ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В Г. БИШКЕКЕ (НС РАН)
МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР -
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН (МНИЦ - ГП)

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

XVII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ

МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ

23 - 25 апреля 2025 г.
г. Бишкек



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В Г. БИШКЕКЕ**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР -
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН В Г. БИШКЕКЕ**

**XVII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ**

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

**Сборник материалов
XVII Международной конференции молодых ученых и студентов**

**23-25 апреля 2025 года
г. Бишкек**

УДК 001
ББК 30.6
С56

Ответственный редактор:
Забинякова О.Б.

Редакционная коллегия:
Баталева Е.А., Валуйский А.Ю., Воронцова Е.В., Кенигсберг Д.В., Кожогулова Г.К., Коломейцев Д.В., Кульков Д.С., Лазарева Е.А., Лисимов М.О., Матюков В.Е., Мухамадеева В.А., Морозова Л.Е., Непеина К.С., Паров С.В., Прохоров О.А., Саламатина Ю.М., Стасенко Л.В., Юнусов А.И.

Рецензенты:
Рыбин А.К., Скляр С.Н.

С56 Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сборник материалов XVII Международной конференции молодых ученых и студентов. – Бишкек: НС РАН, 2025. – 380 с.

ISBN 978-9967-12-998-6

В данный сборник включены материалы XVII Международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях», проведенной Научной станцией РАН и Международным научно-исследовательским центром – геодинамическим полигоном в г. Бишкеке. В сборнике представлены работы молодых ученых и студентов из России, Киргизии, Узбекистана, Казахстана и Таджикистана, охватывающие исследования в области мониторинга геосреды, физики и механики горных пород, оценки сейсмического и геологического риска, математического моделирования различных процессов и других научных направлений.

Сборник может быть полезен студентам, аспирантам и специалистам, занимающимся исследованиями в области наук о Земле, механики и прикладной математики.

Утверждено к печати Ученым советом
ФГБУН НС РАН в г. Бишкеке

УДК 001
ББК 30.6

ISBN 978-9967-12-998-6

©ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкеке
© Коллектив авторов, 2025

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ

УДК 53.05

RESPONSE OF "RESERVOIR-WELL" SYSTEMS TO QUASI-STATIONARY AND EPISODIC IMPACT IN SEISMOACTIVE AND PLATFORM REGIONS

Gorbunova E.M.[1], Besedina A.N.[1], Petukhova S.M.[1], Huang F.[2], Chen Y.[3]
sofiya.petukhova@gmail.com
[1] Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
[2] China Earthquake Networks Center, Beijing, China
[3] Earthquake Agency of Beijing, Beijing, China

The article presents the main results of precision hydrogeological monitoring, which is used to evaluate filtration parameters of fluid-saturated reservoirs in situ in seismically active and platform regions. Examples of the response of the "reservoir-well" systems to the passage of seismic waves from earthquakes and industrial explosions recorded at sites located within the Chinese Craton and the East European Platform are given. The developed scientific and methodological approaches to process experimental data obtained in natural geosystems can be used to analyze measurements in natural-technogenic geosystems, which are characterized by an increase in anthropogenic load on the geological environment. The identified coseismic and postseismic effects in variations in the level, pore pressure, and temperature of groundwater caused by earthquakes and industrial explosions correspond to different deformation regimes of fluid-saturated reservoirs under episodic seismic impact.

Keywords: hydrogeological monitoring, fluid-saturated reservoir, filtration parameters, seismic impact, coseismic and postseismic effects.

Introduction. According to the theory of poroelasticity, variations of the groundwater level in undrained conditions are considered as indicators of dynamic deformation of fluid-saturated reservoirs under the influence of exogenous and endogenous factors. Changes in hydrogeological parameters indicate the need to study trigger effects that can manifest themselves in the activation of natural and man-made processes. Within the framework of the state monitoring program for the state of the subsoil in the territory of the Russian Federation, control is carried out over the groundwater regime, exogenous and endogenous processes [1]. Observations and measurements are performed at points of the state reference facility network deployed in all federal districts. The total number of active groundwater monitoring points in Russia was 6650 in 2021. In China, comprehensive monitoring of geophysical fields has been carried out since the 1960s. Within the Chinese platform, 1021 seismic stations, 784 geodetic stations, 2260 GPS stations, 335 geoelectric and geomagnetic stations, and 1278 groundwater observation points have been installed [2]. Hydrogeological monitoring is an important component of the research, which is aimed at analyzing changes in the properties of fluid-saturated systems under the seismic impact of earthquakes and developing methods for predicting earthquakes in China [3].

Various coseismic and postseismic hydrogeological effects of varying duration have been recorded at numerous polygons located in the massif and in damaged zone of faults at different epicentral distances from earthquake foci. Special attention should be paid to the study of the hydrogeodynamic situation during the operation and subsequent conservation of mineral deposits, which are characterized by increased water cut. Organization and implementation of comprehensive monitoring in technogenically disturbed conditions are aimed at controlling possible changes in the filtration structure of fluid-saturated reservoirs, developing recommendations for the risk mitigation of emergency situations and protection of the natural groundwater resources.

In the central part of the East European Platform, remote monitoring of the filtration properties of water-saturated reservoirs is carried out at two test sites of the Sadovsky Institute of Geospheres

Dynamics of the Russian Academy of Sciences (IDG RAS). Test site I is located within the Moscow Artesian Basin on the territory of the “Mikhnevo” Geophysical Observatory and is classified as a natural geosystem, since it is located on the northeastern edge of the Prioksko-Terrasny State Nature Biosphere Reserve (near the village of Pochinki, Stupino District, Moscow Region). Test site II is confined to the Dnieper-Donetsk Artesian Basin with a technogenically disturbed environment associated with the active development of iron ore deposits of the Kursk Magnetic Anomaly (KMA) using blasting technologies (near the city of Gubkin, Belgorod Region). One of the main tasks of hydrogeological monitoring is to study changes in the filtration parameters of natural and natural-technogenic geosystems in the context of increasing anthropogenic load on the geological environment and climate change.

Priority directions of Russian-Chinese research. Within the framework of joint research, it is planned to propose a unified scientific and methodological approach to processing precision hydrogeological monitoring data, which will include:

(i) analysis of background variations of permeability and transmissivity of water-saturated reservoirs based on tidal analysis;

(ii) study of the reaction of the "reservoir-well" system to earthquakes and industrial explosions;

(iii) detection of the main patterns of changes in the filtration properties of water-saturated reservoirs.

(i) Within the North China and South China cratons, over a long period of geophysical fields monitoring, a data bank has been formed, including databases of records of borehole strain gauge stations, microgravity, seismic events and groundwater level measurements. Comprehensive studies are based on the use of materials obtained by standard methods and the results of precision hydrogeological monitoring.

According to the experimental measurements conducted at test site I of the Unique Scientific Installation “Mid-Latitude Complex of Geophysical Observations “Mikhnevo” (USI “Mikhnevo”) [4], a software package in the Matlab [5] was developed to assess the background parameters of a fluid-saturated reservoir, which was also tested at test site II. The program solves several problems, including:

- correction of hydrogeological data from the influence of atmospheric pressure and assessing the barometric efficiency coefficient;
- determining the phase shift by the tidal wave identified in the groundwater level and theoretically calculated ground displacement;
- assessing porosity, water conductivity, and other parameters.

Background variations in the permeability of fluid-saturated reservoirs in seismically active and platform regions are determined by the reaction of the "reservoir-well" systems to a quasi-stationary factor - Earth tides in accordance with the poroelastic model. Based on the results of spectral analysis of hydrogeological, barometric data, and ground displacement, theoretically calculated for the observation points coordinates, the main types of tidal waves are identified in the data series.

The most informative for subsequent analysis is the M_2 wave, which is steady manifested in the amplitude spectra of the water level of confined aquifers associated with fractured-stratal collectors and ground displacement. Tidal waves S_2 and K_1 are excluded from consideration, as they stand out in the amplitude spectra of atmospheric pressure and complicate the reaction of a water-saturated collector to Earth tides.

(ii) In the seismically active region, large databases of hydrogeological effects have been formed, confirming the irreversible (static) and dynamic (quasi-elastic) deformation of different types of fluid-saturated reservoirs during the passage of seismic waves from earthquakes that occurred in transform faults and subduction zones [6]. Study mainly aimed at hydrogeologically active faults and associated regional structures is being carried out.

In particular, direct observations of the evolution of the fault zone permeability were performed within the framework of the international Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling

project [7]. Eighteen months after the Wenchuan earthquake on May 12, 2008 (M 7.9), precision measurements of the groundwater level were organized in the WSFD-1 well drilled in the damaged zone of the Longmenshan regional fault at epicentral distance of 39 km. The permeability of brecciated rocks exposed in the depth interval of 0.8-1.2 km varied within the range of (0.95-1.75) 10^{-15} m^2 when the level was restored by 16 m over 1.7 years [8]. During the observation period, an increase in permeability by (1.3-4.9) 10^{-16} m^2 was tracked after 4 earthquakes. Particular attention was paid to the analysis of coseismic and postseismic effects recorded at different epicentral distances corresponding to dynamic and static (irreversible) deformation of water-saturated reservoirs [7].

In the platform region at test site I, threshold for tracing reaction of seismic events (≥ 0.05 mm/s) to groundwater level variations is used for formation database of hydrogeological and seismic (vertical component) records corresponding to the passage of seismic waves from distant earthquakes. The systematization of the parameters of industrial explosions at test site II is performed taking into account the operation schedule of iron ore deposits. The maximum amplitudes measured between the successive maximum and minimum in a sliding window with 50% overlap during earthquakes (sliding window of 72 s) and industrial explosions (sliding window of 0.05 s) are determined in the ground velocity and in the water level. The length of the intervals under consideration for earthquakes is three hours before and three hours after the P-wave arrival, and 40 seconds during industrial explosions.

As an example, Figures 1 and 2 show seismograms and diagrams of pore pressure variations in the "reservoir-well" systems recorded at test sites I and II, respectively. Postseismic effects in the form of an increase in pore pressure in the "reservoir-well" system on the territory of the "Mikhnevo" Geophysical Observatory (test site I) were established after the passage of seismic waves during earthquakes that occurred off the coast of Northern Sumatra on April 11, 2012 (M 8.6), Central Chile on February 27, 2010 (M 8.8), Honshu Islands, Tohoku, Japan on March 11, 2011 (M 9.1) (Fig. 1d), Mexico on September 8, 2017 (M 8.2) and in Turkey on February 6, 2023 (M 7.8 and 7.7) [9]. In man-made conditions (test site II), along with variations in pore pressure in the "reservoir -well" system, during industrial explosions in the mine chambers and quarry, a postseismic decrease in the groundwater level was observed (Fig. 2b) [10].

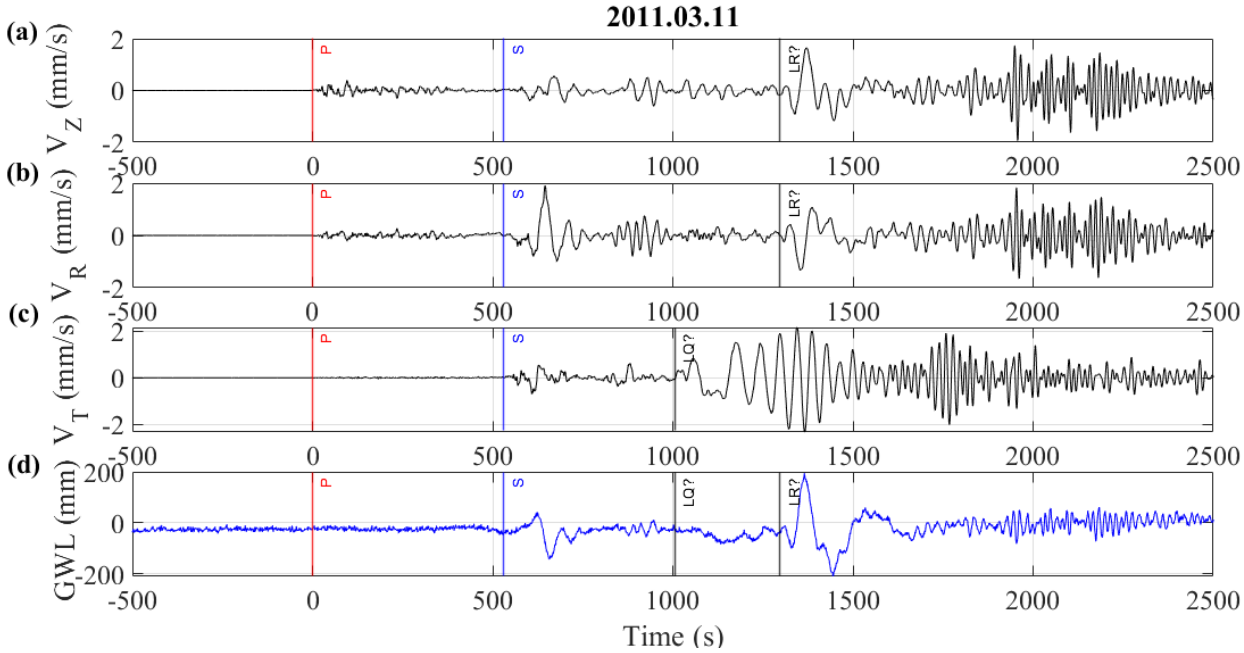


Figure 1 – Seismograms of vertical (a), radial (b), transverse (c) components and pore pressure variations in a weakly fractured reservoir at test site I (d), during the Tohoku earthquake, Japan on March 11,2011 (M 9.1)

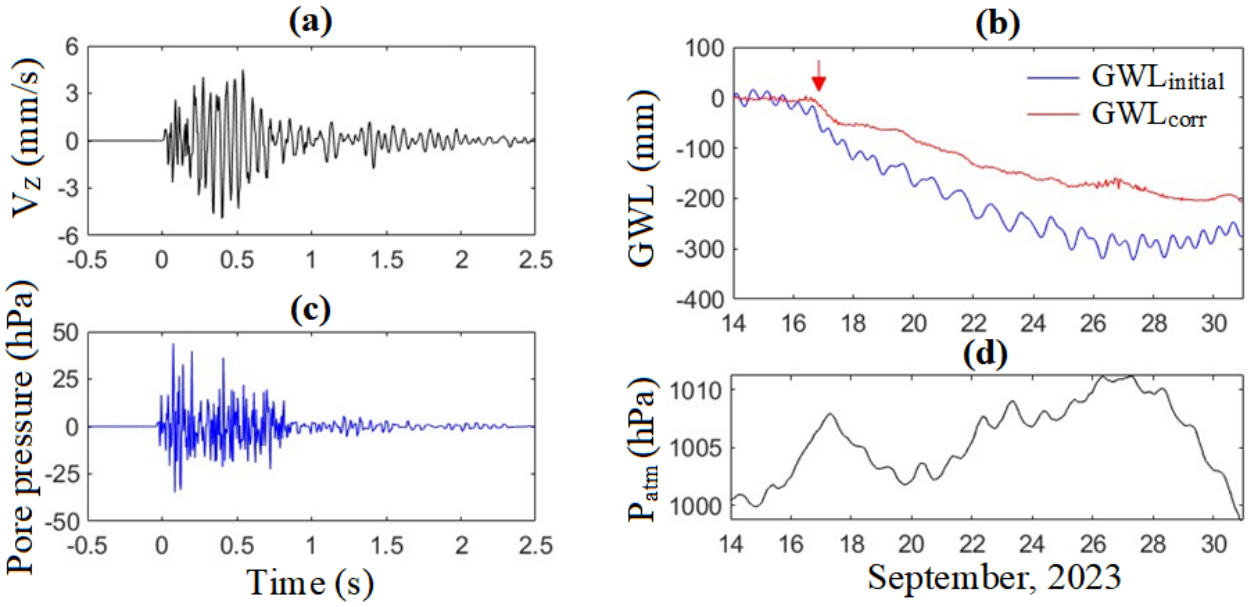


Figure 2 – Diagrams of coseismic variations in the ground velocity (a) and pore pressure in the "reservoir-well" system (c) during an industrial explosion in the mine on September 16, 2023 and postseismic changes in the groundwater level from September 14, 2023 to September 30, 2023: initial (blue line) and corrected from the influence of atmospheric pressure and Earth tides (red line) (b) and variations in atmospheric pressure (d) at test site II

For comparative analysis of responses of a fluid-saturated reservoir to episodic seismic impact (earthquakes, industrial explosions) with background parameters, a probabilistic approach is used. For example, for test site I probability density function of the power spectral density (PSD) of background values (ground velocity and water level) are compared with PSD of intervals including earthquakes occurred in Turkey (Fig. 3). The same technique was tested in the analysis of the response of the "reservoir-well" system to industrial explosions in mine and quarry (Fig. 4).

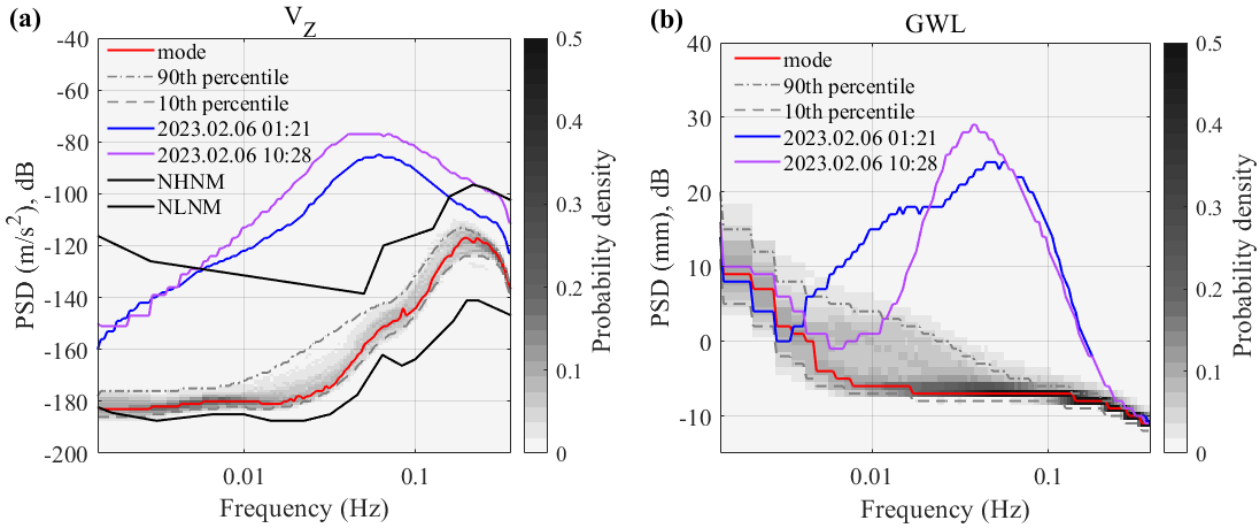


Figure 3 – Noise power spectral density (PSD) diagrams: ground velocity (a) (Obninsk station), weakly confined aquifer level (b), combined with response spectra to earthquakes that occurred in Turkey on February 6, 2023. Black lines in (a) represent high (NHNM) and low (NLNM) microseismic noise model levels

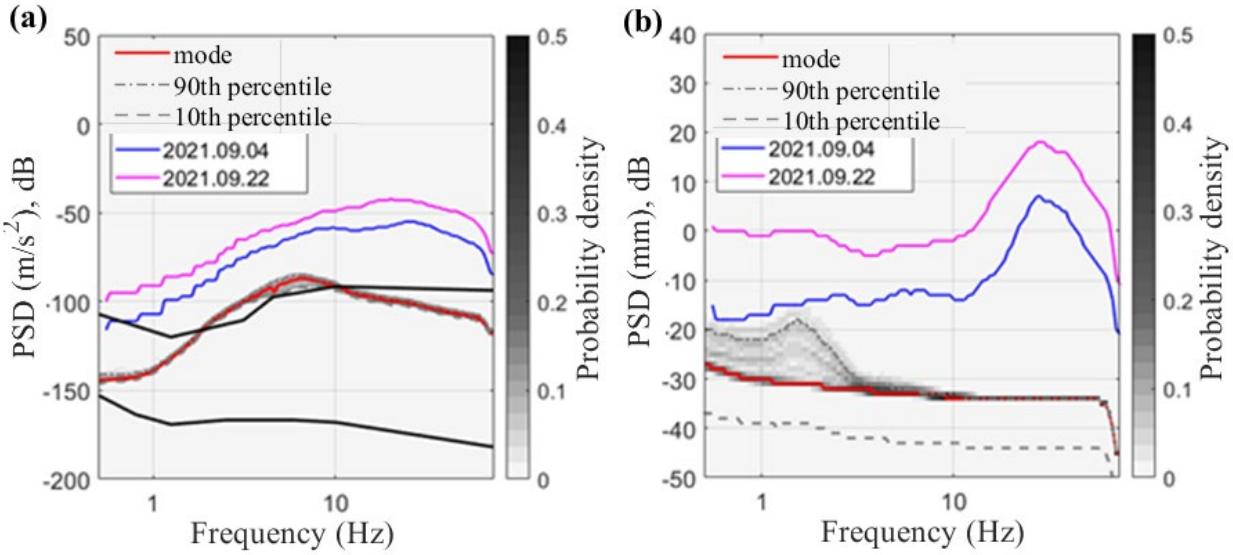


Figure 4 – Noise power spectral density (PSD) diagrams: ground velocity (a), pore pressure in the "reservoir-well" system compared to the PSD of explosions in the mine on September 4, 2021 and in the quarry on September 22, 2021. Black lines in (a) represent high (NHNM) and low (NLNM) microseismic noise model levels

As part of the analysis of the response of a fluid-saturated reservoir to the passage of seismic waves from earthquakes, the theoretical hydrogeological response to the seismic impact recorded within the Chinese craton and the East European platform can be simulated and the results obtained can be compared. The duration of the selected interval depends on type of waves (body or surface).

(iii) Most of the hydrogeological effects induced by earthquakes are caused by changes in the filtration properties of fluid-saturated reservoirs. The results of hydrogeological monitoring indicate ambiguous variations in permeability in situ at different epicentral distances under seismic impact. The most significant changes in reservoir permeability after earthquakes are traced in the damaged zones of regional faults, such as Tanlu, Longmenshan, Huayingshan, and others [11, 12].

Along with groundwater level variations, aquifer temperature changes are observed. Groundwater level and temperature variations were observed in the Mile well, Yunnan Province, China, during the earthquake with seismic energy density exceeding $1 \cdot 10^{-3}$ J/m^3 from 2004 to 2012 [13]. In some cases, synchronous coseismic step-like increases in the aquifer level and temperature were recorded in the same well over 10 years after 11 earthquakes, which do not depend on the epicenter distances and earthquake magnitudes and are correlated with the changes in the permeability of the fluid-saturated reservoir [14]. An interesting effect was noted shortly before the Wenchuan earthquake on May 12, 2008. In the continuous time series of water temperature in two wells, jump-like and high-frequency pulsed changes were identified [15].

Similar coseismic variations in the aquifer temperature were established at test site II. During several industrial explosions in the mine chambers and quarry, an increase and decrease in water temperature with amplitudes of 0.06-0.09° C was observed, synchronous with oscillations of pore pressure in the "reservoir-well" system in the range of 0.4-2.2 kPa (Fig. 5a) [16]. In technogenically disturbed conditions, an inverse relationship was observed between the water temperature and the permeability of the reservoir (Fig. 5b), which is consistent with the change in the temperature of the aquifer with an increase in hydrostatic pressure.

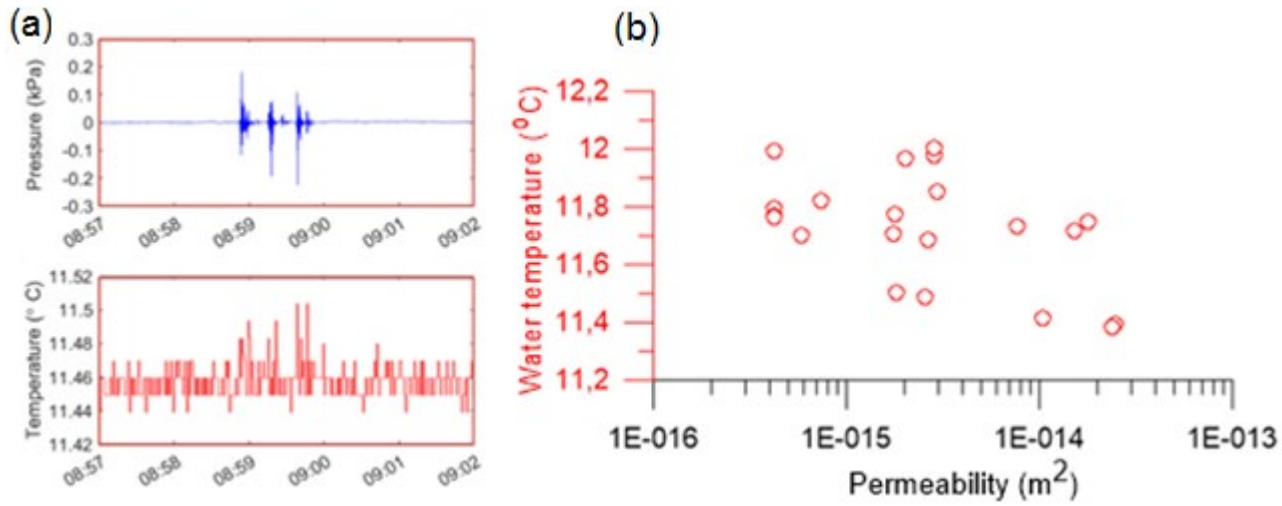


Figure 5 – Variations of pore pressure and water temperature in the "reservoir-well" system during industrial explosions in a quarry on February 28, 2024 (a) and the dependence of changes in the temperature of the upper aquifer on the permeability of water-bearing rocks (b)

Thus, variations in the temperature of the aquifer along with changes in the level and pore pressure can be considered as an additional indicator of the reaction of the "reservoir-well" system to the passage of seismic waves from earthquakes and industrial explosions and indicate a change in the filtration properties of fluid-saturated reservoirs.

Conclusions. A comparative analysis of experimental data in seismically active and platform regions confirms the high informatively of precision hydrogeological monitoring, which allows real-time tracking of the reaction of fluid-saturated reservoirs to quasi-stationary and episodic factors. Registered coseismic and postseismic hydrogeological effects during the passage of seismic waves from earthquakes and industrial explosions indicate different deformation modes of fluid-saturated reservoirs [17]. The results of the studies are of practical importance, since they can be used in the development and testing of models and mechanisms of changes in filtration properties under seismic impact.

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 23-27-00469, https://rscf.ru/project/23-27-00469.

References

1. Information bulletin on the state of subsoil resources in the Russian Federation in 2021. Moscow: FGBU "Gidrospetsgeologiya". 2022. 414 p. [In Russian]
2. Huang, F., Li, M., Yuchuan, Y., Han, Y., Tian, L., Yan, W., Li X. Studies on earthquake precursors in China: A review for recent 50 years // http://dx.doi.org/10.1016/j.geog.2016.12.002
3. Shi, Z., Wang, G., Liu, C. Advances in research on earthquake fluids hydrogeology in China: a review // Earthq Sci. 2013. 26 (6). 415–425. DOI: 10.1007/s11589-014-0060-5
4. Kocharyan G.G., Loktev D.N., Ryakhovsky I.A., Sanina I.A. Unique scientific installation "Mid-latitude complex of geophysical observations "Mikhnevo" // Geodynamics and Tectonophysics. 2022. Vol. 13. Issue. 2. P. 1–6. https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0590 [In Russian]
5. Certificate of state registration of computer program No. 2023680306. Evaluation of filtration properties of a fluid-saturated reservoir / S.M. Petukhova, A.N. Besedina, E.M. Gorbunova. - Application No. 2023669074. Date of receipt 09/18/2023. Registered in the Register of computer programs on 09/28/2023 [In Russian]
6. Wang, C.-Y., Manga, M. Water and Earthquakes. Berkley. 2021. 396 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64308-9

7. Lai, G., Ge, H., Xue, L., Brodsky, E., Huang, F., Wang, W. (2014) Tidal response variation and recovery following the Wenchuan earthquake from water level data of multiple wells in the nearfield // Tectophysics (2013) http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.039
8. Xue, L., Li, H.-B., Brodsky E. et al. Continuous Permeability Measurements Record Healing Inside the Wenchuan Earthquake Fault Zone // Science. Vol. 340. 28 June 2013. P. 1555–1559. DOI: 10.1126/science.1237237
9. Besedina A., Gorbunova E., Petukhova S. Hydrogeological Responses to Distant Earthquakes in Aseismic Region // Water. 2023. V. 15. No. 7. Art. 1322. P. 1–19. DOI: 10.3390/w15071322
10. Gorbunova, E.; Besedina, A.; Petukhova, S.; Pavlov, D. Reaction of the UndergroundWater to Seismic Impact from Industrial Explosions // Water 2023, 15, 1358. https://doi.org/10.3390/w15071358
11. Yan, R., Wang, G., Shi, Z. Sensitivity of hydraulic properties to dynamic strain within a fault damage zone // Journal of Hydrology. 2016. 543. P. 721–728. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.043
12. Sun, X., Xiang, Y. Aquifer permeability decreases before local earthquakes inferred from water level response to period loading // Geophysical Research Letters, 2021, 48, e2021GL093856. https://doi.org/10.1029/2021GL093856
13. Shi, Z., Wang, G. Hydrological response to multiple large distant earthquakes in the Mile well, China // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2014. 119. P. 2448–2459. doi:10.1002/2014JF003184
14. Zhang, S., Shi, Z., Wang, G., Zhang, Z., Guo H. The origin of hydrological responses following earthquakes in a confined aquifer: insight from water level, flow rate, and temperature observations // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2023. 27. 401–415. https://doi.org/10.5194/hess-27-401-2023
15. Huang, F., Ma, Y. The Temperature Changes before and after the 2008 Wenchuan Earthquake and their implication to Continental Tectonic and earthquake Process // Conference Paper, May 2017. DOI: 10.1190/IGC2017-330
16. Gorbunova, E., Petukhova, S., Ivanov, A., Sharafiev, Z., Pavlov, D., Karavaev, A., Fedorov, A. Variations in Temperature and Pressure in the “Reservoir–Well” System Triggered by Blasting Recovery of Iron Ore at the Kursk Magnetic Anomaly // Water. 2024. 16. 2682. https://doi.org/10.3390/w16182682
17. Petukhova, S.M., Gorbunova, E.M. Deformation regimes of fluid-saturated reservoirs under seismic impact according to precision hydrogeological monitoring data (a review) // Dynamic Processes in Geospheres. 2023. 15(4). 44-59. https://doi.org/ 10.26006/ 29490995_2023_15_4_44 [In Russian]

УДК 553.623:691.22

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF QUARTZ SAND DEPOSITS IN THE CENTRAL KYZYLKUM

Nazarov U.Kh.
nazarovuzruh@gmail.com
Navoi Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Navoi city, Republic of Uzbekistan

This study examines the quartz sand deposits in the Central Kyzylkum region of Uzbekistan, focusing on key sites like Djeroy, Akmurd, Kulatai, and Aydarli, as well as prospective occurrences such as Dzharikbas. These deposits are primarily associated with Upper Eocene formations and are rich in high-quality quartz sands. The geological profiles reveal a variety of Paleogene and Neogene layers, including clays, sands, and limestones. Notable features include the Djeroy deposit's diverse sand and clay layers, the two quartz sand horizons at Kulatai, and the Aydarli deposit's combination of sandstones and gypsum-bearing clays. These deposits are crucial for industrial quartz sand production.

Keywords: quartz sand deposits, formations, geological structure, Upper Eocene, rock.

Non-metallic mineral resources comprise a vast group of rocks and minerals, which are essential raw materials for industry, agriculture, and construction. These minerals are widely distributed, with thousands of deposits recorded in the Republic of Uzbekistan. The most favorable areas for the concentration of high-quality quartz sand deposits in Uzbekistan are located in the Central Kyzylkum region, where nearly monomineralic quartz sand varieties are associated with the "Lyavlyakan Horizon" of the Upper Eocene. Well-known deposits in this region include Djeroy, Akmurd, Kulatai, Aydarli, as well as promising occurrences such as Dzharikbas, Kugayaz, and Jingeldi. Below is a brief overview of the geological structure of these deposits [1].

Djeroy deposit is located in the Tamdyn District of the Navoi region, 14 km southeast of the district center, Tamdy settlement. The geological structure of the deposit includes Paleogene (Upper Eocene) formations, listed from bottom to top: 1) Marl clays, grayish-green, dense, layered, occasionally gypsum-bearing and sandy. Thickness of 25 m.; 2) Light yellow clayey marl with a pinkish hue, dense. Thickness of 16 m.; 3) Sandy, greenish-gray montmorillonite-hydromica clays. Thickness of 1 m.; 4) Greenish-gray clayey sands. Thickness of 3 m.; 5) Quartz-mica-feldspar sandstone, grayish-cream in color. Thickness of 3 m.; 6) Quartz sand of varying grain sizes, white and yellowish in color. Thickness of 8 m.; 7) Thin-layered, dense, greenish-gray bentonite-type clays. Thickness of 5–8 m. The total thickness of the Upper Eocene deposits is approximately of 70 m.

Administratively, the Kulatai deposit belongs to the Uchkuduk District of the Navoi region, Uzbekistan. The Kulatai site is located 70 km southwest of the city of Uchkuduk. It is conditionally divided into two sections, spaced 3–4 km apart, with salt flats in between. Section 1 is located 5 km west of the Kulatai well. The geological structure mainly consists of Eocene deposits. The profile of the section is distinctly observed in two terrace-like steps, approximately 10–15 m high and 0.2–0.5 km wide. The outcrop of the first step reveals green clays interbedded with dense (2–4 m) limestone containing poorly preserved macrofauna fossils (shark teeth, etc.). Above this, there is a productive layer of loose white quartz sands, followed by a sequence of green, gypsum-bearing clays that become dense and display a conchoidal fracture upon drying. These clays are greasy to the touch, with a maximum thickness of 4 m. Section 2 is located 250 m north of the Kulatai well, near the edge of the Minbulak Basin. The geological structure includes clays, quartz sands, and Paleogene shell limestones. Two horizons of Upper Eocene quartz sands have been identified: the first (upper)

horizon is exposed along the basin's edges, with a thickness ranging from 1.0 to 1.5 m.; the second (lower) horizon is located at the basin floor [2].

Aydarli deposit is located in the Tamdyn District of the Navoi region. The nearest large settlement, the district center of Tamdy, is situated to the southwest, while the Aydarli well is northeast of the deposit. The geological structure comprises Paleogene and Neogene deposits. The Paleogene is represented by gray sandstones exposed in the northwestern part of the area. Below this lies a sequence of interbedded greenish-gray clays, clayey sands, and gray to grayish-white quartz sands (Upper Eocene). This sequence is visible east of the Aydarli well, along the cliffs of three elevations. The Neogene deposits lie above the Paleogene sequence and consist of gypsum-bearing reddish-colored clays. A quartz sand layer (Upper Eocene) extends along the edges of the basin over a significant distance. The deposit is conditionally divided into two sections: Aydarli section, located 5 km northeast of the Aydarli well and Dzharikbas section, located in the vicinity of the Dzharikbas well.

Akmurd deposit is located on the southeastern slope of the Bukantau Mountains. Administratively, it belongs to the Tamdyn District of the Navoi region. The geological structure consists of Paleogene and Quaternary deposits, exposed in isolated areas. The Paleogene-Eocene sequence includes (from bottom to top): 1) Dark green clays, grayish-green when dry, greasy to the touch; 2) Quartz sands, enriched with clay material at the outcrops, with well-rounded grains. Small clay lenses (10–20 mm thick) are observed. Light gray highly clayey sands gradually transition into pure white and light yellow quartz sands. These loose, well-sorted, and well-rounded quartz sands, with medium-grained sand lenses, are widely distributed in the northwestern and central parts of the deposit area. Thickness is up to 14.9 m; 3) Dark green clays, plastic, greasy to the touch, and layered. The bedding planes are iron-stained. Thickness of 3 m. The Quaternary deposits consist of quartz-feldspar dune sands and loess-like sediments. The thickness varies from 0.00 m (southern part) to 5–10 m (northwestern part) [3].

Conclusions. In general, the above-mentioned deposits are genetically and spatially associated with Paleogene and Neogene formations. The primary lithological rock types include clayey and sandy formations found in the stratigraphic profiles of the Paleogene and Neogene.

References

1. Nazarov U.Kh. Deposits of quartz sands in Uzbekistan and their application in the national economy // Modern techniques and technologies in scientific research. Collection of materials XVI International conference of young scientists and students. Bishkek: NS RAS. 2024. P.183-184.
2. Zakirov M.Z., Gafurdzhanov S.G. Quartz and Quartz-Feldspar Sands of Uzbekistan. Tashkent: "Fan" Publishing House. 1983. 94 p.
3. Non-metallic Mineral Resources of Uzbekistan / R.A. Khamidov, A.M. Ergashov, N.T. Khodjaev, N.M. Khakberdiev; edited by B.F. Islamov; State Committee of the Republic of Uzbekistan for Geology and Mineral Resources, Institute of Mineral Resources. Tashkent: GP "IMR". 2017.

УДК 553.98:551.763(575.13)

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ МЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ФЕРГАНСКОГО РЕГИОНА

Алиев А.Б.
aliev.abdulloh69@gmail.com
Институт минеральных ресурсов, г. Ташкент, Узбекистан

В статье приведены результаты комплексного анализа геолого-геофизических данных с целью определения перспектив нефтегазоносности меловых (К) отложений южной тектонической ступени Ферганского региона. Дана детальная характеристика стратиграфических комплексов меловых отложений. Выполнен детальный анализ материалов по геологическому строению территории антиклинальных поднятий XVIII горизонта. На основе геолого-геофизических данных сейсмической разведки и глубокого бурения построена структурная 3D модель, которая отображает слоистую структуру, положение ловушек и распределение резервуаров. Одна из характерных особенностей антиклинальных поднятий Ферганского региона - развитие на их более крутых крыльях надвигов и взбросо-надвигов, нередко наблюдается опрокидывание этих крыльев. Для структур южного борта отмечается крутое залегание пластов покровных пород вблизи тектонических нарушений, с удалением от них по направлению падения крыльев дислокации слоев уменьшаются. На основе составленной модели оценен нефтегазовый потенциал участка южного борта Ферганского региона и даны рекомендации на проведение дальнейших геологоразведочных работ.

Ключевые слова: нефтегазоносный комплекс, XVIII горизонт, свита, структура, ловушка, углеводород

Введение. В Ферганской нефтегазоносной области (ФНГО) выделяются кайнозойский, мезозойский и верхнепалеозойский нефтегазоносные этажи. В осадочном разрезе выделяются: пермо-триасовый (верхнепалеозойский этаж), юрский, меловой (мезозойский этаж), палеогеновый и неогеновый (кайнозойский этаж) нефтегазоносные комплексы (НГК).

К настоящему времени на территории Ферганского нефтегазоносного региона открыто 61 месторождение нефти и газа, которые административно расположены в пределах: Таджикистан – 11; Узбекистан – 33 и Кыргызстан – 19. В тектоническом плане 48 расположены в пределах Южной ступени, 2 – в Южном переходном поясе, 5 – в Центрально-Ферганской мегасинклинали и 9 – в Майлису-Карагундайском поднятии. По содержанию УВ они подразделяются следующим образом: газовые – 6; газоконденсатные – 5; нефтяные – 29; нефтегазовые – 17; нефтегазоконденсатные – 4. Всего выявлено 290 залежей УВ, из них: нефтяных – 166; газовых – 80; нефтегазовых – 23; с газовой шапкой – 11; газоконденсатных – 6; нефть с конденсатом – 1. По стратиграфическим комплексам они распределены таким образом: в неогене (N) – 27; палеогене (P) – 159; мелу (K) – 65; юре (J) – 33; палеозое (Pz) – 6 [2].

По результатам проведенных научных исследований на территории Узбекистана эти отложения считаются перспективными, и их детальное изучение позволяет обнаружить новые месторождения нефти и газа.

В южной части Ферганского нефтегазоносного региона нефтегазовый потенциал мезозойских отложений связан с двумя стратиграфическими комплексами – меловой и юрской системами, в каждой из которых выделены свои продуктивные горизонты, имеющие собственные покрышки.

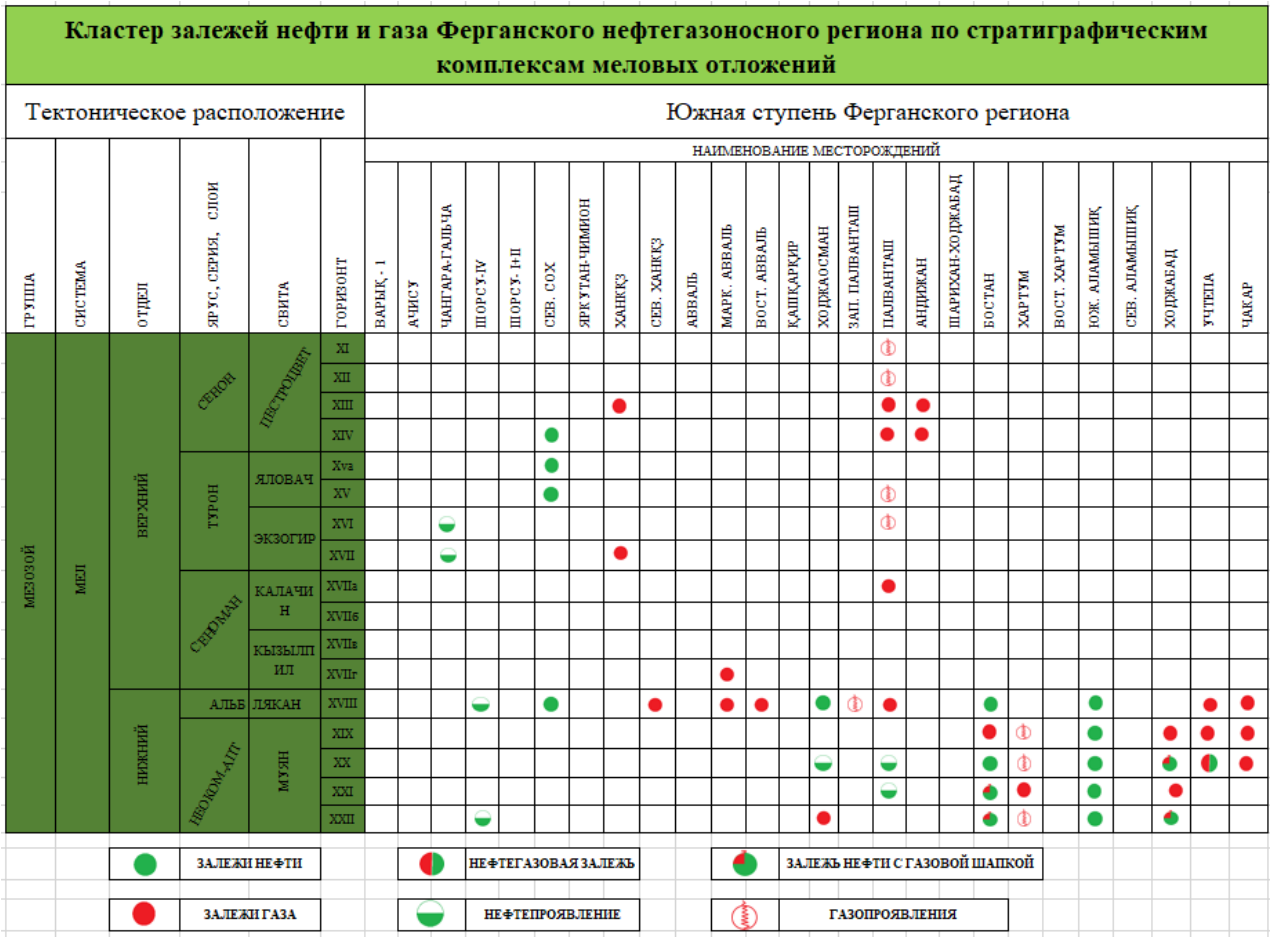


Рисунок 1 – Кластер залежей нефти и газа Ферганской впадинқ по стратеграфическим комплексам (меловых (К) отложений) (Авт. Урмонов А.Х. с дополнениями А.Б. Алиева, 2025 г.) [2]

Меловой НГК содержит 15 месторождений из них 3 нефтяных, 5 нефтегазовых, 6 газовых и 1-газоконденсатное. Всего в объеме рассматриваемого мелового комплекса выделяются 10 проницаемых горизонтов (с XXII-XIII), к которым приурочены залежи нефти и газа. Литологический состав представлен конгломератами, алевролитами, песчаниками, прослоями глин и известняков, доломитов, мощностью 10–95 м (рис.1) [2].

XVIII горизонт в районах Восточного Хартума, Северного Соха, Карасугата, Ханкыза, Северного Риштана и на полигоне «Северо-Восточная Фергана» (скв. 14-П) сложен преимущественно карбонатными породами, тогда как в районах Южного Аламышика, Хартума, Бостона, Майлису-IV и Шор-Су I–II преобладают песчано-алевритовые отложения.

Среди карбонатных пород выделяются известняки и доломиты. Они имеют серую, буровато-серую, кирпично-красную и буровато-коричневую окраску, различаются по степени обогащённости терригенным материалом, содержание которого варьируется от 1 до 37%.

Открытая пористость исследованных образцов известняков и доломитов составляет не более 4–6%, а их проницаемость — 0,1 × 10 мД. Эти породы относятся к коллекторам порово-трещинного типа VI и VII классов (по классификации К.И. Багринцевой).

Песчаники и алевролиты коричневато-бурые, участками светло-серые, зеленовато-серые, известковистые, глинистые, различной плотности, на карбонатно-глинистом цементе. Открытая пористость их изменяется от 4 до 25%, редко достигая 32%, а проницаемость – от 0,5 до 1100 мД, в единичных случаях достигает до 7010 мД. Эти породы относятся к коллекторам I, II и III классов [3].

Глинистые покрышки над XVIII пластом имеют буровато-серую, голубовато-серую, реже розовато-серую окраску, часто они сульфатизированы, разбухаемость их составляет 42-60% [4].

На основе геолого-геофизических исследований, проведенных в различных месторождениях Южной Ферганы (Юж Чимион, Кашкаркир, Вост Аввал, Ханкиз, Олтиарик, Вост Акбарабад, Сев Палванташ), был построена структурная 3D модельная карта меловых отложений XVIII горизонта (рис.2).

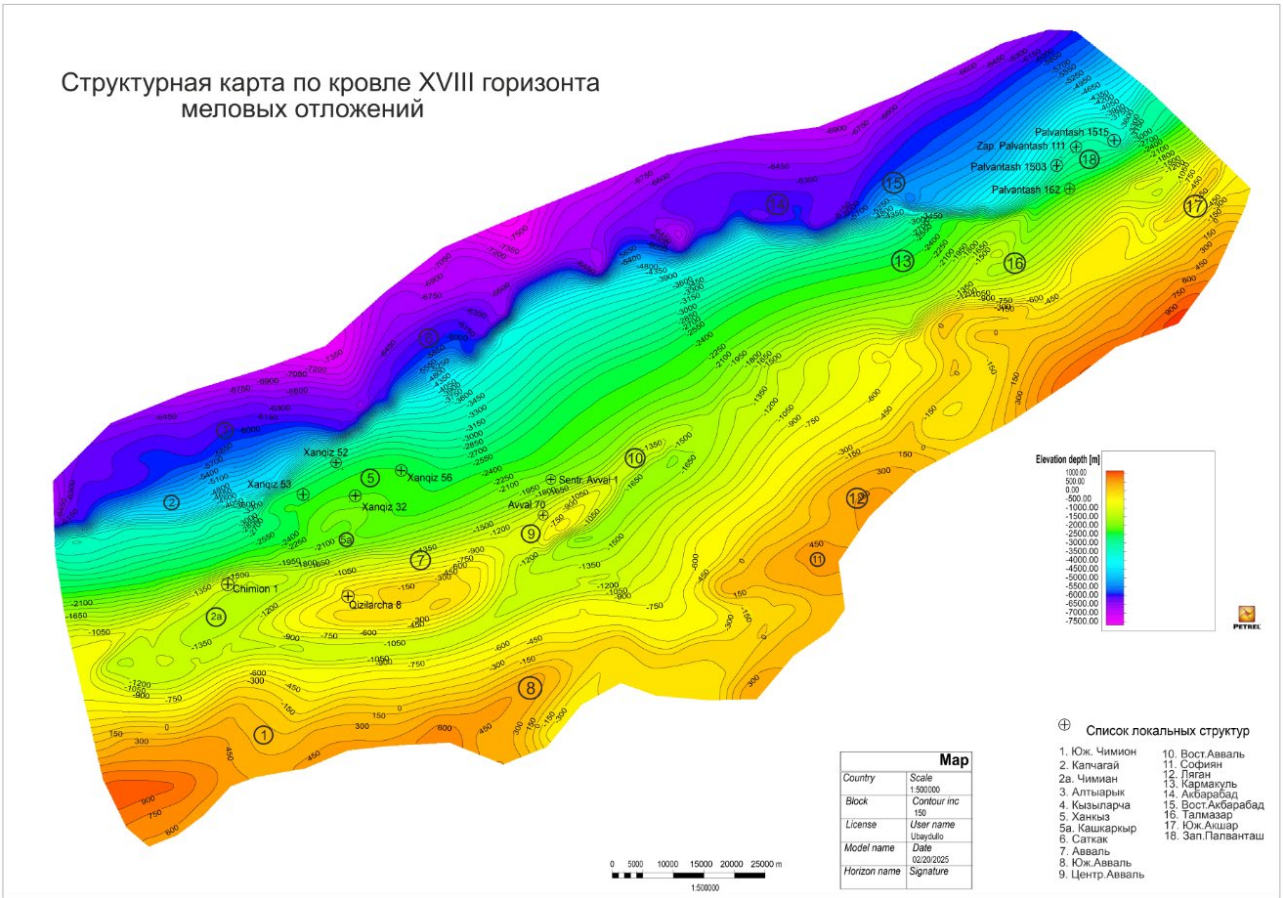


Рисунок 2 –Структурная карта по кровле XVIII горизонта меловых отложений (авт. А.Б. Алиев, 2025 г.)

Ляканская свита в западной части Южного борта представлена серыми и розовыми известняками, слоистыми, массивными с водорослями, которые отражаются на электрокаротажных диаграммах пиками удельного сопротивления до 120 Ом·м. Кривая СП против пористых разностей известняков имеет отрицательную аномалию [4].

К востоку от Аувальской площади известняки постепенно замещаются красноцветными терригенными отложениями, среди которых сохраняются маломощные прослои комковатых известняков и голубовато-зеленых тонкослоистых песчаников. Кажущиеся сопротивления пород не превышают 50-70 Ом·м. Мощность свиты изменяется от 25 до 175 м.

В промысловой номенклатуре ляканская свита выделена как XVIII продуктивный горизонт. Промышленная нефтегазоносность установлена на площадях Северный Риштан (газ), Северный Сох (газ), Ходжаосман (нефть), Южный Аламышик (нефть), Ханкыз (газоконденсат). Емкостные свойства пород характеризуются размещением средних (7-15%) и высоких (>15%) значений пористости. Здесь выделяется XVIII в газоносный горизонт. Мощность свиты 45-55м [5].

Выводы. В этих условиях, чтобы удержать уровень добычи нефти и газа, необходимо, наряду с внедрением новых современных технологий добычи на разрабатываемых месторождениях, обеспечить их рациональную разработку, путем поиска и разведки, открыть новые месторождения нефти и газа, вовлечь их в разработку и обеспечить в них прирост запасов – это неотложная задача сегодняшнего дня.

Литература

1. Хожиев Б.И. Потенциал нефтегазоносности мезозойских отложений западной части Бухаро-Хивинского нефтегазоносного региона (Республика Узбекистан) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2023. Т. 18. № 2. С. 1-28.
2. Урманов А.Х. Структурно-тектонические особенности и перспективы нефтегазоносности кайнозойских отложений Ферганской впадины: Автореф. дис. … д-ра геол.-мин. наук. Ташкент. 2025. 55 с.
3. Нурматов М.Р., Халисматов И.Х., Урманов А.Х., Абидов Х.А. Перспективы нефтегазоносности палеозойских отложений юга Ферганского региона в свете новых геолого-геофизических данных. Ташкент: Fan va texnologiya. 2018. 192 с.
4. Урмонов А.Х. Основные приоритетные направления геологоразведочных работ на нефть и газ в Ферганском регионе // Состояние и перспективы развития геологоразведочных работ на нефть и газ Республики Узбекистан: Сб. науч. ст. Ташкент. 2022. С. 40–44.
5. Нурматов М.Р., Халисматов И.Х., Абидов Х.А., Абдуллаев М. Перспективы длительно-разрабатываемых месторождений нефти и газа Юга Ферганского региона в свете новых данных сейсморазведки и бурения скважин. Ташкент: Fan va texnologiya. 2018. 196 с.

УДК 551.24

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЬСКОГО МЕГАБЛОКА (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ) ПО ГЕОЛОГИЧЕСКИМ ИНДИКАТОРАМ ДЕФОРМАЦИЙ

Бондарь И.В.
bond@ifz.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

В работе проанализированы реконструкции осей главных напряжений, полученные на основании замеров пространственной ориентировки геологических стресс-индикаторов в окрестности города Мурманска. В основном изучались зеркала скольжения. Реконструкция проводилась методом катакластического анализа разрывных смещений Ребецкого Ю.Л. с помощью программы StressGeol. В результате реконструкции получены различные ориентировки осей главных напряжений (и различные типы напряженного состояния), но преобладают северо-восточные и субмеридиональные ориентировки оси максимального сжатия. Такие ориентировки связаны с подвижками по активным на неотектоническом этапе разломам – Волшепахскому сдвигу и Титовско-Поросозерской шовной зоне. Активность данных структур связана, по-видимому, с региональным полем напряжения северо-восточного или субмеридионального сжатия.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, зеркало скольжения, геологические стресс-индикаторы, Волшепахский сдвиг, оси главных напряжений.

Введение. В ходе полевых исследований тектонофизического отряда Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН в 2010-2019 году был исследован небольшой участок в районе города Мурманска. Был набран представительный материал для тектонофизического анализа, а именно: массовые замеры пространственной ориентировки зеркал скольжения, отрывов, зон дробления и других геологических стресс-индикаторов.

Методика исследования и исходные данные. Полученные материалы были проанализированы методом катакластического анализа разрывных смещений Ребецкого Ю.Л. [1]. Данный метод позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний: азимут и угол погружения осей максимального сжатия, максимального растяжения и промежуточной оси. Для расчета использовалась программа STRESSgeol.

Район исследования расположен в пределах Центрально-Кольского мегаблока Кольского полуострова, почти на границе с Мурманским мегаблоком. Породы представлены гранито-гнейсами, гранодиорито-гнейсами и диорито-гнейсами архейского возраста [2]. Все эти породы слагают купола и представляют собой реликты тоналит-трондьемитовой коры. Среди них встречаются также узкие линейные протяженные структуры северо-западного простирания, сложенные амфиболито-гнейсами и железисто-кремнистыми комплексами зеленокаменных поясов. Часть точек наблюдения находится в пределах Титовско-Поросозерской шовной зоны. В пределах этой зоны наблюдаются средне- и верхнелопийские супракрустальные образования колмозерской и поросозерской серий и солдатмыльковской свиты, а также приуроченные к ее краям позднелопийские интрузии преимущественно кислого состава. Считается, что это асимметричная грабен-синклиналь, осложненная серией продольных и поперечных разломов. Зона делится на три поперечных сегмента, с северо-запада на юго-восток: Титовский, Канентъяврский и Колмозеро-Воронинский [3].

Обсуждение результатов исследования. На рисунке 1 приведено положение точек наблюдения и полученные локальные стресс-состояния с ориентировкой осей главных напряжений. Описание результатов реконструкции приведено в работе [4]. Здесь же будет

приведена интерпретация полученных данных (рисунок 2). В пределах изучаемой территории многими исследователями зафиксировано большое количество палеосейсмических деформаций [5, 6, 7], отмечена сейсмическая активность в доинструментальный (исторические документы) и инструментальный период наблюдений [8].

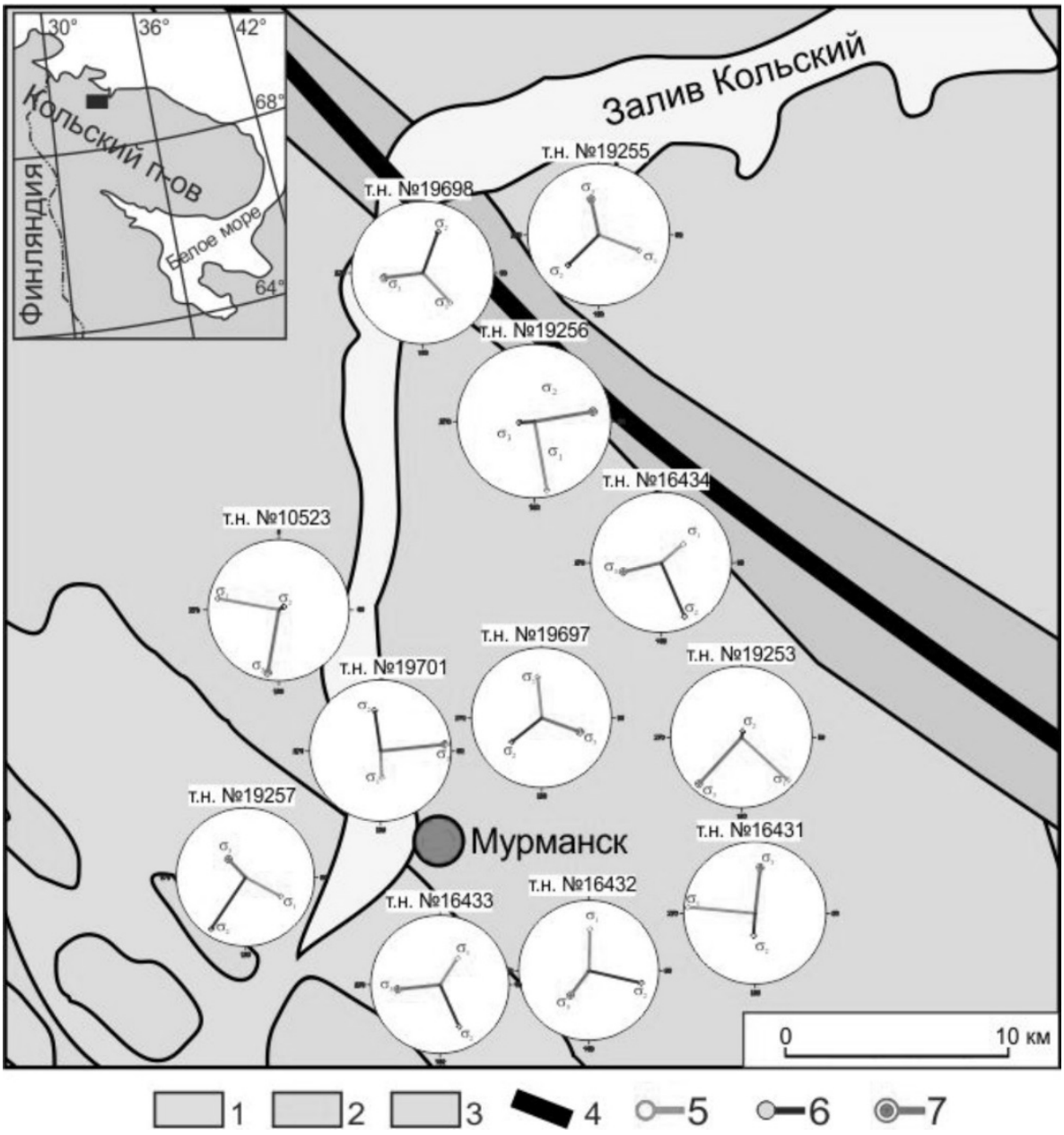


Рисунок 1 – Схема положения точек наблюдения и реконструированных локальных стресс-состояний. На врезке черным квадратом показана территория исследования.
1 - Комплекс основания, архей; 2 - Кольско-Беломорский комплекс, архей; 3 - Комплекс лопия, верхний архей; 4 - Титовско-Поросозерская шовная зона; 5-7 - главные оси напряжения: 5 - максимального растяжения, 6- промежуточная, 7 - максимального сжатия.

Район исследования расположен в пределах двух крупных структур, активных на неотектоническом и современном этапе – это Урагубский сегмент Титовско-Кейвской (Титовско-Поросозерской) шовной зоны и система разрывов Кольского залива, в том числе субмеридиональный Волшепахский сдвиг. Титовско-Поросозерская шовная зона простирается с северо-запада от Варангер фьорда на юго-восток к Горлу Белого моря [9]. Данная зона является границей Центрально-Кольского и Мурманского мегаблоков, имеет

протяженность более 100 км при максимальной ширине 15 км. Геологическое строение представлено сочетанием супракрустальных образований титовской толщи и гранитоидов формаций кварцевых диоритов плагиогранитов и гранитов-пегматитов. Определяющая роль в разрезе титовской толщи принадлежит биотитовым гнейсам [10]. Зона сопряжена с глубинным разломом, имеющим северо-западное простирание и крутое погружение под Мурманский мегаблок, достигая поверхности Мохо.

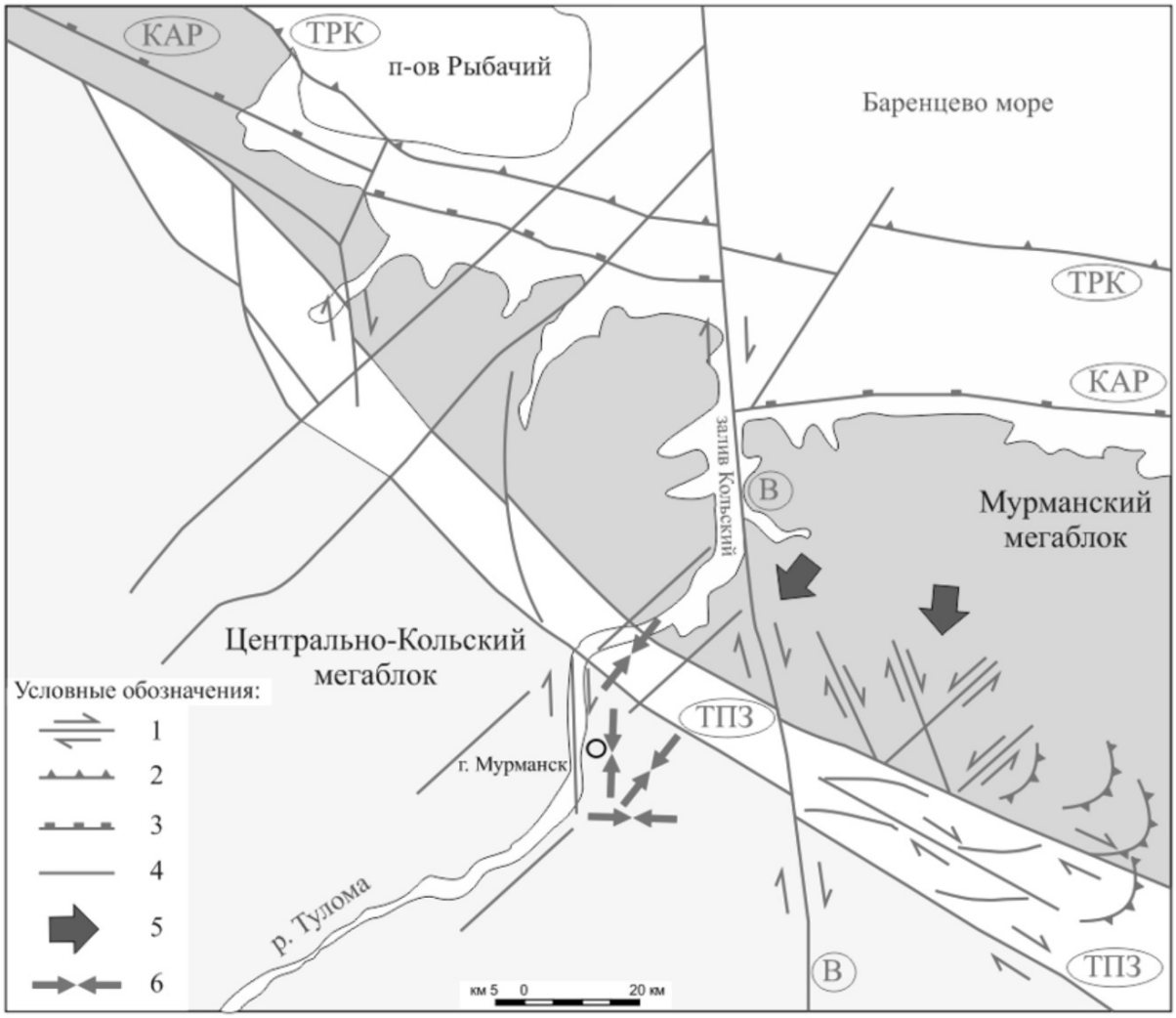


Рисунок 2 – Схема разрывных нарушений территории исследования и их тектонофизическая интерпретация. Составлена с использованием материалов [11]. 1-3 – разломы с достоверным определением кинематики: 1 – сдвиговой, 2 – взбросовой, 3 – сбросовой; 4 – разломы с неопределенной кинематикой; 5 – предполагаемое направление тектонического стресса по структурному рисунку: 6 – направления оси максимального сжатия, полученные в результате реконструкции автором. Буквами обозначены названия разломов: ТРК - линеамент Троллефьорд-Рыбачий-Кильдин, КАР – сброс Карпинского, ТПЗ – Титовско-Поросозерская шовная зона, В – Волшепахский сдвиг.

Данная зона представляет собой систему эшелонированных дуплексов, свойственных тектоническим швам [9]. Крупные разрывы представлены преимущественно правыми сдвигами, протяженностью от 1-2 до десятков километров. По отношению к простиранию структуры выделяются также диагональные и поперечные, а по относительному смещению крыльев - левые и правые сдвиги. Наряду с продольными сдвигами широко развиты поперечные надвиги. Все эти структуры, в том числе и смещения по разломам, образовались при ориентировке оси максимального сжатия в субмеридиональном или север- северо-

восточном направлении в докембрии [9]. Подобные ориентировки зафиксированы нами в центральном участке т.н. 10523, 16431, 19253. При этом в ряде работ эта зона указана как активная на неотектоническом этапе [7, 12].

Кольский залив представляет собой вытянутую субмеридиональную тектоническую структуру, для очертаний которой характерны коленчатые изгибы, сформированные вероятно, на пересечении разломов субмеридионального и северо-восточного простирания [12]. Точное время образования этой структуры является дискуссионным вопросом, но ряд авторов сходятся во мнении, что древняя структура системы грабенов активизировалась на рубеже позднего миоцена - плиоцена, когда после регрессивного развития континентальной окраины началось погружение шельфа [11, 12]. В соответствие с данным этих же исследователей по разломам субмеридионального простирания происходили сдвиговые движения правосторонней кинематики, в особенности по Волшепахскому сдвигу, четко выделяющемуся на космическом снимке. Геолого-геоморфологические данные свидетельствуют, что по нему произошло небольшое смещение после позднего дриаса (12,7-11,6 тыс. лет назад) [5].

Хаотичные на первый взгляд положения осей главных напряжений на небольшом участке исследования (окрестности города Мурманск) закономерно распределяются по типам напряженного состояния и ориентировки осей главных напряжений. Субширотному сжатию соответствует тип напряженного состояния горизонтального сжатия. Северо-восточному сжатию – как правило, тип напряженного состояния горизонтального сдвига. Северо-восточное и субмеридиональное направление оси максимального сжатия связано со смещениями по Титовско-Поросозерской шовной зоне и Волшепахскому сдвигу. Причем обе эти структуры активны на неотектоническом этапе, что косвенно указывает и на возраст реконструированных напряжений. Субширотное направление оси максимального сжатия возможно связано со сбросовыми смещениями разлома Карпинского субширотного простирания, также активным на неотектоническом и современном этапе [13].

Таким образом, анализ геологических стресс-индикаторов позволил выявить ориентировку региональных напряжений сжатия и связанных с ними локальных напряжений. На неотектоническом и современном этапе земная кора в пределах территории исследования деформируется под действием сжимающих напряжений субмеридионального и северо-восточного направления.

Выводы.

1. Выявлено три направления максимального сжатия в пределах района исследования: северо-восточное, субмеридиональное, субширотное
2. Северо-восточное сжатие отражает следы смещения Волшепахского сдвига, а субмеридиональное – движения по Титовско-Поросозерской шовной зоне.
3. В пределах территории исследования действует региональное поле напряжения северо-восточного сжатия.

Финансирование. *Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.*

Литература

1. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М.: ГЕОС. 2017. 225 с.
2. Радченко А.Т., Балаганский В.В., Виноградов А.Н., Голионко Г.Б., Петров В.П., Пожиленко В.И., Радченко М.К. Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита (объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1: 500000). СПб.: Наука. 1992. 112 с.
3. Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В. Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2002. 359 с.
4. Бондарь И.В., Маринин А.В. Реконструкция тектонических напряжений в пределах Мурманского геоблока (Кольский полуостров) // Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов. Материалы всерос. науч. конф., посвящ. 75-летию со дня рождения Е.А. Рогожина(1947–2021) и 115-летию со дня рождения В.В. Белоусова (1907–

1990) / Под ред. А.О. Агибалова. М.: Перо. 2022. С. 244–249.
5. Николаева С.Б., Евзеров В.Я. К геодинамике Кольского региона в позднем плейстоцене и голоцене: обзор и результаты исследований // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2018. № 1. С. 5–14
6. Никонов А.А. Молодые продольные расколы в морфоструктуре Мурманской зоны разломов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. С. 263–267. https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.065
7. Шварев С.В. Морфотектоника, сейсмичность и экзогенные процессы Кольского полуострова // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 8. С. 1135–1152.
8. Виноградов Ю.А., Асминг В.Э., Кременецкая Е.О., Жиров Д.В. Современная сейсмичность на территории Мурманской области и ее проявление в горнопромышленных зонах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 1. С. 62 70.
9. Гавриленко Б.В., Никитин И.В., Зозуля Д.Р., Кудряшов Н.М., Петровский М.Н., Корсакова О.П., Галкин Н.Н. Геология, тектоника, возраст и металлогения архейской шовной зоны Колмозеро-Воронья, Кольский регион // Вестник МГТУ. 2002. Т. 5. №1. С. 43-60.
10. Вороняева Л.В., Крупеник З.В. Новое проявление золота Титовско-Урагубской зеленокаменной структуры позднего архея (Кольский регион) // Региональная геология и металлогения. 2021. № 86. С. 82-91.
11. Шипилов Э.В., Шкарубо С.И., Ковальчук Е.А. Структура и литологический состав разреза отложений Кольского залива (фиорда) по данным бурения и сейсмоакустики и неотектонические условия его формирования // Арктика: экология и экономика. 2017 № 4 (28). С. 72-82. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-72-82.
12. Евзеров В.Я., Николаева С.Б., Шелехова Т.С. Рыхлый покров и новейшая геодинамика Кольского залива (первые результаты и перспективы дальнейших работ) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. № 1 (9). С. 24-32.
13. Зыков Д.С., Спунгин В.Г., Полещук А.В. Морфологические и микросейсмические признаки новейших сдвиговых дислокаций в районах Фенноскандинавского щита // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2018. Т. 93. № 2. С. 3-13.

УДК 550.837.3

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ АМТ И ЭТ: ПРЕИМУЩЕСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ

Валуйский А.Ю.
webattack@list.ru
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

В данной работе рассматриваются разрешающая способность, преимущества и ограничения аудиомагнитотеллурики (АМТ) и электротомографии (ЭТ) в геофизических исследованиях. Представлены схемы установки аппаратуры канадской компании Phoenix Geophysics для метода АМТЗ, а также схема наблюдений для ЭТ. Показана стандартная схема проведения работ с использованием многоэлектродной аппаратуры «СКАЛА-48», которая разработанна в лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, предусматривающая применение двух кабелей.

Ключевые слова: аудиомагнитотеллурика, электротомография, разрешающая способность, электромагнитные помехи, геоэлектрические методы, инженерная геофизика, разведка полезных ископаемых.

Введение. Геофизические методы исследований позволяют получать важную информацию о строении земной коры и ее физических свойствах. Среди наиболее эффективных технологий выделяются аудиомагнитотеллурика (АМТ) и электротомография (ЭТ). Они применяются для разведки полезных ископаемых, инженерных изысканий и мониторинга геологических процессов. Основная цель настоящего доклада — сравнение разрешающей способности этих методов, их преимуществ и ограничений в аспектах глубины исследования, детализации слоев и влияния помех. Метод **аудиомагнитотеллурического зондирования (АМТЗ)** основан на измерении электромагнитных полей естественных источников в широком диапазоне частот от 0,1 до 1000 кГц. АМТЗ является разновидностью индукционного частотного зондирования и использует удалённые естественные источники, такие как грозовые разряды. В отличие от других методов индукционного зондирования, АМТЗ не требует применения генераторных установок и обеспечивает значительную глубину исследований от 100 метров до 5 километров [1]. **Электротомография** — это инновационный метод в области разведочной геофизики, который использует принципы сопротивлений и вызванной поляризации для создания двухмерных и трёхмерных геоэлектрических разрезов на основе измерений, проведённых на поверхности земли или в скважинах. Также электротомография представляет собой метод высокоразрешающей электроразведки на постоянном токе [2].

Глубина исследования. Глубина проникновения геофизического метода является ключевым параметром при выборе технологии для конкретной задачи. Различия в используемых физических принципах приводят к различным возможностям АМТ и ЭТ.

Аудиомагнитотеллурика (АМТ). Метод АМТ основан на регистрации естественных электромагнитных полей Земли, что позволяет изучать скрытые геологические структуры на значительных глубинах. Этот метод способен зондировать глубины от нескольких десятков метров до нескольких километров. Глубина проникновения сигнала напрямую зависит от частоты электромагнитных волн: низкочастотные волны проникают глубже, в то время как высокочастотные позволяют получать детализированную информацию о верхних слоях земной коры [3]. На рисунке 1 показана схема развёртки установки при работе методом АМТЗ.

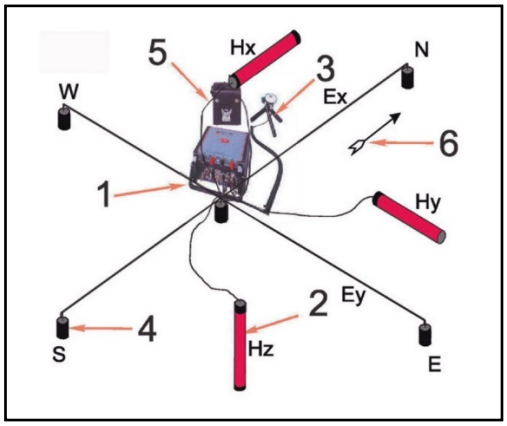


Рисунок 1 – Схема развёртки установки при работе методом АМТЗ. 1 – станция MTU-5; 2 – Hx, Hy, Hz индукционные датчики; 3 – GPS антенна; 4 – N, S, W, E – электроды; 5 – аккумулятор питания

Электротомография (ЭТ). Электротомография основана на применении многоэлектродных электроразведочных кос, подключаемых к аппаратуре, способной коммутировать токовые и измерительные электроды на произвольные выводы косы. Такая технология на порядок увеличивает производительность и разрешающую способность исследований методом сопротивлений, особенно если аппаратура имеет несколько измерительных каналов, позволяющих измерять разность потенциалов одновременно с нескольких приемных линий. Электротомография является одним из ведущих методов малоглубинной электроразведки постоянным током при геофизических исследованиях верхней части геологического разреза. Этот метод позволяет исследовать структуру грунтов и горных пород на глубине до нескольких сотен метров. Глубина исследования зависит от схемы расположения электродов и их расстояния друг от друга: увеличение расстояния между электродами позволяет охватывать более глубокие слои, но уменьшает точность детализации [4]. На рисунке 2 показана схема наблюдений для ЭТ.

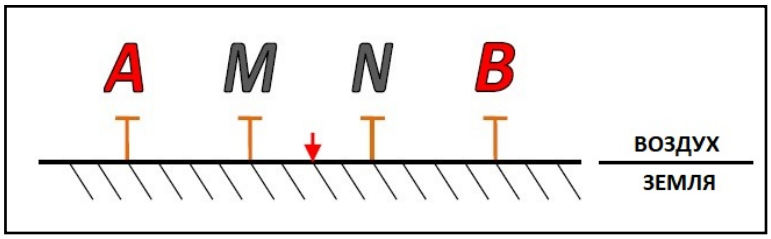


Рисунок 2 – Схема наблюдений для ЭТ (установка Шлюмберже), где AB – питающие электроды, а MN – измерительные

Таким образом, метод АМТЗ предпочтителен для изучения глубинных аномалий, а ЭТ более эффективен для детализированного анализа поверхностных и приповерхностных структур.

Детализация слоев. Разрешающая способность метода играет важную роль при анализе геоэлектрических неоднородностей. Чем выше детализация, тем точнее можно выявить границы различных пород и структурные особенности.

Аудиомагнитотеллурика. Разрешение АМТ ограничено, поскольку метод использует естественные источники электромагнитного излучения, которые обладают ограниченной вариативностью. Хотя метод хорошо выявляет крупные геоэлектрические аномалии, он уступает по горизонтальной разрешающей способности ЭТ [5].

Электротомография. ЭТ обладает высокой детализацией слоев, особенно в верхней части разреза. Использование плотной системы электродов позволяет выявлять даже маломасштабные неоднородности, что делает этот метод незаменимым в инженерных изысканиях и при исследовании локальных геологических объектов [6].

Таким образом, ЭТ более подходит для детализированного анализа поверхностных структур, в то время как АМТЗ является предпочтительным выбором для изучения глубокозалегающих объектов.

Влияние помех и шумов. Как и любой метод геофизического исследования, АМТ и ЭТ подвержены различным видам помех, что влияет на точность измерений и качество интерпретации данных.

Аудиомагнитотеллурика. Основной проблемой АМТ является воздействие индустриальных электромагнитных помех, вызванных линиями электропередач, промышленным оборудованием и городским электротранспортом. Для уменьшения влияния этих факторов применяются специальные алгоритмы фильтрации данных, а также проводятся измерения в условиях минимального уровня шумов (например, в ночное время или в удаленных районах) [5].

Электротомография. ЭТ менее чувствителен к электромагнитным помехам, так как использует искусственно создаваемый сигнал. Однако метод подвержен влиянию контактного сопротивления между электродами и грунтом. В сухих, мерзлых или скальных породах это может вызывать значительные погрешности и ухудшать точность измерений. На рисунке 3 показана стандартная схема работы, которая подразумевает использование одного или двух кабелей, к которым подключаются электроды, выставленные в один ряд с равным расстоянием между соседними электродами [7].

Для минимизации этих проблем применяются методы коррекции данных, выбор оптимальных схем расположения электродов и использование современных цифровых приборов с высокой чувствительностью. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики, преимущества и недостатки ЭТ и АМТЗ.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики, преимущества и недостатки электротомографии (ЭТ) и аудиомагнитотеллурического зондирования (АМТЗ)

Характеристика	**Электротомография (ЭТ)**	**АМТ-зондирование (АМТЗ)**
Глубина зондирования	До 300-500 м	100 м – 3 км
Тип источника сигнала	Искусственный (электроды)	Естественный (атмосферные ионосферные токи)
Разрешающая способность	Высокая в верхних слоях	Средняя
Применение	Инженерные изыскания, археология, экология	Нефтегазовая разведка, гидрогеология
Чувствительность к помехам	Чувствителен к контактному сопротивлению электродов	Подвержен индустриальным шумам
Детализация	Высокая на малых глубинах	Средняя
Преимущества	Высокая точность и детализация, простота аппаратуры	Глубокое зондирование, не требует искусственного источника тока
Недостатки	Ограниченная глубина, влияние контактного сопротивления	Чувствителен к электромагнитным помехам

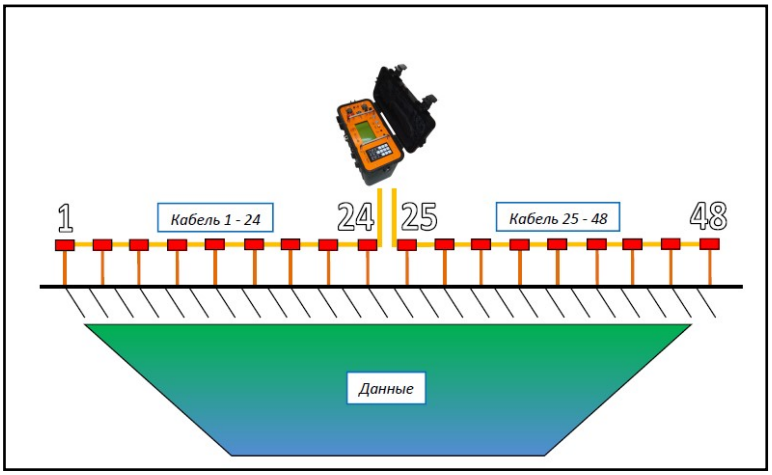


Рисунок 3 – Стандартная схема работы, с использованием двух кабелей

Выводы. АМТ и ЭТ являются эффективными геофизическими методами, каждый из которых обладает своими преимуществами и ограничениями.

Глубина исследования: АМТ позволяет зондировать структуры на глубинах до нескольких километров, в то время как ЭТ ограничен глубинами до нескольких сотен метров.

Детализация слоев: ЭТ имеет высокую пространственную разрешающую способность и лучше подходит для изучения поверхностных структур, тогда как АМТ эффективен для глубоких разрезов.

Влияние помех: АМТ чувствителен к индустриальным шумам, а ЭТ может страдать от проблем с контактным сопротивлением электродов.

Выявлено, что АМТ эффективен для изучения глубинных структур благодаря высокой проникающей способности, но подвержен электромагнитным шумам. В свою очередь, ЭТ обеспечивает высокую детализацию поверхностных слоев, однако ограничен глубиной зондирования. Выбор метода зависит от конкретных геологических задач, и в ряде случаев их комплексное применение позволяет получить наиболее полные и достоверные данные о строении земной коры.

Литература

1. Электронный ресурс: ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика». Дата обращения: 18.03.2025
2. Шапаренко И.О., Неведрова Н.Н. Применение метода электротомографии для исследования разломных зон (на примере горного Алтая) // Строение литосферы и геодинамика. XXVIII Всерос. молодёжная конф. Иркутск. 2019. С. 184-185.
3. Вильховик В.С. Результаты применения электротомографии и аудиомагнитотеллурики на участке кедровского блока // Новые идеи в науках о Земле. Материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 02–05 апреля 2019 г. В 7 т. Т. 4. М.: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе. 2019. С. 359-361. EDN SAVXYQ.
4. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под ред. И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 1. Тверь: ПолиПРЕСС. 2018. 276 с.
5. Электроразведка. Метод АМТЗ. Аппаратура АКФ. Поиск кимберлитовых трубок [Электронный ресурс]. – Дата обращения: 19.03.2025.
6. Фадеев Д.И., Панин Г.Л. Теоретическое исследование разрешающей способности различных типов установок электротомографии для верхней части разреза вулканических объектов // Инженерная геофизика 2013: 9-я междунар. конф. и выставка. Геленджик. 2013.
7. Команда разработчиков аппаратуры «СКАЛА-48». Аппаратура электроразведочная многоэлектродная «СКАЛА-48». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 2013.

УДК 004.8:624.131

ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Каримова Д.А.
d-k-90@internet.ru
Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

В статье рассматриваются актуальные проблемы геотехнического мониторинга в условиях быстрого развития инфраструктуры. Анализируются ограничения традиционных методов, обусловленные разнородностью данных и динамичностью природных процессов, а также описываются преимущества применения алгоритмов машинного обучения для повышения точности и оперативности оценки состояния грунтовых основ. Приводятся примеры практической реализации интегрированных систем мониторинга, обсуждаются результаты внедрения цифровых технологий и формулируются выводы о перспективах дальнейшего совершенствования отрасли.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг, машинное обучение, обработка данных, автоматизация инженерных процессов

Введение. В условиях стремительного роста городов и промышленных зон вопросы безопасности инженерных сооружений занимают первостепенное значение. Для контроля состояния грунтовых основ традиционно использовались эмпирические методы, лабораторные исследования и расчёты по детерминированным моделям. Однако современные задачи, вызванные изменчивостью природных условий, сезонными колебаниями и воздействием антропогенных факторов, требуют более гибких и адаптивных решений. Существенное увеличение объёма и разнообразия данных, получаемых с полевых измерений, лабораторных испытаний, геоинформационных систем и устройств интернета, приводит к тому, что классические подходы не всегда способны обеспечить требуемую оперативность и точность анализа [1].

Современные информационные технологии и алгоритмы машинного обучения открывают новые возможности для решения поставленных задач. Модели, разработанные на их основе, могут работать с большими массивами разнородных данных [2], обнаруживать сложные нелинейные взаимосвязи и прогнозировать динамику процессов в режиме реального времени. Такой подход позволяет не только улучшить оценку состояния инженерных объектов, но и своевременно выявлять потенциально опасные изменения, что имеет решающее значение для предотвращения аварийных ситуаций. В данной статье рассматриваются перспективы интеграции методов машинного обучения в процессы геотехнического мониторинга, приводятся примеры практической реализации с использованием данных из работ [1] и [2], а также анализируются результаты внедрения цифровых технологий в инженерную практику.

Современные вызовы и возможности. Одной из основных проблем современной геотехнической практики является неоднородность данных. Информация поступает из различных источников: полевых измерений, лабораторных испытаний, спутниковых наблюдений и систем дистанционного зондирования. Различия в форматах, методах измерения и уровне точности создают значительные трудности при объединении данных в единую систему анализа. Кроме того, свойства грунта подвержены влиянию климатических изменений, сезонных колебаний и интенсивной хозяйственной деятельности, что вносит дополнительную динамику в исследуемые параметры [1]. В этих условиях традиционные методы, основанные на статических моделях и эмпирических зависимостях, оказываются недостаточно приспособленными для своевременного реагирования [3].

Алгоритмы машинного обучения позволяют устранить проблему неоднородности данных посредством использования методов предварительной обработки и нормализации [2]. Они обеспечивают возможность обнаруживать скрытые закономерности и нелинейные связи, которые трудно учесть в классических моделях. Встраивание информации из различных источников формирует более полное представление о состоянии инженерных объектов, что способствует как повышению точности прогнозов, так и сокращению времени реакции на возникающие угрозы – аспект, крайне значимый в условиях динамично развивающейся городской среды и промышленного роста [3].

Кроме того, скорость принятия решений является критически значимым параметром. Традиционные системы мониторинга обновляют данные с определёнными интервалами, что может приводить к задержкам в обнаружении опасных изменений. Возможность анализа информации в режиме реального времени становится необходимой, поскольку каждая секунда может оказаться решающей. Применение алгоритмов машинного обучения позволяет моментально обрабатывать большие объёмы информации, что способствует своевременному обнаружению аномалий и предупреждению аварийных ситуаций [3].

Методы обработки данных и интеграция машинного обучения. Эффективное применение машинного обучения в геотехническом мониторинге начинается с качественного сбора информации. Сегодня данные поступают не только с полевых измерений, но и из лабораторных испытаний, спутниковых наблюдений и систем геоинформационного анализа. Объединение этих разнородных источников требует создания единой информационной платформы, способной обеспечить согласованность данных и их корректное толкование.

После этапа сбора информации следует процесс предварительной обработки, включающий устранение шумов, корректировку выбросов и нормализацию показателей [2]. Отбор основных признаков из большого объёма данных позволяет снизить размерность задачи и уменьшить вычислительные затраты при обучении моделей. Надёжность последующих прогнозов во многом зависит от качества предварительной обработки, поскольку даже незначительные погрешности в исходных данных могут привести к существенным ошибкам в итоговых расчётах [3].

Следующим этапом является разработка и обучение алгоритмов машинного обучения. В зависимости от специфики задачи применяются различные подходы. Для прогнозирования изменений прочностных характеристик грунта используют модели обучения с учителем, а для выявления аномалий или кластеризации данных – алгоритмы обучения без учителя. В случаях, требующих корректировки модели в режиме реального времени, часто применяют методы обучения с подкреплением. Валидация разработанных моделей проводится посредством сравнения их результатов с данными, полученными традиционными методами мониторинга, что позволяет оценить эффективность новых подходов и определить направления для дальнейшего совершенствования [4].

Консолидация моделей машинного обучения с существующей системой мониторинга предусматривает создание комплекса, включающего специализированный интерфейс для передачи информации, настройку систем оповещения и обеспечение совместимости новых решений с традиционными методами анализа. Одновременно с технической реализацией проводится обучение специалистов, что способствует быстрому освоению современных технологий. Регулярное обновление баз данных и периодическое переобучение моделей позволяют учитывать изменения условий эксплуатации и поддерживать высокую точность прогнозов даже при постоянной изменчивости окружающей среды [5].

Применение методов объяснимого искусственного интеллекта (Explainable AI) предоставляет возможность интерпретировать алгоритмические решения, что повышает доверие специалистов и облегчает процесс принятия управленческих решений [6]. Возможность детального анализа факторов, оказывающих наибольшее влияние на прогноз, является решающим для успешного внедрения новых систем мониторинга.

Практическая реализация и примеры применения. Практическое применение методов машинного обучения в геотехническом мониторинге уже продемонстрировало свою

эффективность в ряде проектов. Одним из ярких примеров является прогнозирование оползней и сдвигов грунта. Системы, основанные на анализе временных рядов данных, полученных с полевых датчиков и метеостанций, позволяют своевременно обнаруживать изменения в показателях влажности, температуры и уклона. Выявление начальных симптомов оползневых процессов предоставляет возможность заблаговременно принять меры по стабилизации склонов и предотвратить развитие аварийных ситуаций. Применение подобных систем особенно актуально для регионов с повышенным риском оползней, где своевременное вмешательство может спасти материальные ценности и человеческие жизни [3].

В работе [1] подробно рассматриваются примеры применения алгоритмов машинного обучения для оценки устойчивости инженерных сооружений. Работа демонстрирует, как анализ временных рядов и применение моделей обучения с учителем позволяют прогнозировать изменения в характеристиках грунта с высокой степенью точности.

Другим примером является оптимизация выбора типа фундамента при проектировании объектов в условиях городской застройки. Здесь анализируются геологические особенности участка, исторические данные о предыдущих проектах и параметры окружающей среды. Применение алгоритмов машинного обучения позволяет сформировать обоснованные рекомендации по выбору оптимального типа фундамента, что снижает вероятность ошибок на стадии проектирования и повышает долговечность сооружений. Такой подход помогает сократить затраты на строительство и обслуживание объектов, делая их более устойчивыми к воздействию внешних факторов [2].

Цифровые технологии также находят применение в автоматизации процессов бурения. Алгоритмы обучения с подкреплением, используемые для корректировки параметров бурения в режиме реального времени, позволяют снизить износ оборудования и сократить сроки выполнения работ. Эта технология особенно востребована в масштабных проектах, где каждая минута оказывает существенное влияние на общий бюджет и сроки строительства. В работе [2] приводятся данные о применении подобных алгоритмов, отмечается эффективность интегрированных систем мониторинга для своевременного обнаружения потенциальных угроз и оптимизации инженерных процессов.

Ниже представлена таблица, составленная на основе данных работы [1], иллюстрирующая сравнительный анализ цифровых технологий в геотехническом мониторинге.

Таблица 1 – Сравнение цифровых технологий в геотехническом мониторинге

Технология	**Преимущества**	**Ограничения**	**Применение**
Интернет вещей (IoT)	Непрерывный сбор данных, высокая детализация	Требования к стабильности сети, безопасность	Мониторинг состояния объектов, сбор данных в режиме реального времени
Облачные вычисления	Масштабируемость, оперативный доступ к данным	Зависимость от интернет-соединения	Хранение и обработка данных, аналитика в режиме реального времени
Аналитика больших данных	Обработка огромных массивов информации	Высокие вычислительные затраты, необходимость в мощном оборудовании	Прогнозирование динамики процессов, выявление закономерностей
Машинное обучение	Выявление скрытых взаимосвязей, точное прогнозирование	Чувствительность к качеству исходных данных	Анализ и прогнозирование геотехнических процессов, оптимизация инженерных решений

Современные распределённые вычислительные платформы и облачные технологии открывают дополнительные возможности для масштабирования систем мониторинга. Они позволяют обрабатывать огромные объёмы информации почти мгновенно, что является необходимым условием для функционирования систем в режиме реального времени. Несмотря на ограничения, связанные с вычислительными ресурсами, современные решения демонстрируют высокую эффективность и устойчивость, существенно снижая риск возникновения аварийных ситуаций.

Результаты и обсуждение. Проведённые исследования и практический опыт внедрения цифровых технологий в геотехнический мониторинг свидетельствуют о том, что применение алгоритмов машинного обучения значительно повышает оперативность и точность прогнозов. Сравнительный анализ показывает, что объединение данных из различных источников, обработанных современными методами, позволяет обнаруживать даже незначительные отклонения в характеристиках грунта. Это предоставляет возможность заранее определить потенциальные угрозы и оперативно принять меры для стабилизации инженерных объектов.

Использование методов объяснимого искусственного интеллекта, позволяющих детально интерпретировать результаты работы моделей, существенно повышает доверие специалистов к новым системам мониторинга. Прозрачность алгоритмических решений даёт возможность понять, какие именно параметры оказывают наибольшее влияние на итоговый прогноз, что облегчает процесс принятия управленческих решений. Использование цифровых платформ и облачных вычислительных систем обеспечивает необходимую скорость обработки информации, что критически важно для своевременного реагирования на возможные аварийные ситуации. Данные, представленные в [1] и [2], определяют, что успешное применение таких методов требует комплексного подхода, включающего модернизацию технической базы, повышение квалификации персонала и пересмотр организационных стандартов [4].

Полученные результаты демонстрируют, что системы, основанные на машинном обучении, не только повышают точность прогнозов, но и сокращают временные затраты на анализ информации [1]. Это позволяет создавать гибкие и масштабируемые платформы, способные функционировать в условиях постоянных изменений окружающей среды. Таким образом, цифровизация процессов мониторинга становится эффективным инструментом для обеспечения безопасности инженерных сооружений и оптимизации эксплуатационных расходов.

Выводы. Подводя итоги, можно утверждать, что интеграция методов машинного обучения в геотехнический мониторинг – это необходимый этап развития современной инженерной практики. Современные задачи, связанные с неоднородностью данных и изменчивостью природных процессов, требуют создания систем, способных оперативно обрабатывать большие объёмы информации и точно прогнозировать изменения в состоянии грунтовых основ. Применение алгоритмов машинного обучения позволяет не только улучшить точность расчётов, но и существенно ускорить процесс принятия управленческих решений, что снижает риск аварийных ситуаций и уменьшает экономические потери.

Применение передовых технологий, таких как облачные вычисления и распределённые системы обработки данных, в сочетании с методами объяснимого искусственного интеллекта, создаёт возможности для построения прозрачных и адаптивных систем мониторинга. Реализация таких решений требует всесторонней модернизации оборудования, повышения квалификации специалистов и пересмотра существующих методологических подходов. Перспективы дальнейшего развития данной области связаны с совершенствованием алгоритмов машинного обучения и увеличением вычислительных мощностей, что позволит создавать ещё более эффективные платформы для прогнозирования и предотвращения аварийных ситуаций.

Литература

1. Каримова Д.А. Исследование подхода в оценке и прогнозировании геотехнических рисков // Проблемы автоматики и управления. 2024. № 2 (50). С. 37-43.
2. Каримова Д.А., Верзунов С.Н. Применение моделей машинного обучения в интеллектуальном анализе образцов горных пород // Проблемы автоматики и управления. 2023. № 3 (48). С. 61-71.
3. Karpatne, Anuj & Ebert-Uphoff, Imme & Ravela, Sai & Babaie, Hassan & Kumar, Vipin. (2017). Machine Learning for the Geosciences: Challenges and Opportunities. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering (in review). 31. 10.1109/TKDE.2018.2861006.
4. Shirmard, Hojat & Farahbakhsh, Ehsan & Müller, Dietmar & Chandra, Rohitash. (2022). A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration. Remote Sensing of Environment. 268. 112750. 10.1016/j.rse.2021.112750.
5. Kreuzberger, Dominik & Kühl, Niklas & Hirschl, Sebastian. (2023). Machine Learning Operations (MLOps): Overview, Definition, and Architecture. IEEE Access. Pp. 1-1. 10.1109/ACCESS.2023.3262138.
6. Adadi, Amina & Berrada, Mohammed. (2018). Peeking Inside the Black-Box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI). IEEE Access. Pp. 1-1. 10.1109/ACCESS.2018.2870052.

УДК 528.2:629.78+004.622

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОСТОБРАБОТКИ РАСЧЁТОВ ИЗ ПРОГРАММЫ BERNESE

Кенигсберг Д.В.
kenig@gdirc.ru
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

Обозначена проблема многократного повторения шаблонных операций для постобработки и анализа расчётов координат из программы Bernese. На языке Python написаны три программных решения, которые быстро выполняют эти шаблонные операции и сокращают время подготовки данных для дальнейшего их анализа. Первая программа производит разбиение файла внутрисуточных координат (.KIN) на части, для каждой станции отдельно. Вторая программа преобразует геоцентрические координаты XYZ в локальные топоцентрические NEU (WGS-84), формируя текстовый файл в удобочитаемом табличном формате. Третья программа из результирующего файла параметров обработки (*.OUT) извлекает среднесуточные (картезианские и геодезические) координаты и их ошибки, создавая удобный для анализа выходной файл.*

Ключевые слова: ГНСС, внутрисуточные координаты, среднесуточные координаты, программа, Python.

Введение. На территории Киргизии ежегодно проводятся полевые измерения GPS пунктов локальной и региональной сетей. Производится сбор данных с 15 перманентных GPS станций (Киргизия, Казахстан). На детальных геодезических площадках (2-4 км^2) осуществляется комплекс режимных измерений и опытно-методические работы с использованием средств GPS, наземной геодезии и других геофизических методов.

Программа Bernese GNSS Software версии 5.2 позволяет обрабатывать измеренные данные с высокой производительностью, обеспечивает высокую точность и довольно гибкий в использовании пакет постобработки GPS / ГЛОНАСС (GNSS) в среде Windows и Linux [1]. Современное моделирование, детальный контроль всех опций обработки, мощные инструменты для автоматизации, соблюдение современных международных стандартов, а также гибкость, являются отличительными чертами Bernese GNSS Software. В возможности программы входит эффективная обработка данных от локальных до глобальных сетей с использованием одно- или двухчастотных GNSS измерений, позволяет автоматически обрабатывать перманентные станции в большом количестве, одновременно обрабатывать GPS и ГЛОНАСС наблюдения [2]. Таким образом, можно получить расчёт среднесуточных, внутрисуточных координат станций, векторов скоростей.

После завершения обработки GNSS данных Bernese формирует выходной файл (*.OUT), содержащий отчёт о выполнении расчётов, из которого вручную нужно выбирать разрозненные среднесуточные координаты пунктов и их ошибки. Кроме того, по результатам расчёта Bernese предоставляет только координаты XYZ и LLA, однако в геофизических задачах часто требуются координаты в локальной топоцентрической системе NEU. При расчёте внутрисуточных координат Bernese формирует файл *.KIN, который содержит в себе общий список координат станций. При этом, для дальнейшего анализа требуется разделение станций по отдельным файлам [3]. Таким образом, ручная пост-обработка файлов с расчётами координат программы Bernese требует повторяющихся шаблонных операций и временных затрат, замедляя дальнейший анализ полученных данных.

Результаты расчётов координат в программе Bernese. По завершении обработки данных, полученных от заданных ГНСС-станций, программа Bernese GNSS Software формирует итоговые ASCII-файлы с расширением *.CRD, которые содержат результаты

вычислений среднесуточных координат. Эти файлы представляют собой текстовые документы, структурированные по определённому формату, что делает их удобными для автоматического считывания и последующей обработки (рис 1).

```
RNX2SNX_240220: Final coordinate results            10-SEP-24 08:05
-------------------------------------------------------------------------
LOCAL GEODETIC DATUM: ITRF2014          EPOCH: 2024-01-22 12:00:00

NUM  STATION NAME          X (M)          Y (M)          Z (M)     FLAG

  1  0194 21752S001   -3766967.16579  3211876.05639  4008333.72868
  2  AB07 40423M002   -3425750.35806 -1214685.78378  5223662.65559
  3  AB09 49419M001   -2583614.97536  -546237.01961  5786501.63850
  4  BIK0 12358M003    1249005.03534  4513917.51147  4316148.02830
  5  CALL 42205M001    1387454.48000 -6081996.21065 -1324212.01560
  6  CAM2 40514M001     -56581.48872 -6001449.53209  2151509.14165
  7  LAUT 50804M002   -6075194.70138   270923.67950 -1917188.92696
  8  NPRI 49684S001    1531392.02271 -4531473.98244  4204982.65663
  9  POL2 12348M001    1239970.84269  4530790.21766  4302578.88036
 10  POLV 12336M001    3411556.94430  2348464.22474  4834397.02357
 11  POR2 49842S002    1541610.46716 -4404569.71316  4333255.70320
```

Рисунок 1 – Фрагмент файла *.CRD с результатами расчёта координат для каждой станции

На рисунке 1 показано, что каждый такой файл относится к определённой дате (одни сутки наблюдений) и включает координаты всех станций, участвовавших в обработке в этот день. Координаты приводятся в заданной геодезической системе координат, например, Международной наземной системы координат (Internetional Terrestial Reference Frame) ITRF2014. Это обеспечивает совместимость с международными стандартами и возможность интеграции результатов в глобальные геодинамические исследования.

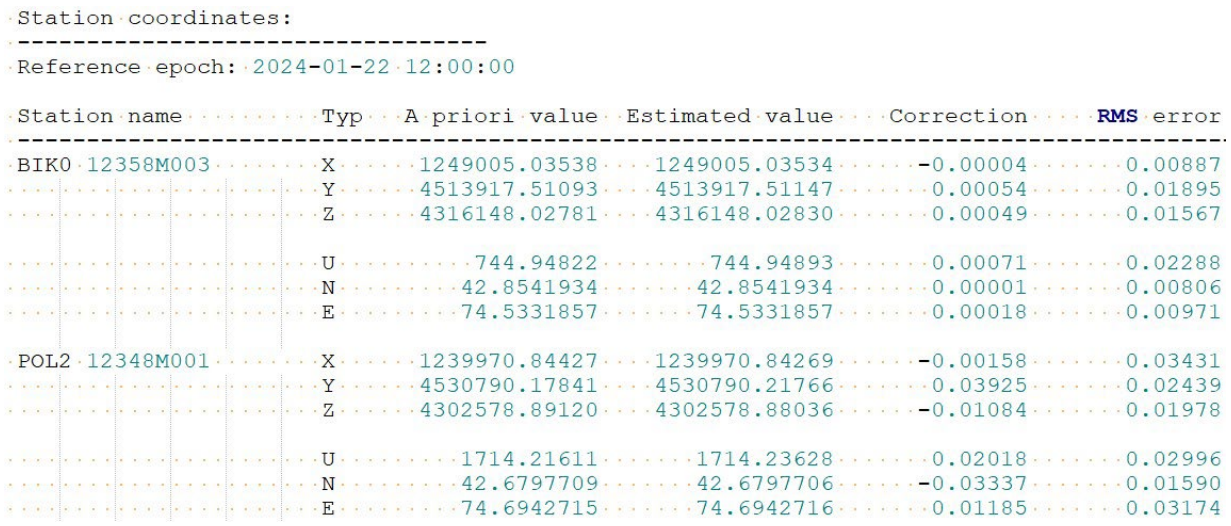
Внутри каждого *.CRD-файла содержится следующая информация:

- Дата наблюдения (EPOCHS),
- Имя станции, например, короткий четырёхсимвольный идентификатор (0194)
- Уникальный номер станции, в формате, принятом международными сервисами GNSS (21752S001)
- Рассчитанные среднесуточные координаты (X, Y, Z в системе ITRF)
- Геодезическая система координат (ITRF2014)

Bernese формирует отдельный файл для каждого дня, что при длительном периоде наблюдений приводит к значительному объёму данных. Например, за один календарный год накапливается *365 отдельных CRD-файлов, если вести обработку ежедневно. При этом каждый файл может содержать координаты по 40–50 и более станциям, в зависимости от конфигурации сети.

В результате, при необходимости провести анализ временных рядов координат станций возникает задача объединения этих координат в единый массив данных по каждой станции. Это необходимо для построения графиков изменений координат во времени и выявления трендов или аномалий. Однако данный процесс становится очень трудоёмким и времязатратным, если выполнять его вручную. Поэтому для эффективного формирования временных рядов координат требуется написание программы для автоматизации этого процесса.

Полную и наиболее подробную информацию о работе программы Bernese и её результатах содержит специальный выходной файл с расширением *.OUT (рисунок 2). Этот файл представляет собой текстовый отчёт, формируемый программой по завершении полного цикла обработки по одному дню. Он является важным инструментом для анализа и диагностики как самих вычислений, так и качества исходных данных.



```
Station coordinates:
--------------------------------
Reference epoch: 2024-01-22 12:00:00

Station name          Typ   A priori value   Estimated value    Correction     RMS error
-------------------------------------------------------------------------------------------
BIK0 12358M003        X     1249005.03538    1249005.03534      -0.00004       0.00887
                      Y     4513917.51093    4513917.51147       0.00054       0.01895
                      Z     4316148.02781    4316148.02830       0.00049       0.01567

                      U         744.94822        744.94893       0.00071       0.02288
                      N          42.8541934       42.8541934     0.00001       0.00806
                      E          74.5331857       74.5331857     0.00018       0.00971

POL2 12348M001        X     1239970.84427    1239970.84269      -0.00158       0.03431
                      Y     4530790.17841    4530790.21766       0.03925       0.02439
                      Z     4302578.89120    4302578.88036      -0.01084       0.01978

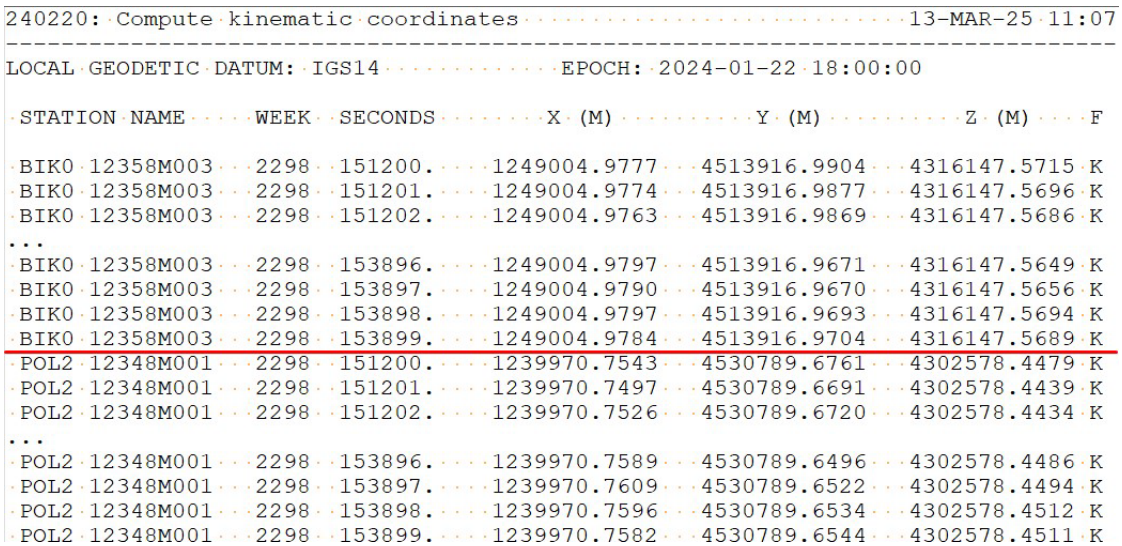
                      U        1714.21611       1714.23628       0.02018       0.02996
                      N          42.6797709       42.6797706     -0.03337       0.01590
                      E          74.6942715       74.6942716      0.01185       0.03174
```

Рисунок 2 – Фрагмент файла *.OUT с результатами расчёта координат для каждой станции

Файл *.OUT включает в себя подробное описание всех аспектов обработки, что делает его незаменимым источником информации для опытных пользователей, особенно при необходимости проведения научных исследований или отладки проблем в обработке. Этот файл содержит в себе: список всех входных и выходных файлов, имена всех обрабатываемых GNSS-станций, количество и качество наблюдений, данные о спутниках, настройки обработки, априорные координаты, рассчитанные координаты, их ошибки и т.д.

Хотя файл *.OUT и предоставляет всю полноту информации, его объём может достигать нескольких тысяч строк, особенно при обработке большого количества станций. Это затрудняет поиск фрагмента, содержащего информацию о рассчитанных координатах станций. Формат при этом текстовый и не структурирован для быстрого извлечения координат и оценок ошибок этих координат (среднеквадратических отклонений) для удобного анализа временных рядов

Таким образом, извлечение координат и их ошибок вручную из .OUT-файлов становится крайне трудоёмким и неэффективным, особенно при необходимости анализа множества обработок. Пользователю приходится вручную искать нужные блоки текста, ориентироваться по меткам и разметке, что занимает много времени и повышает риск ошибок. Поэтому здесь также возникает необходимость в автоматизации данного процесса.



```
240220: Compute kinematic coordinates                          13-MAR-25 11:07
-------------------------------------------------------------------------------
LOCAL GEODETIC DATUM: IGS14          EPOCH: 2024-01-22 18:00:00

 STATION NAME     WEEK  SECONDS       X (M)          Y (M)          Z (M)     F

 BIK0 12358M003   2298  151200.   1249004.9777   4513916.9904   4316147.5715 K
 BIK0 12358M003   2298  151201.   1249004.9774   4513916.9877   4316147.5696 K
 BIK0 12358M003   2298  151202.   1249004.9763   4513916.9869   4316147.5686 K
...
 BIK0 12358M003   2298  153896.   1249004.9797   4513916.9671   4316147.5649 K
 BIK0 12358M003   2298  153897.   1249004.9790   4513916.9670   4316147.5656 K
 BIK0 12358M003   2298  153898.   1249004.9797   4513916.9693   4316147.5694 K
 BIK0 12358M003   2298  153899.   1249004.9784   4513916.9704   4316147.5689 K
 POL2 12348M001   2298  151200.   1239970.7543   4530789.6761   4302578.4479 K
 POL2 12348M001   2298  151201.   1239970.7497   4530789.6691   4302578.4439 K
 POL2 12348M001   2298  151202.   1239970.7526   4530789.6720   4302578.4434 K
...
 POL2 12348M001   2298  153896.   1239970.7589   4530789.6496   4302578.4486 K
 POL2 12348M001   2298  153897.   1239970.7609   4530789.6522   4302578.4494 K
 POL2 12348M001   2298  153898.   1239970.7596   4530789.6534   4302578.4512 K
 POL2 12348M001   2298  153899.   1239970.7582   4530789.6544   4302578.4511 K
```

Рисунок 3 – Фрагмент файла *.KIN с результатами расчёта координат для каждой станции (красная линия на рисунке наглядно разделяет станции)

Файл ASCII с расширением *.KIN, формируемый программой Bernese GNSS Software, содержит в себе внутрисуточные координаты станции (рисунок 3). В отличие от суточных расчётов, где оценивается одна усреднённая координата для станции, внутрисуточный расчёт предоставляет координаты станции на каждую отдельную эпоху записи (обычно каждые 30 секунд или 1 секунду в зависимости от настроек и дискретизации исходных наблюдений).

Файл *.KIN содержит следующую информацию:

- Имя станции;
- Дата и точное время каждого измерения (В формате GPS-недели и секунд с начала недели);
- Три декартовых координаты (X, Y, Z) в системе координат на данную эпоху
- Флаг для каждой эпохи с информацией о качестве измерения (K – качественные).

Как и в случае с другими выходными файлами Bernese, *ручная работа с .KIN-файлом — крайне трудоёмкий процесс, особенно если требуется извлекать координаты для построения графиков, сравнения между датами, анализа точности. Каждая строка содержит данные по одному моменту времени, и при многодневной обработке объём информации может достигать нескольких тысяч строк. Кроме того, один файл *.KIN может содержать в себе все обработанные станции. Для дальнейшего анализа таких временных рядов рекомендуется разделение файла внутрисуточных координат на отдельные.

ПО Bernese предоставляет координаты только в глобальных системах: это декартовые координаты (X, Y, Z) и координаты в геодезической системе (широта, долгота, высота — LLA). Эти координаты представляют собой положение станции относительно центра масс Земли и подходят для глобальных и региональных задач, а также для включения в международные базы данных.

Однако в геофизических и геодинамических задачах, где требуется отслеживать локальные смещения станций — например, при мониторинге деформаций земной коры, осадки инженерных сооружений, вулканической активности или сейсмических процессов — такие глобальные координаты оказываются неудобными для интерпретации. В этих случаях гораздо информативнее использовать координаты в локальной топоцентрической системе NEU (North–East–Up). Выполнять такое преобразование вручную для сотен координат или временных рядов — чрезвычайно трудоёмко, особенно если необходимо каждый раз выбирать разные начальные точки для новой системы отсчёта. Поэтому для решения этой задачи также необходимо написание программы, которая будет автоматически выполнять все необходимые расчёты и структурировать результат в формате, удобном для дальнейшего анализа координат.

Автоматизация постобработки расчётов координат. Для решения проблемы многократного повторения шаблонных операций для постобработки и анализа расчётов координат из программы Bernese. На языке Python написаны три программных решения, которые быстро выполняют эти шаблонные операции и сокращают время подготовки данных для дальнейшего их анализа. Для удобства программы помещены в папку, путь которой указан в переменной среде (Windows), что позволяет запускать её через командную строку в любой каталог, где находится входной файл. Результаты работы программы также сохраняются в эту папку.

Первая программа XYZXTR извлекает из результирующего файла параметров обработки (*.OUT) среднесуточные (картезианские и географические) координаты и их ошибки, создавая удобный для анализа выходной файл.

Все файлы *.OUT помещаются в одну папку. Затем в эту же папку через командную строку исполняется программа XYZXTR. После завершения работы программы создаётся выходной файл формата Excel (рисунок 4).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Station	Data	X,mm	Y,mm	Z,mm	Xr	Yr	Zr	RMS(X)	RMS(Y)	RMS(Z)	Lat,deg	Lon,deg	H,mm
2	AAV4	07.03.2023	1238908557.4	4503301598.6	4329791999.9	5.0	6.6	5.9	0.00030	0.00076	0.00074	43.02	74.62	581749.40
3	AAV4	08.03.2023	1238908556.0	4503301584.9	4329791993.5	3.7	-7.1	-0.5	0.00024	0.00057	0.00060	43.02	74.62	581735.10
4	AAV4	20.04.2023	1238908555.0	4503301598.5	4329792009.7	5.5	5.6	15.8	0.00029	0.00069	0.00071	43.02	74.62	581755.50
5	AAV4	21.04.2023	1238908560.1	4503301600.1	4329792005.1	10.7	7.2	11.3	0.00032	0.00083	0.00073	43.02	74.62	581754.60
6	ACH4	31.05.2023	1265306496.1	4639429279.2	4179327661.3	19.8	-2.0	7.2	0.00036	0.00088	0.00079	41.18	74.74	2282986.10
7	ACH4	01.06.2023	1265306491.6	4639429288.5	4179327667.2	15.4	7.3	13.0	0.00026	0.00066	0.00060	41.18	74.74	2282995.80
8	AKH4	28.08.2023	946538646.5	4669792865.5	4230970567.6	17.4	3.4	7.5	0.00021	0.00057	0.00056	41.80	78.54	3445227.30
9	AKS4	13.08.2023	1174485570.1	4699122755.9	4140844759.9	30.9	0.0	8.9	0.00032	0.00094	0.00085	40.72	75.97	3341269.90
10	AKS4	14.08.2023	1174485566.8	4699122754.1	4140844759.2	27.7	-1.9	8.2	0.00024	0.00067	0.00062	40.72	75.97	3341267.50
11	AKU4	06.06.2023	1213058599.6	4630591621.7	4203811425.4	21.3	7.6	9.6	0.00035	0.00090	0.00081	41.48	75.32	1908860.20
12	AKU4	07.06.2023	1213058594.1	4630591626.6	4203811425.2	15.9	12.5	9.4	0.00032	0.00080	0.00072	41.48	75.32	1908862.60
13	ALAA	07.02.2023	1253820267.5	4526292208.4	4302789431.1	2.7	6.2	18.6	0.00029	0.00075	0.00074	42.69	74.52	1371706.90
14	ALAA	08.02.2023	1253820271.1	4526292220.0	4302789430.4	6.4	17.7	17.8	0.00024	0.00061	0.00059	42.69	74.52	1371715.30
15	ALAA	25.03.2023	1253820265.3	4526292223.5	4302789442.9	3.6	20.3	30.5	0.00035	0.00094	0.00087	42.69	74.52	1371725.10

Рисунок 4 – фрагмент файла Excel с временными рядами и ошибками станций.

На рисунке 4 представлены: имя ГНСС станции, дата наблюдения, рассчитанные координаты XYZ, их относительные ошибки Xr, Yr, Zr, среднеквадратичные ошибки RMS, и геодезические координаты LLA. Таким образом, в результате работы программы XYZXTR все необходимые данные извлечены, собраны воедино и приведены в удобный формат для дальнейшего анализа.

Вторая программа KINDIV производит разбиение файла внутрисуточных координат (*.KIN) на части, для каждой станции отдельно (рисунок 5). Это облегчает процесс формирования временных рядов внутрисуточных координат.

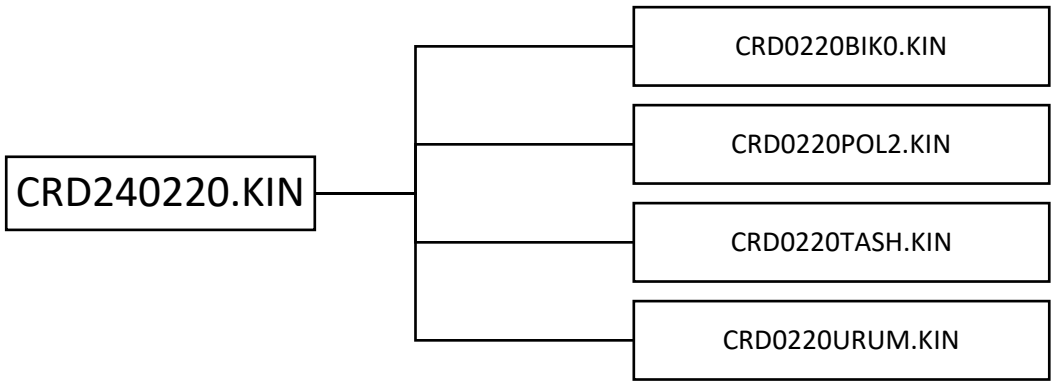


Рисунок 5 – Пример разделения файла внутрисуточных координат

Как видно из рисунка 5, один файл, содержащий расчёты внутрисуточных координат, разделён на отдельные файлы, которые несут в себе день года наблюдений (220) для обработанной станции, а также её название (BIK0).

Третья программа XYZ2NEU позволяет сменить систему отсчёта для выбранных станций, перейдя от глобальной геоцентрической XYZ к локальной топоцентрической NEU. Входными файлами являются файлы внутрисуточных координат с расширением *.KIN. Программа предлагает сформировать пользователю начальную точку для новой системы отсчёта из станций, которые входят в обработку, либо ввести имя и координаты одной станции, которая станет началом в формируемой системе отсчёта. Таким образом, программа XYZ2NEU позволяет выполнить следующие операции:

- Пересчёт координат из XYZ в NEU (WGS-84)
- Возможность выбора опорной точки из одной или нескольких станций
- Возможность расчёта координат для конкретных станций
- Перевод координат из метров в миллиметры
- Пересчёт времени из формата GPS-недели и секунд в общий формат даты и времени

```
GLOBAL GEOCENTRIC (XYZ) TO LOCAL TOPOCENTRIC WGS-84 (NEU) COORDINATES TRANSFORMATION
STATIONS USED IN REFERENCE FRAME: CHUM KMTR POL2

NAME   DATA       TIME       X(mm)          Y(mm)          Z(mm)          N(mm)          E(mm)          U(mm)

CHUM   22.01.2024  00:00:00   1228950286.5   4508079999.1   4327868493.6   53002557.4331  -93167789.1143  -909820.7006
CHUM   22.01.2024  00:00:30   1228950287.3   4508079999.2   4327868490.5   53002555.5213  -93167789.4902  -909823.7051
CHUM   22.01.2024  00:01:00   1228950282.7   4508079997.8   4327868494.3   53002560.2979  -93167787.4790  -909821.6250
CHUM   22.01.2024  00:01:30   1228950285.8   4508080003.4   4327868496.5   53002555.7527  -93167789.5076  -909819.4898
CHUM   22.01.2024  00:02:00   1228950287.5   4508080003.6   4327868498.6   53002559.1850  -93167788.8651  -909819.6142
CHUM   22.01.2024  00:02:30   1228950288.7   4508080007.1   4327868498.7   53002558.4622  -93167788.8589  -909819.6766
CHUM   22.01.2024  00:03:00   1228950284.1   4508080004.1   4327868501.0   53002560.1719  -93167786.6936  -909815.2442
CHUM   22.01.2024  00:03:30   1228950284.6   4508080004.8   4327868499.3   53002559.5770  -93167785.8303  -909816.4329
```

Рисунок 6 – Фрагмент файла с результатом работы программы XYZ2NEU

Как видно из рисунка 6, все данные находятся в удобочитаемом формате. В верхней части файла указан список станций, которые были использованы в формировании новой системы отсчёта. Время из GPS недели и секунд переведено в общепринятый международный формат ДД.ММ.ГГГГ и ЧЧ:ММ:СС. Для удобства анализа координаты переведены из метров в миллиметры, поскольку при анализе таких временных рядов исследуются вариации пределах ~5-20 мм.

Выводы. На языке программирования Python разработаны три вспомогательные программы, значительно упростившие процесс пост-обработки полученных координат. В результате выполнения рутинных операций, ранее занимавших несколько часов, теперь требуется всего 2–3 минуты. Обработанные данные автоматически структурируются в удобочитаемом виде, что облегчает их последующий анализ. Практическое применение показало, что разработанные инструменты существенно повышают удобство и скорость работы с результатами, полученными в программном комплексе Bernese. В дальнейшем планируются развитие и доработка этих программ, а также создание новых программ, направленных на дальнейшую автоматизацию и повышение точности обработки расчётных данных.

Работа выполнена в рамках темы "Исследование современных движений земной коры Тянь-Шаня и прилегающих территорий методами наземной и космической геодезии". Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н., заведующему ЛGPS НС РАН С.И. Кузикову за выбор направления, советы при проведении работ и рекомендации по оформлению статьи.

Литература

1. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. Bernese GNSS Software, Version 5.2. Astronomical Institute University of Bern. 2018. 826 p. DOI: 10.7892/boris.72297.
2. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. Tutorial on the Bernese GNSS Software, Version 5.2. Astronomical Institute, University of Bern. Teor. Appl. 2015. 166 p.
3. Кенигсберг Д.В. Сравнение алгоритмов расчёта внутрисуточных позиций в программном комплексе Bernese // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Сб. материалов XIII Междунар. конф. молодых учёных и студентов, г. Бишкек, 28-30 апреля 2021 г. Бишкек: НС РАН. 2021. С. 81-86.

УДК 550.380.12

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «MAGSEISMOEFFECT» ДЛЯ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА ЗАПИСЕЙ ВОЛНОВЫХ ФОРМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ДАННЫХ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Лазарева Е.А.
ekaterina.lazareva88@gmail.com
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

Приведены результаты работы программы «MagSeismoEffect», предназначенной для обнаружения геомагнитных аномалий во время землетрясений. В качестве исходных данных использованы 1-секундные измерения основных компонент геомагнитного поля X, Y, Z Международной сети INTERMAGNET, а также данные величины геомагнитного поля T, полученные в рамках работы сети геомагнитного мониторинга Научной станции РАН. Для подтверждения наличия или отсутствия сейсмического эффекта в геомагнитных данных анализируется волновая форма рассматриваемого землетрясения, зарегистрированного на ближайшей сейсмостанции. Программа позволяет проводить совместный анализ, масштабирование и сохранение результатов в графическом формате.

Ключевые слова: данные, геомагнитное поле, компонента, полный вектор, производная, землетрясение, волновая форма, сейсмический эффект

Введение. Взаимосвязь между сейсмической активностью и изменениями геомагнитного поля давно является предметом научных исследований [1, 2]. Выявление корреляций между этими явлениями требует обработки больших массивов данных из разных источников, включая сейсмологические станции, спутниковые измерения и наземные магнитометры. В данной статье рассматривается специализированная программа «MagSeismoEffect», разработанная для совместного анализа данных о землетрясениях и геомагнитных вариациях [3]. Программа позволяет исследователям выявлять закономерности, визуализировать изменения вариаций геомагнитного поля во времени, а также тестировать гипотезы о возможных механизмах взаимодействия между тектоническими процессами и магнитным полем Земли, что делает её полезным инструментом, как для геофизиков, так и для специалистов в области прогноза сейсмических событий.

Данные. Основная программа реализована в виде оконного приложения и ряда дополнительных модулей, написанных на языке Python (3.x). Для чтения данных геомагнитных наблюдений применяется программный код, использующий библиотеку Pandas, которая предоставляет удобные инструменты для обработки и анализа наблюдений. Pandas позволяет комбинировать данные из разных источников, сравнивать например, измерения различных наземных геомагнитных обсерваторий, сейсмостанций и спутниковых миссий. Для чтения волновых форм в программном коде используется библиотека Obspy, предназначенная для чтения, обработки, анализа, визуализации данных сейсмических станций и включает поддержку различных сейсмических форматов. Obspy предоставляет следующие основные возможности: чтение и запись данных в сейсмических форматах (SEED, SAC, MiniSEED); фильтрация, интегрирование, дифференцирование сигналов; поиск и анализ сейсмических событий (каталоги, механизмы очагов, расчет спектров); доступ к данным через сетевые сервисы (IRIS, FDSN); визуализация сейсмических данных (сейсмограммы, спектрограммы, механизмы очагов) [4].

Основными функциональными возможностями программы являются: чтение данных Международной сети магнитных обсерваторий в формате IAGA-2002 (https://intermagnet.org/), чтение геомагнитных данных сети геомагнитного мониторинга НС

РАН в формате Parquet, а также чтение записей волновых форм землетрясений (http://www.fdsn.org/networks/). При изучении геомагнитных эффектов, вызванных землетрясениями, необходимо использование высокочастотных данных, полученных от наблюдений сети магнитных обсерваторий, осуществляющих измерения по всему миру. Именно данные с 1-секундной дискретизацией позволяют обнаружить на магнитограммах аномальные вариации, связанные с сейсмическими событиями [5].

В качестве примера, рассмотрим совместный анализ данных геомагнитного поля и волновой формы Учтурфанского землетрясения, магнитудой *Mw=6.9*, которое было зафиксировано 22 января 2024 г. в 18:09 UTC на территории Китая, недалеко от границы с Кыргызстаном (https://seismo.kg/). Геомагнитные данные, включающие вариации магнитного поля в трех компонентах (*X, Y, Z*), рассмотрим по обсерватории Nurmijarvi (NUR, Финляндия), которая удалена на расстояние более 4000 км от эпицентра, сейсмические данные волновой формы землетрясения рассмотрим по ближайшей к магнитной обсерватории сейсмостанции Oulu (OUL, Финляндия).

Результаты и обсуждение. Основное окно программы с исходными вариациями геомагнитного поля за 22 января 2024 г. приведено на рисунке 1 (вкладка «Intermagnet»). Загрузка данных в формате IAGA-2002 осуществляется в виде графиков 1-секундных измерений основных компонент геомагнитного поля.

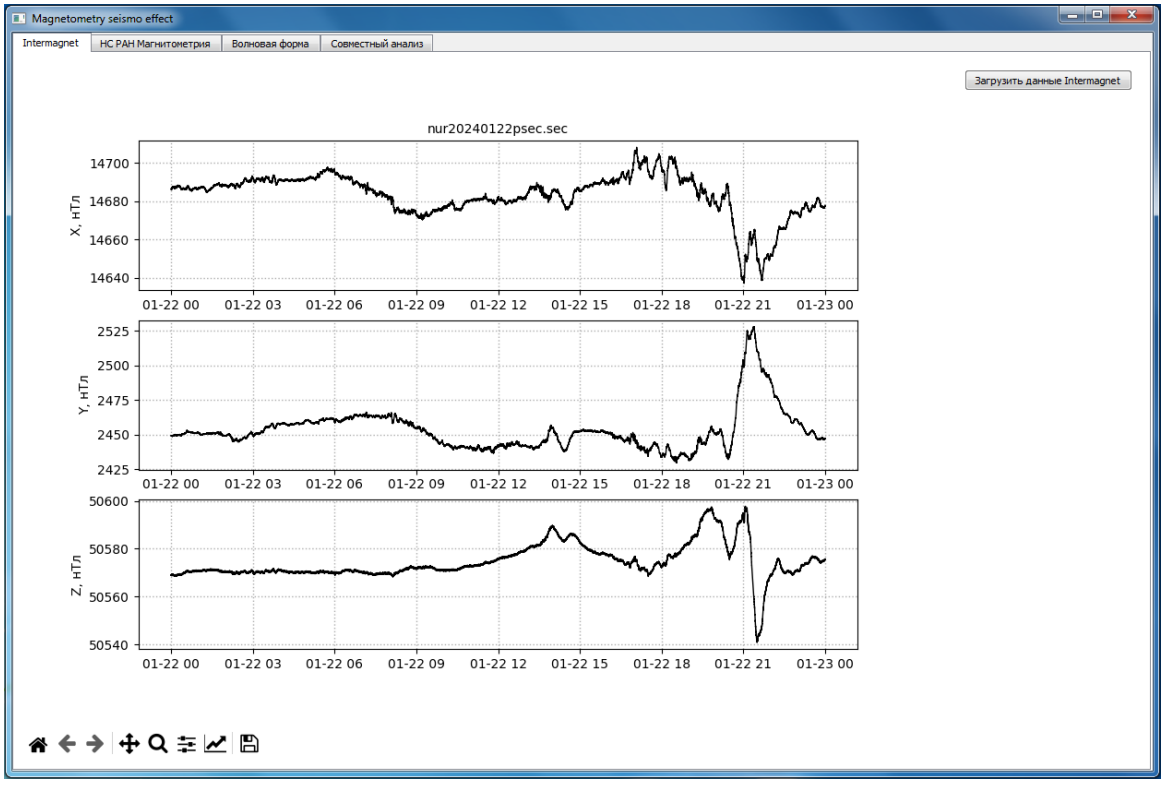


Рисунок 1 – Вкладка «Intermagnet». Вариации компонент геомагнитного поля по данным обсерватории NUR за 22 января 2024 г.

Во вкладке «Волновая форма» (рисунок 2) можно построить график по данным сейсмостанции. Волновая форма землетрясения помогает подтвердить, связаны ли наблюдаемые аномалии в геомагнитном поле с реальными сейсмическими процессами, или же они обусловлены внешними факторами (космическая погода, техногенные воздействия). На рисунке 2 приведены записи волновой формы (горизонтальная компонента *N*, измеряющая движение вдоль оси север-юг) по данным сейсмостанции OUL за 22 января 2024 г., которая соответствует рассматриваемому землетрясению. По оси *y* – количество отсчетов амплитуды сейсмического сигнала.

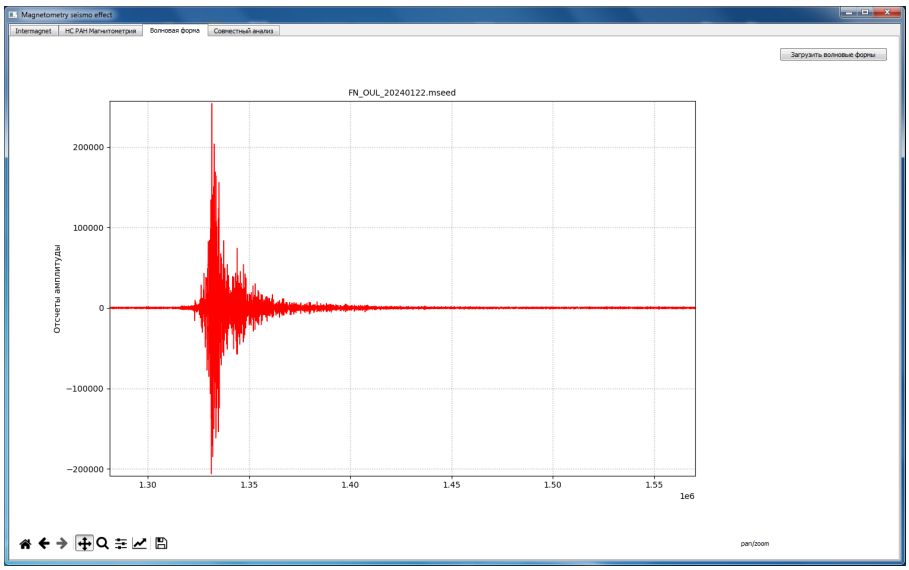


Рисунок 2 – Вкладка «Волновая форма» после масштабирования. Данные горизонтальной компоненты *N* сейсмостанции OUL за 22 января 2024 г.

Согласно данным аналитического центра по геомагнетизму и космическому магнетизму (Kyoto, Japan), средние значения DST-индекса в период с 20 по 25 января 2024 г. составляли в среднем от –15 нТл до 14 нТл (https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/202401/index.html), что свидетельствует об отсутствии сильных магнитных возмущений в это время и дает основание интерпретировать аномальные вариации геомагнитного поля в период землетрясения как сейсмоэлектрический эффект.

Для сопоставления записей волновой формы землетрясения и данных геомагнитного поля в программе предусмотрена вкладка «Совместный анализ» (рисунок 3). При выборе компоненты геомагнитного поля в списке по умолчанию установлена *X*-компонента, поэтому при необходимости можно указать *Y, Z*-компоненту, либо полный вектор *T*. На рисунке 3 отображены исходные вариации *X*-компоненты геомагнитного поля по выбранной ранее обсерватории после масштабирования (верхний график), график изменения величины геомагнитного поля в единицу времени *dX/dt* (средний график), а также волновая форма землетрясения, подтверждающая возможное наличие сейсмического эффекта в геомагнитных данных (нижний график).

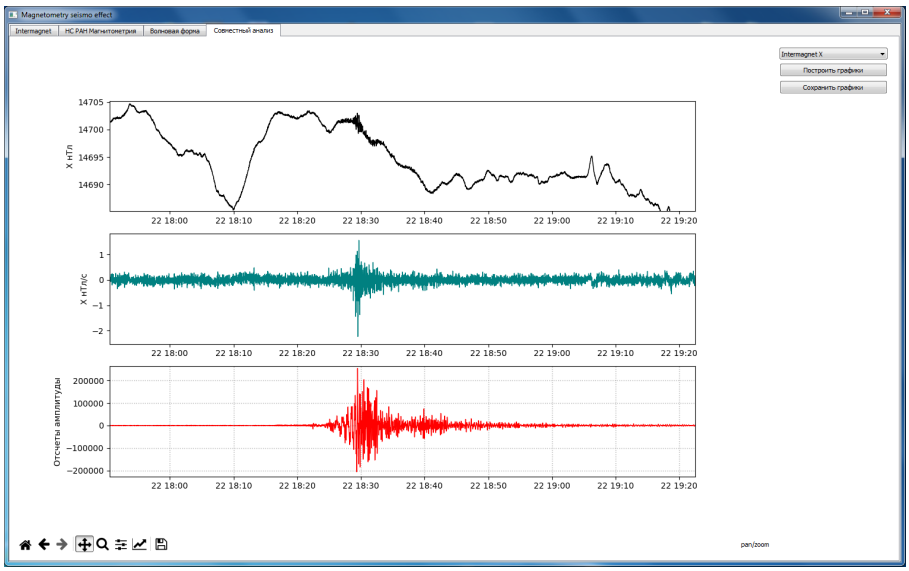


Рисунок 3 – Вкладка «Совместный анализ» после масштабирования

При совместном анализе графиков (рисунок 3) как на исходных данных вариации *X*-компоненты, так и на графике её производной выделяются аномальные, отличающиеся от типичного хода вариации в виде изменения амплитуд или частотных характеристик геомагнитного поля. Несмотря на значительную удаленность геомагнитной обсерватории NUR (4199 км) от эпицентра, наличие сейсмического эффекта в магнитных данных подтверждается записями волновой формы Учтурфанского землетрясения с сейсмостанции OUL, где идентично время максимального изменения сигнала.

Рассмотрим данные величины геомагнитного поля *T*, полученные в рамках работы сети геомагнитного мониторинга Научной станции РАН (вкладка «НС РАН Магнитометрия»). Как отмечалось ранее, геомагнитный отклик можно обнаружить только в 1-секундных данных, тогда как в одноминутных и других наблюдениях, которые регистрируются гораздо дольше, данные сглаживаются и эффекта не наблюдается [6]. Так, например, при загрузке 5-секундных измерений полного вектора геомагнитного поля *T* со станции Ак-Суу несмотря на удаленность пункта на расстояние около 400 км от эпицентра, отклик на Учтурфанское землетрясение едва заметен (рисунок 4, верхний график). На графике скорости изменения *dT/dt* эффект от землетрясения выражен сильнее (рисунок 4, средний график). По данным сейсмостанции Ала-Арча (рисунок 4, нижний график), которая располагается на расстоянии около 40 км от станции Ак-Суу видно, что время вступления сейсмической волны фиксируется раньше, чем на магнитной обсерватории, что объясняется различной удаленностью обсерваторий от эпицентра события.

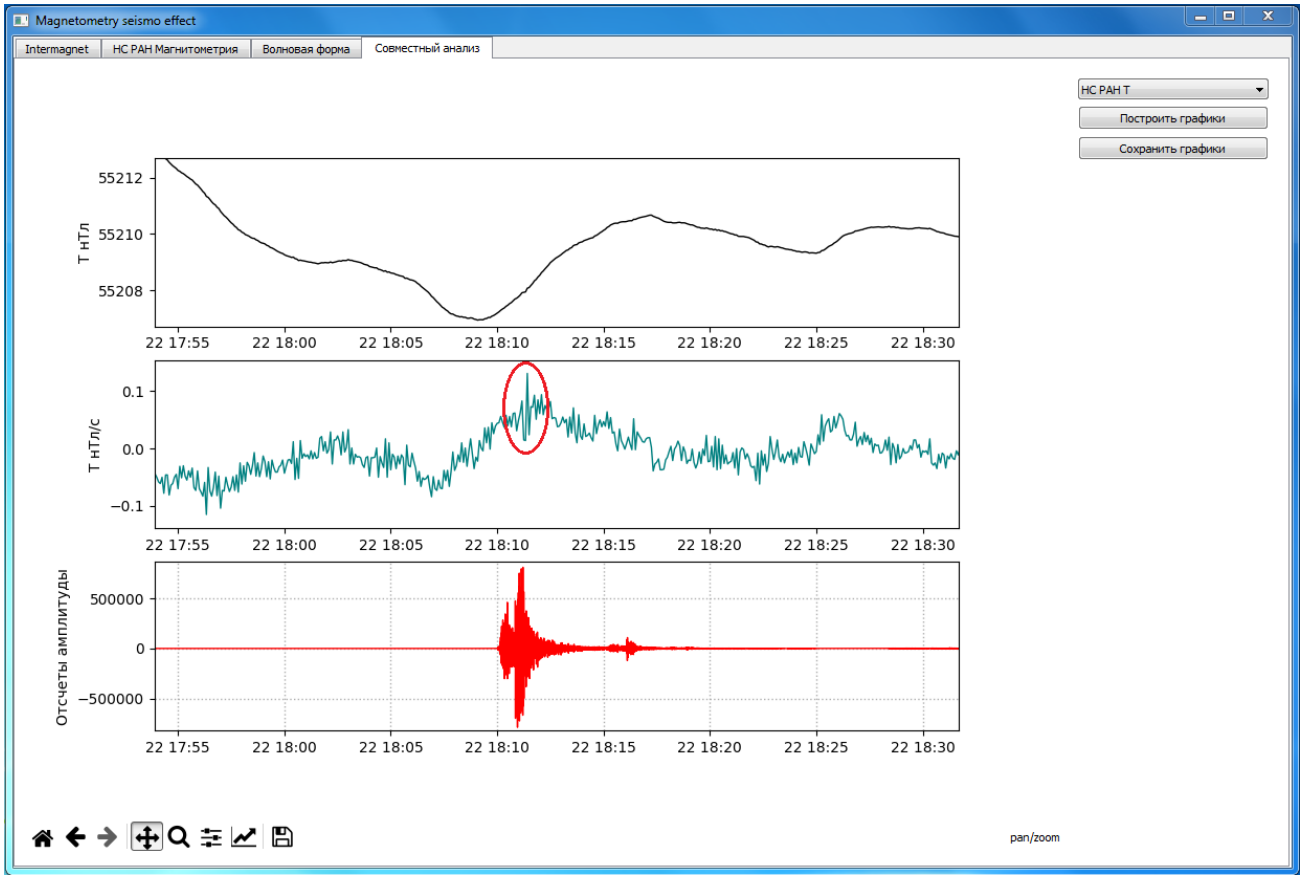


Рисунок 4 – Вариации полного вектора *T* (верхний график) и скорость его изменения *dT/dt* (средний график) по данным магнитной станции Ак-Суу. Волновая форма землетрясения по данным сейсмостанции Ала-Арча (нижний график). Овальная область – отклик землетрясения в 5-секундных данных производной геомагнитного поля

С помощью кнопки «Сохранить графики» в этом же окне программы результаты можно сохранить в файл *.png, указав необходимую директорию.

Заключение. Анализ геомагнитных данных и волновой формы Учтурфанского землетрясения с помощью программы «MagSeismoEffect» выявил наличие косейсмических эффектов в геомагнитных данных, которые проявляются в виде кратковременных аномальных вариаций магнитного поля. Обнаруженные магнитные возмущения могут демонстрировать временную задержку их вступления относительно прихода сейсмической волны. Этот эффект объясняется различным расстоянием от эпицентра до сейсмостанции и магнитной обсерватории, из-за чего момент регистрации косейсмического эффекта в магнитном поле зависит от времени распространения сейсмических волн в земной коре. Кроме того, возможное влияние вторичных процессов, таких как перераспределение заряженных частиц в породах или взаимодействие сейсмических волн с ионосферными токами, также может способствовать временной задержке магнитных возмущений [7]. Результаты работы программы подтверждают, что рассмотренное землетрясение вызывает заметные изменения в 1-секундных измерениях геомагнитного поля, что немаловажно для дальнейшего изучения электромагнитных проявлений сейсмической активности и их влияния на геофизические процессы.

Результаты, представленные в данной работе, получены в рамках выполнения государственного задания Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке по теме «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах».

Литература

1. Шапиро В.А. Сейсмомагнитный эффект // Известия АН СССР. Физика Земли. 1966. № 8. С. 61-73.
2. Ахвердян Л. А. Наблюдение сейсмомагнитного эффекта у очага Зангезурского землетрясения // Доклады академии наук Армянской ССР. 1969. № 3.
3. Имашев С.А., Лазарева Е.А. Программа обнаружения геомагнитных аномалий во время землетрясений MagSeismoEffect. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2024690868, опубликовано 18.12.2024 г. https://elibrary.ru/item.asp?id=76407549
4. Moritz Beyreuther, Robert Barsch, Lion Krischer, Tobias Megies, Yannik Behr, Joachim Wassermann. ObsPy: A Python Toolbox for Seismology. Seismological Research Letters 2010; 81 (3): 530–533.
5. Лазарева Е.А. Анализ вариаций геомагнитного поля в период турецких землетрясений в феврале 2023 года // Вестник Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики. 2024. № 2 (24). С. 35–42.
6. Soloviev A.A. Geomagnetic Effect of the Earthquakes with Mw = 7.5–7.8 in Turkey on February 6, 2023 // Earth Sc. 2023. № 511. P. 578–584.
7. Стуков Д.А., Сурков В.В., Пилипенко В.А., Касимова В.А. Применение импедансов для анализа структуры поля косейсмических электромагнитных возмущений // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов XV Междунар. конф. молодых ученых и студентов, г. Бишкек, 26–28 апреля 2023 г. Бишкек: Научная станция РАН. 2023. С. 165-172. EDN OPFVCZ.

УДК 551.43

КИНЕМАТИКА НОВЕЙШИХ РАЗРЫВОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ГОРНОГО АЛТАЯ

Мануилова Е.А.
e.manuilova@ifz.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

В работе представлены результаты структурно-геоморфологического анализа юго-восточной части Горного Алтая. В результате построения и интерпретации геоморфологических профилей и дешифрирования современного рельефа выявлен новейший структурный план района исследования. Для юго-восточной части Горного Алтая установлен сводово-глыбовый стиль новейших дислокаций, который представляет собой сочетание поднятий и впадин разного ранга, осложненных главными, второстепенными и локальными новейшими разрывами разной кинематики, слабыми зонами. Разработаны типовые геоморфологические модели «сдвига», «взброса», «надвига» и «сброса» для выявления кинематического типа новейшего разрыва в приповерхностном слое по 3D космическим изображениям поверхности Земли. По рельефу, а именно по комбинации новейших разрывов с право- и лево-сдвиговой составляющей северо-западного и северо-восточного простирания, соответственно, выявлено направление оси горизонтального сжатия. Из этого установлено, что новейшие структуры, выявленные в районе исследования сформировались в обстановке субмеридионального сжатия.

Ключевые слова: структурно-геоморфологическое дешифрирование, данные дистанционного зондирования Земли, слабые зоны, кинематика новейших разрывов.

Введение. Выявление и картирование разрывов земной коры является одной из приоритетных задач в тектонофизике и других смежных научных направлений. С этими зонами связаны землетрясения и другие опасные геологические процессы, а также к ним приурочены месторождения полезных ископаемых.

Объектом исследования является юго-восточная часть Горного Алтая – территория Чуйской, Курайской и Джулукульской котловин и сопредельных хребтов, нагорий и плоскогорий. На территории исследования присутствуют разломы разной кинематики, которые собраны в базе данных активных разломов Евразии и прилегающих акваторий [1, 2, 3]. Однако, в этой базе данных отсутствуют разломы на тех участках, где в настоящее время фиксируются рои землетрясений [4]. В связи с этим, целью исследования было выявление геометрии и кинематики новейших разрывов по геоморфологическим признакам и установлении их геодинамической обстановки формирования в более детальном масштабе (1:100 000) на территории юго-восточной части Горного Алтая.

Исходные данные и методы исследования. В работе использовались топографические карты (масштаб 1: 200 000 – M-45-XVI – XVIII, M-45-XXII – XXIV), цифровая модель рельефа (ЦМР), полученная по радарным данным Aster (разрешение 38.2 м) из ПО Global Mapper, карта крутизны склона, «отмывка» рельефа, космические изображения с сервера ArcGis Online в ПО ArcGIS Pro, shp-файл с реками, оцифрованными с топографических карт масштаба 1: 200 000, разломы из базы данных ГИН РАН [3], геологические и тектонические карты.

Для выявления новейших структур был применен структурно-геоморфологический анализ современного рельефа [5]. Метод направлен на выявление конэрозионных (с момента становления структурной формы в рельефе) дислокаций и их типов. В его основе лежит анализ гидрографической сети, рисунка и абсолютных отметок современного рельефа. Методика

включает построение и интерпретацию геоморфологических профилей, и осуществление визуального структурно-геоморфологического дешифрирования рельефа в плане.

Построение геоморфологических профилей проводится в ПО Arc GIS Pro с использованием ЦМР, интерпретация – в Corel Draw. Их линии закладываются вдоль и в крест простирания основных водораздельных поверхностей. При интерпретации на геоморфологических профилях показывают: 1) зону водораздельной денудации, 2) массив, подвергшийся процессам денудации, 3) линию, соединяющую наибольшую глубину вреза крупных рек, 4) массив, не подвергшийся процессам денудации, 5) уровенные поверхности, которые соответствуют определенным абсолютным отметкам рельефа (его этапам развития). Также отмечают информацию о генезисе и возрасте горных пород.

Эти данные позволяют наметить границы новейших региональных (локальных) поднятий. По комплексу признаков (анализ деформации зоны водораздельной денудации, перекос долины, резкое изменение крутизны склона) с учетом одновозрастности соседних смещаемых блоков, можно зафиксировать новейшие разрывы (без выявления кинематики) и оценить вертикальную амплитуду смещения по ним.

Визуальное структурно-геоморфологическое дешифрирование в плане осуществляется в ПО ArcGIS Pro с использованием топографии местности, данных дистанционного зондирования Земли и результатов интерпретации геоморфологических профилей. При этом выделяют морфоструктуры и блоки, которые имеют различную амплитуду конэрозионного поднятия. Границами блоков являются слабые зоны – зоны трещиноватости и дробления пород, разрывов со смещением (зоны тектонического воздействия). Термин введен Н.П. Костенко [5]. К этим зонам часто тяготеют как постоянные, так и временные водные потоки. Их основные признаки дешифрирования приведены в работе [6].

В результате дешифрирования выделяют разноранговые поднятия и впадины, слабые зоны и новейшие разрывы, в том числе с право- и левосдвиговой составляющей.

Стоит отметить, что вышеописанная методика не позволяет установить направление падения поверхности сместителя, от которого зависит кинематика новейшего разрыва. В связи с этим разработаны типовые геоморфологические модели «сброса», «взброса», «надвига» и «сдвига» для района исследования, которые позволяют выявить кинематику новейших разрывов в приповерхностном слое.

Разработка этих моделей основана на результатах, полученных в ходе аналогового моделирования для других горных областей [7]. Для создания моделей опорными данными о геометрии и кинематике послужили разрывы из базы данных ГИН РАН [3], для которых проведен детальный геоморфологический анализ по космическим изображениям в 3D в ПО Arc GIS Pro. При изучении снимка на участке новейшего разрыва особое внимание уделялось анализу поведения гидросети, распространению конусов выноса, морфологии и крутизне уклона треугольных граней (фасетов), смещению горных хребтов с учетом геологического строения района.

Результаты и обсуждение. В результате проведения структурно-геоморфологического анализа современного рельефа района исследования, во-первых, построена серия геоморфологических профилей. Их интерпретация и анализ позволили выявить границы новейших региональных и локальных структур. Помимо этого, выделены шесть уровенных поверхностей (1 уровень ~4000 м, 2 уровень ~3200 м, 3 уровень ~2800 м, 4 уровень ~2200 м, 5 уровень ~1800 м, 6 уровень ~1500 м), которые соответствуют наиболее высоким отметкам новейших структур. Показан возраст и генезис пород [8], слагающих современный рельеф. Стоит отметить, что своды новейших поднятий сложены дочетвертичными образованиями, делювиальными и солифлюкционными отложениями среднего-верхнего неоплейстоцена. В пределах новейших впадин присутствуют гляциальные отложения чуйского горизонта среднего неоплейстоцена, аллювиальные и коллювиально-деллювиальные осадки верхнего неоплейстоцена-голоцена. Анализ смещения выявленных уровенных поверхностей с учетом их одновозрастности позволил нанести на профили местоположение новейших разрывов (без установления их кинематики) и зафиксировать амплитуду вертикальных смещений по ним.

Во-вторых, получена структурна-геоморфологическая карта района исследования в масштабе 1:100 000. Ее построение основано на комбинации результатов интерпретации геоморфологических профилей, проведения визуального дешифрирования современного рельефа и применения геоморфологических моделей разных кинематических типов новейших разрывов.

На карте показаны новейшие пликативные структуры, слабые зоны и новейшие разрывные нарушения, выраженные в современном рельефе. К новейшим пликативным структурам относятся: 1) региональные поднятия с установленными в их пределах локальными поднятиями, разделенными узкими впадинами – Курайское, Башкауское, Муштуайры, Чулымшанское, Шапшальское, Макуту, Камтытыгенское, Чихачева, Тандуаир, Южно-Чуйское, Северо-Суйское и др.; 2) региональные впадины, в пределах которых местами встречаются локальные поднятия – Чуйская, Курайская и Джулукульская.

Также на карте показаны главные, второстепенные и локальные новейшие разрывы разной кинематики – правые и левые сдвиги, в том числе и со взбросовой составляющей, взбросы, надвиги, сбросы, раздвиги, разрывы с вертикальным смещением и слабые зоны. В целом основными преобладающими направлениями новейших разрывов и слабых зон являются северо-западное (290-330º), северо-восточное (30-60º) и субширотное (80-90º).

Главные новейшие разрывы – крупные зоны разрывов, протяженностью первые сотни километров, с зонами интенсивной трещиноватости шириной до 3-х км. Они в основном приурочены к границам новейших региональных структур и структурно-фациальных зон. Второстепенные новейшие разрывы протяженностью десятки километров приурочены к границам новейших локальных поднятий и наследуют простирания палеозойско-мезозойских разломов. Локальные новейшие разрывы протяженностью от сотни метров до первых десятков километров образуют структурные парагенезы с разрывами более высокого ранга.

При сопоставлении простираний новейших разрывов и слабых зон с направлением древних разломов выявлено, что наибольшей активизации в современном поле напряжений подверглись разломы северо-западного (310-320°) простирания. В меньшей степени активизированы разломы северо-восточного (40-60°) и субширотного (60-80°) направления.

В целом для юго-восточной части Горного Алтая установлен сводово-глыбовый стиль новейших дислокаций, который представляет собой сочетание поднятий и впадин разного ранга, осложненных разноранговыми новейшими разрывами и слабыми зонами.

Анализируя систему новейших разрывов северо-западного простирания с право-сдвиговой составляющей и северо-восточного простирания с лево-сдвиговой составляющей, выявлено направление оси горизонтального сжатия, которое изменяется от северо-северо-западного до северо-северо-восточного. Схожие результаты также получены в работе [9, 10], где направление оси горизонтального сжатия получено с помощью структурно-геоморфологического метода Л.А. Сим [11].

Выводы. Таким образом, в результате проведения структурно-геоморфологического анализа рельефа по методу Н.П. Костенко на территории юго-восточной части Горного Алтая выявлены новейшие структуры (разноранговые поднятия, впадины, новейшие главные, второстепенные и локальные новейшие разрывы разной кинематики, и слабые зоны), для которых характерен сводово-глыбовый стиль новейших дислокаций.

Установлены основные направления новейших разрывов и слабых зон – северо-западное, северо-восточное и субширотное, которые в целом наследуют простирания древних разрывов.

Разработаны типовые кинематические модели – «взброс», «сброс», «надвиг», «сдвиг», позволяющие оценить направление поверхности сместителя новейших разрывов в приповерхностном слое по 3D изображениям поверхности Земли. Их применение позволило дополнить имеющиеся данные о разрывах для данного района.

По рельефу, а именно по комбинации новейших разрывов с право- и лево-сдвиговой составляющей северо-западного и северо-восточного простирания соответственно, выявлено,

что на территории юго-восточной части Горного Алтая эти структуры сформировались в обстановке субмеридионального сжатия.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736.
2. Zelenin E.A, Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. 2022. Vol. 14. P. 4489-4503.
3. База данных активных разломов Евразии и прилегающих акваторий: http://neotec.ginras.ru/database.html
4. Emanov A.F., Emanov A.A., Novikov I.S., Gladyshev E.A., Fateev A.V., Polyansky P.O., Shevkunov E.V., Ershov R.A., Arapov V.V., Krivov A.A. Aigulak Focal Area as a result of the Impact of the 2003 Chuya Earthquake on Gorny Altai // Russian Geology and Geophysics. 2024. 65 (11). P. 1–14.
5. Костенко Н.П. Геоморфология. М.: Изд-во МГУ. 1999. 379 с.
6. Панина Л.В. Новейшие структуры и рельеф Земли. М.: ПРО-ПРЕСС. 2019. 115 с.
7. Strak V., Dominguez S., Petit C., Meyer B., Loget N. Interaction between normal fault slip and erosion on relief evolution: Insights from experimental modelling // Tectonophysics. 2011. Vol. 513. P. 1-19.
8. Карта четвертичных образований территории Российской Федерации масштаба 1:2 500 000. Минприроды России, Роснедра, ФГУП «ВСЕГЕИ», ФГУП «ВНИИОкеангеология». СПб. 2014.
9. Маринин А.В., Сим Л.А., Мануилова Е.А., Бондарь И.В., Гордеев Н.А. Новейшее напряженное состояние Чуйско-Курайской впадины и прилегающих структур (юго-восточная часть Горного Алтая) // Наука и технологические разработки. 2022. Т. 101. № 3. С. 33-52.
10. Мануилова Е.А., Сим Л.А. Неотектоника и неотектонические напряжения юго-восточной части горного Алтая // Динамическая геология – проблемы и достижения. Материалы Всерос. науч. конф., посвящ. празднованию 270-летия МГУ им. М.В. Ломоносова и 90-летию со дня рождения Н.В. Короновского, М.А. Гончарова и М.Г. Ломизе. М.: Перо. 2023. С. 65–69.
11. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС. 2017. 234 с.

УДК 528.8(575.2):004.4

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ НА МИНИПОЛИГОНЕ КЕНТОР (СЕВЕРНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ) ПО ДАННЫМ ДЗЗ 2024 Г.

Непеина К.С.
nepeina.k@mail.ru
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

В работе исследуются возможности дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для восстановления метеорологических условий при проведении магнитотеллурического мониторинга миниполигона Кентор (Иссык-Атинский район, Чуйская область, Кыргызстан) и связь с межсессионными вариациями влажности и температуры. С помощью спектрального анализа данных ДЗЗ определены характеристики поверхностного слоя Земли в одном из центральных пунктов магнитотеллурического зондирования. Выбран период наблюдений с мая по октябрь 2024 г. для изучения параметров земной поверхности. Построены графики изменения параметра влажности (NDMI) по данным спутника Sentinel-2 и температурных колебаний Thermal по данным спутника Landsat-9 за полугодовой период при условии 50% облачности. Сделан вывод о разных состояниях почвенного слоя в межсезонье.

Ключевые слова: ДЗЗ, температура, почвы, сезонные вариации, электросопротивление, влажность.

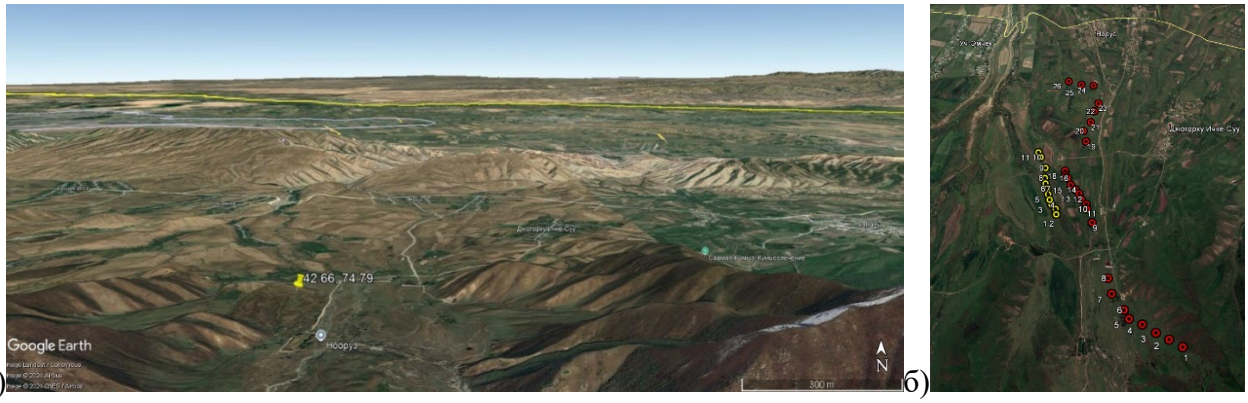
Введение. Электросопротивление почв зависит от различных факторов, включая влажность почвы, температуру, содержание солей и минералов, структуру почвы и другие. В работе [1] сказано: «Сопротивление заземляющего устройства зависит от удельного сопротивления грунта, поэтому при расчетах проектирования и реконструкции по усилению заземляющих устройств необходимо учитывать структуру и слоистости грунтов, климатические условия региона». Чаще всего используются экспериментально-расчетные результаты влияния свойств грунтов на величину их удельных сопротивлений [1]. Метеорологические условия, такие как количество осадков, температура и влажность воздуха, могут значительно влиять на электросопротивление почв. Также изменения температуры и содержание солей в почве могут повлиять на электросопротивление [2-7]. Вода является отличным проводником электричества. Эти колебания могут быть значительными в течение дня, сезона и года, что необходимо учитывать при интерпретации результатов измерений электросопротивления. Основываясь на вышеперечисленных факторах, от которых зависит электрическое сопротивление, поставлены следующие задачи:

- Выбрать пример рабочего участка мониторинговых наблюдений.
- Определить временной отрезок наблюдений.
- Узнать тип поверхности, где ведутся наблюдения.
- Изучить поведение параметров влажности и температуры по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Целью данного исследования является восстановление метеорологических условий для приповерхностного (почвенного) слоя участка рассмотрения и установление закономерностей и обобщенных факторов при измерениях электрического сопротивления.

Основная часть. Изучаемая в данном исследовании область – миниполигон Кентор – это ровная площадка, расположенная в предгорьях Киргизского хребта вблизи с. Норус (Иссык-Атинский район, Чуйская область, Кыргызстан) на высоте ~1800 м н.у.м. (рис. 1). Ежегодно с 2014 г. полевой отряд глубинных магнитотеллурических зондирований ГМТЗ НС РАН проводит весеннюю и осеннюю сессии магнитотеллурического мониторинга на миниполигоне по двум профилям – «Центральный» (С1-С11) и «Восточный» (Е1-Е11, Е13-Е22, Е24, Е26) – примерной длительностью 10-20 часов в каждом пункте наблюдения.

«Локальные профили МТЗ пересекают предгорную Байтикскую впадину в субмеридиональном направлении, их протяженность составляет от 1.1 км («Кентор-Центральный») до 4.7 км («Кентор-Восточный»), шаг зондирований от 100 до 200 м» [8]. Обычно весенняя сессия приходится на май месяц, а осенняя – на октябрь. Поэтому для демонстрации разницы метеорологических условий при проведении зондирований выберем отрезок наблюдений между маем и октябрем 2024 г., так как весенняя сессия пришлась на третью неделю мая с 14 числа, а осенняя – на 10-16 сентября. Иногда работы осложняются неблагоприятными погодными условиями – ливнями, порывистым ветром. Началу работ всегда предшествует проведение калибровок регистраторов и датчиков с последующей тестовой записью. Мониторинг проводится по стандартной методике МТЗ с использованием аппаратуры Phoenix MTU-5 в наборе с электрическими диполями длиной 50 м и индукционными датчиками МТС-50 и неполяризующимися электродами. Ориентации измерительных установок и их расположение полностью повторяли предшествующие полевые работы [9]. Обработку записей проводили в программе SSMT 2000 и в программе EPI-KIT геофизической компании ООО «Северо-Запад» [10]. В предыдущих работах были построены геоэлектрические разрезы для этой зоны до глубин ~1.5 км [11-13]. На этих моделях были показаны зоны активных разломов – Шамси-Тюндюкского и Байтикского. В результате режимных наблюдений был накоплен ряд геоэлектрических разрезов с характерными сезонными вариациями электромагнитных параметров по исследуемым профилям, что дало веские основания для обнаружения эффекта «размытия» границ геоэлектрических тел. Вариации параметров геологической среды приводят к численным изменениям при расчете электрического сопротивления. Как следствие, наблюдаются незначительные трансформации основных геоэлектрических объектов, полученных при инверсии электромагнитных данных.



а) б)

Рисунок 1 – Цифровые изображения из сервиса ©Google Earth (https://earth.google.com/) (для миниполигона Кентор: а) общий вид с основными объектами инфраструктуры, желтым маркером отмечена центр миниполигона с координатами 42.66° с.ш., 74.49° в.д., б) расположение пунктов на профилях «Восточный» (желтые точки) и «Центральный» (красные точки) (с сайта НС РАН http://www.gdirc.ru/)

Для того, чтобы понять, какой тип/состав грунтов находится на поверхности земли, где ведется мониторинг, в первую очередь, изучаются полевые условия, материалы и цифровые фотографии, в том числе и спутниковые (например, Google Earth). Затем для уточнения обращаются к данным ДЗЗ и выбирают доступные инструменты. В данном случае, оценивая спектральные характеристики по данным Sentinel-2 (рисунок 2), можно судить о том, что получаемая кривая для центра миниполигона (point of interest – салатовая линия) ближе всего к коричневой кривой, отвечающей классу почвы (soil, brown sand) по данным USGS Spectral Library, ECOSTRESS Spectral Library (NASA) [14]. Это на самом деле соответствует почвам, судя по рис. 1, тем более, при проведении МТЗ, необходим рыхлый грунт для заземления неполяризующихся электродов и прикапывания индукционных датчиков.

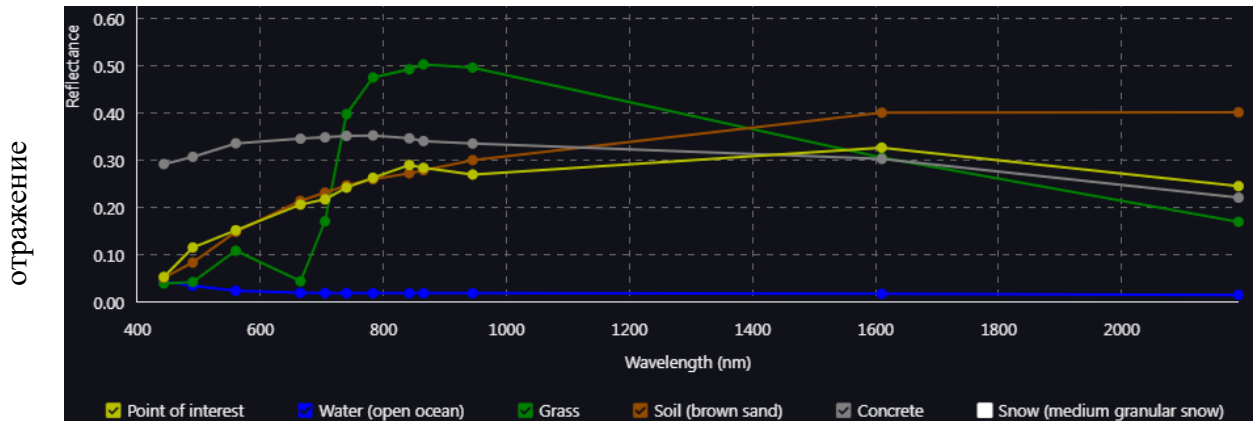
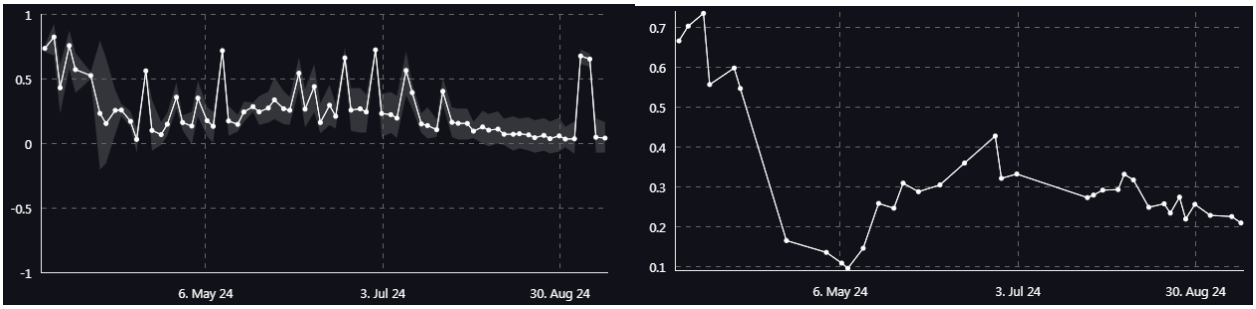


Рисунок 2 – Спектральные характеристики отражательной способности по спутниковым данным Sentinel-2, USGS Spectral Library, ECOSTRESS Spectral Library (NASA) для центра миниполигона Кентор [14]

Согласно общепризнанной практике, для анализа влажности стоит выбрать нормализованный разностный индекс влажности (англ. Normalized Difference Moisture Index, NDMI или MI), который определяет уровень содержания влаги в растениях, используя комбинацию спектральных диапазонов в ближнем инфракрасном (NIR) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах, и является надежным индикатором дефицита влаги в почве. Если MI>0, то это отвечает влажным условиям (осадков больше, чем испаряется – синий цвет), иначе если MI<0, то наблюдаются засушливые условия (испарение превышает количество осадков – красный цвет). Этот индекс получают по данным спутника Sentinel-2 [15].

Для анализа температурных колебаний следует обратиться к каналам спутника Landsat 9. Один из сенсоров – Thermal InfraRed Sensor (TIRS) – работает в длинноволновом инфракрасном диапазоне и регистрирует поток теплового излучения и способен измерять колебания температуры земной поверхности (не атмосферы) [16, 17]. Каналы Landsat 8 и 9 получают изображения с умеренным разрешением – от 15 м до 100 м на пиксель. В данном случае сосредоточимся на обобщенной оценке для уточнения размаха температурных колебаний в зависимости от сезона.

Основные пороговые ограничения, которые были приняты для корректности выводов, это установления порога облачности на уровне не более 50% и перекрытия тайлов (снимков) не менее 70% для выбранной площади. На рис. 3 показан график NDMI за полгода между сессиями магнитотеллурического мониторинга. Видно, что более «сухая» погода была в мае по сравнению с концом августа-началом сентября.



а) б)

Рисунок 3 – График изменения индекса влажности (NDMI) миниполигона Кентор за 6 месяцев по спутнику Sentinel-2: а) для всей площади, б) для центра миниполигона [14]

Полугодовые (май-сентябрь 2024 г.) вариации температуры по данным ДЗЗ TIRS показаны на рис. 4. Заметно, что одно из значений (четвертое измерение слева) ошибочно – показывает сильно отрицательное значение (менее -30°). В остальном тепловой показатель ведет себя объяснимым образом, повышаясь от весны к осени, что соответствует климатическим условиям региона [15].

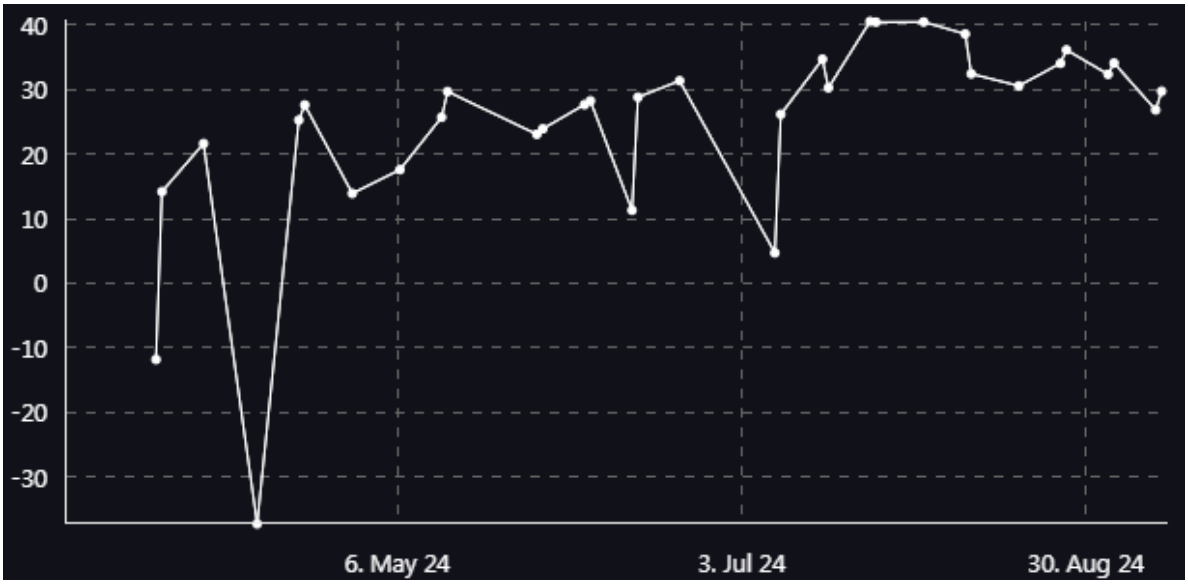


Рисунок 4 – Температура земной поверхности за 6 месяцев по данным Landsat 8-9 [15]

Выводы. Наглядно показано, что условия проведения магнитотеллурического мониторинга различны в соответствующие сезоны весны и осени, судя по данным ДЗЗ о состоянии почвенного слоя, рассматриваемого миниполигона Кентор. Сезонные вариации подстилающей поверхности в аридных условиях и их влияние на параметры электричества могут давать искажения в измерениях. Общая тенденция свидетельствует в пользу того, что с со сменой сезона от весны к осени повышается температура земной поверхности и снижается её влажность. Для продолжения работы стоит проанализировать стандартизованный индекс осадков (Standardized Precipitation Index, SPI) для сравнения результатов измерений электрического сопротивления от года к году в зависимости от метеоусловий. Недостатком данного метода является дискретность полученных данных – пролет спутника над заданной площадью осуществляется раз в 5 дней, а ограничение на параметр облачности уменьшает выборку показаний.

Благодарности. Автор благодарит проект DEvision (https://www.devision.cloud/) за ознакомление с сервисами ДЗЗ и сотрудников кафедры «Геодезия и геоинформатика» КГТУ имени И. Раззакова за образовательный доступ к ArcGIS.

Финансирование. *Работа подготовлена в рамках государственного задания НС РАН*.

Литература

1. Джолдошбеков Б.Ж., Джусупбекова Н.К., Аркарчиева М.К. Исследование влияния сопротивления грунта на сопротивление заземляющих устройств (на примере Нарынской области) // Проблемы автоматики и управления. 2022. № 2 (44). С. 70-76.
2. Дещеревский А.В., Модин И.Н., Сидорин А.Я. Сезонные вариации удельного электрического сопротивления в верхних слоях земной коры // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45. № 3. С. 68-83. https://doi.org/10.21455/VIS2018.3-6.
3. Непеина К.С., Юнусов А.И., Валуйский А.Ю. Количественные оценки корреляции суточных вариаций кажущегося сопротивления верхней части разреза по данным комплекса "Скала-48" // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных

орогенов: Тез. докл. IX Междунар. симп., г. Бишкек, 24–29 июня 2024 г. Бишкек: Научная станция РАН. 2024. С. 299.
4. Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженно-деформированного состояния среды // Геофизические исследования. 2014. Т. 15. № 4. С. 54-63.
5. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Матюков В.Е. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2011. Т. 11. № 4. С. 29-40.
6. Кириченко А.В., Кондрашкин Б.Е., Егоров Ю.В., Тен К.М. Изучение почвенно-грунтовой толщи с помощью новой технологии электроразведки // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2010. № 4. С. 36-40.
7. Мучкинова Л.И. Метод оценки электрического потенциала влажных почвогрунтов // Вестник Учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. 2014. № 6. С. 235-247.
8. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Детализация геоэлектрической структуры зоны сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта (Миниполигон Кентор) // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2018. Т. 18. № 12. С. 134-140.
9. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Непеина К.С., Забинякова О.Б. Особенности применения методов магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования в горах Тянь-Шаня // Наука и технологические разработки. 2023. Т. 102, № 2-3. С. 4-39. https://doi.org/10.21455/std2023.2-3-1.
10. Сайт ООО «Северо-Запад». URL [https://nw-geo.ru/]. Дата обращения 21.11.2024.
11. Баталева Е.А., Рыбин А.К., Непеина К.С., Матюков В.Е. Геоэлектрическая модель и мониторинговые исследования миниполигона Кентор (Северный Тянь-Шань) // Материалы VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна, г. Москва, 04–07 октября 2021 г. М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 2021. С. 311-317.
12. Matiukov V.E., Bataleva E.A. Analysis of synchronous magnetotelluric and magnetovariational regime observations for the Kentor mini test polygon // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. 929. 012023. http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/929/1/012023.
13. Матюков В.Е., Баталева Е.А. Анализ синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных данных для миниполигона «Кентор» // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Тез. докл. VIII Междунар. симп., г. Бишкек, 28 июня–02 июля 2021 г. Бишкек: Научная станция РАН. 2021. С. 231-233.
14. Портал данных ДЗЗ Sentinel-2. URL [https://apps.sentinel-hub.com/]. Дата обращения 13.12.2024.
15. Li Y., Song Y., Orozbaev R., Dong J., Li X., Zhou J. Moisture evolution in Central Asia since 26 ka: Insights from a Kyrgyz loess section, Western Tian Shan // Quaternary Science Reviews. 2020. 249. 106604. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106604.
16. EOS Landsat-8. URL [https://eos.com/ru/blog/kombinatsii-kanalov-landsat-8/]. Дата обращения 18.12.2024.
17. Жантаев Ж.Ш., Ахмеджанов А.Х., Каипов И.В. Определение температурных полей земной поверхности по данным спутникового зондирования // Гидрометеорология и экология. 2010. № 2 (57). С. 17-23.

УДК 550.34

НОВОЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ СОБЫТИЕ В ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОМ АВЛАКОГЕНЕ

Пивоваров Р.С., Ефременко М.А., Стволина З.В.
Q5000@mail.ru
Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск, Россия

Представлены первые результаты анализа инструментальных данных землетрясения, которое произошло 1 февраля 2025 г. в $16^h21^m18^s$ с m_b=3.6 между населенными пунктами Полтава и Решетиловка. Координаты φ=*49.59° N,* λ=*34.26° E, глубина очага h=3 км. Гипоцентр рассматриваемого землетрясения находится в юго-западной части Восточно-Европейской платформы, в зоне сочленения северного склона Украинского щита и южного крыла Днепровско-Донецкого авлакогена. В регионе и ранее были зарегистрированы тектонические землетрясения. В работе рассматриваются волновые формы и спектрограммы трех ощутимых землетрясений, произошедших в этом районе.*

Ключевые слова: землетрясение, гипоцентр, магнитуда, Восточно-Европейская платформа, Днепровско-Донецкий авлакоген, Украинский щит.

Введение. Южная часть Восточно-Европейской платформы (ВЕП) относится к районам со слабой сейсмичностью, подавляющее большинство сейсмических событий регистрируются только инструментально, но бывают и ощутимые землетрясения. Так 01.02.2025 г. в $16^h21^m18^s$ UTC с магнитудой M=3.4 (m_b=3.6; K_P=10.2) произошло ощутимое землетрясение между г. Полтава и с. Решетиловка. Координаты φ=49.59º N, λ=34.26º E, глубина очага около 3 км. Местные жители, по сообщениям в сети Интернет, ощущали землетрясение: в многоэтажных домах дрожала мебель, раскачивались люстры и звенела посуда. Сообщений о разрушениях в инфраструктуре и пострадавших среди населения не сообщалось [1].

Наиболее близкие и сильные землетрясения к рассматриваемому сейсмическому событию, произошли: 01 марта 2024 г. 00^h22^m с M=3.3 (m_b=3.5; K_P=9.3), координаты φ=49.48º N, λ=34.18º E, глубина очага h=5 км и 3 февраля 2015 г. 05^h56^m с M=3.9 (m_b=4.6; K_P=11.1) [2] и координатами φ=50.49º N, λ=34.22º E, глубина очага h=10 км на границе Полтавской и Сумской областей [3].

Исходные данные. Описываемое землетрясение было зарегистрировано сейсмическими станциями Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН (ФИЦ ЕГС РАН) и других государств. Его предварительные параметры были определены в Службе срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН (ССД), г. Обнинск, куда поступают, близко к реальному времени, цифровые записи со станций, работающих не только на территории России, но и станций, входящих в Глобальную мировую сеть. Это позволило по 21 станции, расположенных на эпицентральных расстояниях от 3.5 до 19 градусов выделить вступления сейсмических фаз от этого землетрясения и оценить его основные параметры.

Для автоматического детектирования событий в ССД используется программа AUZ. Первый предварительный расчёт параметров гипоцентра, проводился программой AssocW (автор А.П. Акимов) [4]. Полученный результат применяется как первое приближение для оценки гипоцентра по программе WSG [5]. Для локализации используется глобальный годограф IASPEI91 [6]. С целью уточнения локализации использовалась скоростная модель Ю.К. Щукина [7, 8].

В представленной работе рассмотрены волновые формы и спектрограммы записей трех землетрясений, произошедших в Днепровско-Донецком авлакогене, полученные сейсмической станцией «Сторожевое» (VSR).

Пункт сейсмологических наблюдений «Сторожевое» находится в северной части села Сторожевое 1, которое расположено на правом высоком берегу реки Дон, в пределах восточного склона Среднерусской возвышенности. Координаты места установки сейсмической станции: φ=51.2161º N λ=39.1662º E (рис. 1). Глубина залегания кристаллического основания составляет +25 м, отметка дневного рельефа – +180 м. Осадочный чехол мощностью 150-160 м состоит в основном из глины с прослоями известняков, иногда – известняки с прослоями глин, мела. В пункте наблюдений установлен сейсмический регистратор UGRA и широкополосные сейсмоприемники СМ3-ОС, размещенные на бетонном постаменте.

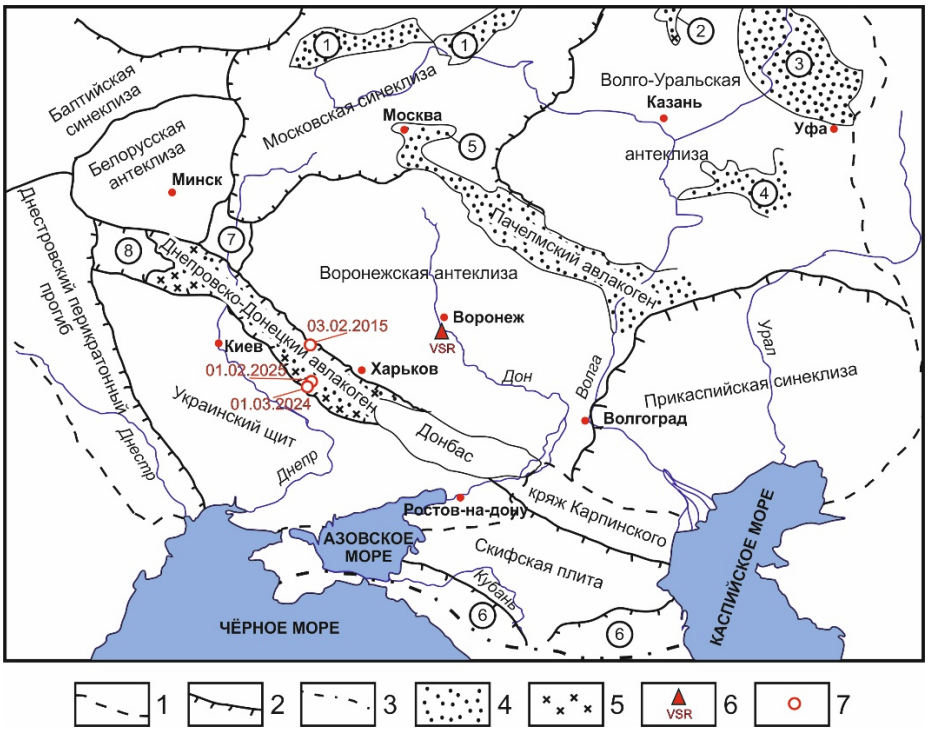


Рисунок 1 – Фрагмент **с**хемы тектонического районирования Русской платформы [*7*] с эпицентрами землетрясений. 1 – граница Русской платформы, 2 – граница основных структур, 3 – южная граница Скифской плиты, 4 – докембрийские авлакогены, 5 – палеозойские авлакогены, 6 – сейсмическая станция, 7 – эпицентр землетрясения. Цифры в кружках: 1–4 – авлакогены (1 – Среднерусский, 2 – Кажимский, 3 – Колтасинский, 4 – Средноводско-Абдулинский); 5 – Московский грабен, 6 – Предкавказский передовой прогиб, 7 – Жлобинская седловина, 8 – Полесская

В центральной части Днепровско-Донецкого авлакогена (ДДА) ранее были зарегистрированы тектонические землетрясения. Наиболее близкими к описываемому землетрясению произошли: 01.03.2024 г. и 03.02.2015 г. Землетрясение 01.03.2024 г. произошло на расстоянии около 14 *км* от рассматриваемого землетрясения, на южном борту ДДА, граничащем с Украинским щитом (УЩ). Гипоцентр землетрясения 03.02.2015 г. расположен на северном борту ДДА, который граничит с Воронежским кристаллическим массивом на расстоянии 102 км от эпицентра землетрясения 2025 г. (рисунок 1).

Тектоника района. Днепровско-Донецкий авлакоген является одной из крупнейших морфоструктур в рельефе фундамента Восточно-Европейской платформы. По геофизическим данным в пределах ДДА поверхность фундамента опущена в юго-западной части на глубину 2.5 км, а в юго-восточной части она понижается до 10 и даже 25 км. В структуре Днепровско-Донецкого авлакогена выделяются три основных тектонических элемента – центральная (Днепровский грабен), а также склоны Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и Украинского щита [9, 10].

Ранее в этом районе были проведены работы по глубинному сейсмическому зондированию (ГСЗ) [11]. Один из сейсмических профилей проходил вкрест простирания ДДА. По результатам ГСЗ отмечено, что в районе эпицентра землетрясения присутствуют глубинные разломы. Мощность осадочного чехла достигает около 10 км.

ДДА испытал несколько стадий тектонической активизации, включающих проявления как растяжения, так и сжатия. В период мезозоя и кайнозоя эти процессы изменялись под воздействием орогенных движений, влияющих на осадочные отложения. Важным аспектом является наличие многочисленных тектонических разломов, пересекающих регион, которые стали каналами для миграции жидкостей, образующих месторождения углеводородов.

В районе Днепровско-Донецкого авлакогена и северного склона Украинского щита наблюдается блоковое строение, причем можно предположить, что отдельные блоки сдвинуты друг относительно друга не только по вертикали, но и по горизонтали, а именно в южном направлении [11].

Результаты и обсуждения. Был проведен анализ записей волновых форм трех сейсмических событий. На рис. 2 представлены записи вертикальной компоненты волнового поля землетрясений, зарегистрированных сейсмической станцией VSR. Отчетливо выделяются объемные волны: *Pn*, *Pg*, *Lg,* поверхностные волны не выделяются. Хорошо видно, что записи двух землетрясений (верхняя и средняя сейсмограммы), гипоцентры которых находятся в зоне сочленения ДДА и УЩ на практически одном эпицентральном расстоянии (Δ=3.2º) от станции близки по форме и амплитуде, когда как запись землетрясения 03 февраля 2015 г., произошедшего в зоне сочленения ДДА и ВКМ незначительно отличается, это связано с разными трассами на станцию VSR, и с разными глубинами гипоцентров. На сейсмограммах всех трех землетрясений доминирует волна *Lg*, что характерно для континентальных районов со слабым поглощением поперечных волн.

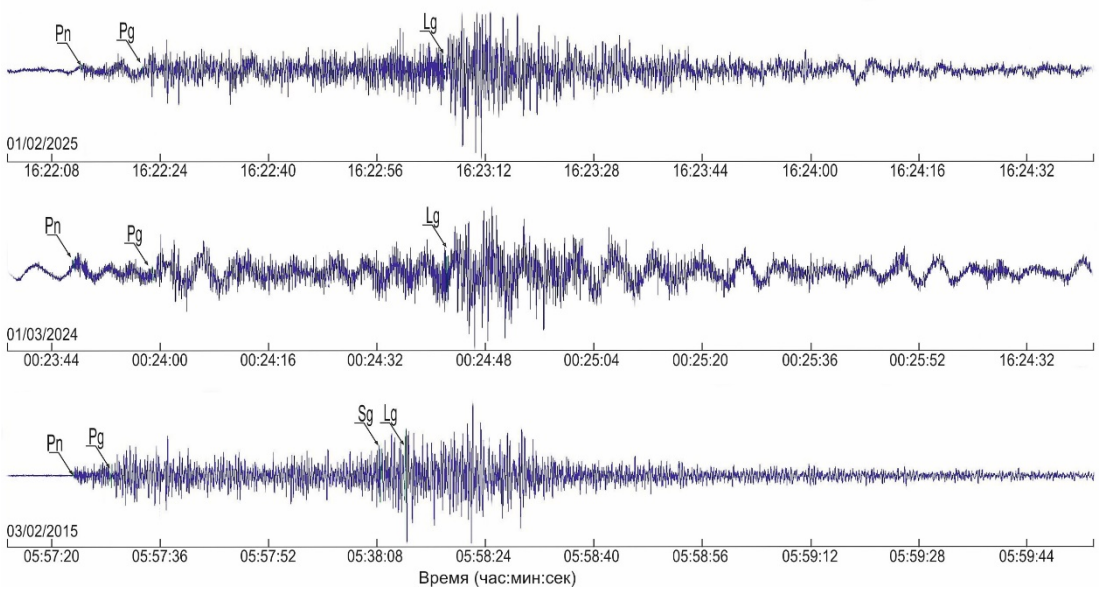


Рисунок 2 – Записи вертикальной компоненты волнового поля землетрясений по данным сейсмической станции VSR (без применения фильтрации): 01.02.2025 г., 01.03.2024 г., 03.02.2015 г.

Пример спектрального анализа в виде спектрограмм показан на рис. 3 для записей вертикальных компонент станций «Сторожевое»–VSR. Более светлые участки показывают вступления основных волн. Для разных волн они различны: для *Pn*, *Pg* достаточно узкая полоса 2-4 *Гц*, волны *Lg* наиболее устойчиво выражены в довольно широком диапазоне частот от 1 до 8 *Гц*, максимум спектра *Lg*-волны приходится на 2-4 *Гц*.

Благодаря анализу спектрограмм, хорошо видны отличия землетрясений, произошедших на разных бортах Днепровско-Донецкого авлакогена. На спектрограмме землетрясения 03.02.2015 г. выделяется поверхностная волна.

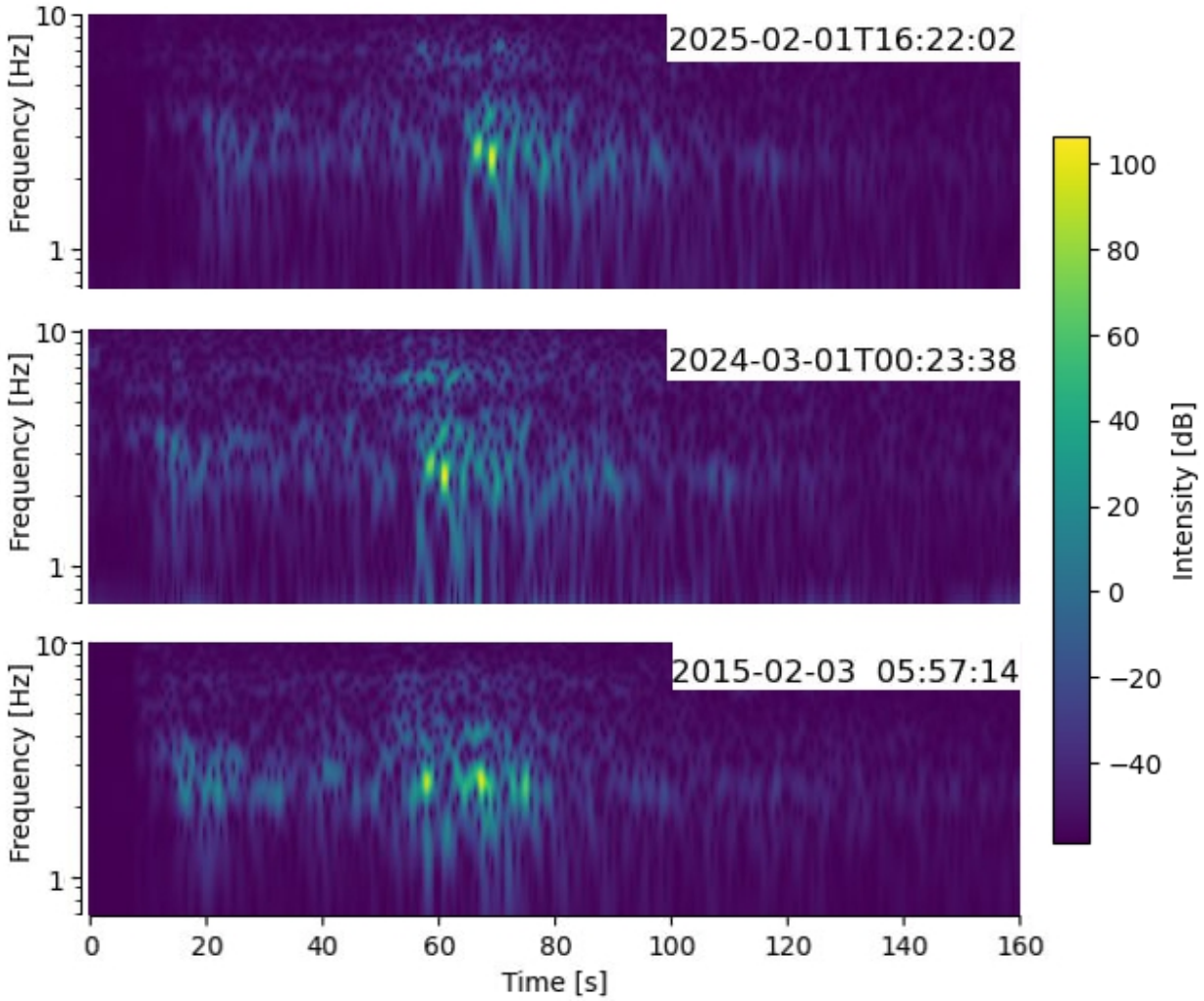


Рисунок 3 – Спектрограмма вертикальной компоненты сейсмической станции «Сторожевое (VSR) землетрясений: 01.02.2025 г., 01.03.2024 г., 03.02.2015 г., построенная в программе ObsPy. Вертикальная шкала слева показывает частоты, цветовая колонка справа – относительный уровень спектра мощности

Выводы. В центральной части ДДА были зарегистрированы тектонические землетрясения. Землетрясение, произошедшее в зоне сочленения северного склона Украинского щита и южного крыла Днепровско-Донецкого авлакогена 1 февраля 2025 г., еще раз подтвердило, что платформенные территории не являются сейсмически пассивными. Землетрясение зарегистрировано большим количеством сейсмических станций, как на территории России, так и на территориях сопредельных государств, что позволило более точно определить координаты очага события. Это землетрясение, как и ранее зарегистрированные является верхнекоровым, с глубиной очага до 10 км.

Сравнительный анализ волновых форм и спектрограмм, полученных на сейсмической станции VSR, показал, что события, произошедшие в разное время, с разными координатами имеют схожую форму записи и свидетельствуют о тектонической природе. В районах гипоцентров произошедших толчков, имеются глубинные тектонические нарушения, следовательно, очаги событий имеют естественную природу. Одной из причин возникновения землетрясений может выступать внутриплатформенная деформация.

В связи с тем, что на территории Полтавской области эксплуатируются нефтегазовые месторождения, возможно проявление инициированной сейсмичности [12].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00604-25) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

1. В Полтавской области произошло землетрясение // РИА НОВОСТИ [сайт]. – URL: https://ria.ru/20250201/zemletryasenie-1996842450.html (дата обращения 01.02.2025).
2. Габсатарова И.П., Ассиновская Б.А., Баранов С.В., Карпинский В.В., Конечная Я.В., Мунирова Л.М., Надёжка Л.И., Никулин В.Г., Носкова Н.Н., Петров С.И., Пивоваров С.П., Санина И.А. Сейсмичность Российской части Восточно-Европейской платформы и ближайшего окружения в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 24 (2015 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2021. С. 182–191. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.17. EDN: TDOJDR
3. Габсатарова И.П., Бабкова Е.А., Надежка Л.И., Пивоваров С.П., Семенов А.Е., Кендзера А.В., Пигулевский П.И., Щербина С.В., Чалый О.О., Ильенко В.А. Землетрясение 3 февраля 2015 г. на границе Полтавской и Сумской областей Украины по макросейсмическим и инструментальным данным // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2016. № 1. С. 115–123. EDN: VVSIYH
4. Коломиец М.В., Дуленцова Л.Г., Рыжикова М.И. Служба срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. 2019. Т. 1. № 1. С. 84–91. DOI: 10.35540/2686-7907.2019.1.08. EDN: BHZSEQ
5. Акимов А.П., Красилов С.А. Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020 г.
6. Kennett B.L.N. (Ed.). IASPEI 1991 Seismological Tables. Australian National University: Research School of Earth Sciences. 1991. 167 p.
7. Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН. 2003. 299 с. EDN: QKEKMH
8. Санина И.А., Куликов В.И., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л., Волосов С.Г. Центральный район Европейской части России и Курско-Белгородский район. Гл. 4. Региональные сейсмические наблюдения взрывов и землетрясений // Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / Под ред. В.В. Адушкина и А.А. Маловичко. М.: ГЕОС. 2013. С. 140–164. EDN: SHAMBV
9. Андреева Р.И. К вопросу о внутренней структуре складчатого фундамента Днепровско-Донецкой впадины // Советская геология. 1961. № 6. С. 17–28.
10. Орлов Р.А., Ефременко М.А. Сейсмотектоника Днепрово-Донецкой впадины и юго-западного склона Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2018. № 4. С. 67–70. DOI: 10.17308/geology.2018.4/1654. EDN: YSOGEP
11. Соллогуб В.Б. Результаты глубинных сейсмических зондирований на Украине // Геофизические исследования строения земной коры Юго-Восточной Европы. Верхняя мантия. М.: Наука. 1967. № 5. С. 8–19.
12. Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Глубинное строение и геотектоническое развитие / Гавриш В.К., Забелло Г.Д., Рябчун Л.И. и др. Киев: Наукова Думка. 1989. 202 с.

УДК 550.34

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАНЦИЙ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Пивоваров Р.С.
Q5000@mail.ru
Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск, Россия

Проведен сравнительный анализ результатов обработки телесейсмических землетрясений, зарегистрированных сейсмическими станциями, установленных в геологических условиях Воронежского кристаллического массива (ВКМ), относительно сводок о срочных землетрясениях (ССД ФИЦ ЕГС РАН) за период 2021-2023 гг. Показано, что общий процент зарегистрированных землетрясений сейсмостанциями ВКМ составляет около 35% от зарегистрированных ССД.

Ключевые слова: Воронежский кристаллический массив, телесейсмические землетрясения, эпицентральное расстояние, магнитуда.

Введение. На территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ) на протяжении длительного периода времени функционирует сеть сейсмических станций, которая позволяет проводить как текущий мониторинг глобальной и региональной сейсмической обстановки, так и накапливать материал для проведения более детальных сейсмологических исследований [1, 2].

В ранее опубликованных работах было показано, что записи сейсмических событий на разных станциях весьма специфичны и зависят от геологического строения места расположения сейсмических станций [3-7]. Были проведены работы по оценке чувствительности, как отдельных станций, так и сети в целом [8, 9]. Рассматривались энергетические характеристики регистрируемых сейсмических событий [10]. Были определены магнитудные поправки [11, 12].

Сетью станций на территории ВКМ регистрируются сейсмические события как природного характера (телесейсмические, местные и локальные землетрясения), так и техногенные (промышленные взрывы и др.) В работе рассматриваются только телесейсмические землетрясения. Эти землетрясения были зарегистрированы широкополосными станциями – «Сторожевое» (VSR), «Новохоперск» (VRH) и «Галичья гора» (LPSR). Часть землетрясений не была зарегистрирована одной или несколькими станциями, причины выяснения этого факта являются актуальной проблемой, которая позволит решить, как научные, так и производственные задачи по улучшению работы сети станций.

Аппаратура и места наблюдений. Сейсмические станции установлены в различных геолого-тектонических условиях на территории ВКМ.

- *Станция VSR* расположена в центральной части Лосевской шовной зоны, в одноименном селе Сторожевое. Подпочва станции – суглинок, на глубине восьми метров залегает мел.
- *Станция VRH*, самая восточная, находится в Хоперском блоке ВКМ, в непосредственной близости простирается субмеридианальный разлом четвертого ранга. Станция установлена в Новохоперском заповеднике Подпочва станции – суглинок.
- *Станция LPSR* находится в северной части Лосевской шовной зоны. Подпочва станции – известняк. Станция установлена в заповеднике Галичья гора.

Все пункты наблюдения оборудованы постаментами.

В рассматриваемый промежуток наблюдений на всех пунктах наблюдений установлены сейсмические регистраторы UGRA и широкополосные сейсмоприемники СМ3-ОС [13]. Схема расположения рассматриваемых станций представлена на рис. 1.

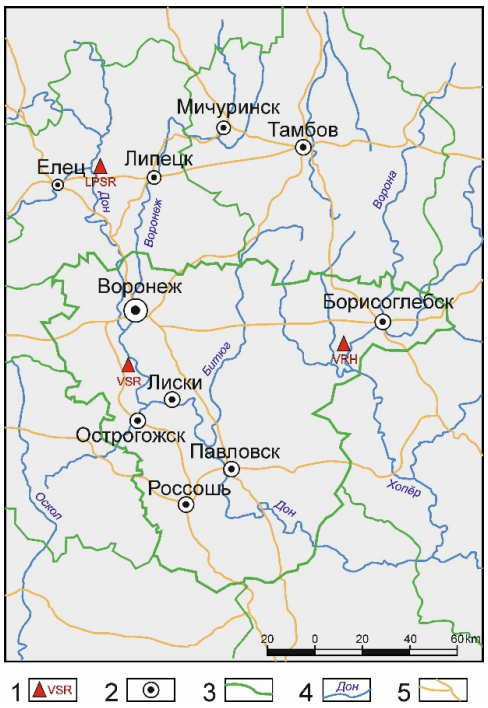


Рисунок 1 – Схема расположения сейсмических станций

Данные. По результатам обработки и интерпретации записей, полученных на сейсмических станциях, работающих на территории ВКМ, в соответствии с «Инструкцией…» [14] составляются сейсмологические бюллетени.

Обработка записей сейсмических станций производится с использованием программного комплекса WSG [15, 16].

В работе использовались ежедекадные сейсмологические бюллетени станций и оперативные сводки службы срочных донесений (ССД) Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба» Российской академии наук (ФИЦ ЕГС РАН).

Необходимо отметить, что если по одной из сейсмических станций ВКМ отсутствовали данные, то этот промежуток времени не учитывался. Так же в работе не учитывались сейсмические события, зарегистрированные сейсмическими станциями ВКМ, но отсутствовавшие в сводке ССД.

Всего за указанный промежуток наблюдений было 15736 сообщений службы ССД ФИЦ ЕГС РАН, из них сетью сейсмических станций ВКМ зарегистрировано 5697 телесейсмических землетрясений из них по станции VSR – 5056, по станции VRH - 4655, по станции LPSR - 4732, Результаты регистрации представлены в виде графиков на рисунке 2.

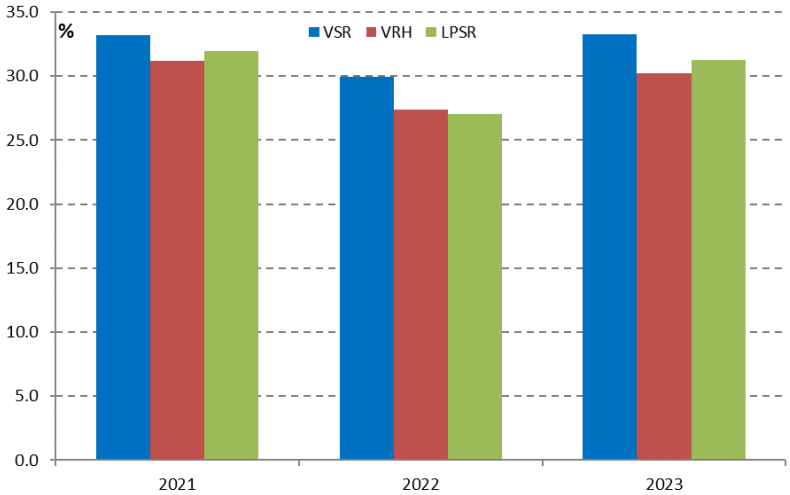


Рисунок 2 – Количество зарегистрированных землетрясений относительно ССД в процентах по каждой станции

Результаты и обсуждения. Сейсмические станции, работающие на территории ВКМ, регистрируют телесейсмические землетрясения в широком диапазоне магнитуд и эпицентральных расстояний, в отдельных случаях, практически с противоположного конца Земли. Это иллюстрирует рис. 3, на котором красным цветом показаны сейсмические события, отмеченные в ССД, синем цветом – зарегистрированные сетью станций на территории ВКМ. Так как служба ССД, в своей работе использует данные всех сейсмических станций, в том числе и расположенных в сейсмоактивных регионах, соответственно, количество достаточно слабых землетрясений, произошедших в сейсмоактивных регионах России, будет высоким. Для сейсмических станций на территории ВКМ, слабые землетрясения в регионах Кавказа, Байкала, Сахалина, Курильских островов и Камчатки находятся за порогом чувствительности [4].

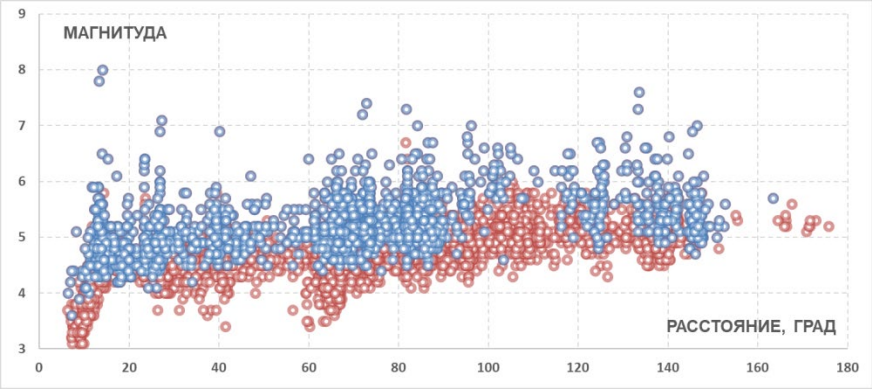


Рисунок 3 – Землетрясения, отмеченные в ССД (красные) и зарегистрированные станциями на территории ВКМ (синие), по магнитуде и расстоянию

После обработки и интерпретации, данных сети сейсмических станций ВКМ были построены карты эпицентров зарегистрированных телесейсмических землетрясений. В основном, землетрясения происходили в сейсмоактивных регионах планеты и на границах тектонических плит (рисунок 4). В дальнейшем, из сейсмических бюллетеней станций сети ВКМ и сводок ССД, выбраны эпицентры землетрясений, которые не были зарегистрированы одной из станций (рисунок 5).

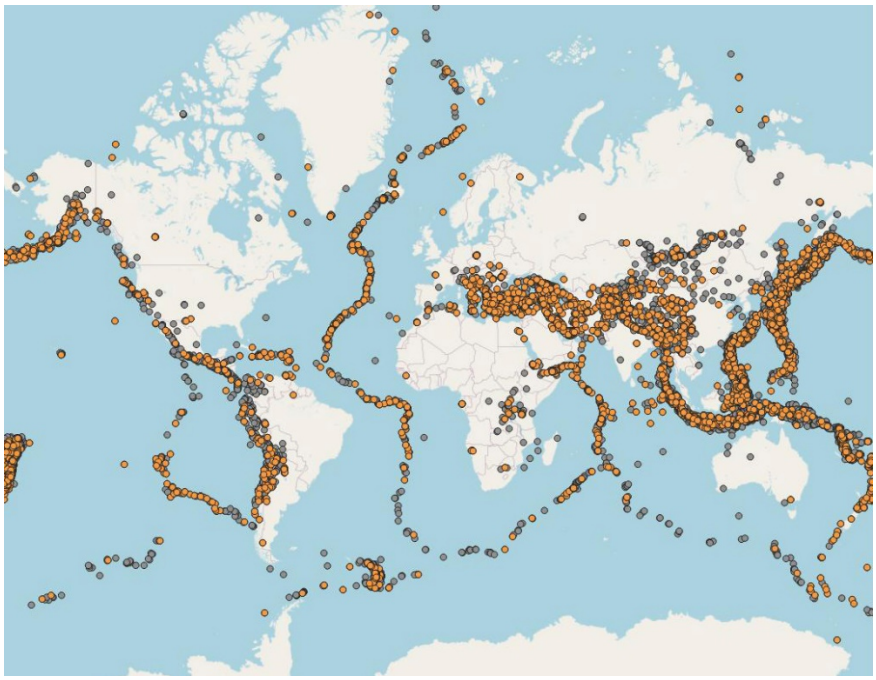


Рисунок 4 – Карта эпицентров землетрясений, (серые ССД, желтые ВКМ)

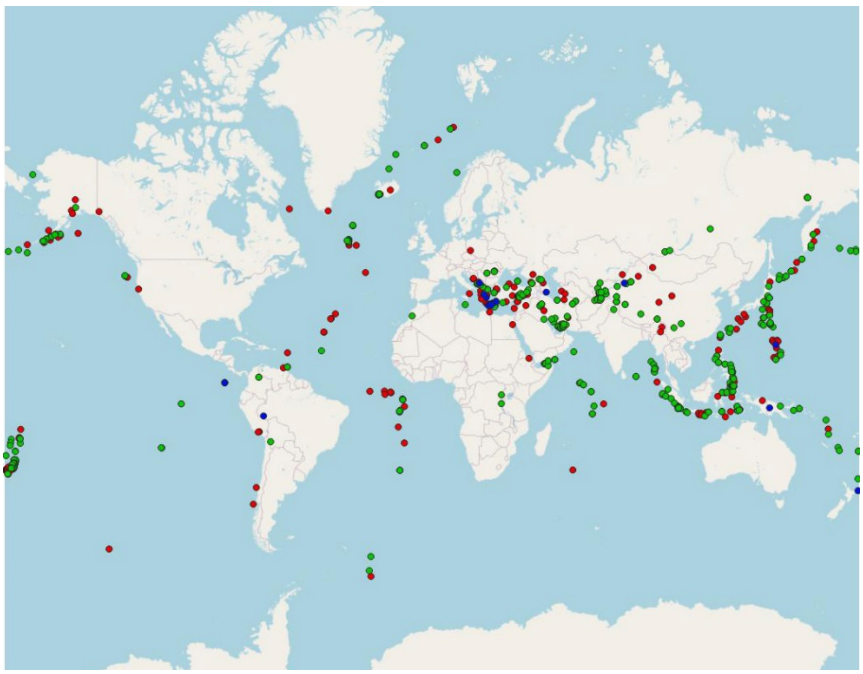


Рисунок 5 – Карта эпицентров землетрясений, не зарегистрированных одной из станций ВКМ (VSR – синий, VRH – красный, LPSR – зеленый)

Видно, что пропуски сейсмических станций VRH и LPSR достаточно равномерны и не выделяются особой систематичностью. Сейсмическая станция VRS значительно реже не регистрирует телесейсмические события относительно других сейсмических станций ВКМ. Не зарегистрированные события находятся в основном в Средиземном море, южнее Греции.

Для анализируемых событий эпицентральные расстояния и азимут на эпицентр близки, плохая регистрация сейсмических событий из определенного района может быть связана, как с геологическими условиями в месте установки станции, так и с трассами распространения сейсмических волн [3, 7, 17].

Выводы. Сейсмическими станциями ВКМ достаточно уверенно регистрируются сейсмические события в большом диапазоне эпицентральных расстояний и азимутов. Пропуски в регистрации телесейсмических событий относительно ССД связанны с малой апертурой сети сейсмических станций на ВКМ и отдалённостью от сейсмоактивных регионов. Тем не менее сеть станций ВКМ регистрирует более 35% событий, от числа отмеченных в ССД, что вносит вклад в повышение точности локации, глубины и оценке энергетических характеристик землетрясений. Сейсмические станции VRH и LPSR уступают станции VSR в эффективности мониторинга телесейсмических землетрясений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00604-25) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

1. Надёжка Л.И., Сафронич И.Н., Орлов Р.А., Пивоваров С.П. Воронежский кристаллический массив // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. Обнинск: ГС РАН. 2006. С. 193–196.
2. Надёжка Л.И., Пивоваров С.П., Пивоваров Р.С., Семёнов А.Е., Ефременко М.А., Калинина Э.В., Семенов А.М., Колесников И.М., Савенков А.В. Некоторые результаты сейсмических наблюдений на территории Воронежского кристаллического массива за 2013–2015 гг. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2016. С. 224–227.

3. Заклюковская А.С., Ефременко М.А., Пивоваров Р.С. Влияние геологических условий в районе установки сейсмических станций на запись телесейсмических событий // Материалы XIV Уральской молодежной научной школы по геофизике. Пермь: ГИ УрО РАН. 2013. С. 103-107.
4. Ефременко М.А., Калинина Э.В., Заклюковская А.С., Пивоваров Р.С. Оценка эффективности регистрации далеких землетрясений сейсмической станцией «Сторожевое» // XVI Уральская молодежная научная школа по геофизике. Пермь. 2015. С. 130-133.
5. Пивоваров Р.С., Ефременко М.А., Семенов А.Е. Особенности характера записи сейсмических событий в зависимости от района размещения сейсмической станции // XI Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сб. докл. Екатеринбург. 2010. С. 179-181.
6. Пивоваров С.П., Семенов А.Е., Савенков А.В., Ефременко М.А. Эффективность работы Воронежской сети сейсмических станций // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Четвертой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН. 2009. С. 159-162.
7. Надежка Л.И., Ефременко М.А., Сафронич И.Н. Особенности записи телесейсмических событий региональной Воронежской сетью // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы V Международной сейсмологической школы. Обнинск. 2010. С. 120-124.
8. Надежка Л.И., Пивоваров С.П., Ефременко М.А. Методические вопросы. Оценка регистрационных возможностей сети сейсмических станций на территории Воронежского кристаллического массива // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 21 (2012 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2018. С. 471-477.
9. Пивоваров С.П., Ефременко М.А., Пивоваров Р.С. Регистрационные возможности сейсмической станции «Сторожевое» // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Седьмой Международной сейсмологической школы. Обнинск. 2012. С. 259-262.
10. Дубянский А.И. Оценка относительной чувствительности станции VRS // Вестник Воронежского госуниверситета, серия Геология. 2004. № 2. С. 161-165.
11. Пивоваров Р.С., Калинина Э.В. Оценка магнитудных невязок широкополосной сейсмической станции «Сторожевое» // Двадцатая уральская молодежная научная школа по геофизике. Сб. науч. материалов. 2019. С. 149-151.
12. Пивоваров С.П., Пивоваров Р.С., Калинина Э.В., Ефременко М.А. Оценка расхождений в определении магнитуд телесейсмических землетрясений для станций воронежской сети наблюдений // Вестник НЯЦ РК. 2020. Вып. 3 (83). С. 100-104.
13. Габсатарова И.П., Ассиновская Б.А., Баранов С.В., Карпинский В.В., Мехрюшев Д.Ю., Мунирова Л.М., Надёжка Л.И., Петров С.И., Пивоваров С.П., Санина И.А. Восточно-Европейская платформа. Российская часть // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 23 (2014 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2020. С. 199-207.
14. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР / Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР. М.: Наука. 1981. 272 с.
15. Акимов А.П., Красилов С.А. Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020 г.
16. Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН. 2006. С. 77–83.
17. Пивоваров Р.С. Особенности записей региональных землетрясений в зависимости от азимута (на примере ВКМ) // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Материалы докл. XVI Междунар. конф. молодых ученых и студентов. Бишкек. 2024. С. 206-211.

УДК 550.834.08

ОЦЕНКА КАРСТО-СУФФОЗИОННЫХ ПОЛОСТЕЙ В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ МЕТОДОМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Рузимбоев Ф.Ф.
frozimboyev@gmail.com
Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

Карстовые и суффозионные процессы представляют серьезную угрозу для строительства, поэтому их выявление и оценка имеют важное значение. В данной статье рассматриваются результаты применения сейсморазведочных методов для оценки карстовых полостей на строительной площадке в Янгибазаре. Исследования проводились с использованием сейсмометра Mae X820S, который позволил измерять скорость и энергию сейсмических волн для выявления геологических аномалий. Этот прибор обладает высокой точностью, что позволяет регистрировать как низкочастотные, так и высокочастотные сейсмические сигналы. С его помощью были определены размеры и глубина карстовых пустот, а также выявлены возможные зоны с высоким риском деформаций. Полученные результаты подтверждают эффективность использования сейсморазведочных методов для диагностики карстовых зон и оценки их опасности. Кроме того, установлено, что прибор Mae X820S обладает высокой чувствительностью к изменениям сейсмической активности в карстовых районах.

Ключевые слова: карстовые пустоты, сейсморазведка, строительная площадка, инженерная геология.

Введение. Карстовые процессы представляют значительную угрозу для строительства, особенно в районах с развитой карстовой структурой. В связи с этим важно своевременно выявлять пустоты и разломы в грунте, используя современные геофизические методы. Сейсморазведка, в том числе метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) [1], позволяет эффективно выявлять скрытые карстовые полости и оценивать механические свойства грунтов.

В пределах территории исследования развиты геологические и инженерно-геологические процессы и явления, изучение которых представляет большое значение для оценки условий строительства. Среди эндогенных-сейсмические и среди экзогенных - выветривание, поверхностный смыв, эрозия, карстовой процессы, оврагообразование, оползни и др. Рельеф адырной зоны территории эрозинно-тектонический, состоящий из многочисленных увалов и холмов разных размеров, форм и высоты. Склоны круты, а иногда отвесны, экзогенные процессы приурочены к различным формам рельефа и литологическим разностям [2].

Кроме того, размыв обусловлен отсутствием травянистого, растительного покрова и сбросом поливых вод без примнения противоэрозионных мероприятий (рисунок 1).

Методология. Исследование проводилось с использованием метода MASW [3], позволяющего определять скорость распространения поперечных волн и строить профили жёсткости грунтов. Были использованы 24-канальные сейсмостанции с шагом между датчиками 2 метра. Данные были обработаны в программных комплексах ZondST2D и ZondST3D.



Рисунок 1 – Объект исследования сейсморазведочных работ в карсто-суффозионных территории

Результаты и обсуждение. Результаты исследований показали наличие неоднородностей в грунтовой толще [4], которые могут свидетельствовать о наличии карстовых полостей. В некоторых зонах наблюдалось значительное снижение скорости поперечных волн, что указывает на возможное развитие карстовых процессов. Анализ данных

также позволил определить глубину залегания плотных грунтовых слоев и оценить устойчивость исследуемой территории, как показано на рисунках 2-4.

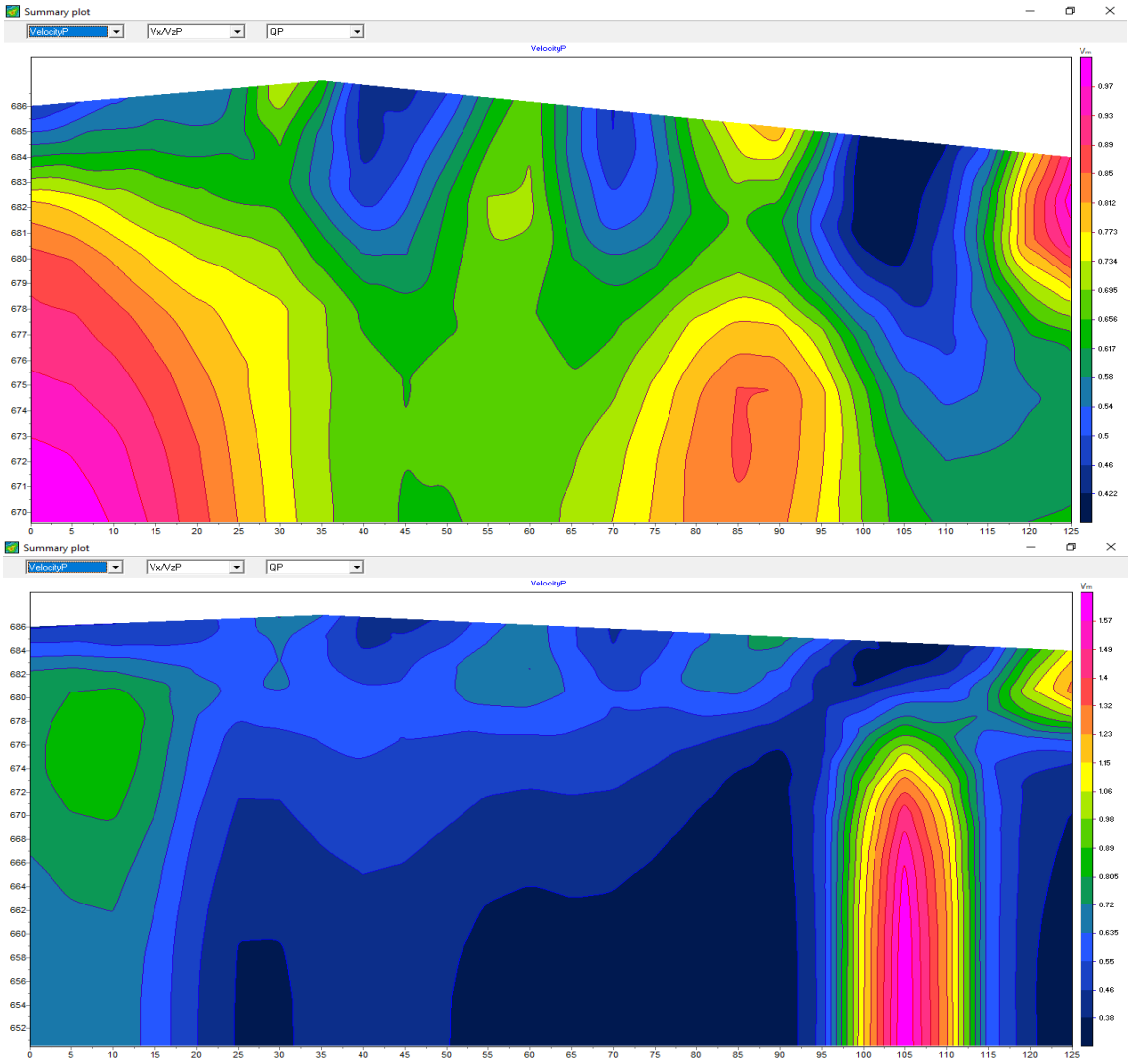


Рисунок 2 – Разрезы скорости Vp-волн

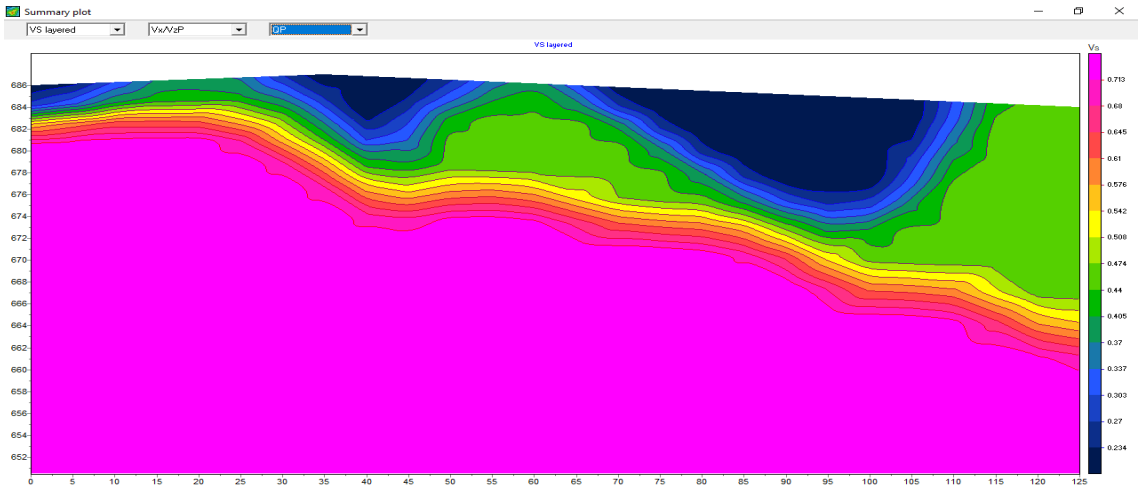


Рисунок 3 – Разрез скорости Vs-волн

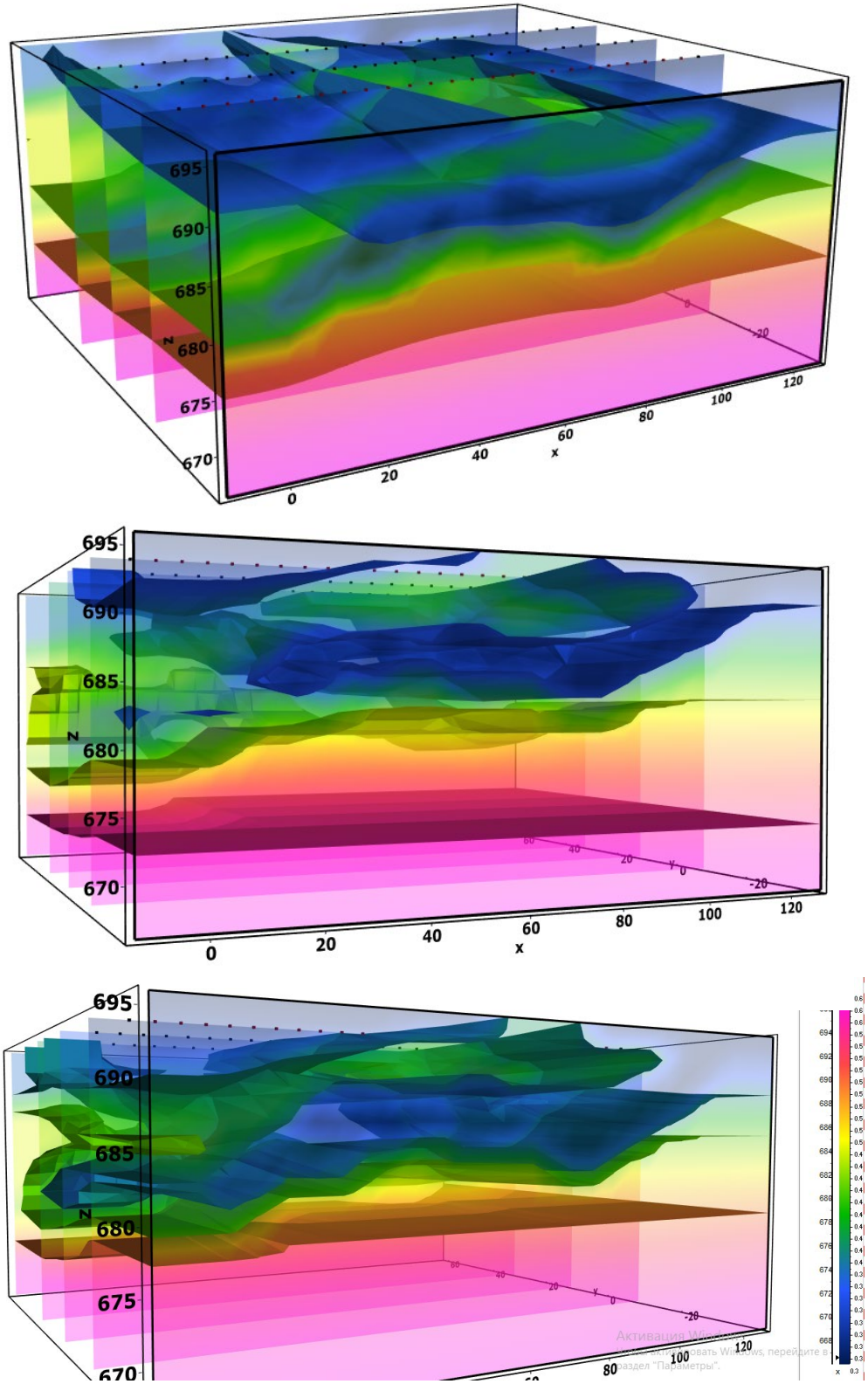


Рисунок 4 – 3D модели областей с распространенными карстовыми пустотами

Заключение. Карсто-суффозионные процессы в осадочных породах представляют значительную угрозу для устойчивости зданий, инженерных сооружений и экосистем. Их своевременное выявление и оценка являются важными задачами для геофизических исследований, особенно в районах с высоким уровнем урбанизации и активным строительством.

Применение сейсморазведочных методов, в частности поверхностно-волнового анализа (MASW) [5], рефракционной и отражательной сейсморазведки, позволяет эффективно изучать структуру пород, выявлять скрытые пустоты и прогнозировать возможные деформации грунта. Данный метод позволяет проводить неразрушающий контроль грунтов [6] и своевременно выявлять потенциально опасные зоны, что способствует повышению безопасности строительства. Анализ волновых полей и сейсмических аномалий дает возможность определить глубину, размеры и морфологию карсто-суффозионных полостей, а также оценить уровень их опасности.

Современные технологии обработки сейсмических данных, включая численное моделирование и 3D-визуализацию, обеспечивают более точные прогнозы и позволяют интегрировать данные с другими геофизическими методами, такими как электротомография и магнитометрия. Комплексный подход к исследованию карсто-суффозионных процессов обеспечивает надежные данные для разработки инженерных решений, направленных на предотвращение геологических рисков.

Таким образом, применение сейсморазведки для изучения карсто-суффозионных полостей является перспективным направлением в инженерной геофизике. Дальнейшее развитие методов интерпретации данных, совершенствование аппаратуры и интеграция многокомпонентных геофизических исследований позволят значительно повысить точность прогнозов и снизить риски, связанные с геодинамическими процессами в осадочных породах.

Литература

1. Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J. Multichannel analysis of surface waves (MASW) // Geophysics. 2018. 83(3). 121–132.
2. Исмаилов В.А. и др. Отчет о научно-исследовательской работе по теме: «Проведение сейсмотектонических, сейсмологических и инженерно-сейсмологических исследований на территории массива «Янги Андижон» Андижанской области и составление карты сейсмического микрорайонирования в масштабе 1:10 000». 2022. С. 96-97.
3. Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B. Application of MASW for site characterization. // Journal of Applied Geophysics. 2019. 162. 45–57.
4. Foti, S., Hollender, F., Garofalo, F. et al. Guidelines for surface wave testing // Geophysical Journal International. 2020. 221(4). 2037–2066.
5. Stokoe, K.H., Joh, S.H., Woods, R.D. Seismic surface wave methods for dynamic soil properties measurement. International Conference on Site Characterization. 2021. 2. 785–802.
6. Yoon, S., Kim, K.Y., Park, C.B. Practical applications of MASW for urban environments // Journal of Applied Geophysics. 2022. 198. 156–167.

УДК 551.242.11

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сагдуллаева К.А., Назаров С.Х., Болтаев Ф.Ш. угли
kamolasagdullaeva48@gmail.com, sarvarnazarov570@gmail.com, boltayevfarhod373@gmail.com
Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

Представлен статистический анализ горизонтальных и вертикальных смещений при сильных землетрясениях геодезическими методами с использованием наиболее широко используемой библиографической онлайн - базы данных, охватывающей период с 1931 по 2024 год. Представлены новые сведения об использовании геодезических наблюдений при землетрясениях в сейсмоактивных регионах, в частности анализ интерферометрических радаров с синтезированной апертурой (InSAR) и спутниковых оптических изображений, а также тенденции и направления в международных исследованиях геодезических наблюдений.

Ключевые слова: землетрясение, горизонтальное смещение, GNSS, GPS, деформация, геодинамика.

Введение. Землетрясения - это стихийные бедствия, вызванные внезапным и катастрофическим выбросом энергии высокого механического напряжения, которое постепенно накапливается в земной коре. Землетрясение - одна из самых страшных и разрушительных сил природы, вызывающая стихийные бедствия и наносящая огромный материальный и духовный ущерб человечеству. Поэтому сегодня проводятся множество исследований, направленных на всестороннее углубление знаний о процессах, вызывающих землетрясения, а также на поиск предвестников сильных землетрясений. В настоящее время проблема прогнозирования землетрясений имеет национальное, экономическое и социальное значение, которой посвящены научные работы многих ведущих ученых из США, Японии, Китая, Индии, России, Италии, Узбекистана и других стран. В этом направлении проводятся обширные исследования с использованием различных методов, включая сейсмологические, геофизические, геодезические, астрофизические, биофизические, гидрогеохимические и др. Многие факты свидетельствуют о том, что основным механизмом возникновения разрушительных землетрясений является дифференциальное перемещение и взаимодействие активных тектонических блоков [1-5].

Цель исследования - использовать исторические научные данные для получения нового представления о геодезических наблюдениях землетрясений в сейсмически активных районах, особенно об интерферометрических радарах с синтезированной апертурой (InSAR) и анализе спутниковых оптических изображений, а также о тенденциях в международном изучении геодезических наблюдений [6-14].

11 марта 2011 года на северо-востоке Японии произошло одно из самых сильных землетрясений M=9,0 вызвало цунами в прибрежных районах к югу от Тохоку, Канто и Хоккайдо, унесшее жизни 15 848 человек. Актуальность и важность раннего предупреждения о возможных катастрофических землетрясениях, связанных с такими серьезными бедствиями, но это очень сложно сделать на сегодняшнем уровне знаний.

Результаты. Проблема прогнозирования местоположения, силы и времени землетрясений с высокой точностью не является исчерпывающей, но основываясь на характере сейсмичности, существуют алгоритмы для долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного прогнозирования сильных подземных толчков выше заданного предела. На основе геодезических, геофизических, геохимических и других комплексных наблюдений изучается деформация земной поверхности [7-13]. Для мониторинга деформации земной

поверхности в Японии имеется 1200 станций GPS-слежения, радиус действия которых составляет 25 км. В последние годы внимание исследователей к проблеме прогнозирования землетрясений привлекли деформации поверхности, предшествующие катастрофическим землетрясениям. Теоретические и лабораторные результаты исследований горных деформаций перед разрушением, в частности, мониторинг расширения горных деформаций перед разрушением, показывают, что во многих случаях можно наблюдать поверхностные деформации [8], что позволяет предположить, что поверхностные деформации, наблюдаемые при некоторых землетрясениях, происходят до разрушения. Кроме того, согласно большому количеству источников геофизических аномалий вплоть до землетрясений, наибольшую долю в частоте регистрации занимают горизонтальные и вертикальные деформации земной поверхности [9-11]. В последнее время, в результате появления геодезических подходов и их быстрого совершенствования с течением времени, результаты прогнозирования землетрясений вышли на новый этап [12]. Быстрые и экономичные геодезические технологии, такие как глобальная навигационная спутниковая система (GNSS), позволили наблюдать за перемещениями земной поверхности во многих местах одновременно в режиме реального времени, а также позволили наблюдать тектонику плит в масштабе 2-8 миллиметров [13]. Используя пространственные геодезические наблюдения за движениями перед землетрясением при сильных землетрясениях, можно более точно оценить риск катастрофического землетрясения, чем традиционные сейсмологические или геологические подходы [13]. По этой причине недавние изменения в геодезических методах обеспечивают своевременное и надежное предупреждение о потенциально сильных землетрясениях путем разработки эффективного метода обнаружения локальных очагов деформации и, таким образом, полного изучения многомерных пространственных геодезических временных рядов данных.

Известно, что землетрясение возникает в результате разрушения блоков земной коры в том или ином направлении. Согласно данным А.П. Райзмана [3-4], относительное смещение сторон по разлому составило около 170 см при силе землетрясения М=7,2. Результаты измерения на поверхности земли в эпицентральной области подтвердили приведенные выше данные, отметив, что после землетрясения Газли в 17 мая 1976 года в эпицентральной области было 76,3 см вертикального и около 100 см горизонтального смешений [3].

Землетрясение Токачи-Оки магнитудой 8 баллов в Японии в 2003 году вызвало деформацию площади в несколько сотен квадратных километров. Согласно геодезическим наблюдениям GPS, произошел сейсмический сдвиг на 10 см [14].

В таблице ниже приведен каталог смешений, связанные с землетрясениями (таблица 1)

Таблица 1 – Смещения, произошедшие в результате землетрясения

№	Страны	Годы	Магнитуда	Вертикаль	Горизонталь
1	Япония	2003 Токачи-Оки	8.0	10 см постсейсмическое перемещение	
2.	Япония	2011 Тохоку-Оки	9.0	1 м смещения	от 5м смещения
3.	Япония	1973 Немуро-оки	8.0	смещения 2,7 метра нивелир	
4	Япония	1994 Хоккайдо-Тохо-Оки (Шакотан)	8,1.	смещения >40 см	
5	Япония	2008 Ивате – Мияги Наирику	6,9	смещения <3,5м	
6	Япония	1996 19 октября Хьюга-нада.	6,7	смещения 2,9 м	
7	Хитой	2011 Тохоку-Оки		3см	
8	Сахалин	2000 Углегорское	6,8	смещения 1,5м	
9	Памир	2015 Сарез	7,2	смещения 4 м	

В 2011 году землетрясение в Тохоку-Оки магнитудой 9,0 предоставило уникальную возможность проанализировать деформацию земной коры. Землетрясение
Таблица 2. Современные движения земной поверхности.

Тохоку-Оки (магнитудой 9,0) произошло в зоне субдукции недалеко от Японии, вызвав значительные косейсмические деформации, зафиксированные с помощью GPS, со смещениями около 5 м по горизонтали в Японии, 1 м по вертикали и около 3 см по горизонтали в восточном Китае [16,17].

В 1973 году землетрясение в Немуроки привело к деформации земной поверхности на 2,7 метра [18].

30 сентября 2009 года у западного побережья Суматры произошло землетрясение в Паданг с магнитудой 7,6. Этот основной удар затронул обширную территорию на западе Суматры, вызвав деформацию земной коры. Об этом свидетельствуют данные с 40 установленных GPS-станций [19].

Опубликованы данные о горизонтальных сейсмических сдвигах по данным Хубсугульского землетрясения магнитудой 6,7, произошедшего 11 января 2021 года [20]. Использованы данные GPS-станций Байкальского геодинамического полигона.

Ноябрь 2016-11: 02:56 UTC, сильное землетрясение магнитудой 7,8 произошло недалеко от Кайкоуры, Новая Зеландия. Деформация земной поверхности хорошо прослеживается по данным InSAR и GNSS [20].

В Турции землетрясение Ванское 2011 года магнитудой 7,1 [21] вызвало деформацию земной поверхности, средняя максимальная составила 1 метр.

В Ашхабадской сейсмоактивной зоне было два региональных профиля нивелирования. Результаты работ по измерению в 1944-1952 годах показали резкое увеличение скорости и изменение знака движений. Наблюдалось аномальное изменение горизонтальной отметки 1630 (-230 мм) на 222 км участке (+330 мм) и линии Ашхабад - Гярус. Так, на одном участке в радиусе 80 км амплитуда движения увеличилась на 0,5 м. (эпицентр катастрофического землетрясения 6. X. 1948 года находился в центре этого участка). Данные повторного измерения, проведенного в 1962 году, подтвердили произошедшие изменения [6].

Мы проанализировали 4 землетрясения магнитудой 6,0-7,0 (M=6,9 в Японии в 2008 году, M=6,7 в 1996 году; M=6,8 на Сахалине в 2000 году; M=6,7 в Монголии в 2021 году). заметим, что после землетрясений среднее смещение составило 1,64 м (табл.2).

5 землетрясений магнитудой до 7,0-8,0 (Индонезия, 2009 г., м=7,6; Памир, 2015 г., м=7,1; Япония, 2003 г., м=8,0; м=8,0 в 1973 г.). За землетрясениями последовало среднее смещение на 1,38 - 2,7 м.

После землетрясений магнитудой M≥8,0 произошло смещение на 5 м и более. Результаты анализа данных, представленных в источниках, показывает, что магнитуда M≥6 может вызвать деформацию земной коры. Землетрясения с магнитудой M≤6 имели смещения от 1 м до 3,5 м. При землетрясениях с магнитудой ≥7 происходили смещения до 4-5 м. Землетрясения M=9 вызывали деформацию земной коры на 5 м и более

Таблица 2 – Смещения, произошедшие в результате землетрясения

№	Страны	Годы	Магнитуда	Горизонталь
1	Монголия	2021 Хубсугульская	6,7	
		станции		смешения
		MNDY		0.59мм
		BADG		0.18мм
		ZKMN		0.10мм
		IRKM		0.09мм
		KYAD		0.05мм
		ULAZ		0.06мм
2	Индонезия	2009 Паданг	7,6	
		станции		смешения
		ABGS		16.62 мм
		KTET		8.02 мм
		LAIS		6.28 мм
		LNNG		27.70 мм
		MNNA		5.49 мм
		MSAI		50.83 мм
		NGNG		38.03 мм
		PKRT		19.28 мм
		PPNJ		23.21 мм
		PSKI		5.92 мм
		TIKU		11.46 мм
		TLLU		34.02 мм

Вывод. Одной из важных задач является проведение мониторинга с использованием геодезических наблюдений в сейсмически активных районах на основе статистического анализа горизонтальных и вертикальных сдвигов, возникающих при сильных землетрясениях. Кроме того, рекомендуется расширить применение интерферометрических радаров с синтезированной апертурой (InSAR) и спутниковых оптических изображений при обнаружении предвестников землетрясений. Проведение геодезических исследований на Земле с использованием геодезических наблюдений позволяет оценивать деформационное состояние и контролировать вертикальные и горизонтальные перемещения геологических, тектонических блоков.

Литература

1. Ярмухамедов А.Р., Эргешов И.М., Валиев И.С., Саттаров А.С. Исследование проявления современных тектонических движений земной коры геодезическим методом на Таваксайском геодинамическом полигоне в связи с сейсмичностью. Ташкент. 2006. 144 с.
2. Ярмухамедов А.Р., Якубов Д.Х., Саттаров А.С. Современная геодинамика Восточного Узбекистана. Ташкент: Фан. 1979. 109 с.
3. Газлийские землетрясения 1976 и1984 гг. Ташкент: Фан. 1986. 368 с.
4. Пискулин Е.А., Райзман А.П. Исследования деформаций земной поверхности в эпицентральной зоне Газлийского землетрясения 20 мая 1984 г. геодезическими методами // Газлийские землетрясения 1976 и1984 гг. Ташкент: Фан. 1986. С. 110-117.

5. Курбанов М.К., Лыков В.И., Челпанов С.С. Вертикальные движения реперов в зоне очагов Ашхабадских землетрясений // Современные движения земной коры. Сб. докл. междунар. конф. Новосибирск: Наука.1978. С. 100-104.
6. Kaftan V., Melnikov A. Local deformation precursors of large earthquakes derived from GNSS observation data. IOP Conf. Ser. Yearth Yenviron. Sci. 95, 032030 (2017).
7. Cicerone R.D, Yebel J.Ye., Britton J. A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. 476. 371–396.
8. Ma, Z., Li, C., Jiang, Y., Chen, Y., Yin, X., Aoki, Y., Yun, S., Wei, S., 2024. Space Geodetic Insights to the Dramatic Stress Rotation Induced by the February 2023 Turkey-Syria Earthquake Doublet. Geophysical Research Letters 51, e2023GL107788. https://doi.org/10.1029/2023GL107788
9. Kawamura M., Kudo T., Yamaoka K. Spatiotemporal relationship between geodetic and Seismic quantities: possible clue to preparatory processes of M ≥ 6.0 Inland earthquakes in Japan // International Journal of Geophysics. 2012. 1–10. https://doi.org/10.1155/2012/610712
10. Rikitake T. Yearthquake prediction. Yearth Sci. Rev. 4, 245–282 (1968).
11. Kiani M. Possibility of land movement prediction for creep or before earthquake using Lidar Geodetic Data in a machine learning scheme. arxiv [Preprint] (2020). https://arxiv.org/abs/2006.10419 (Accessed 6 May 2022).
12. Ito C., Takahas'hi H., Ohzono M. Yestimation of convergence boundary location and velocity between tectonic plates in northern Hokkaido inferred by GNSS velocity data. Yearth Planets Space 71, 1–8 (2019).
13. Panda G.F., Peresan A., Senso F., Crespi M., Mazzoni A., Nasketti A. Institute of Geophysics, Chinese earthquake Control Administration, Beijing, China HOW GEODESY CAN CONTRIBUTE TO THE UNDERSTANDING AND PREDICTION OF EARTHQUAKES 2017. http://dx.doi.org/10.1007/s12210-017-0626-y
14. Поллитц Фред Ф., Бюргманн Роланд, Банерджи Парамеш. Геодезическая модель скольжения землетрясения магнитудой 9,0 Тохоку 2011 г. https://doi.org/10.1029/2011GL048632
15. Yamagiwa A., Hatanaka Y., Yutsudo T. and Miyahara Basara. Real-time capability of GEONET system and its application to crust monitoring // Bulletin of the Geogrephical Survey Institute. 2006. Vol. 53 March. P. 27-33.
16. Zhou X., Sun W, Zhao B., Fu G., Dong J., Nie Z. Geodetic observations detecting coseismic displacements and gravity changes caused by the Mw = 9.0 Tohoku-Oki earthquake // J. Geophys. Res. 2012. 117. 2011JB008849. https://doi.org/10.1029/2011JB008849
17. Sagiya T., Meneses-Gutierrez A. Geodetic and Geological Deformation of the Island Arc in Northeast Japan Revealed by the 2011 Tohoku Earthquake. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2022. 50. 345–368. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-032320-074429
18. Nishimura T. Slip distribution of the 1973 Nemuro-oki earthquake estimated from the re-examined geodetic data // Earth Planet Space. 2009. 61. 1203–1214. https://doi.org/10.1186/BF03352973
19. Arisa D., Setiadi B., Priyanto V.S. Preliminary and coseismic analysis of the 7.6 magnitude padang earthquake 2009 from geodetic approach // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, Vol. 789, Iss. 1, pp. 012069. doi:10.1088/1755-1315/789/1/012069
20. Lukhnev A.V., Lukhneva O.F., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I. 2022. Coseismic effects of the 11 january 2021 Hovsgol, mongolia, earthquake. Geodin. tektonofiz. https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0626
21. Zedek F., Rolland L.M., Mikesell T.D., Sladen A., Delouis B., Twardzik C., Coı¨sson P. Locating surface deformation induced by earthquakes using GPS, GLONASS and Galileo ionospheric sounding from a single station // Advances in Space Research. 2021. Vol. 68. Iss. 8. P. 3403-3416.
22. Jin, Z., Fialko, Y., Zubovich, A., Schöne, T., 2022. Lithospheric Deformation Due To the 2015 M7.2 Sarez (Pamir) Earthquake Constrained by 5 years of Space Geodetic Observations. JGR Solid Earth 127, e2021JB022461. https://doi.org/10.1029/2021JB022461

УДК 528.481

ДИАГРАММА РАЗМАХА ДАННЫХ ЛИНЕЙНО-УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДКЕ

Саламатина Ю.М.
salam_yuliya13@mail.ru
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

Графическое представление о разбросе линейно-угловых измерений в виде диаграммы «ящик с усами» позволяет выделить аномальные значения и наглядно сравнить вариации базовых линий, пересекающих и не пересекающих активные разломы, а также посмотреть изменения по годам и связь с состоянием почвы. Согласно диаграммам размаха в случае высокой влажности почвы вокруг одного из разломов наблюдается незначительное сокращение расстояний между геодезическими реперами, в то время как по остальной площадке – удлинение. В случае замерзшей почвы по всей геодезической площадке наблюдается незначительное укорочение. Чтобы сделать более точные выводы о том, влияет ли повышенная влажность и промерзание почвы на геодинамическую картину территории, исследуемой с помощью линейно-угловых измерений, графической интерпретации недостаточно, необходимо провести статистический анализ данных и согласовать данные с ГНСС измерениями.

Ключевые слова: линейно-угловые измерения, длины базовых линий, ящик с усами, boxplot, состояние почвы

Измерение деформации земной коры необходимо для понимания тектонических процессов, рисков землетрясений, вулканической активности и т.д. Одним из классических высокоточных инструментов, используемых для обнаружения мелкомасштабных движений в земной коре на локальных геодезических площадках, является тахеометр. Этот прибор измеряет вертикальные и горизонтальные углы, превышения и длин базовых линий между геодезическими реперами.

На геодезической площадке POLIGON с 2012 по настоящее время проводятся линейно-угловые и ГНСС измерения для наблюдения в первую очередь за двумя активными разломами — Шекуленским и Аламединским (рисунок 1). И в данной зоне было выявлено как минимум четыре вида упругих деформационных событий [1].

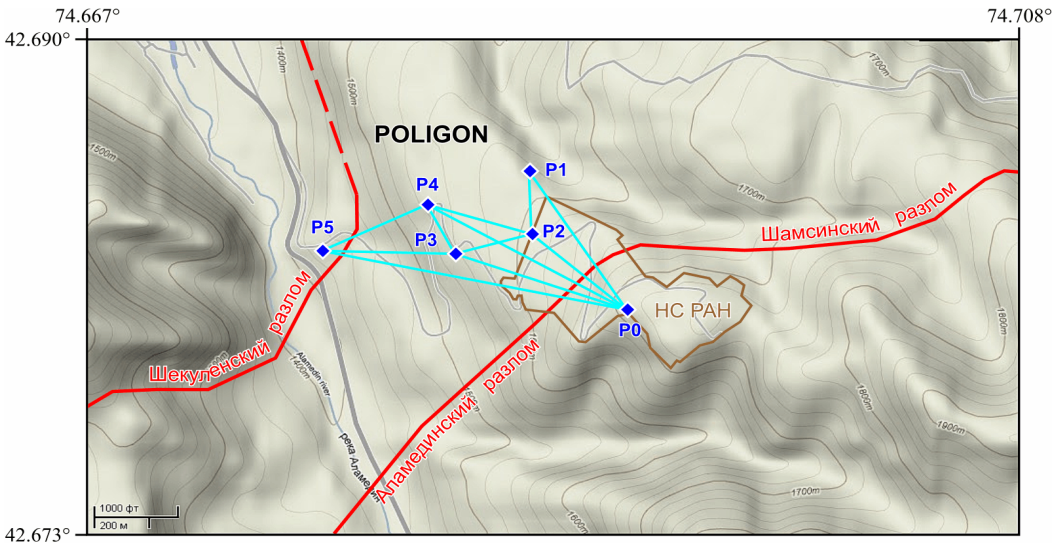


Рисунок 1 – Геодезическая площадка POLIGON. Синие квадратики — геодезические реперы (P0, P1, ...). Голубым отмечены 11 базовых линий, красным — пролегание активных разломов

В данной работе в качестве исходных данных используются вариации длин базовых линий (в мм) в ходе многолетних линейно-угловых измерений, все данные, в зависимости от расположения базовых линий, поделены на 4 группы:

1) пересекает Аламединский разлом (линии P01, P02, P03, P04),
2) пересекает Аламединский и Шекуленский разломы (P05),
3) пересекает Шекуленский разлом (P35, P45),
4) не пересекает разломов (P12, P23, P24, P34) (рисунок 1).

А для графического отображения будет использоваться диаграмма размаха, так называемый «ящик с усами» (boxplot, box-and-whiskers diagram). Диаграмма размаха строится следующим образом:

– сначала выборка упорядочивается и рассчитывается медиана — значение делящее выборку на две равные части, обозначается поперечной чертой;
– рассчитываются квартили, которые делят выборку на равные четверти (нижний квартиль Q1 соответствует 25-ому перцентилю, верхний квартиль Q3 — 75-ому перцентилю)
– расстояние между квартилями Q1 и Q3 — есть межквартильный размах IQR, представляет собой ширину «ящика», в «ящике» лежат 50% центральных, самых ожидаемых наблюдений;
– «усы» начинаются с краев «ящика» (Q1 и Q3) и заканчиваются либо на минимуме и максимуме выборки, либо на значениях (Q1–1.5*IQR) и (Q3+1.5*IQR);
– все остальные значения, находящиеся за пределами «усов», являются выбросами и характеризуют аномалии выборки (рисунок 2).

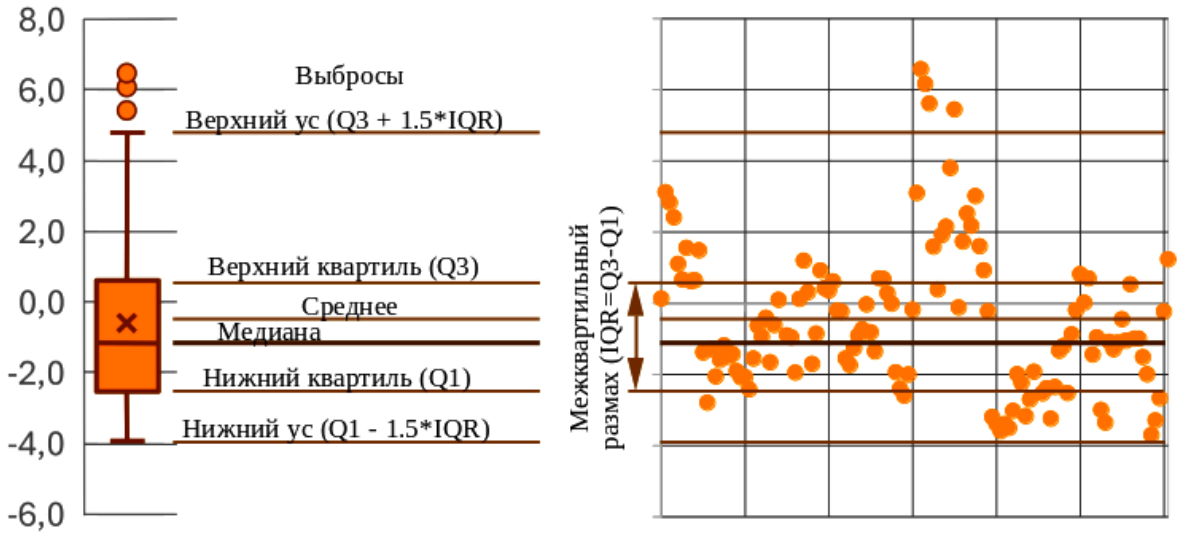


Рисунок 2 – Пример диаграммы размаха и ее составляющих

Данная диаграмма удобна при больших объемах данных, когда нужно показать распределение значений в выборке и выделить аномальные, для наглядного сравнения несколько выборок. Из минусов можно указать, что она отражает только основные статистические характеристики, не отображает динамики значений, а так же при небольшой выборке может исказить картину.

Чтобы оценить, насколько изменялись расстояния между геодезическими реперами вдоль разломов в зависимости от года, построим следующие 4 диаграммы размаха (рисунок 3). Временные ряды содержат несколько аномальных значений в 2018 году, которые далее не будут отображены на диаграммах.

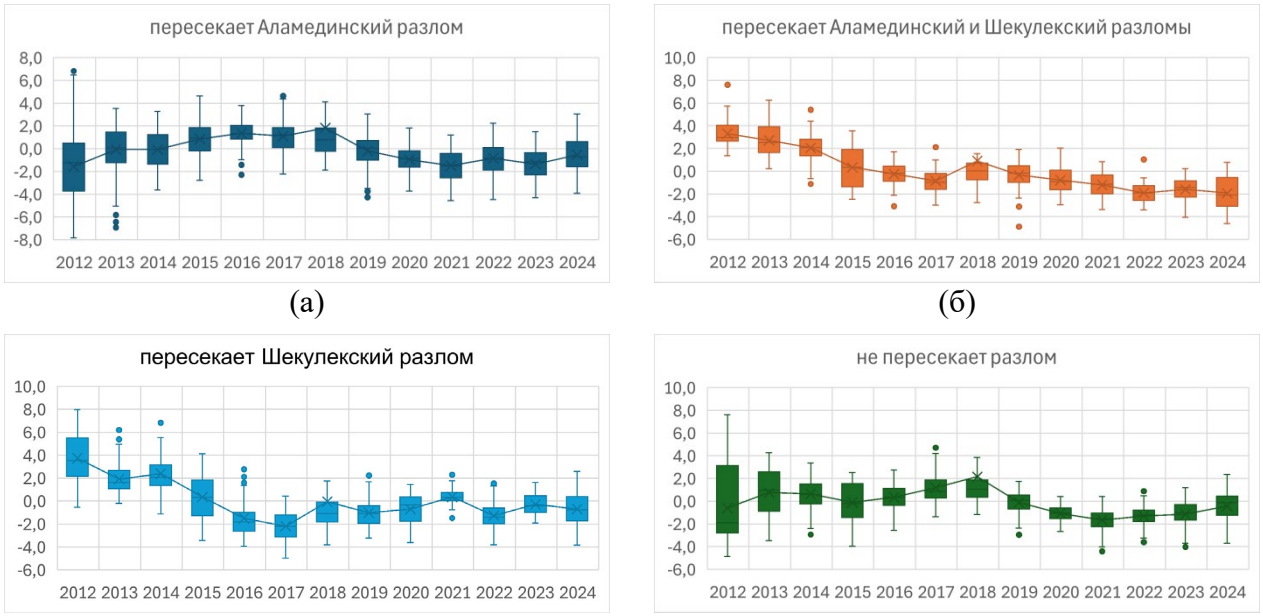


Рисунок 3 – Диаграмма размаха по годам для групп базовых линий, пересекающих (а, б, в) и не пересекающих разлом (г). По вертикали – вариации длин базовых линий в мм. «Ящики» соединяются между собой через средние значения

Согласно рисунку 3 вокруг Шекуленского разлома (в, б) с 2012 по 2017 г. наблюдается тенденция к укорочению расстояний между реперами, для остальных (а, г) – тенденция к удлинению. 2018 год характеризуется наличием аномальных выбросов, после чего тенденции меняются практически на всей площадке, кроме линии, пересекающей оба разлома.

На измерения и интерпретацию деформаций земной коры в геодезии может оказывать влияние состояние почвы. Гидрологическая нагрузка вызывает сезонные вертикальные деформации поверхности, величина которых зависит от физико-минералогических свойств почвы, характеристик среды и амплитуды годовых колебаний температуры и влажности. Особенно это заметно при проведении многолетних ГНСС измерений [2-4]. Сезонные смещения земной коры были учтены при выпуске самой последней версии Международной земной системы отсчета ITRF2020 в виде добавленных параметрических функций, описывающих годовые и полугодовые смещения ГНСС станции, а так же моделирующие ее сезонные смещения, определенные методами космической геодезии [5]. Поэтому при проведении геодезических работ целесообразно опираться на высокоточные расчеты местоположения по ГНСС.

Ниже рассмотрим, отражаются ли свойства почвы в линейно-угловых измерениях тахеометром. Поскольку у нас нет датчиков, измеряющих влажность и глубину промерзания почвы напрямую, мы рассчитаем эти параметры косвенно из метеорологических данных. Ежечасные метеорологические данные для территории геодезического площадки POLIGON были скачены с web-сайта OpenWeather [6], представляют собой набор временных рядов, содержащих температуру, атмосферные давление и влажность, скорость и направление ветра, количество выпавших осадков и т.д.

На влажность почвы влияет множество факторов, основные – количество выпавших осадков и суточное потенциальное испарение, которое было рассчитано по формуле Пенмана - Монтейта (Food and Agriculture Organization-56) [7]. Имея эти параметры, мы условно поделили влажность почвы на 4 типа: «сухая» (осадков накануне проведения линейно-угловых измерений не было и большое испарение влаги), «умеренно сухая» (осадки были накануне и большое испарение), «влажная» (осадки были накануне и малое испарение) и «мокрая» (осадки шли несколько дней и почти нет испарения). С учетом этих 4 типов влажности почвы построены диаграммы размаха для вариаций базовых линий (рисунок 4).

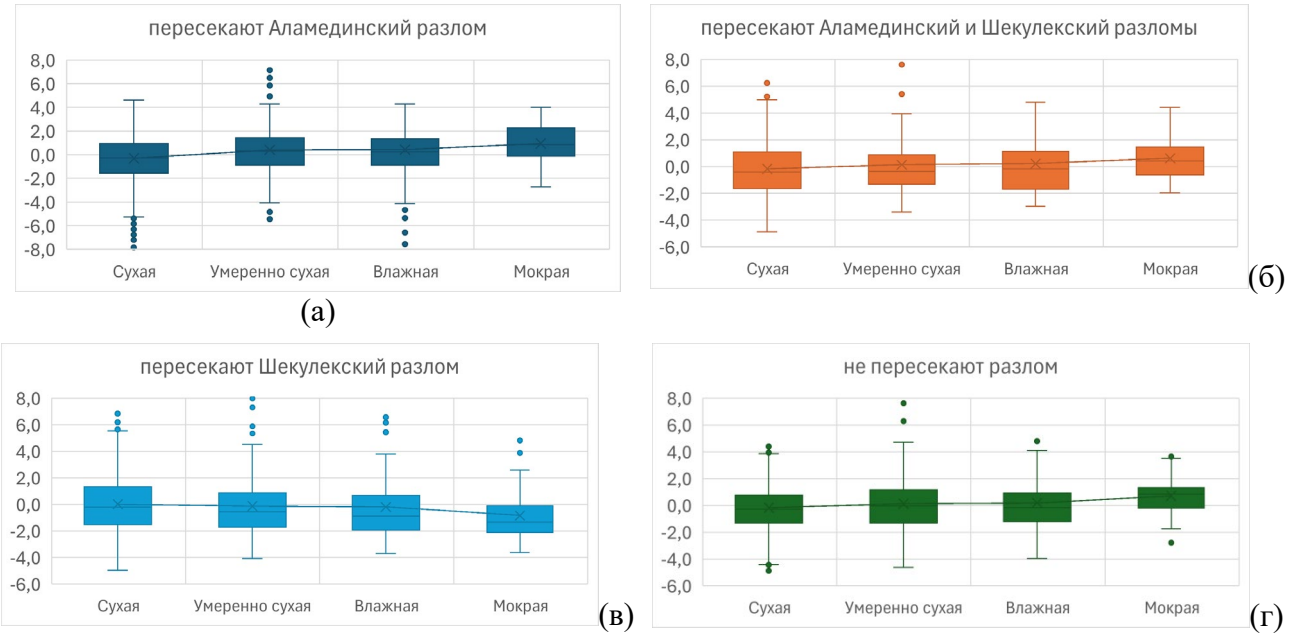


Рисунок 4 – Диаграмма размаха, показывающая связь изменения в расстоянии между геодезическими реперами и влажность почвы

По всей площадке в случае небольшой влажности почвы («сухая», «умеренно сухая» и «влажная», рисунок 4) разница по среднему значению и по медиане составляет менее 1 мм и ширина межквартильного размаха IQR практически не меняется. В случае высокой влажности почвы («мокрая», рисунок 4) заметно, что вокруг Шекуленского разлома наблюдается незначительное сокращение, в то время как по остальной площадке – удлинение.

Так же используя метеорологическими данным, содержащим осадки, выпавшие накануне проведения измерений, и температуру воздуха, разделим условно состояние почвы на 4 типа: «подтаивающая» (когда мороз сменяется потеплением и почва начинает оттаивать), «теплая» (температура всегда >0), «промерзающая» (потепление сменяется морозом и почва начинает промерзать), «мерзлая» (всегда отрицательная температура воздуха) (рисунок 5).

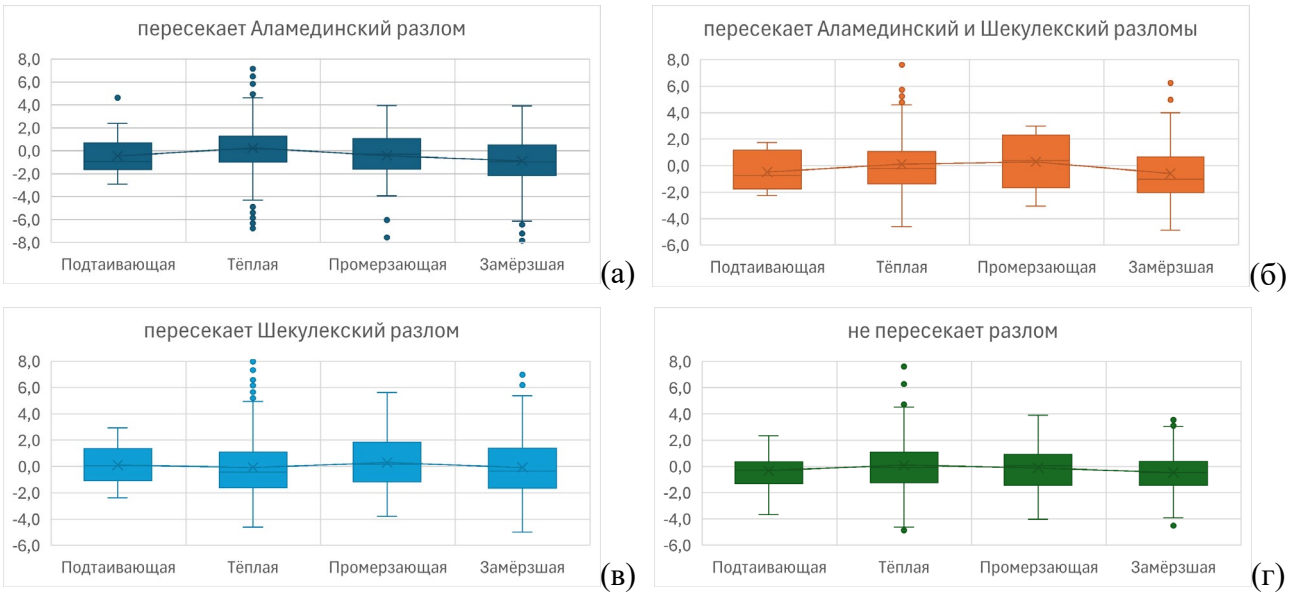


Рисунок 5 – Диаграмма размаха, показывающая связь изменения в расстоянии между геодезическими реперами и состояния почвы

По всей площадке в случае замерзшей почвы наблюдается незначительное укорочение дистанций между геодезическими реперами около 1 мм. Когда почва теплая вокруг Шекуленского разлома наблюдается незначительное сокращение, в то время как по остальной площадке – удлинение. Выбросы в основном наблюдаются при обоих состояниях, когда почва «мерзлая» и «теплая».

Графическое представление о разбросе линейно-угловых измерений в виде диаграммы «ящик с усами» позволило визуально сравнить между собой данные пересекающие активные разломов и не пересекающие в зависимости от года измерения и состояния почвы. Чтобы сделать более точные выводы о том, влияет ли повышенная влажность и промерзание почвы на геодинамическую картину исследуемого региона по линейно-угловым измерениям, графической интерпретации недостаточно, необходимо провести статистический анализ данных и согласовать данные с многолетними ГНСС измерениями.

Работа выполнена в рамках государственного задания НС РАН по теме «Исследование современных движений земной коры Тянь-Шаня и прилегающих территорий методами наземной и космической геодезии».

Литература

1. Кузиков С.И. Деформирование разломных зон по данным линейно-угловых измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне. // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 4. С. 290–301. doi: 10.30730/2541-8912.2018.2.4.290-301
2. Su G., Zhan W. Seasonal and long-term vertical land motion in Southwest China determined using GPS, GRACE, and surface loading model // Earth, Planets and Space. 2021. Vol. 73. Pp. 1-14. doi: 10.1186/s40623-021-01459-4
3. Zhan W., Tian Y., Zhang Z., Zhu C., Wang Y. Seasonal patterns of 3D crustal motions across the seismically active southeastern Tibetan Plateau // Journal of Asian Earth Sciences. 2020. Vol. 192. P. 104274. doi: 10.1016/j.jseaes.2020.104274
4. Pavlyk V., Kutnyi A., Kalnyk O. Features of the influence of seasonal variation of soil moisture on vertical movements of the Earth's surface // Geodynamics. 2019. Vol. 2(27). Pp. 16-23. doi: 10.23939/jgd2019.02.016
5. Collilieux X., Altamimi Z., Rebischung P, de La Serve M., Métivier L., Chanard K., Boy J-P. A Review of Space Geodetic Technique Seasonal Displacements Based on ITRF2020 Results // Gravity, Positioning and Reference Frames. International Association of Geodesy Symposia. 2022. Vol. 156. Pp 167–173. doi: 10.1007/1345_2023_216
6. OpenWeather [Электронный ресурс] – 2025. – Режим доступа: https://openweathermap.org/city/1528675 (23.04.2025)
7. Zotarelli, Lincoln, Michael D., Consuelo C., Kati W., and Kelly T. «Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method): AE459, 2 2010» // EDIS. 2010. Vol. 2. doi: 10.32473/edis-ae459-2010.

УДК 534.23

РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ СИСТЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВАНИИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ГРАДИЕНТНОЙ УСТАНОВКИ

Стасенко Л.В.
liya_stasenko@list.ru
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

Система сейсмического мониторинга на основе трехкомпонентной градиентной установки позволяет осуществлять длительную многоканальную непрерывную регистрацию сейсмического поля, с возможностью выделения на постобработке его эндогенной составляющей. Помимо регистрации и обработки регистрируемого сигнала было проведено исследование помех, вызванных естественными (природными) и искусственными (техногенными) источниками.

Ключевые слова: трехкомпонентная градиентная установка, сейсмический мониторинг, фильтрация сейсмического поля, энергетическая характеристика сейсмического поля.

Введение. Геодинамические процессы представляют собой изменение напряженно-деформационного состояния крупных литосферных блоков, в данном процессе происходят необратимые деформации горных пород, которые проявляются в процессе трещинообразования. В процессе трещинообразования каждая отдельная трещина генерирует источники, формирующие сейсмические шумовые сигналы-микросейсмы, представляющие собой совокупность упругих колебаний. Область распространения упругих волн с различной частотой колебания представляет собой сейсмическое поле.

Процесс регистрации сейсмических сигналов. Для регистрации сейсмического поля вблизи дневной поверхности применяется трехкомпонентная градиентная установка, которая обеспечивает непрерывную синхронную регистрацию сейсмических сигналов. Градиентная сейсморегистрирующая установка дает возможность разделить упругое поле по направлению распространения волн, производить пространственную фильтрацию. Установка состоит из семи блоков сейсмических датчиков. Блоки сейсмодатчиков записывают три компоненты движения грунта, вертикальную (Z) и две взаимно перпендикулярных горизонтальных (X,Y). В качестве сейсмических датчиков используются датчики скорости смещения GS–20DS фирмы Geospace. Эта модель геофона наиболее широко используется для регистрации колебаний внешней среды и преобразования их в электрические сигналы [1]. Для регистрации изменения малых параметров волны применяется многоканальные АЦП с мультиплексированием входов. Происходит способ передачи нескольких потоков данных по каналу связи одновременно в виде одного сложного сигнала. Для регистрируемых сигналов необходимый диапазон перестройки частоты дискретизации составляет 100-10000 Гц. В качестве регистратора и накопителя информации используется переносной ПК. Соединение ПК и блока АЦП выполняется сетевым кабелем UTP-5 (длина 50 м). Передача данных осуществляется по протоколу Ethernet.

Программное обеспечение необходимое для измерения микросейсмического фона, первичных данных, состоит из двух программ:

- Программа - ***x502_Registrator***, основным назначением программы является регистрация сигналов, поступающих от сейсмических датчиков с возможностью их визуализации в режиме реального времени, с последующим сохранением регистрируемых данных во внешнем компьютере. С помощью программы

осуществляется настройка параметров и режимов работы измерительных каналов (частота дискретизации, коэффициент усиления и т.п.) [2].

- Программа - ***ExpDataProc_x64.exe***. На базе данной программы осуществляются следующие задачи: загрузка, визуализация и предварительная обработка данных зарегистрированных сигналов. На рисунке 1 показан пример полезного зарегистрированного сигнала, открытый в программе ***ExpDataProc_x64.exe***.

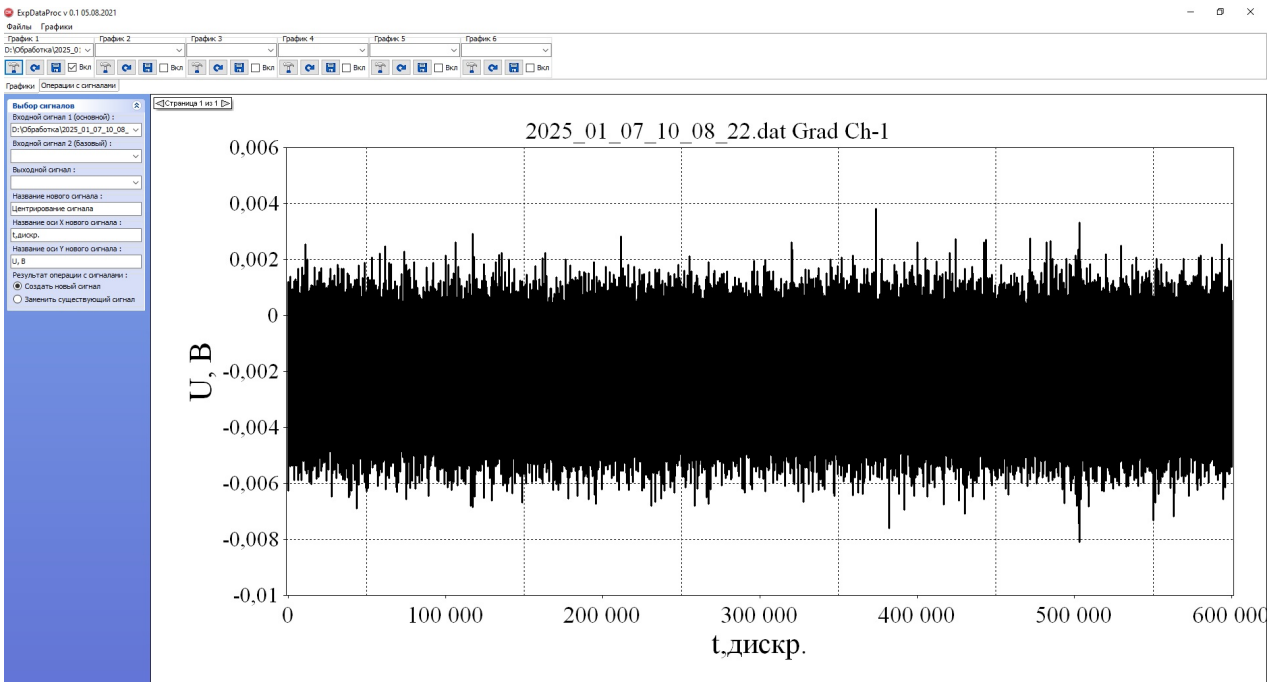


Рисунок 1 – Пример регистрируемого сигнал-микросейсмической активности при помощи многоканальной сейсморегистрирующей градиентной установки

В совокупности с программным обеспечением можно говорить о создании системы мониторинга сейсмического поля [3].

Процесс сейсмического мониторинга. Сейсмический мониторинг проводится на измерительном пункте Научная станция РАН с октября 2023 г. по настоящее время. Основная задача заключается в определении направления распространения сейсмического поля, на основе фильтрации зарегистрированных волн по направлению их распространения с тем, чтобы выделять поля, связанные с процессом трещинообразования.

Микросейсмы, относительно слабые колебания Земли, вызванные суммарным воздействием множества сейсмических источников. Происхождение микросейсм имеет различную природу, источниками могут быть сигналы естественного-природного происхождения, вызванные различными погодными явлениями, так и искусственного-техногенного происхождения. Подобные явления оказывают значительное влияние на регистрируемый сигнал, так как аппаратура расположена вблизи дневной поверхности. На рисунке 2 представлена десятиминутная запись сигнала, зарегистрированная на измерительном пункте во время грозового дождя.

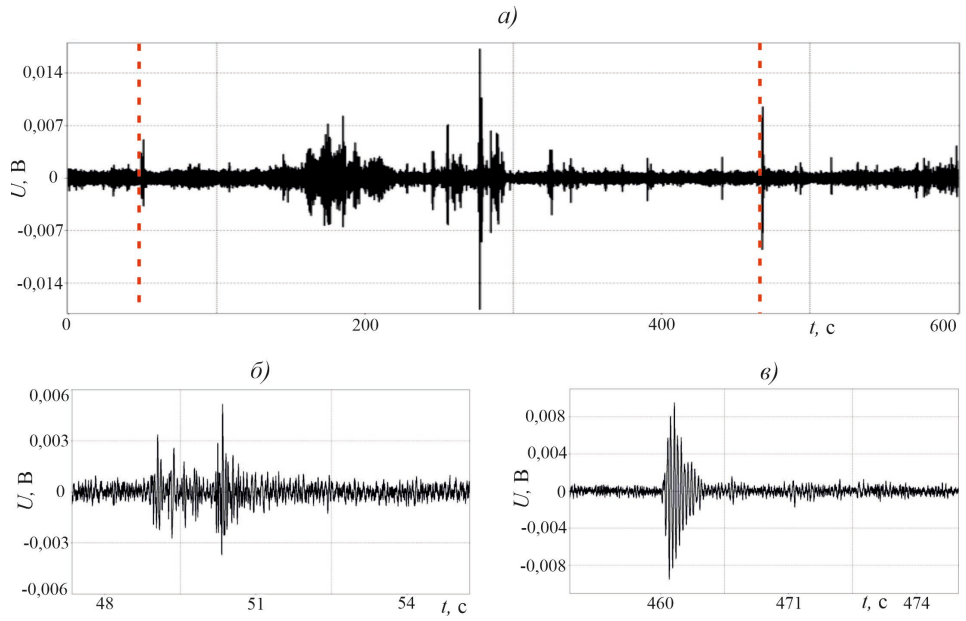


Рисунок 2 – Сигнал, зарегистрированный во время дождя с грозой 15 августа 2024 г. *а)* – полная десятиминутная запись, *б), в)* – увеличенные фрагменты

Как показано на рисунках 2 б), в) на увеличенных фрагментах видно, что уровень помех в десятки раз превышает уровень регистрируемого сейсмического сигнала. Так же такие помехи по своей форме и по энергетике сходны с сейсмическими событиями, что в дальнейшем может затруднять анализ слабой сейсмической активности. Таким образом такие помехи подлежат обязательной отбраковке.

Рассмотрим сигналы, представленные на рисунке 3, на которые большое воздействие имели помехи искусственного-техногенного происхождения. Такие помехи возникают от работы различного рода силовых агрегатов и установок, генерирующих акустические помехи.

Их энергетика, как показано на рисунке 3, значительно превышает не только уровень регистрируемого полезного сигнала, но и уровень сейсмических событий, оказывая значительное влияние на результаты дальнейшей обработки и как правило подлежат отбраковке. Сигналы характеризуются четко выраженной периодичностью. Для таких помех можно разработать алгоритмы их автоматического поиска и устранения.

В процессе мониторинга по регистрируемым данным вычислялись *энергетические характеристики сейсмического поля*, строились *компоненты лунно-солнечных приливов* и составлялся *каталог сейсмических событий*, произошедших вблизи до 100 км. от пункта наблюдения.

Результат сложения сигналов от множества микротрещин при активизации разрушения представляет собой источники сейсмической эмиссии. Для количественной оценки сейсмической эмиссии вводится параметр энергетической характеристики сейсмического поля. Фильтрация сейсмического поля по направлению распространения упругого поля и выделении Wx, Wy, Wz – энергетических характеристик сейсмического поля эндогенного происхождения за вычетом среднего, заключается в выделении из общего потока сейсмической эмиссии волн, направленных субвертикально вверх. В таком случае используются вектора направления распространения волны – nx, ny, nz, по каждой компоненте скорости смещения – Sx, Sy, Sz. Вектор характеризует направление распространения волны [4]. Также вычислялся ротор сейсмического поля – связанный с деформациями сдвига и дивергенция сейсмического поля, связанная с деформациями сжатия и растяжения. Ротор и дивергенция характеризуют свойства источника сейсмического поля. Основной функционал расчета параметров реализован в программной среде MatLab. Энергия сейсмического поля вычислялась на интервале равном 10 минутам.

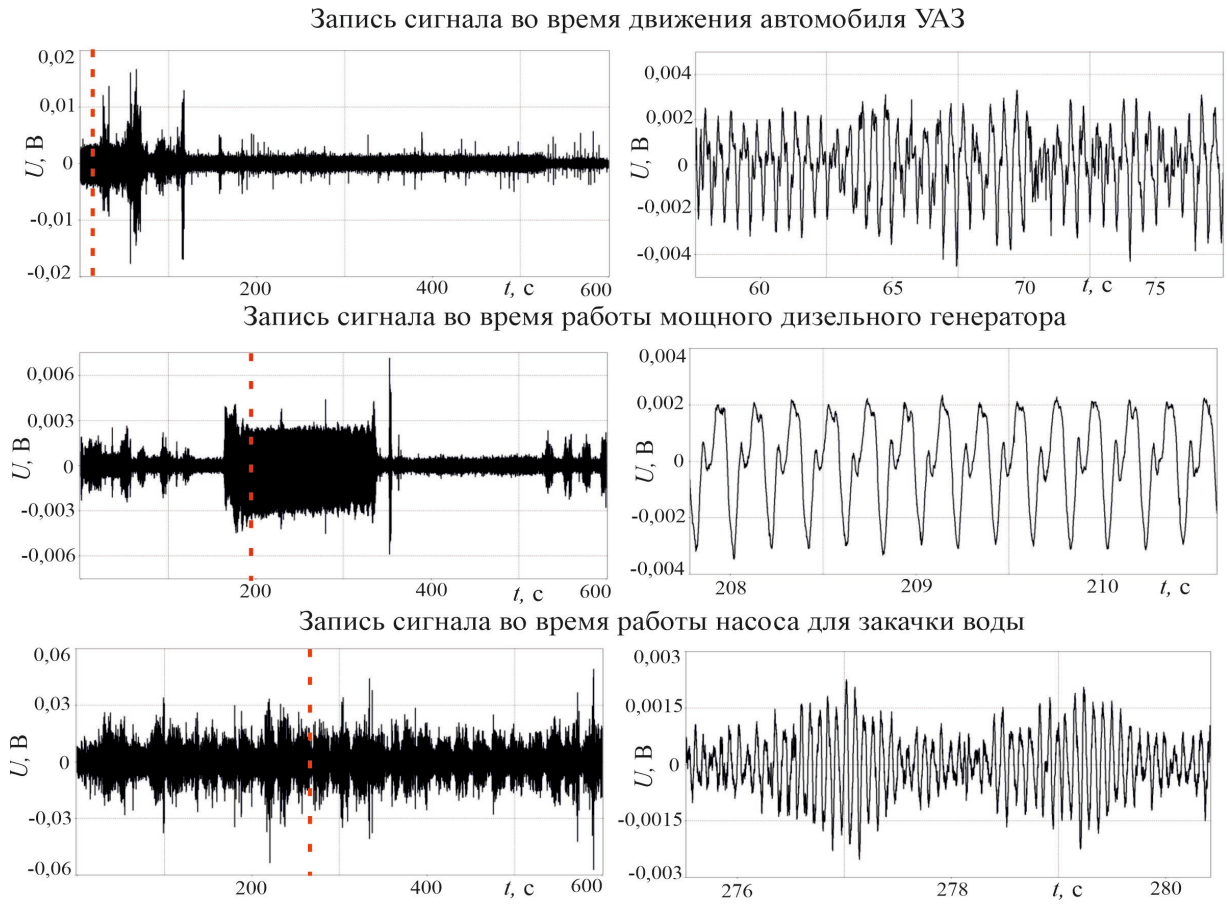


Рисунок 3 – Примеры записей помех искусственного происхождения

Обработанные данные сопоставлялись с лунно-солнечными приливами. Расчет теоретических лунно-солнечных вариаций производился с помощью программы TIDE_3.exe. Программа рассчитывает часовые значения трех компонент приливообразующего ускорения: *An*-вертикальная компонента, *Au*-горизонтальная компонента "запад-восток", *Av*-горизонтальная компонента "юг-север", в единицах ускорения силы тяжести мГал. Географические координаты вводятся в градусах и долях градуса (74.693185, 42.678973).

Для сопоставления обработанных данных с произошедшими сейсмическими событиями с эпицентрами, располагающимися в радиусе 100 км. от места установки аппаратуры, применялся каталога Научной станции РАН, составленный по данным цифровой сети KNET. Наблюдение за слабыми сейсмическими сигналами от землетрясений малых магнитуд (не более M<4), на малых глубинах (не более 10 км.) и на малом эпицентральном расстоянии (не более 100 км.), соответствует цели мониторинга активных геодинамических процессов. Такие землетрясения вносят существенный вклад в микросейсмический фон в сейсмоактивных районах.

На рисунке 4 приведен пример результатов сейсмического мониторинга за 7 суток с 20 по 27 июня 2024 г., включающий все возможные на текущий момент данные.

На верхнем графике (рисунок 4) были выделены часы снижения энергии, ночное время. Учитывая то, что на дневное время (рабочее время), наблюдается увеличение сейсмической энергии, которое связано с помехами искусственного происхождения, можно сделать вывод, что данные помехи оказывают существенное влияние на вычисление энергетической характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения. На среднем графике было проведено сопоставление энергетической характеристики сейсмического поля с произошедшими сейсмическими событиями. Результаты обработки данных позволяют наблюдать за компонентами ротора сейсмического поля, связанных с деформациями сдвига, а также за дивергенцией, связанной с деформациями сжатия и

растяжения этого поля. По результатам проведенных экспериментов было выявлено наблюдение: растяжение в совокупности со сдвиговыми деформациями приводит к увеличению, а сжатие к уменьшению энергетических характеристик сейсмического поля.

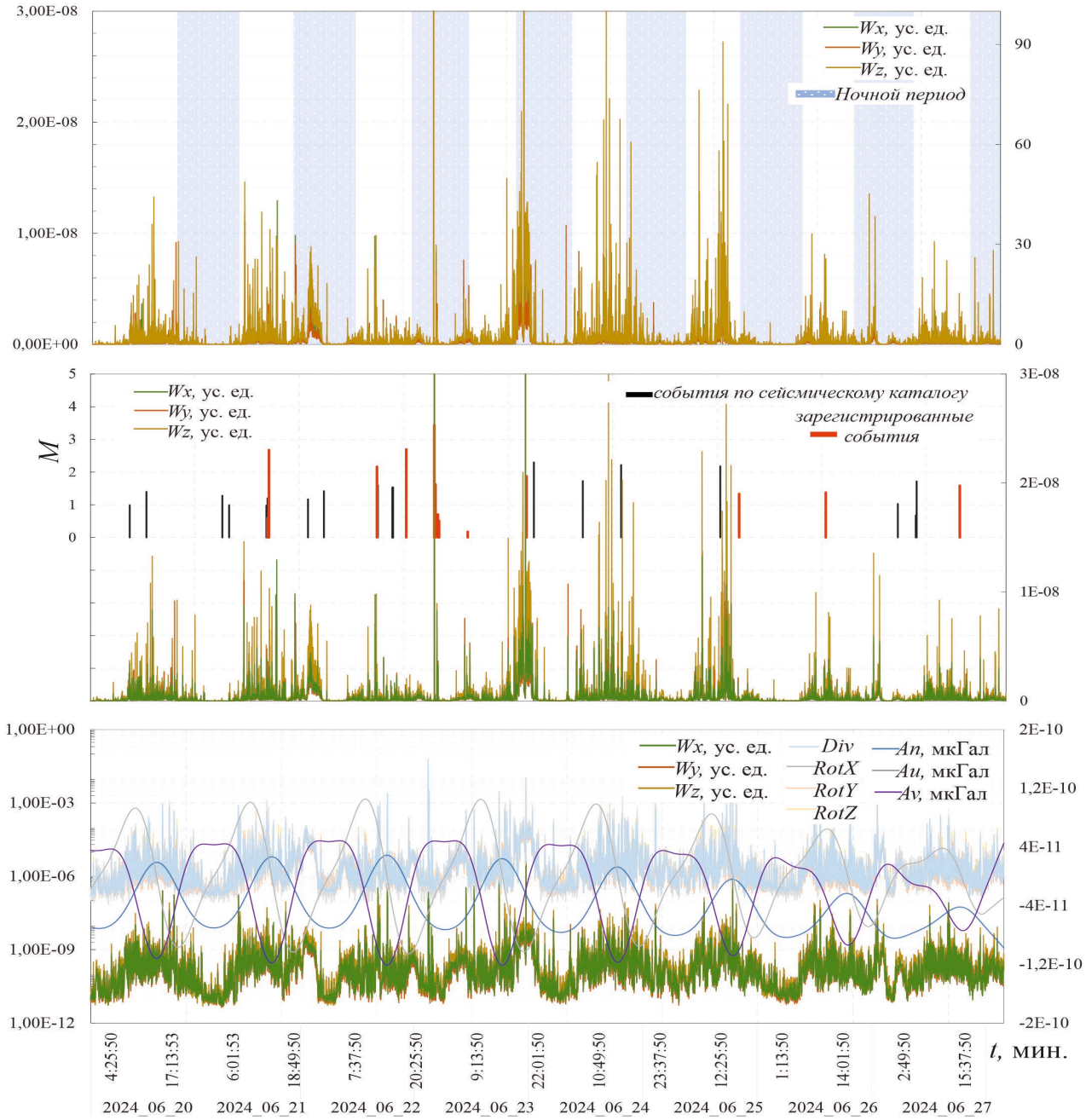


Рисунок 4 – Полные результаты сейсмического мониторинга за 7 суток с 20 по 27 июня 2024 г.: *Wx, Wy, Wz* - энергетические характеристики сейсмического поля, вычисляемые по компонентам вектора смещения Sx, Sy, Sz; Rx – x-вая, Ry – y-вая, Rz – z-вая компоненты ротора сейсмического поля эндогенного происхождения; Div – дивергенция сейсмического поля эндогенного происхождения; компоненты лунно - солнечных приливов: *An* - вертикальная компонента, *Au* - компонента "запад - восток", *Av* - компонента "юг - север"; черным цветом обозначены сейсмические события зарегистрированные сетью KNET, красным цветом обозначены сейсмические события зарегистрированные многоканальной сейсморегистрирующей установкой

Заключение. По полученным данным в ходе сейсмического мониторинга можно отметить, что помехи естественного и искусственного происхождения оказывают значительное влияние на вычисление энергетической характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения, и, следовательно, существует необходимость разработки методов автоматического обнаружения и устранения таких помех. Проведенный анализ позволил выявить основные источники таких помех и наметить дальнейшего работу по возможности их устранения.

Литература

1. Казначеев П.А., Матюков В.Е., Александров П.Н., Непеина К.С. Разработка и опробование трехкомпонентной градиентной установки для регистрации сейсмоакустического поля в геодинамических активных регионах // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55. № 1. С. 46-58.
2. Бобровский В.В. Разработка аппаратурно-программного обеспечения для исследований современных геодинамических процессов в земной коре на территории северного Тянь-Шаня // Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов. Материалы II Всерос. науч. конф., посвященной 300-летию Российской академии наук, г. Москва, 22-24 октября 2024 г. М.: Изд-во ИФЗ РАН. 2024. С. 154-159.
3. Бобровский В.В. Программа регистрации сигналов сейсмоакустического поля x502_Registrator. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2024690867, 18.12.2024.
4. Непеина К.С., Казначеев П.А., Александров П.Н. Сейсмический мониторинг современных геодинамических процессов с использованием градиентной установки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 4. Вып. 44. С. 84-92.

УДК 551.248.2

РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

Стрельников А.А.
aas@ifz.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Данные современных сейсмических сетей в Горном Алтае, которые были развернуты в 1960-х годах, представляют информацию о сильных землетрясениях в некоторых регионах только за последние сто лет. Для достоверной оценки сейсмической опасности и комплексной оценки сейсмического режима этого недостаточно, так как при проектировании и строительстве ответственных объектов запрашивают от сейсмологов данные о сильной сейсмической активности за последние 10–100 тысяч лет. При решении этой задачи ученые используют современные методы палеосейсмологии. Сильные землетрясения с M=5–6 в большинстве случаев оставляют после себя сейсмогенные деформации рельефа. Изучение этих деформаций предоставляет уникальный материал для долговременной и полноценной оценки сейсмической опасности. Были исследованы морфоструктуры и палеосейсмичность северных предгорных зон Алтая. Обнаружены примеры образования сейсмогенных конволюций в речных и озерных отложениях в древних бассейнах озер и рек. Также подобные структуры обнаружены в старых руслах реки Катунь. Сейсмическая активность прошлого также выражена как единичными, так и систематичными примерами значительных горизонтальных подвижек, зачастую кратно превышающих вертикальные.

Ключевые слова: Алтай, палеосейсмология, сильные землетрясения.

Введение. На протяжении многих лет сотрудники лаборатории палеосейсмологии и палеогеодинамики ИФЗ РАН проводили свои исследованиях в Иссык-Кульской котловине, Нарынской и Ошской областях зон Северного, Центрального и Южного Тянь-Шаня. За эти годы были детально изучены новейшие морфоструктуры, а также сейсмодислокации, образовавшиеся во время современных и древних сильных землетрясений. Известный американский академик и исследователь Центральной Азии Питер Молнар называл Тянь-Шань «открытой природной лабораторией», так как проявление и сохранность морфоструктур и сейсмодислокаций на территории орогена является долговечной, а отсутствие значительных растительных покровов в горной области делают ландшафт легко доступным для детального изучения. В связи с вышеизложенным, горы Тянь-Шаня являются уникальным структурным объектом для понимания формирования и развития постплатформенных орогенов, опыт изучения которого был перенесен на горные пояса Российской Федерации, такие как Алтай, покрытые в большей степени обильной растительностью.

Используемые методы. В данной работе были использованы традиционные методы палеосейсмологии и археосейсмологии. Палеосейсмологический метод, основы которого в бывшем СССР заложены работами В.П. Солоненко [9], за прошедшие с момента его создания десятилетия превратился в практичный инструмент обнаружения следов древних землетрясений, оценки их параметров [11]. Опыт палеосейсмологических исследований на данной территории заложен еще с 1980-х годов [3] и затем неоднократно и успешно применялся в разных регионах мира, выработав систему критериев идентификации и параметризации палеосейсмодислокаций [10, 5, 6, 8, 1, 7]. Оценка магнитуд палеоземлетрясений проводилась на основе эмпирических зависимостей между ними и параметрами сейсмогенных разрывов [12].

Проявление тектонических движений четвертичного периода. Характерное проявление тектонических движений четвертичного периода представлено в виде комплексных систематических изменений рельефа, гидрографических объектов, а также изменение структуры внутреннего строения озерных и речных отложений в палеодолине р. Катунь на территории г. Горно-Алтайск. Было исследовано несколько обнажений в карьерах.

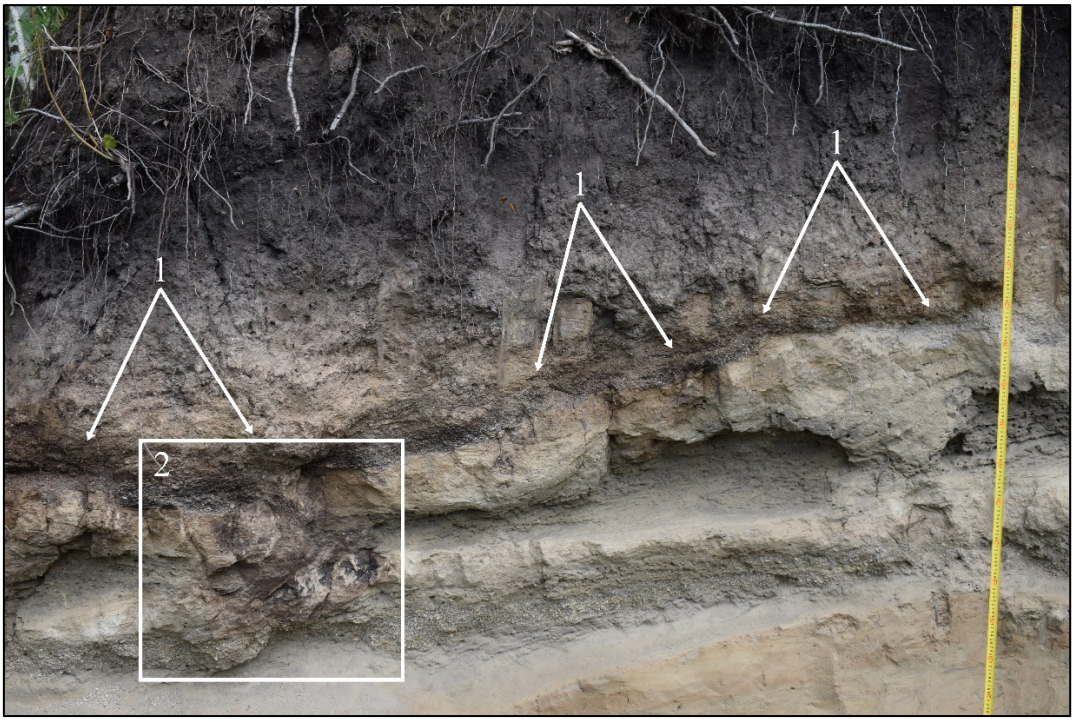


Рисунок 1 – Карьер в 2 км от г. Горно-Алтайска. 1. Пластическая интрузия. 2. Конволютные волнообразные структуры (сейсмиты)

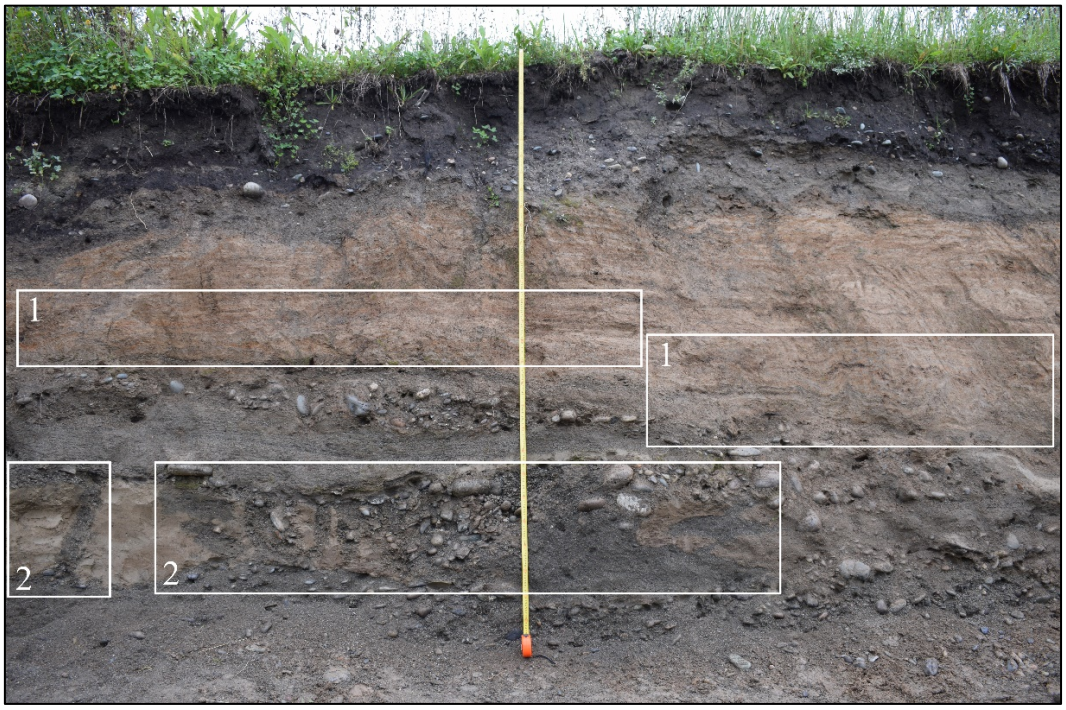


Рисунок 2 – Карьер в 8 км от г. Горно-Алтайска. Общий вид. 1. Текстуры восходящего внедрения. 2. Конволютные пламеневидные структуры (сейсмиты), структуры нагрузки

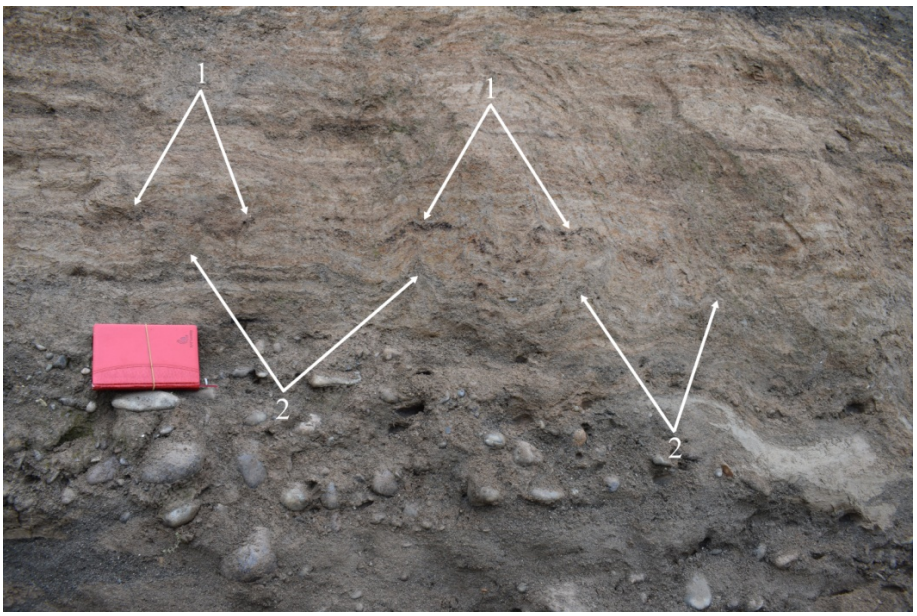


Рисунок 3 – Карьер в 8 км от г. Горно-Алтайска. 1. Структуры нагрузки 2. Конволютные пламеневидные структуры (сейсмиты) в слое суглинков с повторяющейся амплитудой высотой 15-20 см

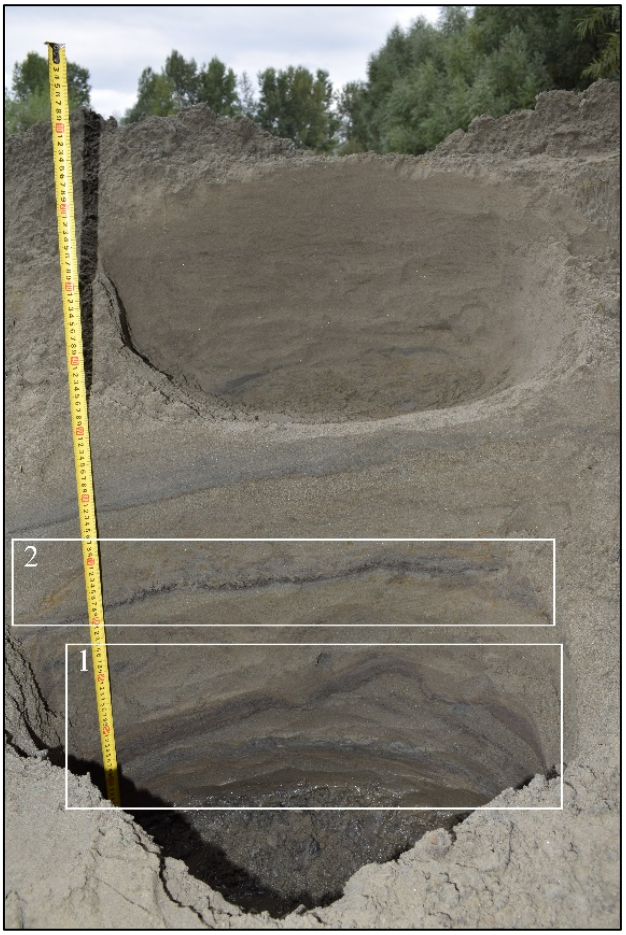


Рисунок 4 – Шурф в левобережье р. Катунь в 22 км от г. Горно-Алтайска. 1. Конволютные волнообразные структуры (сейсмиты). Единственный из трех слоев суглинков, имеющий волнообразные структуры с повторяющейся амплитудой высотой в 5-10 см. 2. Слой крупнозернистого песка имеет схожие формы, но с гораздо меньшей высотой в 3-4 см, но также с повторяющейся амплитудой

Выводы. При помощи палеосейсмологических методов, в частности траншейных работ, морфометрического анализа рельефа и данных дистанционного зондирования удалось обнаружить и выполнить параметризацию нескольких объектов, маркирующих сильные землетрясения в Горно-Алтайском и Маймском районах. Выявлены горизонтальные и вертикальные подвижки по разлому, проходящему поперек р. Катунь. Полученные данные свидетельствуют о необходимости детального изучение региона и уточнения сейсмической опасности густонаселенных районов, часто расположенных вдоль сейсмогенерирующих структур.

Литература

1. Деев Е.В., Корженков А.М. Палеосейсмологические исследования в эпицентральной зоне Кеминского землетрясения 1911 г. в Северном Тянь-Шане // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 2. С. 421-430.
2. Деев Е.В., Турова И.В., Корженков А.М., Лужанский Д.В., Гладков А.С., Родкин М.В., Абдиева С.В., Мажейка Й.В., Рогожин Е.А., Фортуна А.Б., Муралиев А.М., Чаримов Т.А., Юдахин А.С. Результаты палеосейсмологических и археосейсмологических исследований в западной части Ала-Баш-Конуроленской внутригорной впадины (Южное Прииссыккулье, Кыргызстан) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 7. С. 1381-1392.
3. Корженков А.М., Чедия О.К. Новейшая структура и сейсмодислокации Тюлекской и Каракуджурской впадин (Тянь-Шань) // Изв. АН Кирг. ССР. 1986. № 5. С. 26–33.
4. Корженков А.М., Абдиева С.В., Мажейка Й., Муралиев А.М., Фортуна А.Б., Чаримов Т.А., Юдахин А.С. О неизвестных сильных голоценовых землетрясениях на юге Иссык-Кульской котловины, Тянь-Шань // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41. № 2. С. 30-40.
5. Корженков А.М., Эрроусмит Р., Кросби К., Гуральник Б., Рогожин Е.А., Сорокин А.А., Абдиева С.В., Фортуна А.Б., Юдахин А.С., Агатова А.Р., Деев Е.В., Мажейка Й.В., Родкин М.В., Шен Д. Сильные палеоземлетрясения вдоль Аксуйского краевого разлома по материалам датирования смещенного террасового комплекса реки Чон-Аксуу, Северный Тянь-Шань // Физика Земли. 2018. № 2. С. 64-80.
6. Корженков А.М., Абдиева С.В., Рогожин Е.А., Сорокин А.А. Неизвестное сильное землетрясение в Иссык-Кульской котловине // Природа. 2018. № 3. С. 24-35.
7. Овсюченко А.Н., Корженков А.М., Ларьков А.С., Рогожин Е.А., Мараханов А.В. Оценка сейсмической опасности низкоактивных областей на примере Керченско-Таманского региона // Наука и технологические разработки. 2017. Т. 96. № 1. С. 5-18.
8. Смекалин О.П., Имаев В.С., Корженков А.М., Чипизубов А.В. Палеосейсмологические исследования в плейстосейстовой области Беловодского землетрясения 1885 г. в Северном Тянь-Шане // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. № 3. С. 20-32.
9. Солоненко В.П., Хромовских В.С. Палеосейсмологические и сейсмотектонические основы сейсмического районирования Большого Кавказа // Сейсмотектоника южных районов СССР. М.: Наука. 1978. С. 48–63.
10. Чедия О.К., Корженков А.М. О долговременном сохранении геоморфологических следов древних сейсмических катастроф // Геоморфология. 1997. № 3. С. 88-89.
11. McCalpin J.P. Paleoseismology. 2nd ed. Amsterdam; London: Acad. Press. 2009. 615 p.
12. Wells D.L., Coppersmith K.J. Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1994. V. 84. P. 974–1002.

УДК 550.388.2

СОСТОЯНИЕ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ 24-25 МАРТА 2024 ГОДА

Тилеу Г.Б., Мукашева С.Н.
tileugulbanu061199@gmail.com, snmukasheva@gmail.com
Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

В работе рассмотрены вариации критических частот в максимуме слоя F2, f_0F2, для среднеширотных станций Rostov [47,24°N, 39,63°E] и Almaty [43,25°N, 76,93°E] с использованием ассимиляционной модели реального времени IRI Real-Time Assimilation Mapping (IRTAM). Вариации параметров ионосферы показаны во время уникального гелио-геомагнитного события 24-25 марта 2024 года. Показано, что относительные отклонения значений f_0F2, полученные по модели IRTAM, от наземных наблюдений на станции Rostov [47,24°N, 39,63°E] составляют в среднем за сутки 11,53 % в геомагнитно возмущенные дни. При этом относительные отклонения максимальных суточных значений f_0F2 составляют 18,93 %. Методика анализа геофизических данных может быть использована для оценки состояния верхних слоев земной атмосферы в периоды экстремальных солнечных событий в регионах, где отсутствуют наземные ионосферные обсерватории.

Ключевые слова: ионосфера, геомагнитная буря, солнечная вспышка.

Введение. Экстремальные солнечные события, такие как вспышки, сопровождающиеся выбросом мощного магнитного облака (Coronal Mass Ejections, CMEs), вызывают возмущение магнитного поля и верхних слоев атмосферы Земли [1-2]. Неослабевающий интерес мировой общественности к расширению и всестороннему развитию спутниковых средств связи ставит задачи исследования ионосферы в ранг актуальных. Космические исследования в Казахстане имеют давние традиции, с 1943 года функционировала ионосферная станция Алматы (Almaty) [43,25°N, 76,93°E], которая в течение нескольких десятилетий в круглосуточном режиме вела измерение ионосферных параметров, их первичную обработку и предоставление результатов измерений различным потребителям [3]. В последние годы по техническим причинам ионосферная станция Алматы не функционирует, в настоящее время ведутся работы по установлению современного ионозонда и включению его в международную сеть ионосферных наблюдений. В регионах, где отсутствуют наземные ионосферные обсерватории, успешно можно использовать современные технологии, такие как ассимиляционная модель ионосферы IRI Real-Time Assimilation Mapping (IRTAM) [4-5]. IRTAM использует преимущества ионосферной модели IRI (International Reference Ionosphere), которая описывает поведение ионосферы в магнитоспокойных условиях. IRTAM использует данные сети ионозондов вертикального зондирования, предоставляемые Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) [6]. В модели IRTAM используется эмпирическая модель магнитного поля Земли IGRF (International Geomag Netic Reference Field) для корректного учета геомагнитного поля. Солнечная активность в IRTAM учитывается автоматически посредствам ассимиляции данных наблюдений [4-5]. Авторы работы [7], сравнивая поведение возмущения критической частоты слоя F2, foF2, в период геомагнитной бури 17 марта 2015 г. полученного по модели Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП), с результатами по модели IRTAM, отмечают, что в целом они согласуются.

В настоящей работе рассмотрены вариации параметров ионосферы для среднеширотной станции Алматы (Almaty) [43,25°N, 76,93°E] во время уникального гелио-геомагнитного события 24-25 марта 2024 года с использованием ассимиляционной модели реального времени “IRTAM”.

Использованные данные. Данные геомагнитной «Алма-Ата» [43.176ºN 76.951ºE] Институт ионосферы, Алматы, Казахстан (geomag.ionos.kz). Данные по среднеширотной станции вертикального зондирования города Ростов [47°14′ N; 39°42′E], представленной на сайте Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова (http://ipg.geospace.ru/ionosphere-data-graph/) [8]. Данные о максимальной плотности и высоты в ионосфере на основе ассимиляционной модели реального времени «IRTAM» (https://giro.uml.edu/rix/gambit-local-nowcast/). Характеристики солнечного ветра с сайта ACE: http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/ace/. Информация о магнитных бурях представляется на основе так называемого планетарного индекса Kp с сайта лаборатория солнечной астрономии и гелиофизического приборостроения (ИКИ РАН и ИСЗФ СО РАН): https://xras.ru/magnetic_storms.html/almaty/?m=3&d=24&y=2024.

Описание гелиогеофизической обстановки 24-25 марта 2024 года. Сильная вспышка высшего класса X на Солнце была зарегистрирована 02 UT 23 марта 2024 г., вспышка сопровождалась корональным выбросом массы (coronal mass ejections, CMEs) в направлении «Солнце – Земля». По данным спутника ACE скорость солнечного ветра увеличилась почти в два раза до примерно 800 км/сек (рисунок 1).

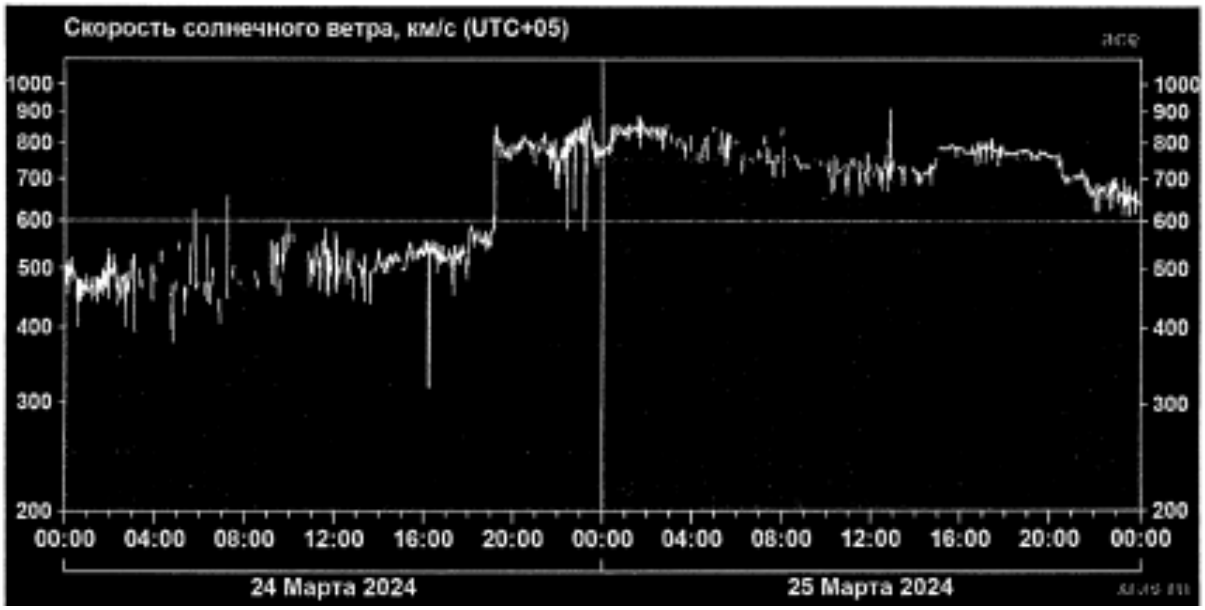


Рисунок 1 – Изменчивость скорость солнечного ветра по данным спутника ACE

В магнитосфере Земли произошла сильная магнитная буря уровня G4. Изменения геомагнитного индекса Kp с 23 по 25 марта 2024 г. для средних широт показаны на рисунке 2. Рассмотрим суточные вариации критических частот слоя F2, f_0F2, предоставленные на сайте GLOBAL IONOSPHERE RADIO OBSERVATORY (https://giro.uml.edu/) на основе ассимиляционной модели реального времени «IRTAM» (https://giro.uml.edu/rix/gambit-local-nowcast/). На рисунке 3 приведены вариации f_0F2 для среднеширотных станций: в левом столбце – Rostov [47,24°N, 39,63°E], в правом столбце – Almaty [43,25°N, 76,93°E], при этом для магнитовозмущенных дней: a) и b) – для 24 марта 2024 г.; c) и d) – 25 марта 2024 г. Вариации f_0F2 для магнитоспокойного дня 5 марта 2024г. приведены на рисунке 3,f и 3,e.

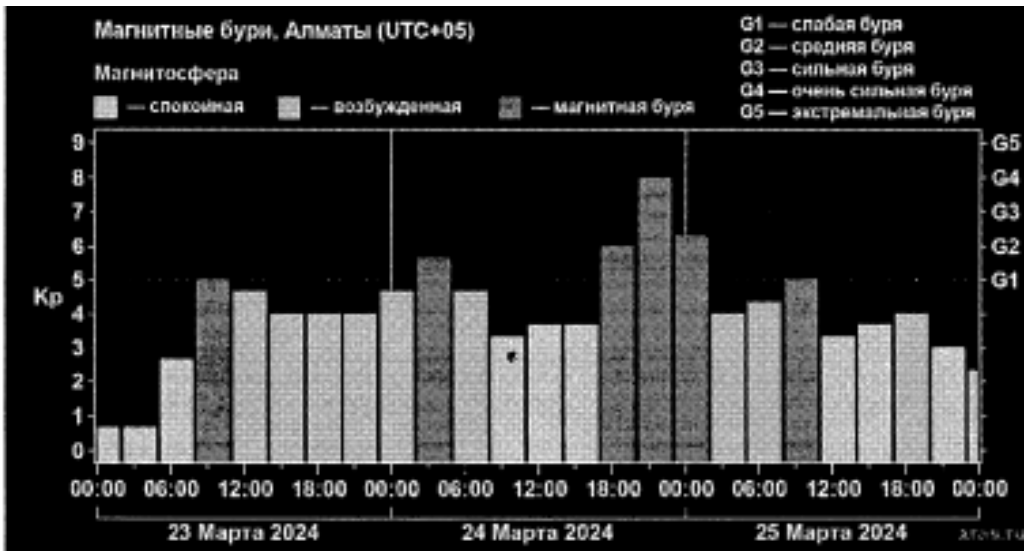


Рисунок 2 – Изменения Kp индекса с 23 по 25 марта 2024 года для средних широт

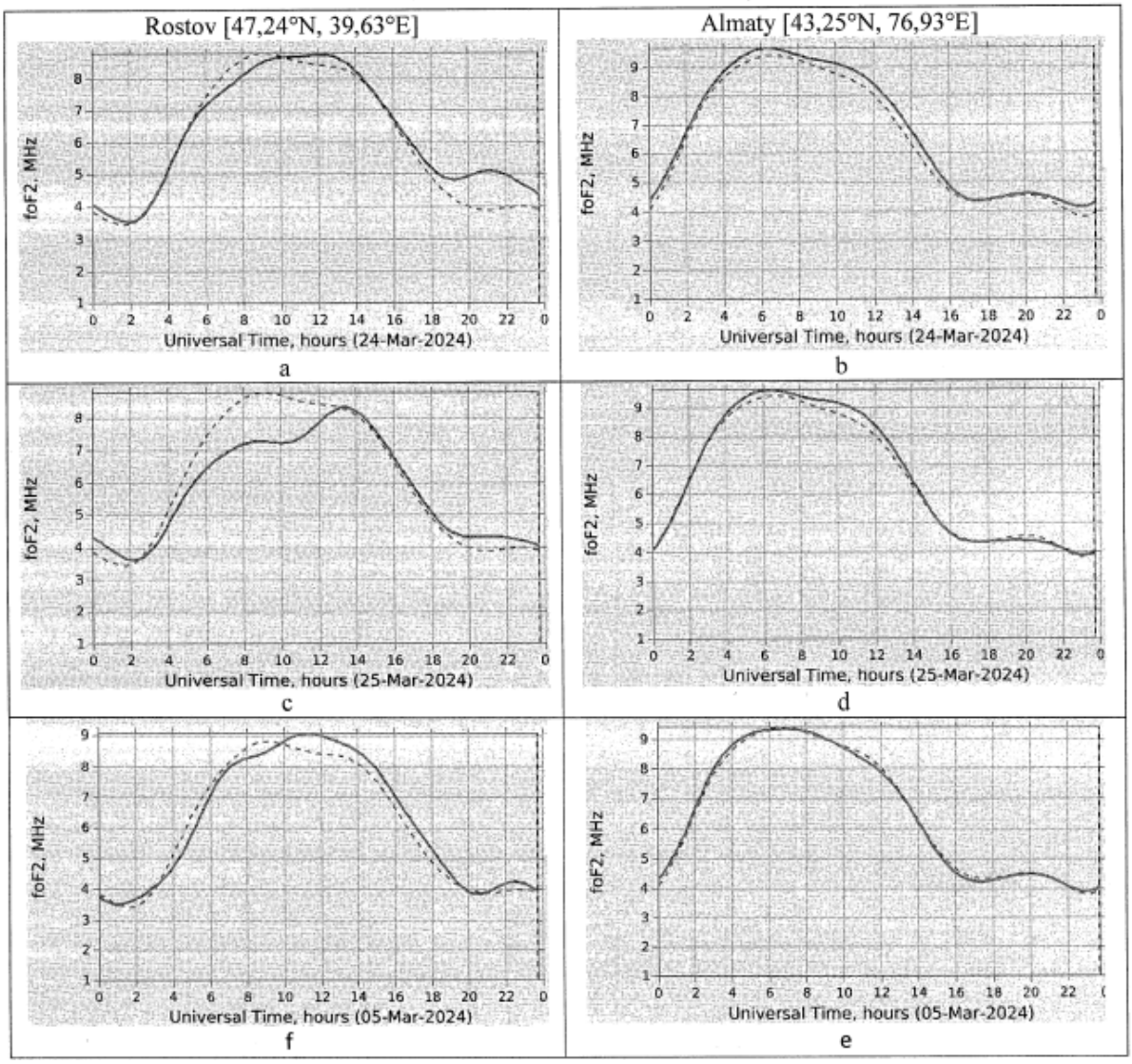


Рисунок 3 – Вариации f_0F2 для среднеширотных станций Rostov [47,24°N, 39,63°E] (левый столбец) и Almaty [43,25°N, 76,93°E] (правый столбец). Сплошная кривая – IRTAM; пунктирная – IRI

Результаты и обсуждение. Рассматриваемый период очень близок к весеннему равноденствию, когда амплитуды суточных вариаций максимальные, и для среднеширотных станций меняются от ~ 4 МГц до ~ 5 МГц. Рост электронной концентрации происходит непрерывно от утренних 06 LT до полуденных 12 LT (рисунок 3), затем его уменьшение до 22-24 LT. Мы рассмотрели относительные отклонения часовых значений f_0F2, измеренных на станции Rostov [47,24°N, 39,63°E] от f_0F2, полученных по модели IRTAM, по формуле:

$$\delta fo\text{F2}=((fo\text{F2}_{\text{Ростов}}-fo\text{F2}_{\text{IRTAM}})/\ fo\text{F2}_{\text{Ростов}})\times 100,\ \%.$$

Относительные отклонения часовых значений f_0F2, полученные по модели IRTAM, от наземных наблюдений на станции Rostov [47,24°N, 39,63°E] составляют в среднем за сутки 11,53 % в геомагнитно возмущенные дни 24 и 25 марта 2024 г. При этом относительные отклонения максимальных суточных отклонений составляют 18,93 % в 12 LT.

Для магнитоспокойного дня 5 марта 2024 г. отклонения часовых значений f_0F2, полученные по модели IRTAM, от наземных наблюдений на станции Rostov [47,24°N, 39,63°E] составляют в среднем за сутки 11,69 %. Также были рассмотрены относительные отклонения часовых значений f_0F2 от медианных для станции Rostov, которые показали среднее значение 19,28 % и 24,80 % на 24 и 25 марта 2024 г., соответственно. Для 5 марта 2024 г. отклонения часовых значений f_0F2 от медианных составляет 23,21 %.

Выводы. Для среднеширотных пунктов, в которых не ведутся ионозондные наблюдения, допустимо использование результатов ассимиляционной модели ионосферы IRI Real-Time Assimilation Mapping (IRTAM), как для возмущенных и спокойных гелиогеофизических условий. В перспективе мы планируем продолжить исследования в этом направлении.

Методика анализа гелиогеофизических данных может быть использована для оценки состояния ионосферы на средних широтах в периоды экстремальных солнечных событий в регионах, где отсутствуют наземные ионосферные обсерватории.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант ИРН AP26103851).

Литература

1. Мирошниченко Л.И. Физика Солнца и солнечно-земных связей: учеб. пособие // Под ред. М.И. Панасюка. М.: Университетская книга. 2011. 174 с.
2. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ИСЗФ СО РАН. 2006. 480 с.
3. Дробжев В.И., Мукашева С.Н. История развития ионосферных исследований в Казахстане // Радиотехника, электроника и связь (РЭиС-2017): Материалы. междунар. науч.-техн. конф. в рамках Междунар. форума высоких технологий и техники для Арктики, Сибири и Дальнего Востока («ВТТА-Омск-2017»). Омск. 2017. С. 15-22.
4. Galkin I.A., Reinisch B.W., Huang X., Bilitza D. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI // Radio Science. 2012. V. 47. RS0L07. doi: 10.1029/2011RS004952
5. Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Захаренкова И.Е., Веснин А.М., Ратовский К.Г., Галкин И.А., Черняк Ю.В., Ясюкевич Ю.В., Коренькова Н.А., Котова Д.С. Суточные и долготные вариации в ионосфере Земли в период солнцестояния в условиях глубокого минимума солнечной активности // Космические исследования. 2016. Т. 54. № 1. С. 10–22. DOI: 10.7868/S0023420616010106.
6. Reinisch B.W., Galkin I.A. Global ionospheric radio observatory // Earth, planets and space. 2011. Vol. 63. No. 4. P. 377–381.
7. Котова Д.С., Клименко М.В., Клименко В.В., Благовещенский Д.В., Захаров В.Е. Анализ высокоширотных ионограмм наклонного зондирования в период геомагнитной бури 17 марта 2015 г. // Physics of Auroral Phenomena. Proc. XLI Annual Seminar. Apatity. 2018. P. 131-134. DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.131-134.

УДК 550.83.04(575.1)

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ И ПОДГОТОВКЕ СТРУКТУР В РЕСПУБЛИКЕ УЗБЕКИСТАН

Хмыров П.В., Абдураимов М.Х., Тухтаев Р.Р., Богданов А.Н.
pkhmirov@gmail.com
Институт геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений, г. Ташкент, Узбекистан

В статье приводится информация об основных результатах проведённых геофизических работ на территории Республики Узбекистан за 2023-2024 годы. Геолого-экономическая оценка результатов проведённых работ производилась по таким расчетным показателям, как количество выявленных и подготовленных объектов, их размеры, средняя стоимость одной подготовленной структуры и 1 квадратного километра площади, 1 тонны условного топлива перспективных ресурсов и т.д. По результатам, сделаны выводы об эффективности геофизических исследований, проведённых в этот период на территории Республики Узбекистан.

Ключевые слова: геолого-экономическая эффективность, геофизические работы, площадь, структура, стоимость, затраты.

Введение. Геологоразведочные работы на нефть и газ – это сложная научно-производственная система, объединяющая воедино комплекс научных знаний о геологическом строении изучаемой территории, научные и производственные подразделения геологоразведчиков, методические приемы, технические средства изучения и др.

На любом этапе геологоразведочных работ главной задачей является повышение их эффективности, что неразрывно связано, в том числе, с объемом и качеством выявления и подготовки структур к глубокому бурению.

Этап поисковых геолого-геофизических исследований разделяется на стадию выявления и подготовки объектов к поисковому бурению и стадию поиска месторождений (залежей). Стадия выявления и подготовки объектов к поисковому бурению, в свою очередь, подразделяется на подстадию выявления объектов и подстадию подготовки их к поисковому бурению.

Для успешного поиска залежей нефти и газа необходимо постоянное наличие перспективных объектов на каждой стадии геологоразведочных работ. Так, например, количество объектов и возможность выбора среди них наиболее привлекательных для дальнейшей подготовки определяется обеспеченностью выявленными структурами. При этом огромное значение имеет степень достоверности выявленных объектов [1].

В настоящей статье анализируются результаты геофизических работ по выявлению и подготовке структур за период 2023-2024 гг.

Материалы исследования. В основу исследований положен комплексный анализ выполненных геофизических работ на территории Республики Узбекистан за период 2023-24 гг.

Результаты. По состоянию на 01.01.2025 г. в Республике Узбекистан на балансе Министерства горнодобывающей промышленности и геологии числятся 144 выявленные ловушки (в Устюртском регионе – 41, в Бухаро-Хивинском регионе – 72, в Юго-Западно-Гиссарском регионе – 4, в Сурхандарьинском регионе – 3, в Ферганском регионе – 15 и на новых территориях (Средняя Сырдарья и Заравшанская впадина) – 9), закартированные различными методами.

За период 2023-2024 гг. на территории республики выявлено 44 ловушек. Как показал анализ, единственным методом для выявления структур является сейсморазведка МОГТ. При этом сейсморазведкой МОГТ-2Д выявлено 32 объекта (72,7%), а сейсморазведкой

МОГТ-3Д –12 (27,3%).

Из общего количества выявленных ловушек всего лишь 11 (25 %) имеют размеры по длине оси от 7 до 11 км, у остальных 33 (75 %) они равны от 1 до 6 км.

Как видим, среди выявленных структур преобладают ловушки малые (до 12 км^2) по площади и к тому же малоамплитудные. Следовательно, при условии их подтверждения и ввода в глубокое бурение, вновь открываемые месторождения нефти и газа будут, в основном, мелкими по запасам. Исключением могут являться месторождения Бухаро-Хивинского региона с рифовым типом ловушки и крупной концентрацией углеводородов за счёт высоты продуктивности или многопластовые месторождения Устюртского региона.

Одним из необходимых условий успешного поиска залежей углеводородного сырья является наличие фонда подготовленных объектов. Количество, качество, размеры и перспективные ресурсы подготовленных объектов позволяют определить первоочередные из них для постановки дальнейших геологоразведочных работ.

В связи с этим приводится анализ результатов поисково-детальных геолого-геофизических работ по выявлению и подготовке площадей к поисковому бурению с использованием таких показателей, как обеспеченность глубокого бурения подготовленными структурами, стоимость, продолжительность и подтверждаемость подготовки одной структуры.

Эти исследования за рассматриваемое время в пределах Республики Узбекистан осуществлялись сейсморазведочными работами МОГТ 2Д, 3Д, в комплексе с вертикальным сейсмическим профилированием (ВСП), электроразведочными работами и грави-магниторазведкой.

По состоянию на 01.01.2025 г. в Республике Узбекистан на балансе Министерства горнодобывающей промышленности и геологии числятся 160 подготовленных различными методами ловушек с числящимися перспективными ресурсами.

За период 2023-2024 гг. в Республике Узбекистан подготовлено 37 структур (табл. 1). Как показал анализ, основным методом для подготовки структур является сейсморазведка МОГТ. При этом сейсморазведкой МОГТ-3Д подготовлено 16 (43,2%) объектов, а сейсморазведкой МОГТ-2Д – 21 (56,7%).

Основное количество структур (34) имеют площадь до 15 км^2, а у 3-х площадь изменяется от 15 км^2 до 24 км^2. Амплитуда структур в целом изменяется в очень широком диапазоне. Большинство объектов имеет амплитуду до 100 м (27, или 72,9 %). Количество перспективных объектов, амплитуда которых равна 100 м и более, составляет 10 единиц. Максимальная амплитуда – 250 м. Таким образом, на территории Республики Узбекистан в настоящее время в резерве подготовленных ловушек имеются как мелкие и средние по размерам ловушки, так и крупные [2, 3].

За последние 2 года (2023-2024 гг.) на территории Республики Узбекистан ежегодно подготавливались от 18 до 19 новых ловушек.

В целом за два года (2023-2024 гг.) подготовлено 37 ловушек, из которых 10 (27,0 %) за этот же период были введены в глубокое бурение, на которых в последующем открыто 1 (2,7 %) месторождение и на 9 продолжаются буровые работы или они перешли в стадию испытания. Достигнутый коэффициент успешности от количества опоискованных структур равен 0,1. Данный коэффициент, очевидно, будет меняться в последующие годы. Максимально высокий показатель может составить 1,0, а максимально низкий – 0,1.

Таблица 1 – Республика Узбекистан. Эффективность работ по подготовке структур за период 2023-2024 гг.

Регионы	Количество подготов-ленных структур, ед.	Ресурсы УВ категории C_3 (извлекаемые)				Общая площадь, подготовленных структур, кв.км.	Средняя площадь, приходящаяся на 1 подготовленную структуру, км^2.	Средняя стоимость 1 км^2 подготовленной площади, тыс. $	Общие затраты на подготовку структуры, тыс. $	Средняя стоимость 1 подготовленной структуры, тыс. $	Средняя стоимость подготовки 1 т.у.т. перспективных ресурсов категории C_3 $	Средние ресурсы категории C_3, приходящиеся на 1 подготовленную структуру, млн. т.у.т.
		Газ, млн. м^3	Конденсат, тыс.т.	Нефть, тыс.т.	УВ, млн. т.у.т.							
2023 год												
Устюртский регион	5	94142	4775	0	116,03	36,9	7,4	329,8	2434	487	0,021	23,207
Бухаро-Хивинский регион	10	36403	1545	0	44,44	84,55	8,5	367,8	3110	311	0,070	4,444
Сурхандарьинский регион	2	4665	0	1456	7,49	10,2	5,1	26,7	136	68	0,018	3,747
Хорезм	1	9339	353	0	11,34	18,4	18,4	5,1	93	93	0,008	11,338
Ферганский регион	0	0	0	0	0,00	0	0,0	0,0	0	0	0,000	0,000
Итого за 2023 год	**18**	**144549**	**6673**	**1456**	**179,30**	**150,1**	**8,3**	**693**	**5773**	**321**	**0,032**	**9,961**
2024 год												
Устюртский регион	5	34931	814	0	41,68	32,5	6,5	247,2	1607	321	0,039	8,337
Бухаро-Хивинский регион	11	46905	1777	1697	59,38	131	11,9	233,7	2783	253	0,047	5,398
Сурхандарьинский регион	1	2448	0	1891	5,54	6,5	6,5	19,4	126	126	0,023	5,544
Хорезм	0	0	0	0	0,00	0	0,0	0,0	0	0	0,000	0,000
Ферганский регион	2	0	0	8175	11,69	25,1	12,6	20,0	251	126	0,021	5,845
Итого за 2024 год	**19**	**84284**	**2591**	**11763**	**118,30**	**195,1**	**10,3**	**464**	**4767**	**251**	**0,040**	**6,226**
2023-2024 гг.												
Устюртский регион	10	129073	5589	0	157,72	69,4	13,9	577,0	4041	808	0,06	31,54
Бухаро-Хивинский регион	21	83308	3322	1697	103,81	215,6	20,4	601,5	5893	564	0,12	9,84
Сурхандарьинский регион	3	228833	9264	13219	13,04	16,7	11,6	1156,8	262	572	0,07	16,19
Хорезм	1	9339	353	0	11,34	18,4	18,4	5,1	93	93	0,00	0,00
Ферганский регион	2	0	0	8175	11,69	25,1	12,6	20,0	251	126	0,10	39,88
Итого за 2023-2024 гг.	**37**	**450553**	**18528**	**23091**	**297,60**	**345,2**	**9,3**	**1130**	**10540**	**285**	**0,035**	**8,043**

Изменение средней стоимости подготовки 1 структуры по регионам Республики Узбекистан и по годам показано в таблице 1. Как мы видим, средняя стоимость подготовки одной структуры изменяется от 93 тыс. долл. США до 487 тыс. долл. США. Средняя площадь, приходящейся на одну подготовленную структуру изменяется от 5,1 км^2 до 18,4 км^2.

В таблице 1 приводится эффективность подготовки структур за период 2023-2024 гг. Как мы видим средняя площадь, приходящаяся на одну подготовленную структуру, составляет 9,3 км^2, а среднее количество перспективных ресурсов углеводородного сырья категории C_3 на одной подготовленной структуре равно 8,03 млн. т.у.т. Усредненные за два года затраты на подготовку 1 структуры составили – 285 тыс. долларов США. Средние затраты на подготовку 1 т.у.т перспективных ресурсов категории C_3 в недрах равны 0,035 долларов США [2].

Выводы. Несмотря на то, что общий фонд выявленных ловушек достаточно большой (144 единицы), активными при подготовке являются лишь объекты, срок выявления которых составляет 5-6 лет. Степень участия остального фонда ловушек, в последующих стадиях поисково-разведочного процесса составляет незначительную долю, т.е. оказывается пассивным. Учитывая, что количество ежегодно выявляемых объектов превышает количество подготовленных в среднем на 3-5 единиц, существующий фонд выявленных будет пополняться на эту разницу структур.

Если же говорить о подготовленных объектах, то в последние годы вновь подготавливаемые структуры не «залеживаются» в фонде подготовленных, а практически сразу переходят в следующую стадию (поискового бурения). Анализ результатов, полученных на подготовленных за последние годы объектах, показывает, что проведение геофизических работ оказалось целесообразным и экономически эффективным. Всё это подтверждает необходимость продолжения активного проведения геофизических работ по выявлению и подготовке перспективных объектов.

Литература

1. Хмыров П.В., Абдураимов М.Х., Богданов И.А., Мирзалиев А.Т. Результаты и эффективность подготовки структур к глубокому бурению за период 2014-2018 гг. // Актуальные проблемы нефтегазовой геологии и инновационные методы и технологии освоения углеводородного потенциала недр. Сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., г. Ташкент,10-11 октября 2019 г. Ташкент. 2019. С. 245-248.
2. Шарипов И.Р. Абдураимов М.Х. Показатели эффективности подготовки структур к глубокому бурению в Республике Узбекистан // Нефть и газ Узбекистана. Материалы семинара молодых учёных в рамках международной выставки и науч.-техн. конф., г. Ташкент, 16-18 мая 2018 г. Ташкент. 2018. С 46-48.
3. Богданов А.Н., Хмыров П.В., Абдураимов М.Х., Тухтаев Р.Р. Определение рейтинга подготовленных структур и выделение первоочередных для проведения геологоразведочных работ в Бухаро-Хивинском регионе // Состояние и перспективы развития геологоразведочных работ на нефть и газ в Республике Узбекистан. Сб. материалов Республ. науч.-техн. конф. Ташкент. 2022. С. 12-16.

УДК 624.131:551.311.234.3(575.1)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОСАДОЧНОСТЬ ЛЕССОВЫХ ПОРОД ФЕРГАНСКОЙ МЕЖ ГОРНОЙ ВПАДИНЫ

Хусомиддинов А.С., Бозоров.Ж.Ш., Ядигаров.Э.М., Исроилов.Х.Б.
ahrorhs1980@gmail.com
Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

В работе проанализированы основные факторы, влияющие на просадочность лессовых пород Ферганской межгорной впадины на базе технологий ГИС и материалов космических съёмок. Разработана цифровая топооснова в масштабе 1:500000. Её трехмерное представление позволило провести исследования более точно. По результатам исследований разработана цифровая схематическая карта прогноза просадочности территории распространения лессовых пород Ферганской впадины и на ее основе усовершенствованы научные основы оценки сейсмической опасности, где по просадочности лессовых территорий разделены на четыре района. Определены закономерности распространения лесса и лессовых пород по территории Ферганской межгорной впадины. Изучены толщина и распространение лесса и лессовых пород различных генетических классов.

Ключевые слова: ГИС - геоинформационная система, дистанционное зондирование земли, интегрированные технологии, лессовые породы, инженерная геология, просадочность.

Ферганская впадина расположена в восточной части Узбекистана. Это глубокая и сложная в структурном отношении межгорная впадина эллипсовидной формы, со всех сторон окружена высокими Кураминским, Чаткальским, Ферганским, Алайским, Туркенстанским хребтами и на западе имеет узкий проход в голодную степень [1]. Хребты сложены палеозойскими, мезозойско-кайнозойскими отложениями и имеют абсолютные высоты около 1500-3500 м. Их склоны изрезаны многочисленными речными долинами, которые представляются самостоятельными межгорными впадинами с абсолютной высотой 800-1500 м.

По устройству поверхности Ферганской впадины четко выделяется три зоны: горная, предгорная и равнинная. В инженерно-геологическом отношении особое место занимают равнинная и предгорная зоны, в которой расположены 85-90 % народнохозяйственных объектов региона. Равнинная часть состоит из сочетаний покатых равнин с хорошо выраженными конусами выносов. Ближе к середине состоит из плоских предгорных равнин и террасированной аллювиальной равнины, представленной долинами р. Сырдарьи и ее притоков - Нарына и Карадарьи. Равнины обрамляются полосой предгорий из адырных поднятий и небольших по размерам заадырных и межадырных впадин.

Адыры характеризуется мягким рельефом, имеют вид невысоких гряд, расчлененных долинами постоянно и временно действующих водных потоков с глубиной вреза до 200 м. Рельеф заадырных впадин равнинный, общий уклон поверхности от гор к адырам и руслам прорезающих их потоков. Абсолютные отметки поверхности равнинной части колеблются от 330 до 690 м, возрастая с запада на восток вверх по течению Сырдарьи, а также на север и на юг в сторону от русла рек.

В геологическом строении региона участвуют разнообразные осадочные, магматические, метаморфические породы палеозоя (в основном выше высот 1800 м), перекрытые мезокайнозойскими и четвертичными отложениями. Формирование, распространение и условия их залегания взаимосвязаны со структурно-тектоническими морфоструктурными особенностями Ферганской межгорной впадины. Характеристики главнейших молодых

структур Ферганской межгорной впадины описаны рядом авторов (М.С. Сайдалиевой, Р.Н. Ибрагимова, А.Р. Ходжаева, Ш.Д. Давлятова, М. Ходжибаева, М.А. Ахмеджанова, О.М. Борисова и др.). На основе этих работ М.Ш. Шерматовым характеристики главнейших структур детализованы по следующим зонам: Северо-Ферганская зона антиклинальных поднятий, Восточно-Ферганская зона антиклинальных поднятий, Южно-Ферганская и юго-восточная зоны антиклинальных поднятий, зона Центрально-Ферганских антиклинальных поднятий.

Анализ структурно-тектонических и морфоструктурных характеристик основных молодых антиклинальных структур Ферганской межгорной впадины показывает, что лессовые отложения в основном представлены аллювиальными, аллювиально-пролювиальными, пролювиальными генетическими типами, а по литологическому составу- лессами, лессовидными суглинками, супесями нижнего, среднего, верхнего неоплейстоцена и голоцена. Пролювиальные лессы и лессовидные породы Ташкентского комплекса (LpQIIts) неоплейстоцена подстилается конгломератами и слагает Юго-Восточной (Андижанская группа адыров) и Северо-Восточной (Наманганская, Избасканская) группа адыров [2].

Аллювиальные лессовыдные суглинки и супеси Мирзачульского (голодностепинско- го) (LaQIIIql) и Сырдарьинского (LaQIvsd) комплекса распространены преимущественно в Центральной Северо-восточной и юго-восточной части Ферганской впадины и слагают II - III террасы р. Сырдарьи, Карадарьи и Касансая. Подстилаются галечниками и песчано- галечниковыми отложениями, мощность которых изменяются в широких пределах от 0,25- 3,0 до 15-18 м.

Содержание пылеватых частиц в пролювиальных лессовых породах изменяется в пределах от 65 до 80 %, песчаных – от 6 до18 %, глинистых – 15-20 %. Средние значения плотности минеральных частиц составляют – 2,72 г/см^3, влажного грунта – 1,61 г/см^3, сухого грунта – 1,42 г/см^3; пористости – 45%, коэффициент пористости – 0,873. Естественная влажность изменяется в пределах от 10 до 21 %. Величина коэффицента относительной просадочности лессовых пород в адырной части (Андижанские адыры) изменяется от 0,001 до 0,018, а юго-восточной части (опорный разрез Султанобод) – от 0,01 до 0,09. Тип грунтовых условий лессовых пород адырной части по просадочности 1, а северо-восточной части 11, величина суммарной просадки по разрезу Султонобод составляет 150-180 см.

Лессовые породы верхнего неоплейстоцена Мирзачульского комплекса (LaQIIIgl) литологически представлены лессовидными суглинками и супесями. Лессовидные суглинки серовато-желтые, пылеватые, тяжелые. В гранулометрическом составе содержание пылеватых фракциями преимущественно составляет 55-92 %, песчанистых 10-22 %, глинистых 15-20 %; плотность минеральных частиц – 2,70-2,74 г/см^3, плотность сухого грунта– 1,30-1,65 г/см^3, влажного грунта – 1,34-1,95 г/см^3; пористость– 38-52,6 %; естественная влажность – 12- 43 %. Коэффициент относительной просадочности при природном давлении изменяется от 0,001 до 0,016. Тип грунтовых условий по просадочности – I-II.

Супеси светло-бурые, темно-бурые, местами серовато-желтые, пылеватые, тяжелые, содержат до 18-25 % песчаных частиц, до 65-70 % – пылеватых, до 9-10 % – глинистых. Плотность минеральных частиц в среднем составляет 2,68 г/см^3, плотность -1,50 г/см^3, пористость – 46 %. Величина относительной просадочности при природном давлении изменяется от 0 до 0,015. Тип грунтовых условий по просадочности – I-II.

Аллювиальные лессовидные породы голоценового возраста сырдарьинского комплекса (LaQIVsd) представлены также маломощными (0,5-2 м) супесями и суглинками. Супеси пылеватые, тяжелые и плотные. Суглинки преимущественно темно-серые пылеватые, мягкие и тяжелые, залегают на песках и гравийно-галечниковых отложениях. С изменением сезона года постоянно изменяются водно-физические и физико-механические свойства. Они обычно непросадочные.

Подземные воды в четвертичных отложениях в основном приурочены к галечникам, а покровные пески, супеси и суглинки имеют незначительную водоносность. Глубина

залегания зеркала грунтовых вод изменяется от 0,5 до 100 м и более, увеличиваясь к высоким предгорьям и уменьшаясь к реке. Плотный остаток грунтовых вод, наоборот, к горам уменьшается, в сторону долины рек увеличивается от 0,5 до 5,5 г/л, местами и более. По типу минерализации гидрокарбонатно-сульфатные, сульфатно-гидрокарбонатные, сульфатно-хлоридные. Встречаются на отдельных участках более минерализованные воды с плотным остатком даже 50 г/л.

На территории Ферганской впадины развито овражкобразование, лессовый псевдо-карст, просадка, обвалы, плывуны, оползни, селевые потоки. В местах с близким залеганием грунтовых вод наблюдается процесс засоления почв и в понижениях – заболачивание. Эти явления и процессы обусловлены климатической обстановкой, геоморфологическим и геологическим строением, в связи с чем в их развитии наблюдается определенная зональ-ность. Так, в горной зоне распространены выветривание, эрозия, обвалы, в высокопредгор- ной и предгорной - эрозия, водокаменные, грязекаменные селевые потоки, оврагобразова- ние, просадка, оползни, а в пределах предгорных равнин - просадка, лессовый псевдокарст, оврагообразование и др.

Для разработки тематической карты прогноза просадочности лессовых территорий Ферганской впадины были собраны и изучены имеющиеся материалы по геолого-геоморфологическому, структурно-тектоническому строению, по составам и свойствам лессовых пород, инженерно-геологическим процессам и явлениям и по современному положению уровня грунтовых вод [3-13]. С целью более детальной разработки прогнозной карты были использованы материалы космических съемок Landsat, которые предварительно обработаны с целью более точного приведения к нужной проекции и масштабу с применением сети опорных точек. Координаты опорных точек определялись в период полевого обследования с применением навигатора Garmin. Использование космических снимков позволило более детально проанализировать распространение лессовых пород, определить границы между различными типами просадочности лессовых пород, выделить участки распространения нелессовых пород и др.

Грунтовые условия территории Ферганской впадины, сложенные лессовыми грунтами, в зависимости от возможных проявлений просадки под собственным весом, нами были подразделены согласно КМК 2.02.01.-98 [10] на два типа: I-й тип – грунтовые условия, в которых возможная величина просадки лессовых пород от собственного веса не более 5 см. II-й тип – грунтовые условия, в которых величина просадки лессовых пород от собственного веса более 5 см. Первый тип грунтовых условий занимает территорию I-II надпойменной террасы р. Сырдарьи, Карадарьи, Норина, Косонсая, Шахримансая, Исфайрамсая, а также территорию вдоль каналов и арыков. Второй тип грунтовых условий имеет распространение на северной, северо-восточной, Южной, юго-восточной части Ферганской впадины. Лесы и лессовидные породы здесь в основном пролювиального, аллювиально–пролювиального и аллювиального генезиса. По возрасту - средненеплейстоценовые (LpQ_{II}), верхненеоплесто- ценовые (LaQ_{III}) и характеризуются различной величиной просадки.

По результатам проведенных исследований, с учетом степени и величины просадки на лессовых территориях Ферганской впадины, нами выделены 4 района (рисунок 1): среднепросадочные районы с ожидаемой величиной просадки от 0,5 до 1 м; слабопросадочные районы с ожидаемой величиной просадки от 0,15 до 0,5 м; очень слабопросадочные районы с ожидаемой величиной просадки от 0,05 до 0,15 м; непросадочные районы с ожидаемой величиной просадки менее 0,05 м. Среднепросадочные и слабопросадочные районы распространены в северо-восточной, восточной, южной, юго-восточной части Ферганской впадины. Эти площади сложены лессовыми породами пролювиального генеза среднего неоплейстоцена и частично аллювиального генезиса верхнего неоплейстоцена, мощностью 15-25 м. Грунтовые воды залегают премущественно на глубине ниже 15-30 м. Очень слабопросадочные и непросадочные районы занимают главным образом центральную часть, северную, южную, юго-западную части Ферганской

межгорной впадины. В этих районах генезис лессовых пород главным образом аллювиальный, аллювиально-пролювиальный, делювиальный. По возрасту они относятся к голоцену и верхному неоплейстоцену. Мощности лессовых пород обычно небольшие – 0,25-2-3 м. Грунтовые воды в зависимости от сезона года и характера полива изменяются от 0-3 м до 3-5 м.

В результате изучения естественноисторических условий Ферганской межгорной впадины необходимо отметить следующее: в распространении лессовых пород региона наблюдается определенная вертикальная зональность, различающаяся структурно-тектоническим, геологическим, геоморфологическим строением, климатическими, гидрогеологическими условиями развитием различных генетических и возрастных типов лессовых пород. Наибольшая мощность (15-25 м) лессовых пород наблюдается в северо-восточной, восточной, юго-восточной части территории, а наименьшая (0,25-3 м) – в юго-западной, северо-западной и центральной части Ферганской впадины.

В настоящее время на территории Ферганской впадины выделяются 4 района с различной величиной просадки: 1– среднепросадочные районы с ожидаемой величиной просадки от 0,5 до 1 м; 2 – слабопросадочные районы с ожидаемой величиной просадки от 0,15 до 0,5 м; 3 – очень слабо просадочные районы с ожидаемой величиной просадки от 0,05 до 0,15 м; 4 – непросадочные районы с ожидаемой величиной просадки менее 0,05 м. Первые три района по КМК 2.02.01-98 [11] (по грунтовым условиям) относятся ко второму типу, четвертый район – к первому типу.

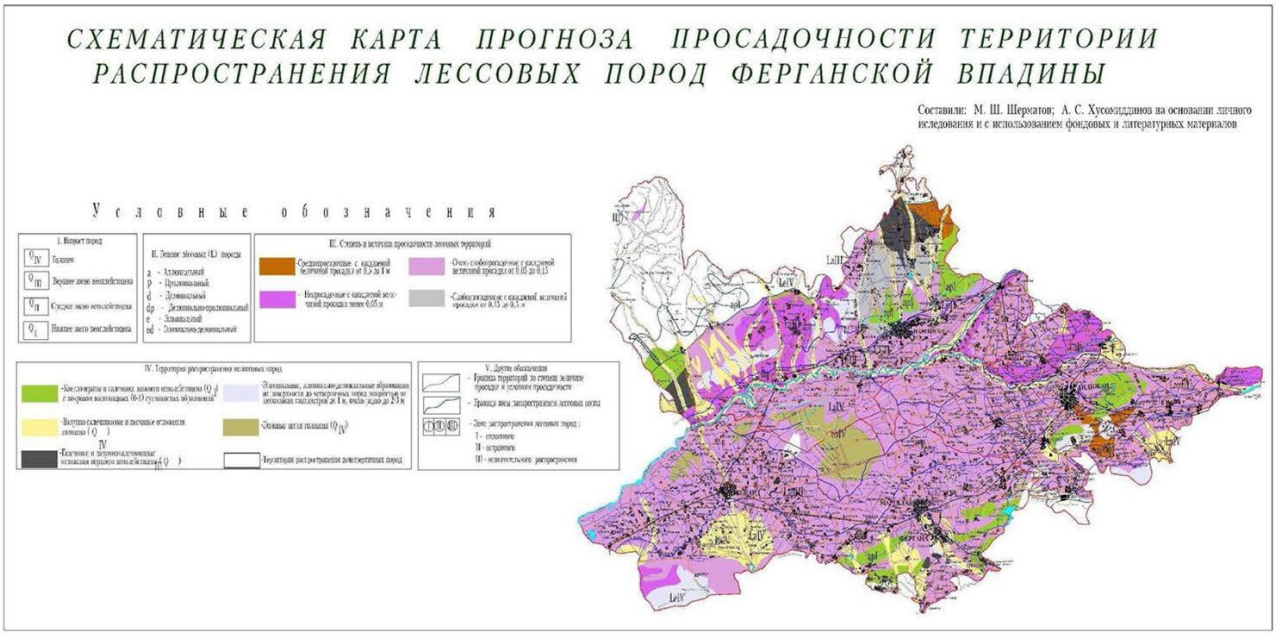


Рисунок 1 – Схематическая карта прогноза просадочности территории распространения лессовых пород Ферганской впадины

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов: “Разработка и испытание методов уменьшения сейсмической интенсивности и параметров сейсмических колебаний строительной площадки путем повышения сейсмической устойчивости грунтов основания", прикладных проектов Агентства инновационного развития, а также фундаментальной темы АН РУз: «Исследование разжижительных свойств дисперсных грунтов при сильных землетрясениях в лабораторных и полевых условиях и разработка их классификации».

Литература

1. Шерматов М.Ш. Инжерно-геологические свойства лессовых пород Чаткальской горной области. Ташкент: Фан. 1971. 188 с.

2. Шерматов М.Ш., Джураев Н.М., Туйчиева М.А. Особенности зонального измене- ния рельефа и гранулометрического состава лессовых пород правобережья долины р. Чирчик // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. 2008. № 5. С. 149–152.
3. Мавлянов Г.А., Сидиков М.С., Шерматов М.Ш., Сапаров А. Ферганская межгорная впадина // Региональная инженерная геология Средней Азии. Ташкент: Фан. 1973. С.92-104.
4. Ибрагимов К.Н., Коррель Ф.Ф. и др. Ферганский регион // Инженерная геология СССР. В 8 т. Т. 7. Средняя Азия. М.: изд-во Моск. ун-та. 1978. С. 194 -203.
5. Шерматов М.Ш., Сапаров А.С., Кадыров А. Исследование инженерно-сейсмологических условий территории Андижанского вилоята для целей детального сейсмического районирования // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. 2006. № 3. С. 297- 302.
6. Мавлянов Г.А., Касымов С.М., Шерматов М.Ш. Лессы Узбекистана, генизис, распространение // Международный журнал. Изд. Компании Д. Ридела. 1987. С.145-150.
7. Мавлянов Г.А., Шерматов М.Ш., Умарова Г.Х. Опорные инженерно-геологические разрезы лессовых пород Узбекистана и некторые результаты их изучения // Инженерная геология лессовых пород. Тез. докл. Всесоюзн. совещ. Кн. 1. Ростов-на-Дону.1989. С. 120- 121.
8. Опорные инженерно-геологические разрезы лессовых пород Северной Евразии / В.Т. Трофимов и др. М.: Университет. Кн. дом. 2008. 607 с.
9. Худойберганов А.М., Шерматов М.Ш., Джураев Н.М., Туйчиева М.А. Особенности формирования инженерно-геологических факторов сейсмического риска на урбанизованных территориях Ферганской долины на примере г. Наманган и его окрестностей // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. 2009. № 6. С. 128-132.
10. Кадыров А.А. Иследование инженерно-геологических условий территории райцентра Ходжаабад Андижанской области для целей микросейсмического районирования // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. 2008. № 5. С. 177-180.
11. Рахматуллаев Х.Л., Шерматов М.Ш., Рахматуллаев Х.Х. Опорные разрезы лессовых пород Узбекистана // Лессовые породы Узбекистана. Ташкент: ИМР. 2010. С. 153-219.
12. Хусомиддинов А.С., Актамов Б.У., Ядигаров Э.М., Бозоров Ж.Ш. Оценка приращения сейсмической интенсивности на основе геоинформационных технологий на примере восточного Узбекистана // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Сб. материалов XV Междунар. конф. молодых ученых и студентов, г. Бишкек, 26-28 апреля 2023 г. Бишкек. 2023. С. 211-216.
13. Хусомиддинов А.С., Ядигаров Э.М., Мансуров А.Ф. Методика изучения просадочных свойств лессовых пород Ташкентской области // SCIENCE AND INNOVATION. INTER- NATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE OF YOUNG SCIENTISTS. COLLECTION OF SCIEN- TIFIC PAPERS. Ташкент. 2024. С.296-299.
14. Строительные нормы и правила. КМК 2.02.01-98. Основания зданий и сооружений. Ташкент. 1998. 147 с.

УДК 550.34

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ СЕЙСМОГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Шозиёев Ш.П.[1], Асаншоева Ш.А.[2], Шозиёев А.П.[3]
shokarim@mail.ru
[1] Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН РТ, г. Душанбе, Таджикистан
[2] Хорогский государственный университет им. М. Назаршоева, г. Хорог, Таджикистан
[3] Мангалорский Университет, г. Мангалор, Индия

Вейвлет-преобразование - бесценный инструмент в обработке сигналов, который находит применение в самых разных областях - от гидродинамики до нейробиологии. Этот революционный метод позволяет нам выявлять структуры, которые присутствуют в сигнале, но скрыты за шумом. Ключевой особенностью вейвлет-преобразования является то, что оно выполняет разложение функции как во временной, так и в частотной областях. В связи с этим производим анализ сейсмогеохимических данных методом вейвлет-анализа.

Ключевые слова: преобразование Фурье, вейвлет-анализ, сейсмогеохимические данные, Python, Таджикистан

Введение. Первые идеи вейвлетного подхода для анализа были предложены 1910 году А. Хаар. Им было сформулирована обобщенная ортонормальная система базисных функций с локальной областью определения [1].

В конце 70-х годов XX в. данная задача заново начала привлекать внимание исследователей. Когда инженер-геофизик Д. Морле столкнулся с проблемой анализа сигналов от сейсмодатчиков, которые содержали высокочастотную компоненту сейсмической активности в течение короткого промежутка времени и низкочастотные составляющие спокойного состояния земной коры – в течение длительного периода. Метод оконного преобразования Фурье не позволял одновременно анализировать высокочастотную и низкочастотную составляющие сигнала, то есть проанализировать обе компоненты сразу не представлялось возможным [2].

Оконное преобразование Фурье дает возможность проанализировать одну из двух составляющих сигнала: с её помощью можно выявлять высокочастотную либо низкочастотную компоненту. Это привело к формированию новой парадигмы анализа временных данных. Главная идея этого подхода заключалось в том, что ширина выборки для низкочастотной компоненты увеличилась, а для высоких частот уменьшилась. Подход нового оконного преобразования заключался в том, что расчет производился при растяжении (сжатии) и смещении по времени порождающей функции. В западной литературе порождающая функция называется scaling- function или вейвлетом Морле [3, 4].

В работе [5] сделан вейвлет-анализ временных данных. Хотя в данной статье не уделяется внимания геохимическим данным, в ней обсуждается использование кросс-вейвлет-преобразования и вейвлет-когерентности для анализа взаимосвязей между двумя геофизическими временными рядами. В упомянутой статье изложены основы использования вейвлет-анализа для изучения взаимосвязей между несколькими временными рядами. Полагаем, что указанные методы могут быть полезны для понимания связей между различными геохимическими параметрами или между геохимическими данными и другими факторами окружающей среды.

В предложенной работе производится анализ сейсмогеохимических данных методом вейвлет-анализа по данным сейсмогеофизических наблюдений станции Явроз на территории Таджикистана.

Источник данных и метод анализ данных. С середины 70-х годов в ТИССС начались сейсмогеохимические наблюдения с целью выявления аномалий в сейсмогеохимических параметрах термальных вод Таджикистана как индикатора подготовки землетрясений. В качестве источника данных использованы данные сейсмогеофизических наблюдений станции Явроз на территории Таджикистана. Для анализа выбрано среднесуточное значение pH.

В методе вейвлетного анализа предлагается следующее: ширина оконной функции для низких частот увеличивается, а для высоких частот – уменьшается. Новое оконное преобразование получалось в результате растяжения (сжатия) и смещения по времени одной порождающей (так называемой скейлинг-функции – scaling function, scalet) функции. Эта порождающая функция была названа вейвлетом Д. Морле. Данный подход широко применяются для фильтрации, обработки временных данных (медицине, экономике, сжатие данных) и т.д.

Для быстроты анализа данных применялось машинное обучение в среде Python. Данный язык программирования входит, по разным оценкам, на первое место по популярности. Основной причиной распространенности этого языка являются: 1) наличие огромного числа библиотек для решения практических задач, включая вычислительную математику, научную визуализацию; 2) бесплатность; 3) ортогональность языка, заключающаяся в том, что для решения конкретных задач необходимо ограниченное подмножество языковых средств, которое можно расширять по мере необходимости. Для анализа данных в данной работе применялись программные средства библиотеки pycwt [6, 7].

Код представляет собой скрипт Python, который выполняет спектральный анализ временных рядов с использованием вейвлетов. Для анализа набора данных и визуализации результатов используется библиотека pycwt. На следующем шаге код выполняет удаление тренда и нормализацию входных данных по их стандартному отклонению. Иногда удаление тренда не требуется и достаточно просто удалить среднее значение. Здесь мы подбираем полиномиальную функцию первой степени, а затем вычитаем ее из исходных данных. Следующим шагом будет определение некоторых параметров вейвлетного анализа. За основу материнского вейвлета, в данном случае выбран вейвлет Морле. При необходимости можем изменить спектр мощности в соответствии с предложениями в [8]. Далее можем остановиться и представить наши результаты на графике. Однако нас также интересует проверка значимости спектров мощности. Следующий шаг – это вычисление глобального вейвлет-спектра и определение его уровня значимости. На последнем шаге, представляем наши результаты на четырех различных подграфиках на рис. 2, содержащих (1) исходный ряд аномалий; (2) спектр мощности вейвлета; (3) глобальный вейвлет и спектр Фурье; и (4) усредненный по диапазону спектр вейвлета. На некоторых подграфиках уровни значимости показаны либо пунктирными линиями, либо заполненными контурными линиями.

Результаты и обсуждения. Поскольку вейвлеты появились именно как механизм обработки экспериментальных данных, то есть параметры, меняющиеся во времени, до сих пор их применение для решения подобных задач представляется весьма актуально. Преобразование этого рода, дает возможность получению наглядного и информативного результата экспериментальных данных. Кроме того, вейвлет- преобразование, позволяет очистить исходные данные от шумов и случайных искажений. По результатам визуализации получаем возможность выявлению некоторых особенностей входных данных – характерные периодические свойства на локальном уровне. Делать дальнейшую обработку и анализ данных легко для интерпретации.

Для обработки экспериментальных данных используем показатель pH (рисунок 1.а). Следует заметить, что на графике изображены 1032 измеренный в промежуток 512 дней для преобразования Габора. Аномальная вариация параметра pH, обнаруженная по данным сейсмогехимической станции Явроз свидетельствует о неодинаковости динамики геологических структур, разломных зон в окрестностях этого пункта. Согласно авторам [9] реакция флюида коррелирует с изменением тектонических напряжений.

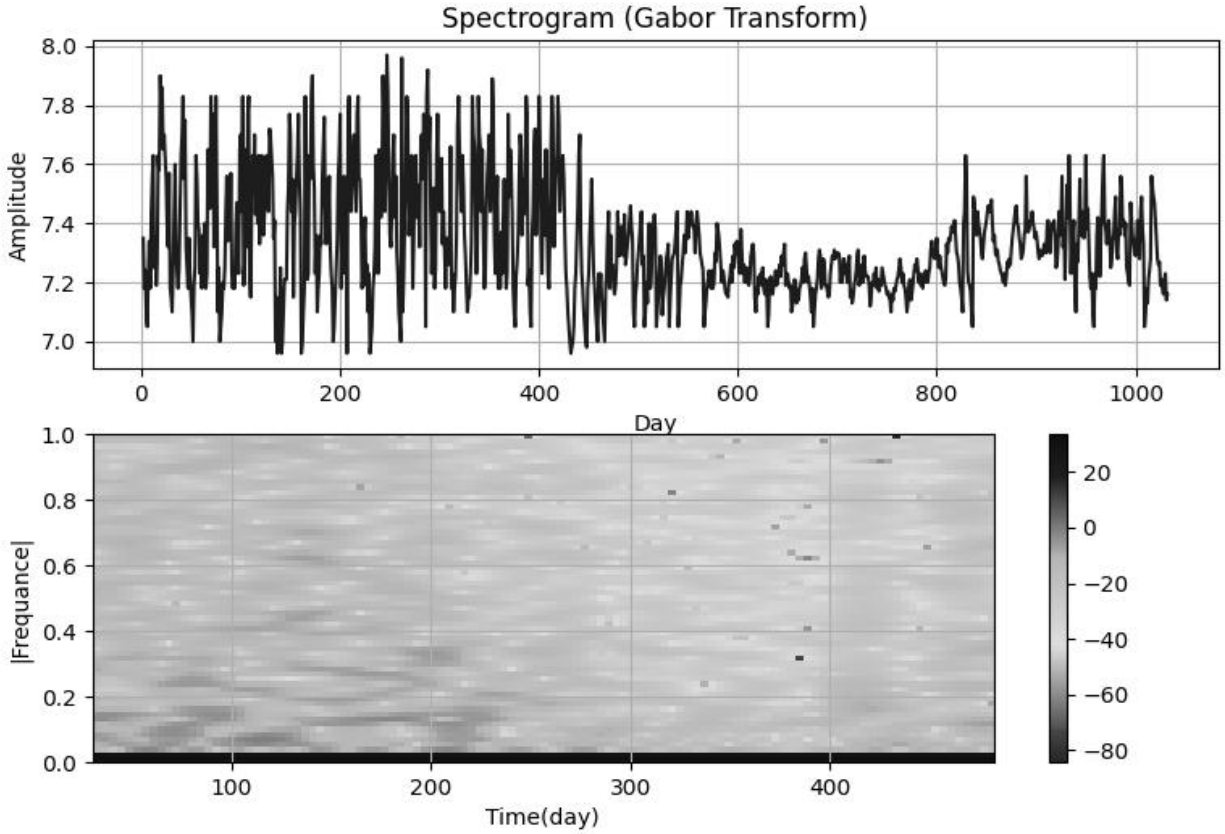


Рисунок 1 – а) График экспериментальных данных показателя pH (два измерения в течение 512 дней, 1032 измерений). б) Частотно-временное распределение, скейлограмма полученный преобразованием Габора

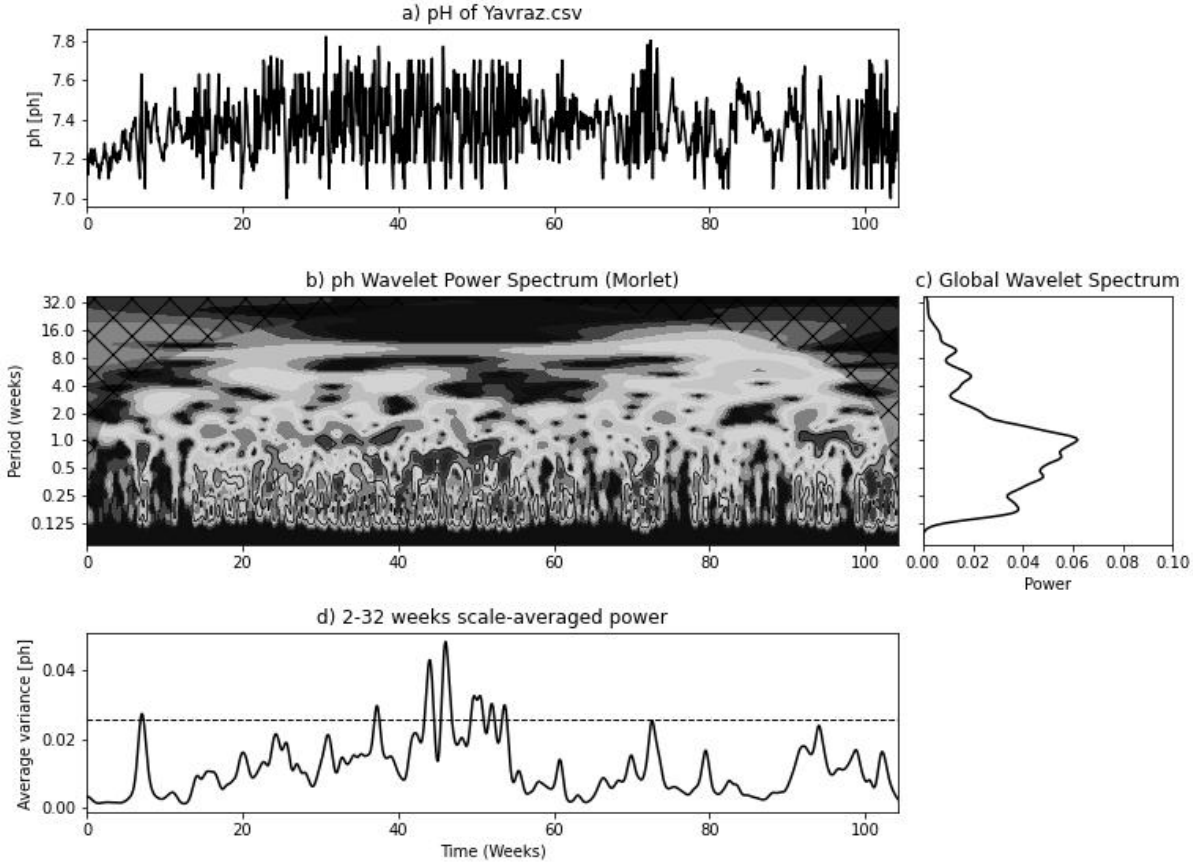


Рисунок 2 – Вейвлет-спектрограмма экспериментальных данных показателя pH на станции Явроз

Преимущество вейвлет-преобразования перед преобразованием Габора (который является частным случаем кратковременного преобразования Фурье, рисунок 1. б), заключается в том, что оно покрывает фазовую плоскость ячейками одинаковой площади, но по форме ячейки разные. Кроме того, позволяет хорошо локализовать низкочастотные детали сигнала в частотной области (преобладающие гармоники), а высокочастотные – во временной – резкие скачки и пики, которые выявлены на рисунке 2.

В случае применения вейвлетов для многомасштабного анализа способом разложения сигнала по базису производится сдвигами и разномасштабными копиями функции-прототипа. Это подтверждает фрактальные свойства вейвлет-преобразования. Базисные функции называются вейвлетами, если они определены на двухмерном пространстве, т.е. в пространстве комплекснозначных функций *f(t)* на прямой с ограниченной энергией. Значения их колеблются вокруг оси абсцисс и быстро сходятся к нулю по мере увеличения абсолютного значения аргумента.

Следует отметить, что вейвлет-анализ позволяет исследовать поведение фрактальных функций. На математическом языке это означает, что фрактальные функции не имеют производных ни в одной точке. На полученной спектрограмме четко выделены распределения частот во времени. Например, на рис. 2 выделяются несколько периодичностей от 1/2 недели (3-4 дня) до 16 недели (112 дней).

Заключение. Вейвлет-анализ имеет хорошо разработанную теорию, является лучшим инструментом анализа и обладает обширным полем для исследований. Вейвлет - наиболее подходящий метод для анализа нестационарных временых данных. Огромное значение имеет задача разработки приложений для автоматизированного анализа временных данных.

Работа иллюстрирует возможное применение вейвлет-анализа в временных сейсмогеохимических данных. Предоставляя информацию о частотно-временных характеристиках геохимических данных, вейвлеты помогают исследователям лучше понимать геологические и сейсмические процессы, выявлять аномалии и оптимизировать результаты для интерпретации.

Литература

1. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб.: ВУС. 1999. 204 с.
2. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. М.: РХД. 2001. 464 с.
3. Каримов Ф.Х., Саломов Н.Г., Ниязов Д.Б., Норова Г.Б., Усупов Ш.Н. Некоторые характеристики динамики параметра pH подземных вод по данным наблюдений на территории Таджикистана // Наука и инновации. Научный журнал ТНУ. Серия естественных наук. 2017. № 1. С. 46-56.
4. Саринова А.Ж., Исин М.Е. Кодирование и декодирование гиперспектральных аэрокосмических изображений с применением вейвлет-преобразований // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2016. № 4 (48). С. 84-89.
5. Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlinear Processes in Geophysics. 2004. Vol. 11. Iss. 5/6 NPG. 11. P. 561–566. https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004
6. Liu, Y., Liang, X.S. and Weisberg, R.H. Rectification of the bias in the wavelet power spectrum // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2007. 24. P. 2093-2102. DOI 10.1175/2007JTECHO511.1.
7. Mallat S. A theory for multiresolutional signal decomposition: the wavelet representation. IEEE Trans // Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1989. No. 7. P. 674-693.
8. Robert C.M. Coding in Python. A Comprehensive Beginners Guide to Learn the Realms of Coding in Python. 2020. 165 p.
9. Torrence, C. and Compo G.P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bulletin of the American Meteorological Society, American Meteorological Society. 1998. 79. P. 61-78. DOI 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO

УДК 551.24

РЕЗУЛЬТАТЫ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЙОНАХ УЗБЕКИСТАНА ЗА ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ

Шукуров З.Ф.[1], Алимухамедов И.М.[1], Зубович А.В.[2]
zukhriddin shukurov@seismos.uz
[1] Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан
[2] Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, г. Бишкек, Кыргызстан

В статье представлены результаты ГНСС измерений, проведенных в 2002 и 2023 годах в сейсмоактивных районах Республики Узбекистан. В результате ГНСС наблюдений определены скорости вертикального движения 35 точек, расположенных в сейсмоактивных районах. На основе ГНСС наблюдений выделены интенсивные зоны - поднятые и опущенные части земной коры и проведено их сравнение с сейсмичностью.

Ключевые слова: ГНСС, вертикальные движения, средняя скорость, напряженно-деформированное состояние, интенсивные зоны.

Введение. Известно, что землетрясения являются продуктом эндогенных геодинамических процессов, и сегодня нет возможности полностью избежать наносимого ими ущерба. Поэтому одной из основных задач сейсмологии является ранняя оценка риска землетрясений и снижение их пагубных последствий. Обеспечение сейсмической безопасности населения и зданий путем оценки сейсмической опасности регионов является одним из основных и важных вопросов устойчивого социально-экономического развития республики.

В последние годы широкое развитие получили научные исследования по оценке ущерба от природных и техногенных катастроф. В частности, особое место занимают космогеодезические исследования (ГНСС - глобальные навигационные спутниковые системы), посвященные проблемам определения современных движений блоков, ограниченных разломами. Результаты научных исследований, посвященных определению направления движения тектонических блоков земной коры на основе современных движений, оценке напряженно-деформированного состояния земной коры, организации мониторинга путем выявления участков интенсивного перемещения техногенных объектов в земной коре и изучения их связи с современной сейсмичностью, позволят оценить современное геодинамическое состояние территории Узбекистана, глубоко изучить природу землетрясений, создать современные методы природопользования с минимальным воздействием на природный баланс.

Несмотря на то, что в прошлом проводились многочисленные исследования по ГНСС, высокоточные ГНСС исследования на территории Республики Узбекистан недостаточно систематизированы, а полученные данные не полностью обработаны. Для преодоления этой проблемы потребовалось проведение специального проекта в области ГНСС исследований. Одна из таких возможностей была создана в рамках программы MUNIS, организованной при участии Всемирного банка. В рамках международного проекта «Модернизация национальной инновационной системы Узбекистана», организованного при участии Агентства по инновационному развитию Республики Узбекистан и Всемирного банка, был выигран научный проект REP 04032022-209 «Совершенствование сети комплексного мониторинга сейсмических процессов на территории Узбекистана». Целью проекта является создание взаимосвязанной системы ГНСС станций научного назначения путем установки 10 постоянно действующих ГНСС станций на территории Республики Узбекистан и проведения ГНСС наблюдений в 35 пунктах, установленных в сейсмоактивных зонах (рисунок 1).

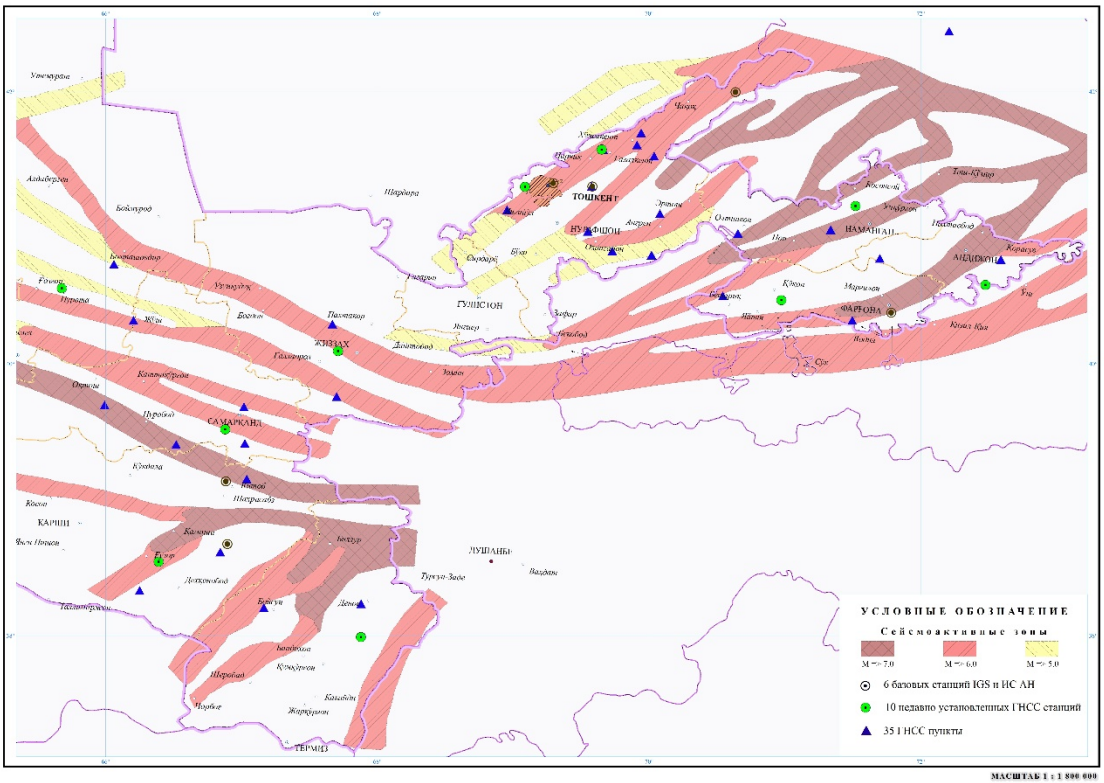


Рисунок 1 – Карта расположения точек ГНСС, в которых проводятся постоянные и периодические измерения в сейсмоактивных зонах Республики Узбекистан

Основными задачами вышеуказанного международного проекта являются совершенствование интеграции науки и производства, проведение геодинамических исследований, в том числе определение современных движений земной коры на территории Республики Узбекистан, изучение аспектов полученных результатов, связанных с сейсмической активностью, а также вывод мер по снижению сейсмического опасности на новый уровень.

Методика. В рамках проекта по совершенствованию сети комплексного мониторинга сейсмических процессов на территории Узбекистана в 2023 году проведен 2-й цикл измерений в 35 вышеперечисленных пунктах. Измерения в каждой точке проводились в течение 36 часов с помощью высокоточных приборов GNSS с интервалом в 30 секунд. В ходе измерений использовался 1 комплект устройств Leica GRX1200 Plus, произведенных в Швейцарии, 2 комплекта устройств CHCNAV i90, и по 1 комплекту устройств SOUTH G1 Plus и SOUTH G1 произведенных в Китае. В данном исследовании в качестве банка данных использовались первичные данные, полученные с открытого ftp-адреса IGS (Международной службы GNSS), а также данные, измеренные на 35 пунктах GNSS, установленных в сейсмоактивных районах Узбекистана. Целью исследования является совместная обработка и анализ данных первого и второго цикла, измеренных в 2002 и 2023 годах, а также определение 21-летних горизонтальных и вертикальных скоростей движения земной коры.

Как известно, ГНСС устройства используются для определения координат и времени в любой точке земной поверхности. ГНСС определяет точку на местности, используя два параметра: первый - точное местоположение (координаты долготы, широты и высоты), а второй - точное время (в формате UTC). Скорость и направление движения определяются этими параметрами [1, 2].

Процесс обработки данных ГНСС осуществлялся с использованием программы GAMIT-GLOBK, разработанной учеными Массачусетского технологического института в США, которая работает на операционной системе Linux/Unix [3, 4]. Преимущество программы в том, что она работает полуавтоматически.

Таблица 1 – 21-летние вертикальные движения станций GNSS, установленных в сейсмоактивных районах Узбекистана

№	Долгота, градус	Широта, градус	Высота, мм/год	Коды ГНСС станций
1	74,75	42,99	0,73	CHUM
2	74,69	42,67	0,79	POL2
3	73,99	44,20	-0,4	SUMK
4	72,59	40,76	-1,84	ALS4
5	72,59	40,76	-1,84	ALS5
6	72,21	42,44	1,9	TALA
7	71,70	40,77	-1,88	SAY4
8	71,49	40,31	-1,57	HAN5
9	71,49	40,31	-1,57	HAN4
10	71,33	40,98	4,77	SHN4
11	71,33	40,98	4,77	SHN5
12	70,65	40,95	-2,35	MAZ5
13	70,65	40,95	-2,35	MAZ4
14	70,54	40,49	-1,23	BEA5
15	70,54	40,49	-1,23	BEA4
16	70,08	41,10	2,29	DUK4
17	70,08	41,10	2,29	DUKA
18	70,03	41,52	-1,35	NUR4
19	70,01	40,79	-1,11	ANGR
20	70,01	40,79	-1,11	ANG4
21	69,94	41,69	-1,82	HUM4
22	69,91	41,60	-2,09	ALZ4
23	69,73	40,82	-2,19	ALM4
24	69,73	40,82	-2,19	ALM5
25	69,66	41,57	-1,75	CIR4
26	69,57	41,30	-1,88	BUS4
27	69,57	41,30	-1,88	BUS5
28	69,55	40,97	-2,27	TAS4
29	69,55	40,97	-2,27	TAS5
30	68,95	41,13	-1,21	BOS4
31	67,88	38,23	0,67	DEN4
32	67,70	39,75	-1,39	BAL4
33	67,66	40,29	2,27	OKT1
34	67,16	38,20	2,51	BAS4
35	67,03	39,15	2,36	KIT4
36	67,02	39,41	-1,75	ZIN4
37	67,01	39,68	-2,26	ZER4
38	66,84	38,61	2,14	MAD4
39	66,51	39,40	2,1	TAR4
40	66,25	38,33	1,52	DJN4
41	66,20	40,31	2,95	TRS4
42	66,06	40,73	2,75	KSB4
43	65,99	39,69	3,43	KAN4

В ходе обработки были обработаны данные в общей сложности с 43 станций ГНСС за 2002-2023 годы. В этой связи были обработаны данные измерений 4-х GNSS-станций Международной ГНСС службы (IGS): CHUM, POL2, SUMK, TALA, а также ГНСС пунктов: ALS4, ALS5, SAY4, HAN5, HAN4, SHN4, SHN5, MAZ5, MAZ4, BEA5, BEA4, DUK4, DUKA, NUR4, ANGR, ANG4, HUM4, ALZ4, ALM4, ALM5, CIR4, BUS4, BUS5, TAS4, TAS5, BOS4, DEN4, BAL4, OKT1, BAS4, KIT4, ZIN4, ZER4, MAD4, TAR4, DJN4, TRS4, KSB4, KAN4, установленных в сейсмоактивных районах Узбекистана.

Результаты. В результате обработки определены 21-летние скорости вертикальных движений земной коры по данным ГНСС станций, установленных в сейсмоактивных регионах Узбекистана. Средние вертикальные скорости точек ГНСС были рассчитаны относительно Евразийской плиты (таблица 1).

В таблице 1 долгота – координаты долготы станций ГНСС, широта – координаты широты станций ГНСС, высота – годовые вертикальные движения точек, т.е. средние годовые разности высотных координат согласно Международной наземной системе отсчета (International Terrestrial Reference Frame, 2014), коды ГНСС станций – сокращенные наименования станций ГНСС.

На основе таблицы 1 была построена карта среднегодовых скоростей вертикального движения земной коры по данным станций ГНСС с использованием среднегодовых разностей высотных координат, то есть разностей между двумя периодами, измеренными в 2002-2023 гг. (рисунок 2).

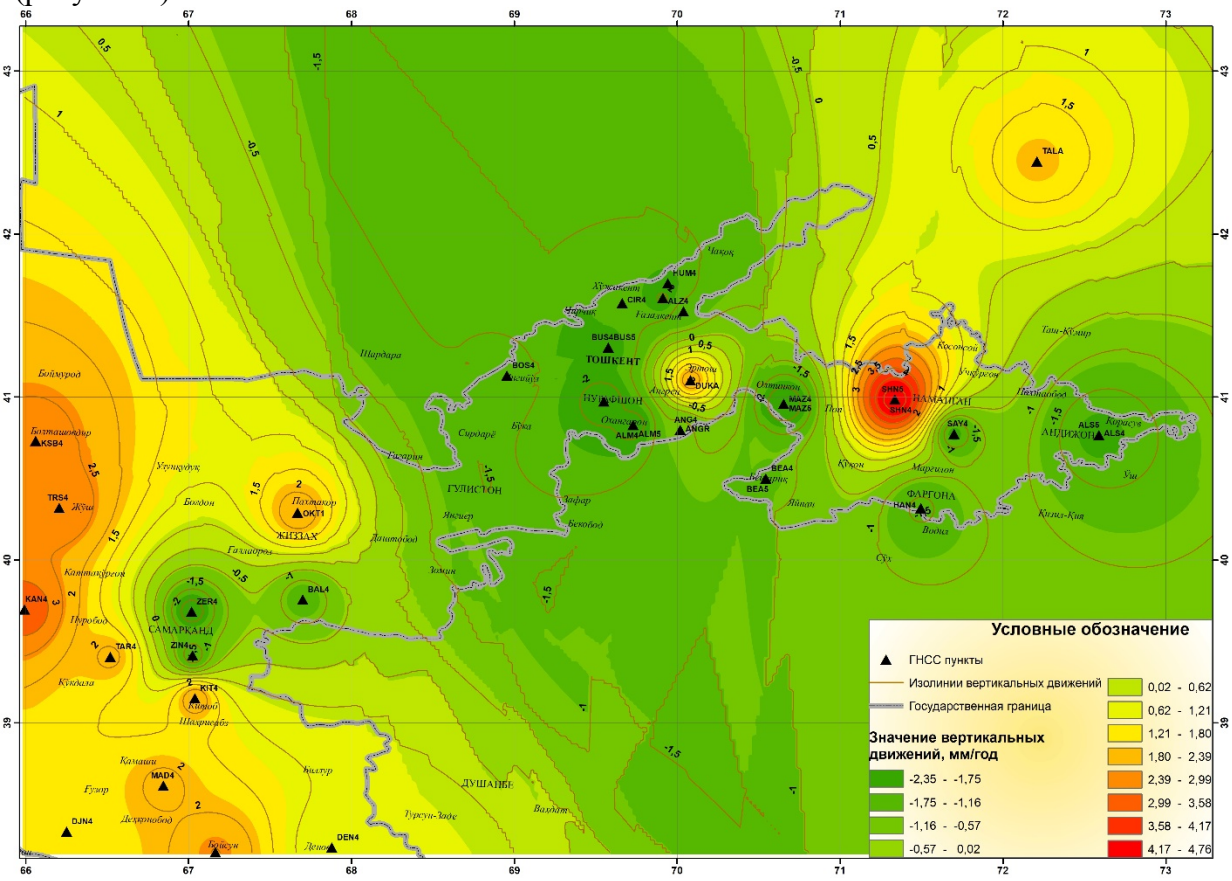


Рисунок 2 – Скорости вертикальных движений сейсмоактивных зон за последние годы

На рисунке 2 значения скорости основной вертикальной составляющей за последние 21 год варьировались от -2,35 до 4,77 мм/год, при среднем значении 1,21 мм/год. Из рисунка видно, что значения скорости вертикальных движений изменялись в большом диапазоне, при этом неравномерное опускание наблюдалось на значительной части Ферганской долины и Приташкентской области, тогда как центральные и южные районы Узбекистана поднимались.

Определенные на исследуемой территории вертикальные скорости земной коры были сопоставлены с эпицентрами землетрясений, произошедших за последние 21 год (рисунок 3).

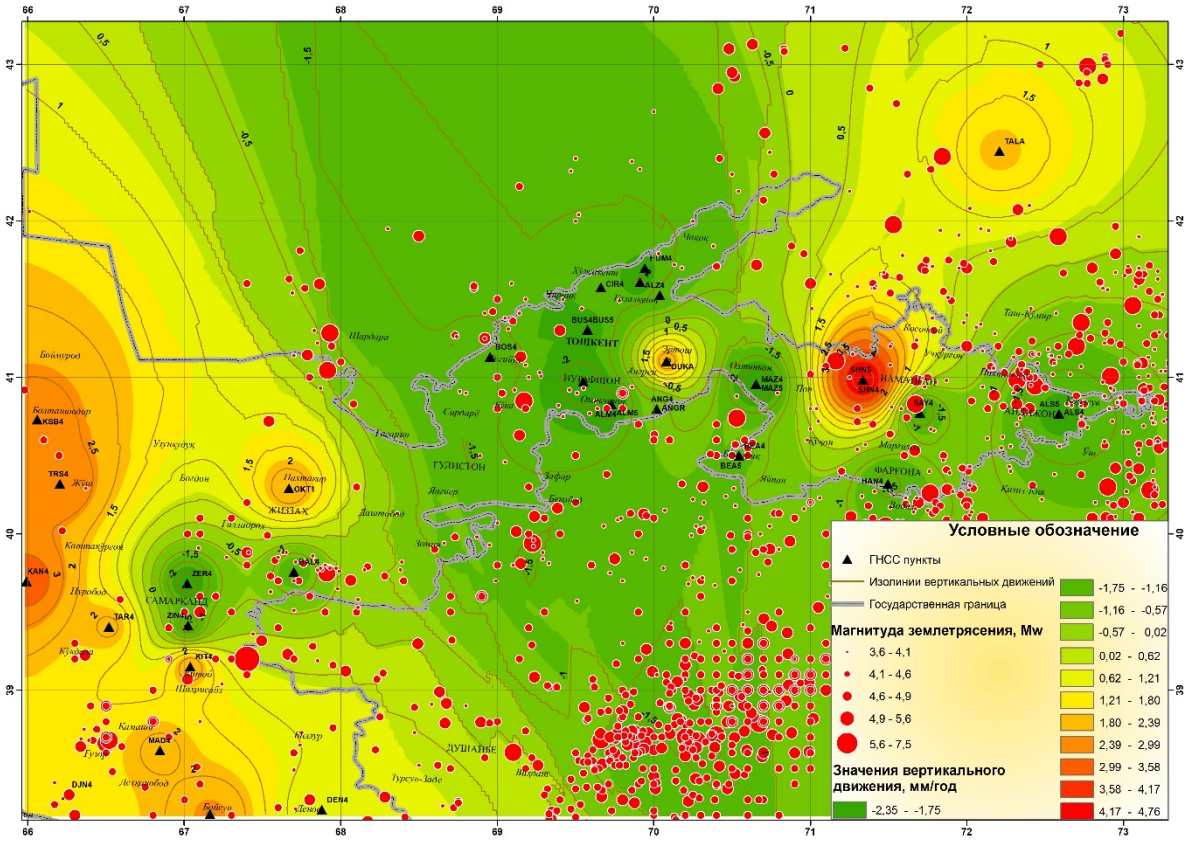


Рисунок 3 – Сопоставленная карта вертикальных скоростей движения с сейсмичностью за последние 21 год

Согласно созданной карте 3, большинство землетрясений, произошедших за последние 21 год, попадают в зону, отмеченную зеленым цветом, то есть многие землетрясения с магнитудой более 3,6 совпадают с зонами, где наблюдаются проседания.

Заключение. В результате проведенных работ определены скорости вертикальных движений земной коры в сейсмоактивных зонах за последние 21 год. Определенные скорости вертикальных движений были сопоставлены с сейсмичностью. Следует отметить, что вертикальные скорости движения земной коры интенсивны в восточных, центральных и южных регионах Узбекистана, что свидетельствует о интенсивных тектонических движениях в этих регионах. Значения вертикального движения выше в предгорьях и на низких равнинах, чем в горных районах. Такая ситуация, по нашему мнению, свидетельствует о том, что предгорья, подверженные горизонтальным и вертикальным движениям, включаются в состав активных областей, испытывающих орогенические процессы.

Статья подготовлена в рамках проекта REP-04032022/209, поддержанного Правительством Республики Узбекистан и группой "ГРП" Всемирного банка.

Автор работы выражает благодарность заведующему отделом «Системы мониторинга и управления данными» ЦАИИЗ, к.ф.-м.н. Зубовичу А.В. за консультации в ходе работы и рекомендации по обработке ГНСС данных.

Литература

1. Herring T.A., King B.W., McClusky S.C. GAMIT. Reference manual. GPS analysis at MIT. Release 10.3 // EAPS. MIT. 2006. 82 p.
2. Herring T.A., King B.W., McClusky S.C. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.3 // EAPS. MIT. 2006. 87 p.
3. Zubovich A.V. et al. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // Tectonics. 2010. V. 29. TC6014. Doi:10.1029/2010TC002772.
4. Шукуров З.Ф. Обработка и анализ данных измерений ГНСС в среде GAMIT-GLOBK // Журнал «Проблемы сейсмологии». 2020. № 1. Том 2. С. 23-31.

УДК 550.83

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СРЕДНИХ СКОРОСТЕЙ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В УСЛОВИЯХ СЕЙСМОСТАНЦИЙ KNDC И KASK

Шульга М.В, Жолдыбаев А.К., Исагали А.
Shulga.mikhail.00@mail.ru
Филиал Института геофизических исследований РГП НЯЦ РК, г. Алматы, Казахстан

Представлены результаты изучения грунтовых условий в параметре средних скоростей поперечных волн для двух площадок установки станций сильных движений KNDC и KASK в условиях техногенных сейсмических помех и ограниченных размеров площадок исследований. Для этих сейсмостанций определена категория грунтов по сейсмическим свойствам. Приведены примеры записей сильных движений с наибольшими значениями пиковых ускорений. Проведено сравнение параметров колебаний на двух станциях.

Ключевые слова: скорость поперечных волн, техногенные сейсмические помехи, сейсмические зондирования, категория грунтов по сейсмическим свойствам.

Введение. Сеть станций сильных движений (СД) в Казахстане начала создаваться и развиваться в 80-х годах прошлого столетия [1]. На всех стационарных станциях сейсмической сети Института сейсмологии АН КазССР были установлены приборы, регистрирующие колебательную скорость и ускорения при сильных землетрясениях. Это была региональная сеть СД. Кроме того, на территории г. Алматы были открыты пункты сильных движений на грунтах, относящихся к разной категории по сейсмическим свойствам. Это была локальная сеть сильных движений. Все станции тех лет были аналоговыми.

С 2000 года сети СД начали создаваться в двух организациях – ИС МОН РК и ИГИ НЯЦ РК. В этот период все новые станции являлись цифровыми. В настоящее время в Центре данных Института геофизических исследований НЯЦ РК проводится обработка данных сильных движений станций ИГИ, а также новой сети SNECCA, созданной в рамках международного проекта под эгидой МНТЦ. Все полученные волновые формы, результаты обработки сильных движений архивируются, создана специальная база данных сильных движений.

Слабым звеном в интерпретации результатов и их использовании остается недостаточная изученность свойств площадок, на которых установлены приборы сильных движений. Ни для одной станции сильных движений в Казахстане нет детальной характеристики скоростных моделей верхней толщи грунтов под станцией, а это очень важная информация для использования записей при задании воздействий с учетом грунтовых условий. Известно, что условия площадки вносят в колебания значительный вклад, изменяя основные параметры записей – пиковые амплитуды, резонансные периоды, спектральный состав, длительность колебаний.

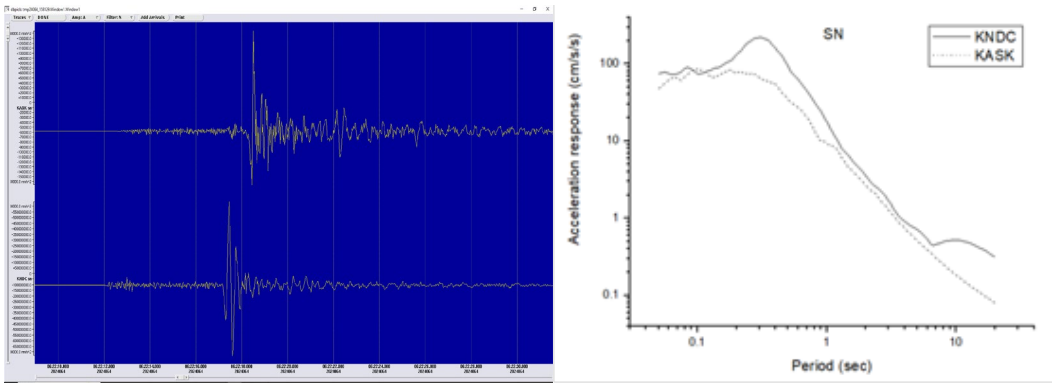
В настоящей работе показаны результаты изучения сейсмических свойств геологической среды в местах установки двух близко расположенных друг от друга станций сильных движений сети НЯЦ РК – KNDC (г. Алматы) и KASK (г. Каскелен). Расстояние между станциями KNDC и KASK составляет 26,5 км. Такие работы в Казахстане для станций сильных движений выполнены впервые.

Все данные о станциях можно найти на веб-сайте KNDC www.kndc.kz.

Сравнение параметров колебаний на двух станциях KNDC и KASK. Собраны все записи одних и тех же событий по двум станциям, определены основные характеристики колебаний по акселерограммам – пиковые ускорения, резонансные периоды, относительная длительность на уровне 0,5 от максимума, рассчитаны спектры реакции. Самым сильным из зарегистрированных землетрясений явилось событий 4.03. 2024 г., координаты 43,0166 N, 76,

8465E, магнитуда mb=5,6, энергетический класс 12,3. Землетрясение ощущалось в обоих пунктах с интенсивностью 5 баллов. Расстояние от станций 24-27 км. Пиковые ускорения составили 74,8 см /с^2 для KNDC, 47,5 см /с^2 для KASK.

На рис. 1а представлены акселерограммы этого землетрясения, а на рис. 1б – спектры реакции для 5% -ого затухания по компоненте N, на которой отмечены максимальные колебания.



а) б)

Рисунок 1 – а) Акселерограммы землетрясений 4.03.2024 г; б) соответствующие спектры реакции

Видно, что при общности источника, близости эпицентрального расстояния, азимута на эпицентр записи различаются. Запись на KASK более сложная по сравнению с KNDC. На этот факт существенно влияет, в частности, строение верхней части разреза.

Проведенный статистический анализ сравнительных характеристик разных параметров позволил сделать следующие выводы: в среднем пиковые ускорения близки, но при отдельных событиях могут различаться до 1,5 раза, резонансные периоды, длительность также близки, ширина спектра меньше на станции KNDC, то есть спектр более резонансный по KNDC, чем на KASK. Вся обработка акселерограмм проводилась с помощью программы ViewWave [2].

Полевое изучение средних скоростей поперечных волн в заданных типах грунтовых условий. Общей закономерностью расположения сейсмостанций KNDC и KASK (рисунок 2), осложняющей проведение работ, является их техногенная нагруженность.

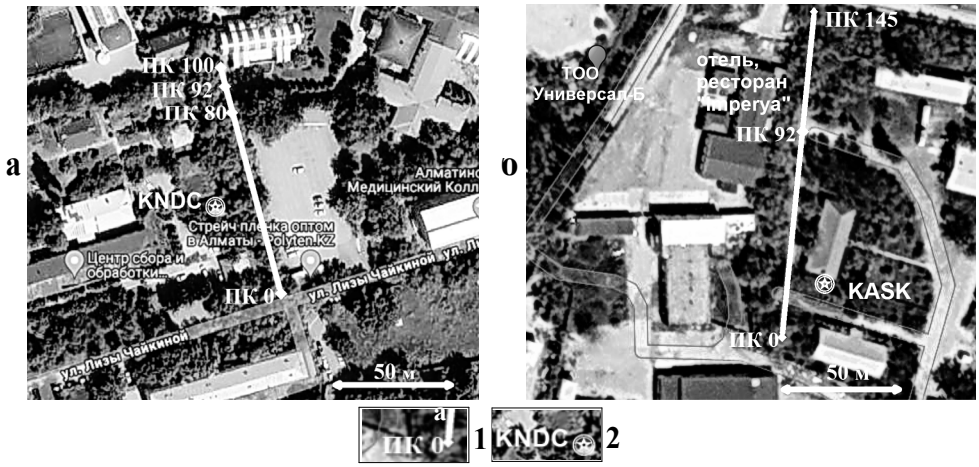


Рисунок 2 – Сейсмостанции KNDC (а) и KASK (б). Схемы расположения сейсморазведочных профилей для уточнения грунтовых условий. 1 – линии сейсморазведочных профилей (а) для определения скорости и пикеты в метрах; 2 – местоположение сейсмостанций

Для KNDC – это высокая плотность застройки, прилегающей территории с работающими различными механизмами и оборудованием, для KASK – непосредственная близость с северной стороны (порядка 50 метров) автомагистрали Алматы-Бишкек с практически не прекращающимся автомобильным потоком, а с южной – действующее автохозяйство. Такое расположение обеих сейсмостанций предопределяет и высокий уровень техногенных сейсмических помех. Не менее важным обстоятельством, усложняющим решение задачи, являются ограниченные размеры площадок для использования выносных пунктов возбуждения, которые оказались возможными только с северных флангов обоих профилей.

Аппаратура, методика полевых работ и обработки. Аппаратурный комплекс сейсморазведочных работ включал горизонтальные сейсмоприёмники JF20 DX (OYO GeoSpace) и сейсмостанцию SGD-SEL (НПК «СибГеофизПрибор»).

Учитывая требования и рекомендации [3], принята следующая методика полевых работ и обработки данных. В условиях ограниченной площади исследований для обеспечения глубинности зондирования до 30 метров и детального изучения самой верхней части разреза, применялась расстановка сейсмоприёмников длиной 92 метра с шагом пунктов приёма (ПП) 2 метра. Каждая расстановка отрабатывалась из 4-6 пунктов возбуждения (ПВ), расстояние между которыми составляло порядка 20 метров. Из них только 1 ПВ выносился за её пределы по линии профиля на расстояние порядка 20-50 метров.

Возбуждение поперечных горизонтально поляризованных (SH) волн осуществлялось горизонтальными ударами кувалды в направлении, ортогональном линии наблюдений. При этом для ослабления остаточного фона продольных волн регистрировались записи ±Y возбуждений.

Обработка полученных волновых полей включала выделение первых волн (прямой и преломлённых) построение их годографов. Для повышения соотношения сигнал-помеха при корреляции целевых поперечных волн выполнялось вычитание волновых полей при +Y и –Y воздействиях, в процессе которого происходило синфазное суммирование регулярных SH и ослабление интенсивности продольных P волн.

Интерпретация годографов осуществлялась по точкам излома годографов [5] с расчётом мощностей преломляющих горизонтов. По полученным значениям интервальной скорости определялась средняя скорость по разрезу. Объём полевых наблюдений в поперечных волнах составил 0.18 пог. Км.

Результаты и обсуждение. Сейсмические зондирования выполнялись на техногенно нагруженных территориях, представленных равнинными формами рельефа дневной поверхности (конуса выноса горных рек).

Профиль KNDC. Поле поперечных волн при возбуждении по краям косы на открытом канале (рисунок 2а, в) характеризуется наличием интенсивных регулярных помех в диапазоне 25-40 Гц, существенно затрудняющих отслеживание целевых SH волн на удалении от ПВ более 45-50 метров. Эта задача решена путём применения полосовой фильтрации в диапазоне 2/10 – 30/40 Гц, который был выбран в результате анализа спектрального состава волн-помех и полезного сигнала. Как видно из рисунков 2 б, г, волновое поле практически очищено от помех и корреляция проходящих поперечных SH волн проблем не вызывает.

По отфильтрованным волновым полям поперечных волн построены соответствующие годографы, которые были поделены на отрезки с постоянной кажущейся скоростью (рисунок 3 а), для последующей их интерпретации способом [4].

Важной особенностью распределения кажущейся скорости по годографам является существенное повышение значений этого параметра с 630 до 1100 м/с на удалении от выносного ПВ на 88 метров. Этот эффект свидетельствует о наличии в разрезе преломляющей границы на глубине более 20 метров. Результатом интерпретации

приведённых выше годографов стала скоростная колонка в параметре скорости поперечных (Vs) волн (рисунок 4Б).

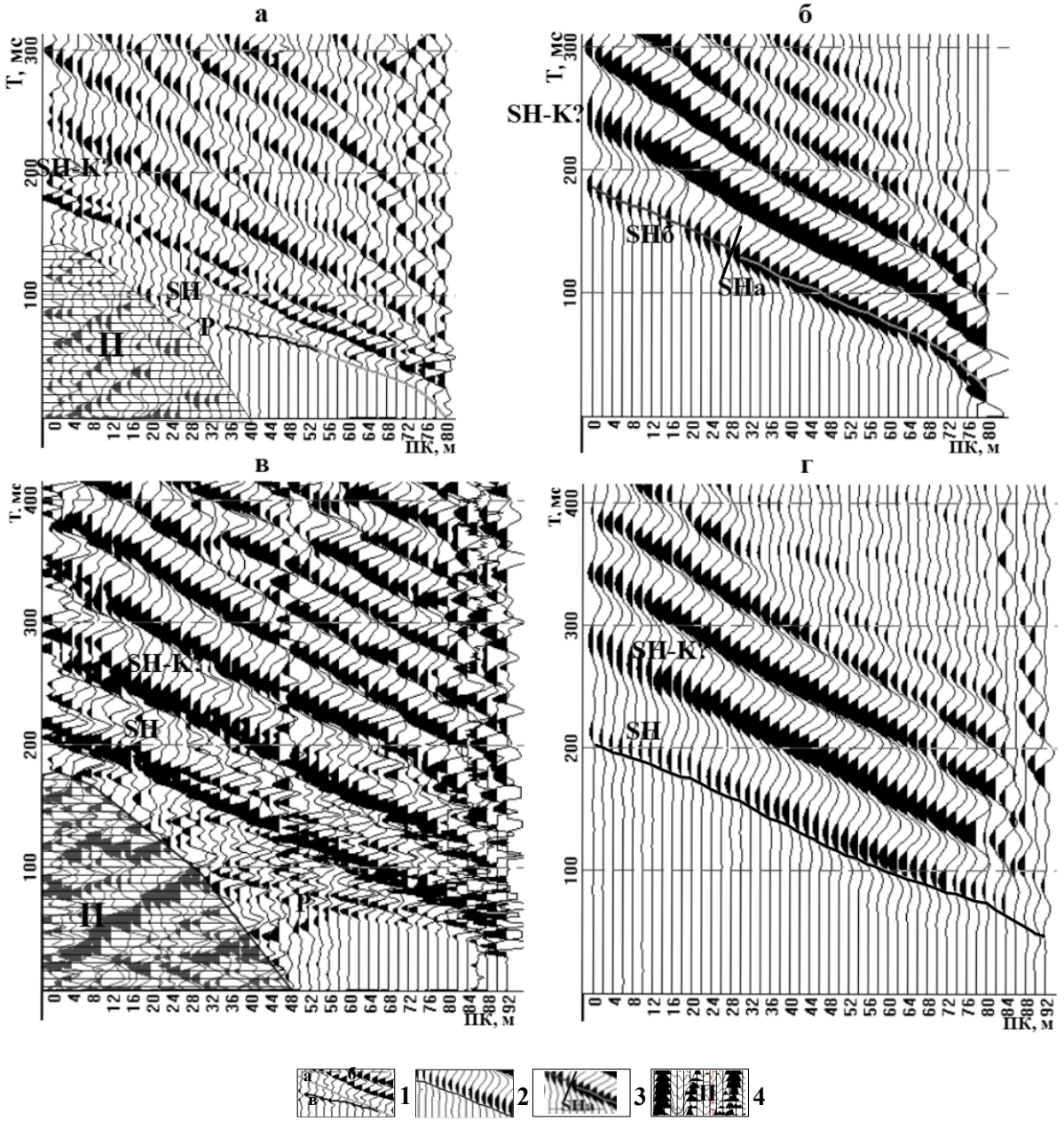


Рисунок 3 – Сейсмостанция KNDC. Поля поперечных волн при возбуждении в ПК80 и 100: а, в – наблюденные на открытом канале, б, г - после повышения соотношения сигнал/помеха полосовой фильтрацией в диапазоне 2/10 – 30/40 Гц. SH и SH-K? – проходящие и предположительно кратные горизонтально поляризованные преломлённо-рефрагированные поперечные волны. P – проходящие преломлённо-рефрагированные продольные волны. 1 – фазы до фильтрации: поперечной (а, б) и продольной (в) волн; 2 – фазы поперечных волн из пунктов возбуждения ПК80 и ПК100 после фильтрации; 3 – смещение фазы поперечной волны в области остаточного влияния помехи; 4 – поле техногенных сейсмических помех при возбуждении поперечных волн

Как видно из этого рисунка, закономерным является резкое повышение скорости в самой верхней части разреза (0-3 метра) и практически однородная толща до отметок 26 метров (Vs=600-630 м/с), ниже которой имеет место жесткая преломляющая граница, по

которой скорость Vs возрастает до 1100 м/с, что возможно, вызвано сменой вещественного состава разреза, например, песчано-галечного на валунно-галечный.

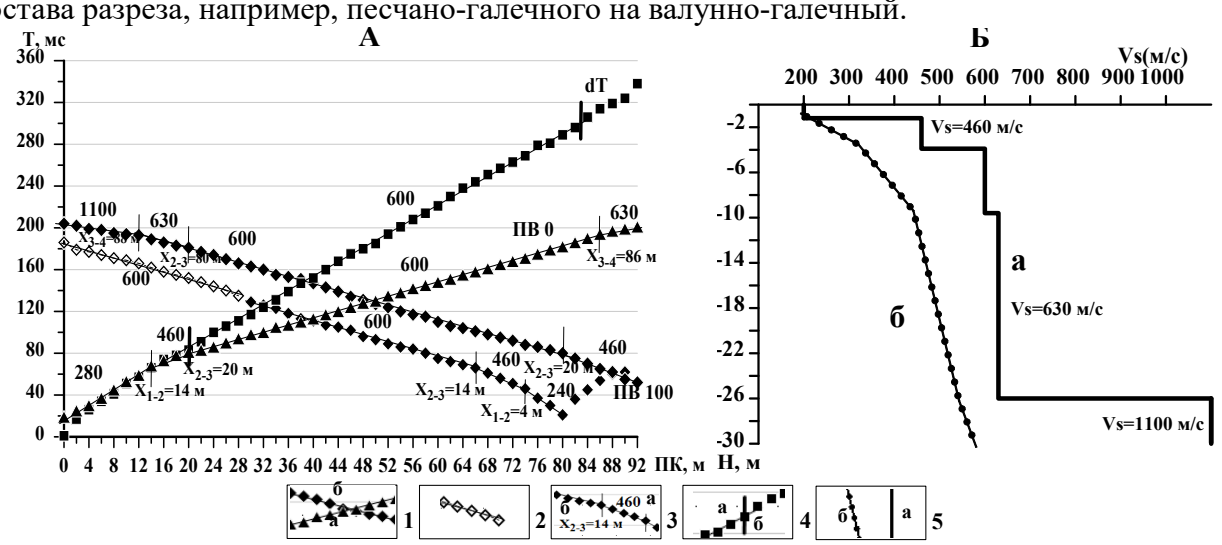


Рисунок 4 – Сейсмостанция KNDC. Годографы SH волн (А) и скоростные параметры (Б) разреза в поле поперечных волн. 1 – прямой (а), встречный (б) годографы, наблюдённые из пунктов возбуждения (ПВ) в ПК 0 и 80; 2 - фрагмент годографа, смещенного после фильтрации; 3 – нагоняющий годограф из ПВ ПК100 и точки излома (а) годографов, по которым рассчитывалась кажущаяся скорость при удалении (б) от пункта возбуждения; 4 – разностный годограф (а) между ПВ0 и 100 и его границы (б); 5 – графики интервальной (а) и средней (б) скоростей поперечных волн

Приведённые выше сведения о распределении скорости поперечных волн на глубину, использованы в качестве фактурных данных для определения категории грунтов по сейсмическим свойствам в районе сейсмостанции KNDC.

Профиль KASK. Поле поперечных волн на этом участке при возбуждении по краям косы практически свободно от техногенных помех, что позволило вполне уверенно протрассировать вступления первой волны (рисунки 5 а, б) с применением процедуры АРУ.

Более сложной представляется волновая картина, наблюдённая из выносного пункта возбуждения ПК140. Основной помехой здесь выступает волна в интервале частот 15-20 Гц, забивающая волновое поле на временах вплоть до 300 мс (рис. 5 в). Её подавление выполнено в два приёма – сначала режекторная фильтрация с центральной частотой 17 Гц, затем полосовая в диапазоне 2/5 – 30/40 Гц (рисунок 5 г).

В результате этих процедур представилось возможным выделить преломлённую волну с кажущейся скоростью 850 м/с от ПК38 и далее в начало профиля. По приведённым выше волновым полям поперечных волн построены и проинтерпретированы годографы (рисунок 6А), также, как и для профиля KNDC, способом [4] с построением скоростной колонки (рисунок 6Б).

Как видно из этого рисунка, также, как и для профиля KNDC, закономерным является резкое повышение скорости в самой верхней части разреза (0-3 метра). Далее, вплоть до глубины порядка 28 метров имеет место незначительное повышение интервальной скорости. Ниже этой отметки – резкое увеличение скорости поперечных волн с 660 до 850 м/с, что вероятно вызвано сменой вещественного состава разреза, например, песчано-галечного на валунно-галечный.

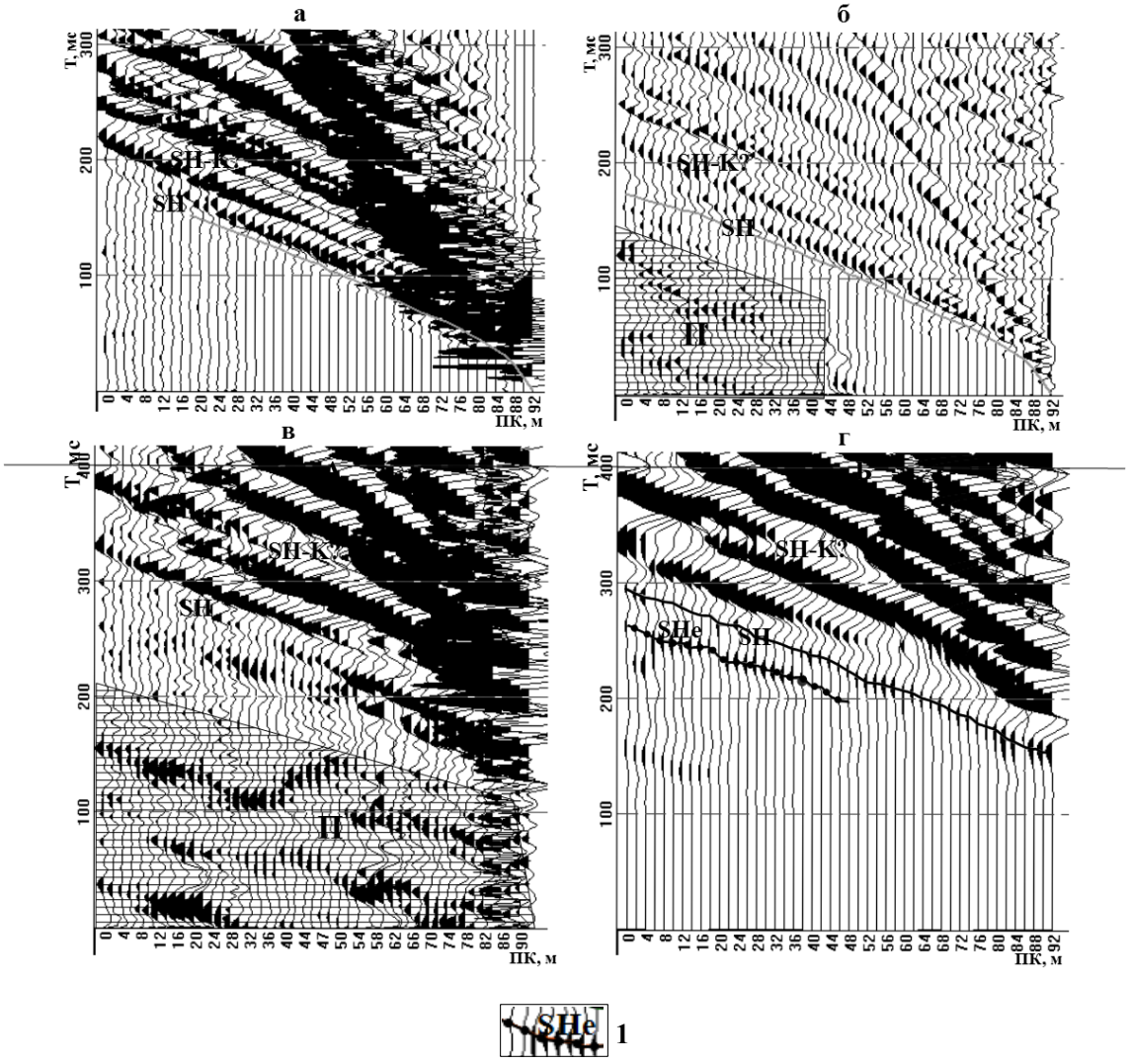


Рисунок 5 – Сейсмостанция KASK. Поля поперечных волн при возбуждении в ПК92 и 145: а, в – наблюдённые на открытом канале, б, г - после повышения соотношения сигнал/помеха на основе применения АРУ. 1 – фрагмент предположительно преломлённой волны с максимальной кажущейся скоростью. Остальные условные обозначения на рисунке 3.

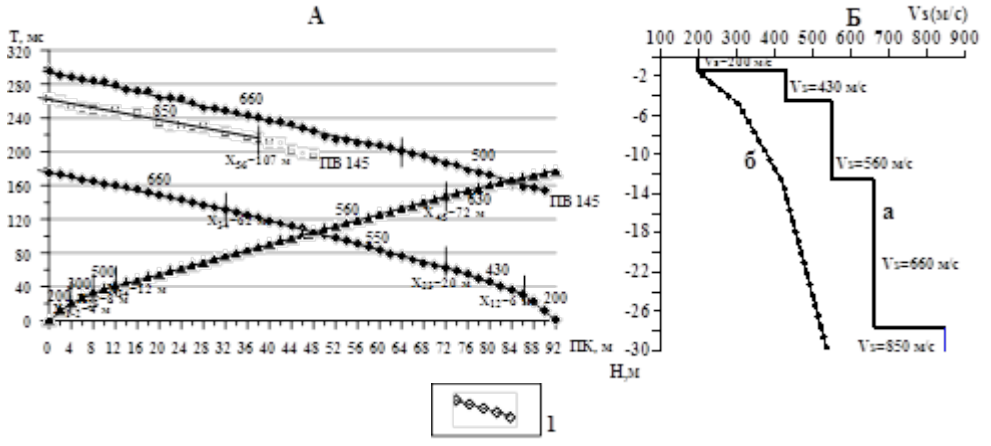


Рисунок 6 – Сейсмостанция KASK. Годографы SH волн (А) и скоростные параметры (Б) разреза в поле поперечных волн. 1 – фрагмент годографа предположительно преломленной волны с максимальной кажущейся скоростью. Остальные условные обозначения на рисунке 2.

Определение категории грунтовых условий в местах расположения сейсмостанций KNDC и KASK. Необходимые для решения этой задачи данные по средней скорости поперечных волн были получены её расчетом из интервальных значений Vs на глубину не менее 30 метров (рисунки 3 Б и 5 Б). Собственно категория грунтов определена в соответствии с требованиями [5]. Данные по значениям скорости поперечных волн на глубинах 10 и 30 метров в точках зондирования и соответствующая им категория грунтов по сейсмическим свойствам приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Значения средней скорости поперечных волн на глубинах 10, 30 метров и категория грунтов по сейсмическим свойствам в заданных точках зондирований

С/станции	Координаты с/станций		Координаты центров зондов		Vs 10м (м/с)	Vs 30м (м/с)	Категория грунтов по сейсм. свойствам
	Y(с.ш.)	X(в.д.)	Y(с.ш.)	X(в.д.)			
KNDC	43.2171	76.9671	43. 217166	76. 967233	450	590	IБ
KASK	43. 2178	76. 6414	43. 217979	76. 641219	380	530	II

Выводы. Как видно из табл. 1, для приведённых точек зондирования в целом характерны повышенные значения средней скорости. На глубинах 10 и 30 метров в среднем они составляют 415 и 560 м/с соответственно. При этом сейсмостанция KNDC, как следует из полученных данных, находится в более благоприятных условиях для приёма сейсмических колебаний.

Для повышения эффективности работ по оценке и прогнозированию сейсмических воздействий при сильных землетрясениях рекомендуется продолжить работы по изучению сейсмических условий под всеми станциями сильных движений на территории Казахстана.

Литература

1. Михайлова Н.Н. Сейсмическая опасность в количественных характеристиках колебаний грунта. Дис. … д-ра физ.-мат. наук. М. 1996. 250 с.
2. Kashima T. ViewWave Help, IISEE, BRI. 2002.
3. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Сейсморазведка. Госстрой РСФСР (РСН 66-87).
4. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Мин-во геол. СССР; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидрогеол. и инж. геол.; Под ред. Н.Н. Горяинова. М.: Недра. 1992. 264 с.
5. Свод правил Республики Казахстан. Строительство в сейсмических зонах. СП РК 2.03-30-2017. Астана. 2018.

УДК 553.98.041:551.762(575.16/.192)

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ МЕЛОВЫХ И ЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРЕДЕЛАХ СТРУКТУРЫ ШАРКИЙ ЖИЙДАЛИК

Юлдашев Н.Н.[1], Саотов М.Х.[2], Шокиров А.Ш.[1], Давронов Н.Н.[1], Бойтемиров А.М.[3]
Yuldashev_nn@mail.ru, nodir.davronov.96@mail.ru
[1] Институт геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений, г. Ташкент, Узбекистан
[2] АО «УЗБЕКГЕОФИЗИКА», г. Ташкент, Узбекистан
[3] Ташкентский университет информационных технологий им. Мухаммад ал-Хоразмий, г. Ташкент, Узбекистан

В статье авторы предлагают подготовить выявленную структуру к глубокому бурению с целью открытия нового месторождения нефти и газа с ожидаемой геологической эффективностью. В статье был проведен комплексный анализ геологических и геофизических данных. На основе анализа имеющихся материалов (бурение, ГИС и МОГТ-2Д) даны рекомендации по подготовке структуры к глубокому бурению по кровле юрских и меловых отложений.

Ключевые слова: горизонт, формация, юрские отложения, прогиб, сейсморазведка, ловушки, бурение, скважина, залежь, поднятие.

Введение. Развитие производства и, в целом, экономики любого государства мира неразрывно связано с потреблением энергетических ресурсов: нефти, газа и др. Доля углеводородов в топливно-энергетическом балансе составляет более 80%. Проведение геологоразведочных работ на нефть и газ играет значимую роль при выполнении прироста, воспроизводстве и добычи углеводородного сырья для экономики республики.

Интенсивный рост потребления углеводородного сырья требует определенных темпов геологоразведочных работ, обеспечивающий достаточно высокий прирост запасов нефти и газа.

Отложения карбонатной формации (КФ) в Бухаро-Хивинском регионе (БХР) занимает одно из ведущих мест по добыче нефти и газа. Однако ресурсы нефти и газа КФ ограничены и возникает необходимость использования дополнительных источников.

Дальнейшее наращивание запасов возможно либо за счет переориентации поисково-разведочных работ на более глубоко залегающие продуктивные горизонты, либо за счет поисков залежей, не связанных с антиклинальными ловушками (стратиграфические, литологические, тектонически экранированные и др.), так как перспективы выявления новых месторождений на основе традиционного направления поисков близки к полной реализации.

Терригенные меловые и юрские отложения являются резервом для наращивания разведанных запасов нефти и газа, что поможет решить проблему энергетической независимости. Это и определяет актуальность настоящей работы, посвященной комплексному применению материалов сейсморазведки, и ГИС в Мубарекском поднятии Бухарской ступени.

Для Бухарской тектонической ступени относительно детально этот вопрос рассмотрен в работах Акрамходжаева О.М., Симоненко А.Н., Арнаутова Е.И., Бабаева А.Г., Троицкого В.И., Алексеева В.П., Габрильян Р.А., Эйдельнант Н.К., Эгамбердиев М.Э., Давлятова Ш.Д., Корсунь В.В., и др [1-2]. Все исследователи едины в мнении, что меловые и юрские отложения являются регионально перспективными. Рекомендуемый к изучению участок Шаркий Жийдалик в территориально-административном отношении расположен на территории Нурабадского района Самаркандской области. В тектоническом отношении расположен в северно-восточной части Мубарекского поднятия Бухарской тектонической ступени БХР. Бухарская тектоническая ступень характеризуется широким диапазоном нефтегазоносности,

наличием залежей УВ как в юрском (терригенная и карбонатная формация), так и нижнемеловых комплексах отложений. Хотя в юрской терригенной формации (ТФ) промышленные притоки установлены на площадях Акжар, Шурчи, Юлдузкак, Саталантепе, Шумак, Сев.Мубарек, Юж.Мубарек, Ходжихайрам, Сев.Майманак. Основной упор при проведении геологоразведочных работ делался на изучение КФ и нижнего мела.

Структура впервые была выявлена в 1995 году и детализирована переинтерпретацией материалов сейсморазведки Хатамской 22/15-18, Шурсайской 14/16-19, Андабазарской 21/18-21 и Чаманзорской 14/20-23 сейсмопартий [3].

Северная часть Бухарской ступени остается наименее изученной частью БХР.

Структурный план Мубарекской тектонической зоны имеет сложную конфигурацию и конседиментационный характер развития положительных и отрицательных структур осадочного покрова. Она унаследовала многие черты герцинского этапа, сохранив в общих чертах структурный план фундамента - простирание структур, которые чаще всего имеют брахиформные, куполовидные формы, структуры имею относительно большие амплитуды. Кроме того, важнейшим фактором формирования структурного плана является система разрывных нарушений, региональные продольные сбросы и взбросы северо-западного и северо-восточного направления и осложняющие их локальные поперечные сдвиги и сбросы [4]. Система тектонических нарушений различной величины и амплитуды, разломно-блоковая структура палеозойского основания контролируют структурный план осадочного чехла. К каждому из блоков приурочено одно или несколько структур большой амплитуды, с крутыми крыльями. Ориентировка и конфигурация структур осадочного чехла отвечает в общем разломно-блоковому строению палеозойского основания, локальные структуры совпадают с простиранием крупных разрывных нарушений и тектоническими выступами палеозойского основания.

Мубарекское поднятие включает в себя Южно-Мубарекский вал, на котором находится площадь Чувама. Южно-Мубарекский вал протягивается с юго-запада на северо-восток и включает в себя структуры Расылкудук, Южный Мубарек, Ходжихайрам, Карабаир, Карактай, Байбурак и др.

Почти все месторождения на Бухарской ступени являются приразломными: Юлдузкак, Чембар, Шуртепа и др.

В данной территории отложения палеозоя вскрыты в ряде структур: Караулбазар, Джаркум, Джийдалик и Хайдарали. Палеозойские отложения также вскрыты южнее на соседних ГКМ Северный Мубарек, Южный Мубарек, Шуртепе представлены сильно измененными изверженными породами - гранитами и гранодиоритами. На отдельных участках верхняя часть этих пород сильно разрушена и представляет кору выветривания. Наряду с магматическими породами в фундаменте присутствуют осадочно-метаморфические [5]. Карбонатные породы вскрыты только в единичных скважинах. Шире представлены углисто-кремнистые, иногда известковые сланцы, песчаники, алевролиты каменноугольного возраста. Вскрытая мощность кристаллического фундамента 8 - 271 м.

Терригенные отложения представлены темно-серыми, местами почти черными аргиллитами и глинами с прослоями алевролитов. В верхней части разреза встречаются редкие прослои зеленовато-серых, глинистых известняков. Песчаники темно-серого, темно-зеленого слюдистого с многочисленными обуглившимися растительными остатками. Мощность терригенных отложений в скважинах № 1 Чембар составляет 55 м, № 1 Джийдалик составляет 221 м и в скв. № 1 Янги Кызылрабат составляет 218 м.

На терригенных отложениях согласно залегает мощная карбонатная толща, состоящая из разнообразных видов известняков и имеющая повсеместное распространение. К отложениям келловейского яруса в нефтегазоносном регионе относится XVI, XVa горизонты юры.

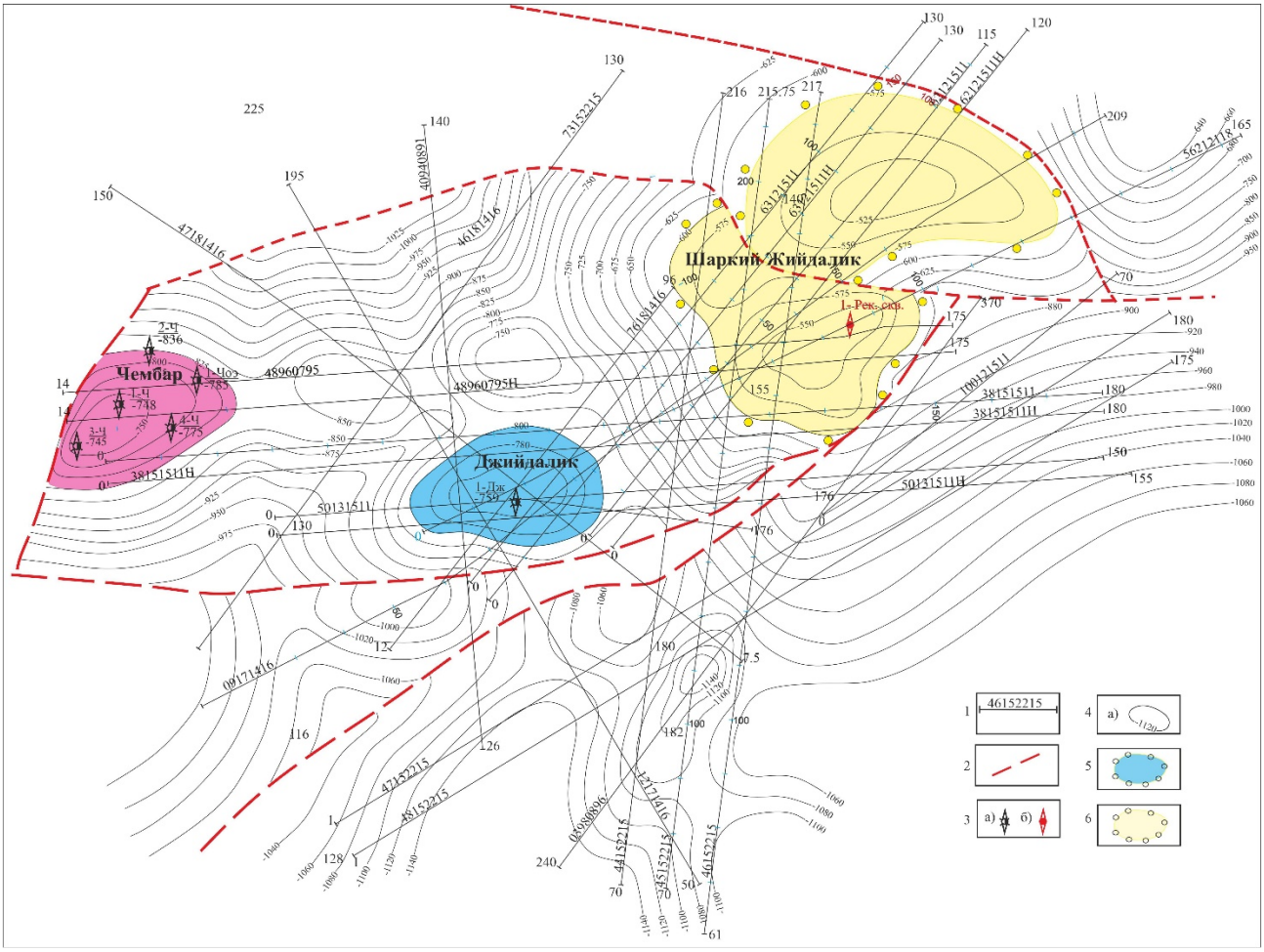


Рисунок 1 – Структурная карта по отражающему горизонту T_5 приуроченная к кровле нижних ангидритов. Условные обозначения:1-сейсмические профили МОГТ-2Д; 2-разломы; 3-пробуренные скважины:а) поисковые б) рекомендуемые; 4-изогипсы по ОГ T_3 (J_3,tt); 5-подготовленная структура; 6-выявленный объект

XVI горизонт представлен преимущественно известняками, хорошо выдержанными как по мощности, так и по литологии. Известняки афонитовые, темно-серые, плотные, крепкие с включением кальцита, встречаются стиллолитовые швы, выполненные битумом. Мощность XVI горизонта в скважине № 1 Чорбог составляет 112 м.

XVa горизонт представлен известняками. Известняки серые, участками темно-серые, плотные, крепкие, местами трещиноватые с включениями фауны плохой сохранности, обуглившихся растительных остатков кристалликов пирита. Мощность XVa горизонта в скважине № 1 Джийдалик составляет 23 м, в скважине № 1 Чембар - 31 м, в скважине № 3 Янги Кызылрабат - 33 м.

Отложения согласно залегают на карбонатной толще келловейского яруса средней юры, состоящей из разнообразных видов известняков и имеющая повсеместное распространение. В разрезе карбонатной формации выделяются XV-ПР, XV-Р и XV-НР горизонты.

Методика обработки и результаты. В результате анализа геолого-геофизических данных были построена структурная карта по кровле ОГ T_5 (оксфорд-кимеридж) в масштабе 1:50 000 с выделением перспективных площадей для продолжения геологоразведочных работ (рис. 1). На структурной карте иллюстрируется сложное геологическое строение площадей и месторождений.

На структурных картах выделяется Шуртепинская антиклинальная зона, которая имеет северо-восточное простирание и состоит из складок: Шумак, Ижобат, Шуртепе, Шурсай,

Чембар, Шимолий Чембар, Джийдалик и Шаркий Жийдалик расположенных по отношению друг к другу кулисообразно.

В зонах нарушений создаются наиболее благоприятные условия для образования высокоамплитудных ловушек. В этих зонах коллектора имеют трещинный тип с высокой проницаемостью. Именно на этих участках как правило получают высокодебитные притоки. С этих позиций предлагаемая структура расположена в благоприятных условиях, т.е. с севера и северо-востока ограничена тектоническим нарушением.

Южнее от рекомендуемой структуры в 2023 году была пробурена поисковая скважина №1 на площади Джийдалик, с проходкой полного разреза юрских и меловых отложений и со вскрытием отложений палеозоя. Забой скважины находится на отметке -1400 м.

Скважиной были вскрыты отложения оксфорд-кимериджа на отметке -1054 м, что на 19 м гипсометрически ниже проектного, 24 м выше отметки в скважине Чембар №4.

Отложения терригенной юры вскрыты на глубине -1156 м что гипсометрически на 21 м ниже проектного, 20 м выше отметки в скважине Чембар №4. Бурение в интервалах 992-1400 м проводилось при следующих параметрах промывочной жидкости: удельный вес глинистого раствора -1,09 г/см^3, вязкость – 55с., водоотдача – 7см^3/30 мин.

Верхнеюрские карбонатные отложения на участке имеют сингенетично сокращенный тип разреза. Отсутствуют нижние горизонты. Терригенные среднеюрские отложения, а именно, XVII и XVIII горизонты сложены плотными терригенными разностями и отличаются отсутствием метаморфизма.

В результате испытания скважины №1 Джийдалик из карбонатных отложений притоков углеводородов не получены. Из нижней части карбонатов, XV-а горизонта получена пластовые воды уд. весом – 1,00-1,01 г/см^3. Должно быть пластовые воды с низу подпирают скопление газов в вышележащих пластах.

Необходимо отметить, что XIII и XII горизонты нижнего мела на площади Джийдалик не были испытаны, тогда как из XII горизонтов в скважинах Чембар №1 и №4 получены промышленные притоки газа (рисунок 2).

На волновом поле материалов сейсморазведки МОГТ 2Д ОГ T_2 и наблюдающиеся ниже отражающие горизонты залегают конформно.

Результаты анализа показывают, что юрские терригенные отложения имеют сокращенный тип. Здесь сокращение происходи за счет выпадения из разреза нижних горизонтов. Структура находится на палеозойском выступе. Карбонатные отложения так же имеют небольшие мощности, мощности САФ уменьшены до 10 м. Наблюдается общее сокращение юрских и меловых отложений к северу.

Это означает, что на площади Шаркий Жийдалик, расположенной на 7 км к северо-восточнее от структуры Джийдалик мощности юрских отложений будут ещё меньше. Возможно отсутствие надежной соляно-ангидритовой покрышки. Следовательно, говорить о продуктивности терригенных отложений юры затруднительно. Однако по меловым отложениям перспективы нефтегазоносности обнадеживающие.

В пользу рентабельности можно сказать, что в отложения мела залегают на небольших глубинах, на обнаруженных залежах газа в меловых отложениях на месторождениях Узбекистана отсутствует сероводород.

Найденные залежи бессернистого газа в меловых отложениях расположены вблизи тектонических нарушений и образовались за счет перетока из нижележащих юрских терригенных отложений, или это происходит в процессе латеральной миграции газа через терригенные породы.

На основе вышеизложенного считаем перспективным нижнемеловые и юрские отложения на площади Шаркий Жийдалик. Рекомендуется подготовить структуру Шаркий Жийдалик по ОГ T_2 и T_3 с целью заложения поисковой скважины на своде структуры для изучения перспектив нефтегазоносности нижнемеловых и юрских отложений (рисунки 3, 4).

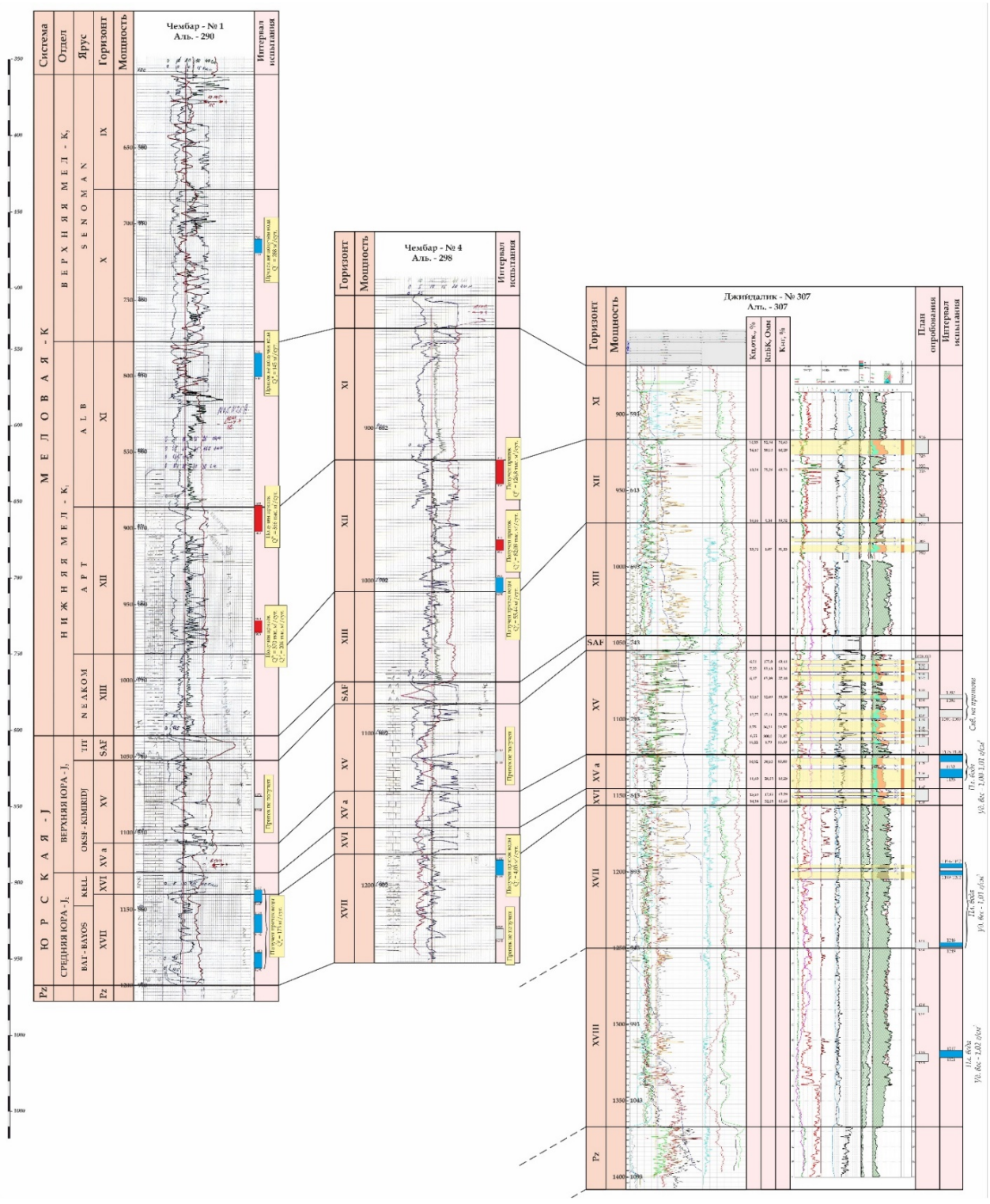


Рисунок 2 – Корреляционная схема по линии скважин Чембар №1,4, Джийдалик №1

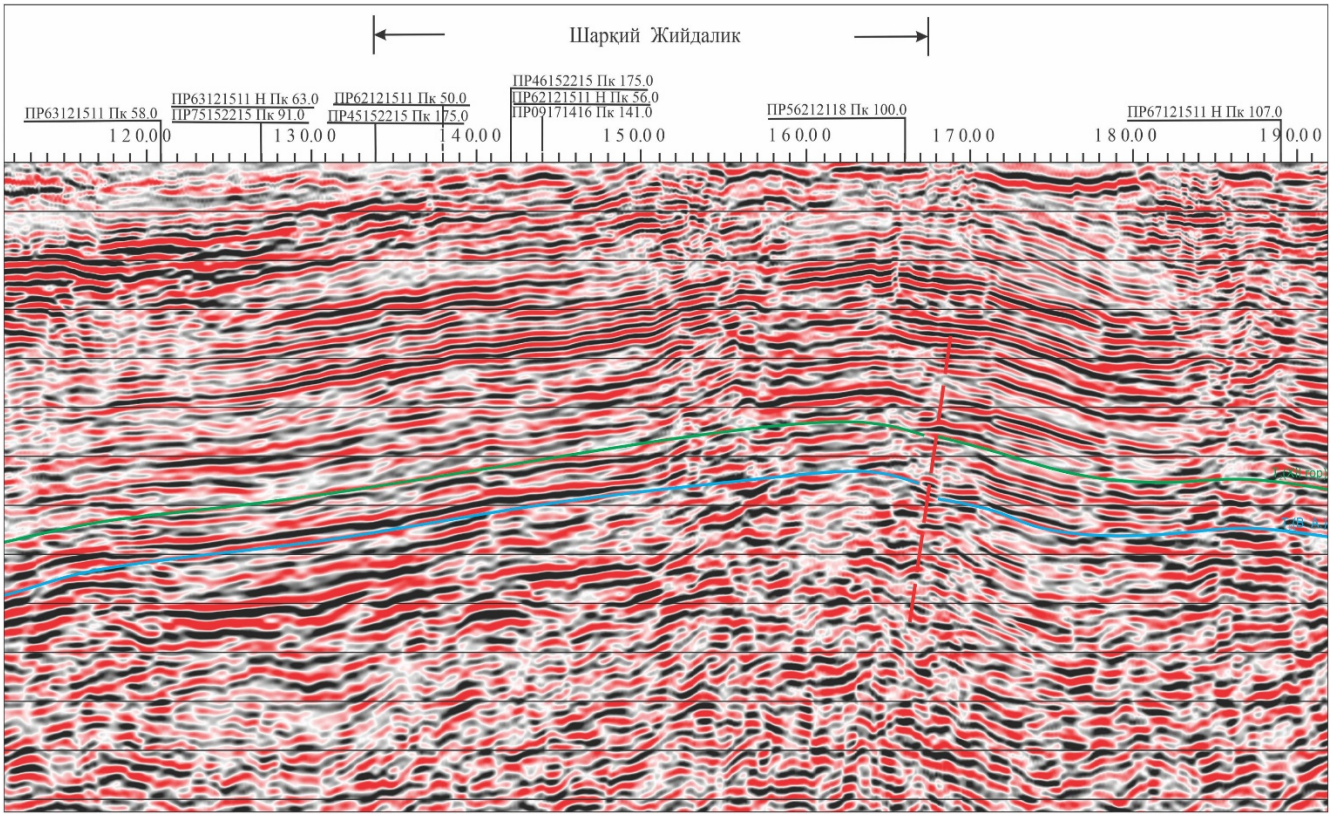


Рисунок 3 – Временной разрез по профилю 57212118

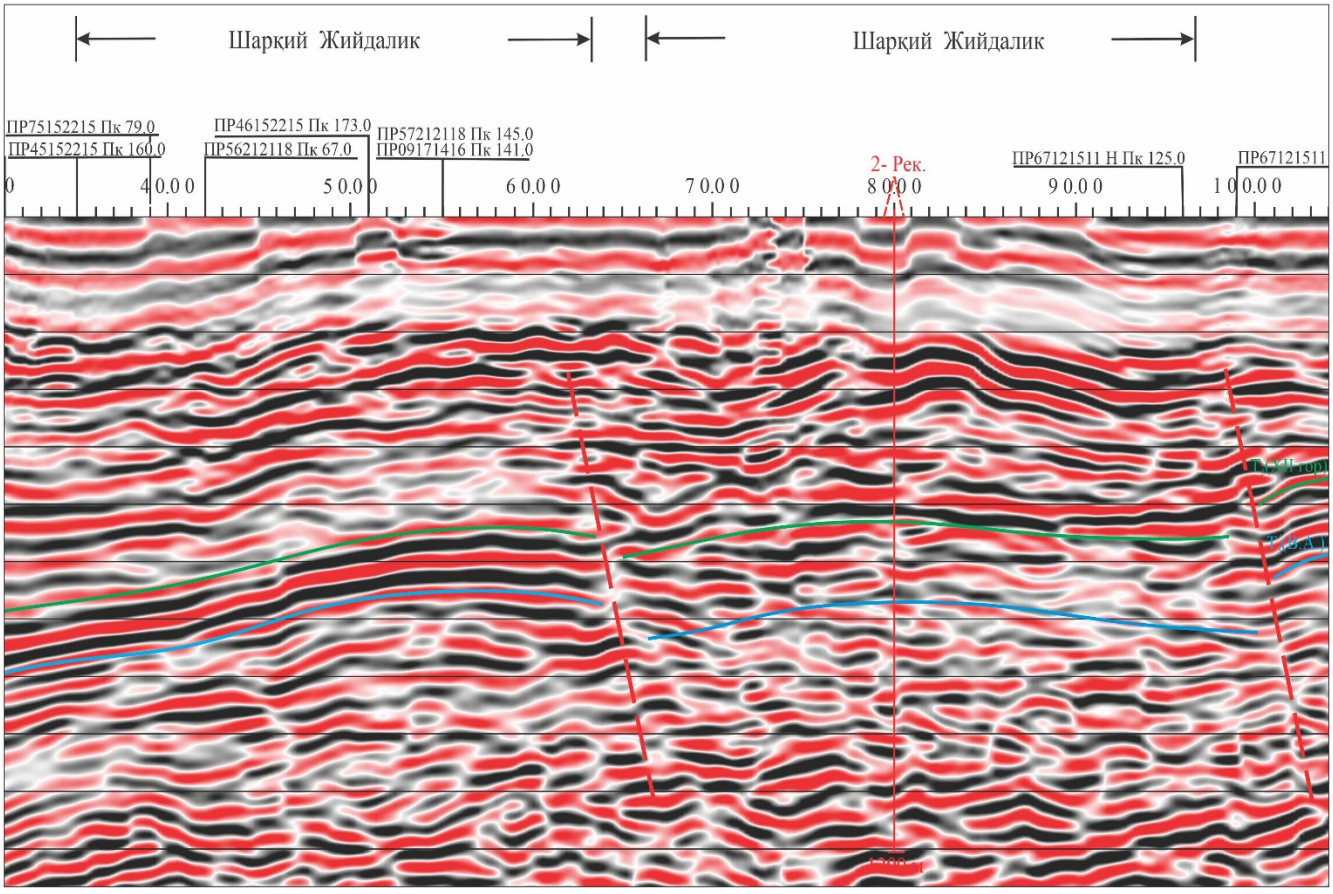


Рисунок 4 – Временной разрез по профилю 62121511Н

Структура хорошо прослеживается по отражающему горизонту T_6, приуроченному к кровле нижних ангидритов. Объект представляет собой двухкупольную антиклинальную складку северо-восточного простирания. Южный купол ограничен тектоническими нарушениями в юго-восточной и северной частях, а северный купол – в южной и северо-восточной частях.

Выводы. Таким образом, в целях поисков залежей углеводородов в карбонатных отложениях верхней юры, а также в терригенных отложениях нижнемелового возраста и оценки их нефтегазоносности, а также для вскрытия и глубокого изучения верхнепалеозойских образований, структуру Шаркий Жийдалик рекомендуется для подготовки к глубокому поисковому бурению.

Литература

1. Теоритические основы и методы поисков и разведки скоплений нефти и газа / АА. Бакиров, Э.А. Бакиров, Мелик-Пашаев В.С. и др. М.: Высшая школа. 1987. 384 с.
2. Абдуллаев Г.С., Богданов А.Н., Эйдельнант Н.К. Месторождения нефти и газа Республики Узбекистан // Ташкент: Zamin nashr. 2019. 247 с.
3. Абдуллаев Г.С., Миркамалов Х.Х., Евсеева Г.Б. Нефтегазоносные рифовые фации юрской карбонатной формации Амударьинской впадины (южного и юго-западного Узбекистана) и их связь с рифообразованием в палеобассейнах тетиса // Труды научно-практической конференции. Ташкент: ИГИРНИГМ. 2010.
4. Юлдашев Н.Н. Актуальные вопросы изучения строения и перспектив нефтегазоносности юрских терригенных отложений Бухаро-Хивинского региона (Республика Узбекистан) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2021. Т. 16. № 1. С. 1-7. https://doi.org/10.17353/2070-5379/3_2021
5. Hakimjon N. Zaynidinov, Asror M. Boytemirov, Odash A. Qarshiyev, Tuychi X. Shoymurotov, Nazarbek N. Yuldashev, Murodjon G. Yoqubov. Porosity and Permeability Prediction of Oil and Gas Reservoirs Using Artificial Neural Networks and Support Vector Machines // 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE)**.** 25.12.2024. Novosibirsk, Russian Federation. P. 1550-1555 https://doi.org/10.1109/PIERE62470.2024.10804993

УДК 553.98.041:551.762(575.16/.192)

СОСТОЯНИЕ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ ПО ПОИСКУ НЕФТИ И ГАЗА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЧАРДЖОУСКОЙ СТУПЕНИ НА ПРИМЕРЕ СТРУКТУРЫ АКНАЗАР

Юлдашев Н.Н.[1], Курбонов Ш.Б.[2], Киргизов И.К.[2], Давронов Н.Н.[1]
Yuldashev_nn@mail.ru, nodir.davronov.96@mail.ru
[1] Институт геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений, г. Ташкент, Узбекистан
[2] ИП ООО «SANOAT ENERGETIKA GURUHI», г. Ташкент, Узбекистан

В рамках исследований проведен комплексный анализ имеющихся и вновь полученных геолого-геофизических данных по месторождению Акназар, расположенному в центральной части Чарджоуской ступени Бухаро-Хивинского региона (БХР). Проанализированы материалы бурения поисково-разведочных скважин Акназар, материалы интерпретации сейсморазведочных работ МОГТ-3Д. В результате комплексного анализа авторами определены дальнейшие направления доразведки месторождения Акназар путем получения новой геологической модели.

Ключевые слова: поднятие, горизонт, модель, прогиб, структурная карта, сейсморазведка, ловушки, бурение, скважина, залежь.

Введение. В настоящее время ощущается острая нехватка в энергоресурсах для обеспечения потребностей страны, а именно природным газом, нефти и нефтепродуктами. Поэтому перед геологами нефтегазовой отрасли поставлена задача по ускорению геологоразведочных работ, получение дополнительного прироста запасов УВ, наращиванию объемов их добычи.

Основные промышленные запасы нефти и газа в Республике Узбекистан сосредоточены в карбонатных отложениях юры Бухаро-Хивинского региона. Верхнеюрские карбонатные отложения до сих пор рассматриваются в качестве главного поисково-разведочного объекта с большой степенью опоискованности геофизическими методами и глубоким бурением.

В административном отношении месторождение Акназар расположено в Кашкадарьинской области Республики Узбекистан. Ближайший населенный пункт г. Карши расположен в 75 км к северо-востоку от месторождения Акназар.

В тектоническом отношении структура Акназар расположена в юго-западной части Бешкентского прогиба в центральной части Чарджоуской ступени БХР.

Структура изначально была выявлена поисковыми сейсморазведочными работами МОГТ 2Д в 1973 г. В 1982 г. подготовлена к глубокому поисковому бурению. В 1983 г. началось бурение поисковой скважины №1, при испытании которой в 1985 г. получены промышленные притоки газа из верхнеюрских карбонатных отложений. В разряд месторождений структура введена в 1985 году.

По кровле XVa-1 горизонта месторождение Акназар представляет собой контрастно выраженную брахиформную горст-антиклинальную структуру северо-восточного простирания. По изогипсе «-3325 м» структура имеет размеры: 6,75 х 4,25 км при высоте 138м [1].

Промышленная газоносность месторождения установлена в XVa-1 и XV горизонтах верхнеюрской карбонатной толщи. Газоносность нижезалегающей части карбонатной толщи испытанием не установлена, если не считать получение слабого газа, не поддающегося замеру через затрубное пространство при опробовании XVa-2 горизонта в скв. № 1. Промышленная газоносность XVa-2 горизонта предполагается по данным ГИС.

Общие размеры залежи (XV, XVa-1, XVa-2) горизонтов: длина 7 км, ширина 4 км, высота в своде 137 м, в седловине – 50 м. Дебиты газа от 86,14 тыс. м3/сут через 12 мм штуцер (скв. № 4) до 162,5 тыс. м3/сут через 15 мм штуцер (скв. № 1). Тип залежей пластовый тектонически экранированный. Тип коллектора трещинно-поровый. Газоводяной контакт принят общим на абсолютной отметке «-3312 м». Пластовые давление и температура равны, соответственно, 604 ата и 130 °С. Коэффициенты открытой пористости изменяются от 0,076 до 0,085, а газонасыщенности - от 0,67 до 0,87.

Газ месторождения Акназар по составу относится к категории сухих, низкосернистых, углекислых, низкоазотных. Объемная доля компонентов в газе составляет (%): метана 89,7; этана 4,01; пропана 0,97; изо-бутана 0,15; н.-бутана 0,19; пентана и высшие 1,21, углекислого газа 3,73, сероводорода 0,001, азота 0,06. Плотность газа составляет 0,651 г/см3. Потенциальное содержание конденсата в сухом газе составляет 76 г/м3, а коэффициент его извлечения равен 0,7.

На 01.01.2025 г. месторождение находится в разряде подготовленных к разработке. Всего на месторождении за период 1983-2024 гг. пробурено 9 скважин (№№ 1-8,11). Из них по 3-м скважинам (№№1,7,8) получены промышленные притоки газа, остальные ликвидированы по геологическим и техническим причинам [2].

Методика обработки и результаты. В период 2015-2018 гг. проведены детализационные сейсморазведочные работы МОГТ-3D в пределах месторождений Акназар, Шимолий Акназар и другие с целью получения достоверных сейсмических данных и дальнейшего построения их трехмерных сейсмогеологических цифровых моделей.

В результате комплексной переинтерпретации данных сейсморазведки МОГТ-3D с учетом данных бурения поисково-разведочных и эксплуатационных скважин месторождений Акназар и Шимолий Акназар, специалистами геологической службы СП ООО «Sanoat Energetika Guruhi» совместно со специалистами ГУ «ИГИРНИГМ» были проанализированы геолого-геофизические, буровые и добычные данные по месторождению. В результате были проведены переинтерпретация сейсмических данных (атрибутный анализ) в программном комплексе Петрель и получены новая уточненная геологическая модель месторождения Акназар. Кроме того, по результатам построений были получены карты изохрон, карты мощностей и структурные карты по главным продуктивным горизонтам. По новой геологической модели месторождения в отличии от раннее построенной геологической модели, настоящая модель является 3-х купольной структурой: северный, южный и западный (рис. 1).

Размеры северного купола по замыкающей изогипсе «-3180м» составляют 0,9х1,3 км, площадь 1,0 кв.км, амплитуда около 20 м; южного купола замыкающей изогипсе «-3180м» составляют 3х2 км, площадь 4,27 кв.км, амплитуда около 80 м; западного купола замыкающей изогипсе «-3160м» составляют 3х1 км, площадь 3,0 кв.км, амплитуда около 100 м;

Кроме того, для выделения и оконтуривания возможных зон с высокими коллекторскими свойствами нами были использованы сейсмические атрибуты Max Amplitude, RMS Amplitude и мгновенной частоты. Наиболее информативным атрибутом для выделения возможных зон коллекторов оказался атрибут RMS.

Для подтверждения новой геологической модели и уточнения запасов УВ месторождении Акназар, рекомендуется пробурить эксплуатационных скважин №9 и №10, а также разведочных скважин №№12, 13, 14 проектной глубиной 3650м со вскрытием XVI горизонта карбонатной юры.

Выводы. Вышеприведённая информация и полученные геолого-геофизические данные пробуренных скважин позволяют, для уточнения распространения залежи структуры и увеличения площади запасов УВ, а также для изучения контура залежи в XV горизонте верхней юры, местоположения рекомендуемых скважин: эксплуатационная скважина №9, 10 - на пересечении сейсмических профилей Inline 1545 и 1610 (рисунки 2, 3).

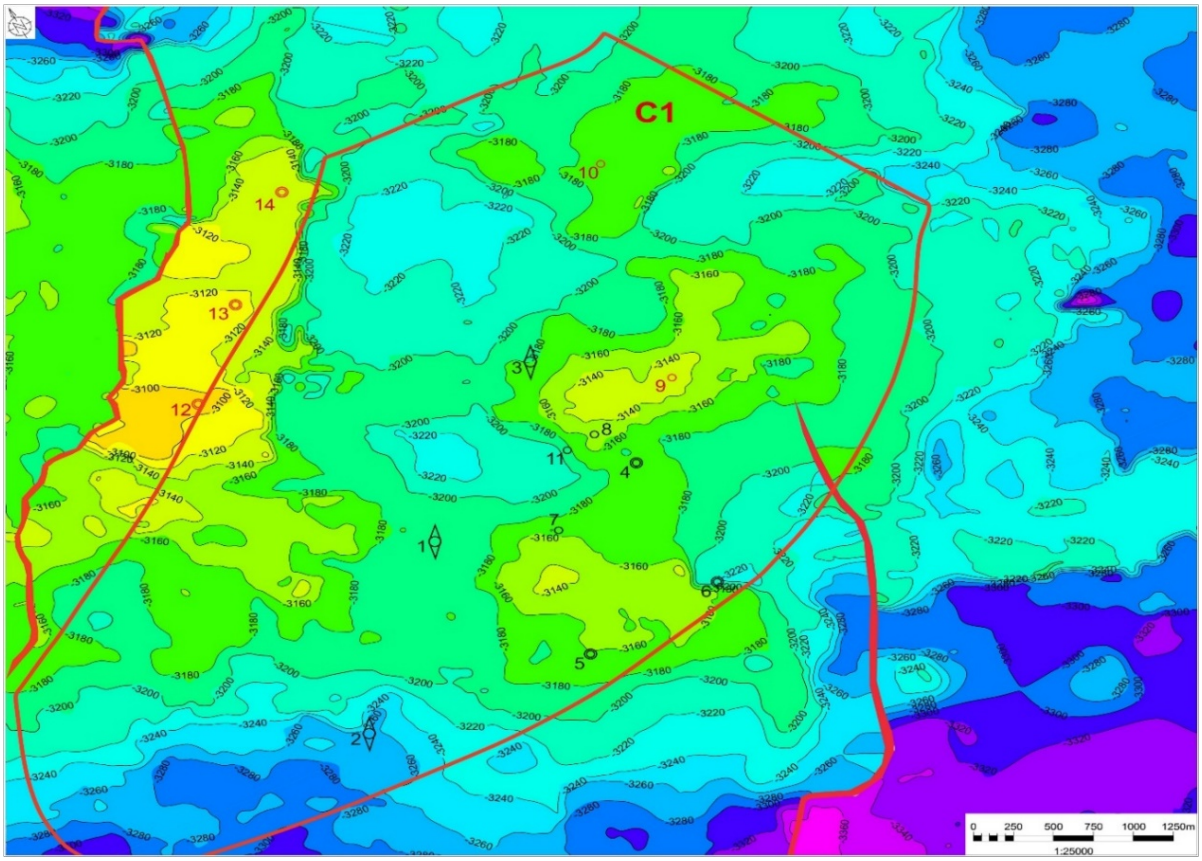


Рисунок 1 – Структурная карта по ОГ T_6, приуроченному к кровле XV горизонта

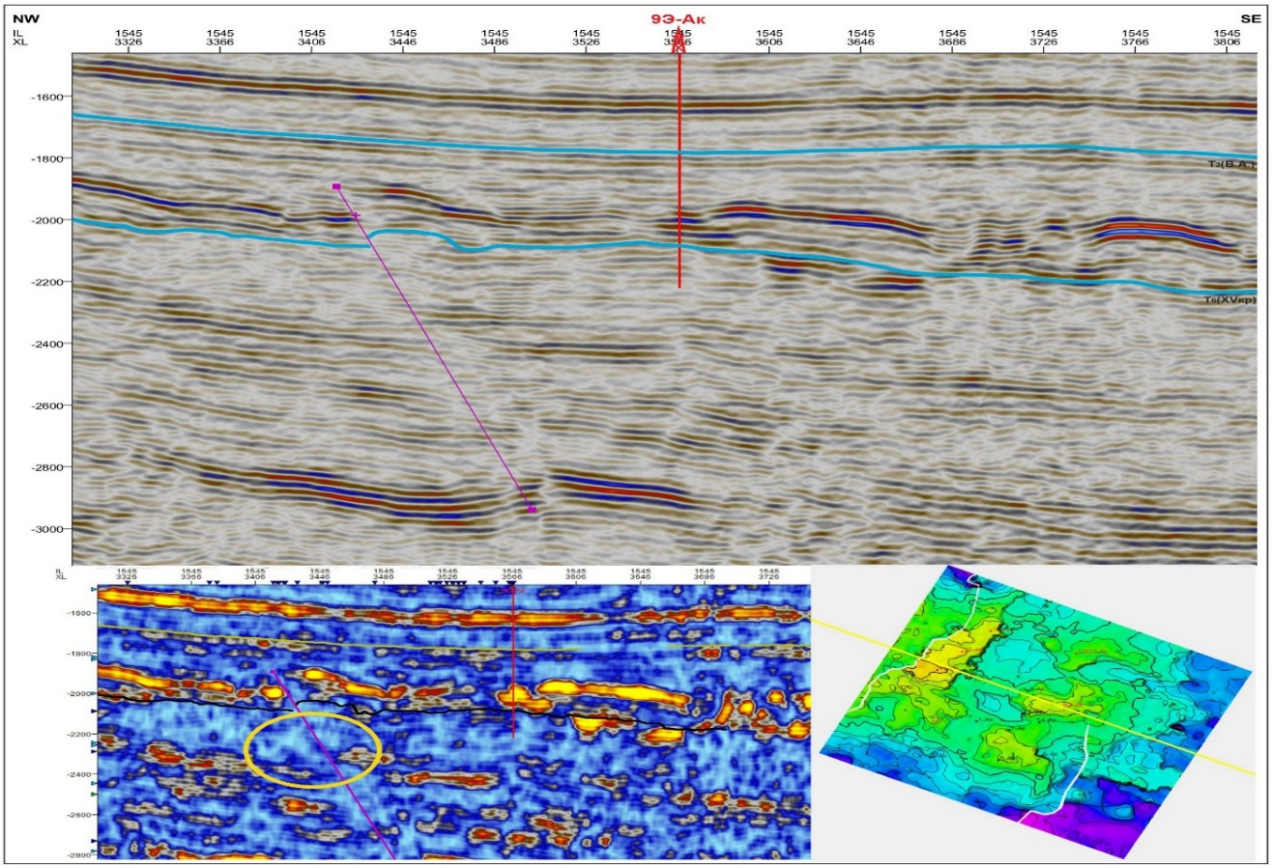


Рисунок 2 – Временной разрез по профилю Inline 1445 и Атрибутный разрез (RMS) по профилю

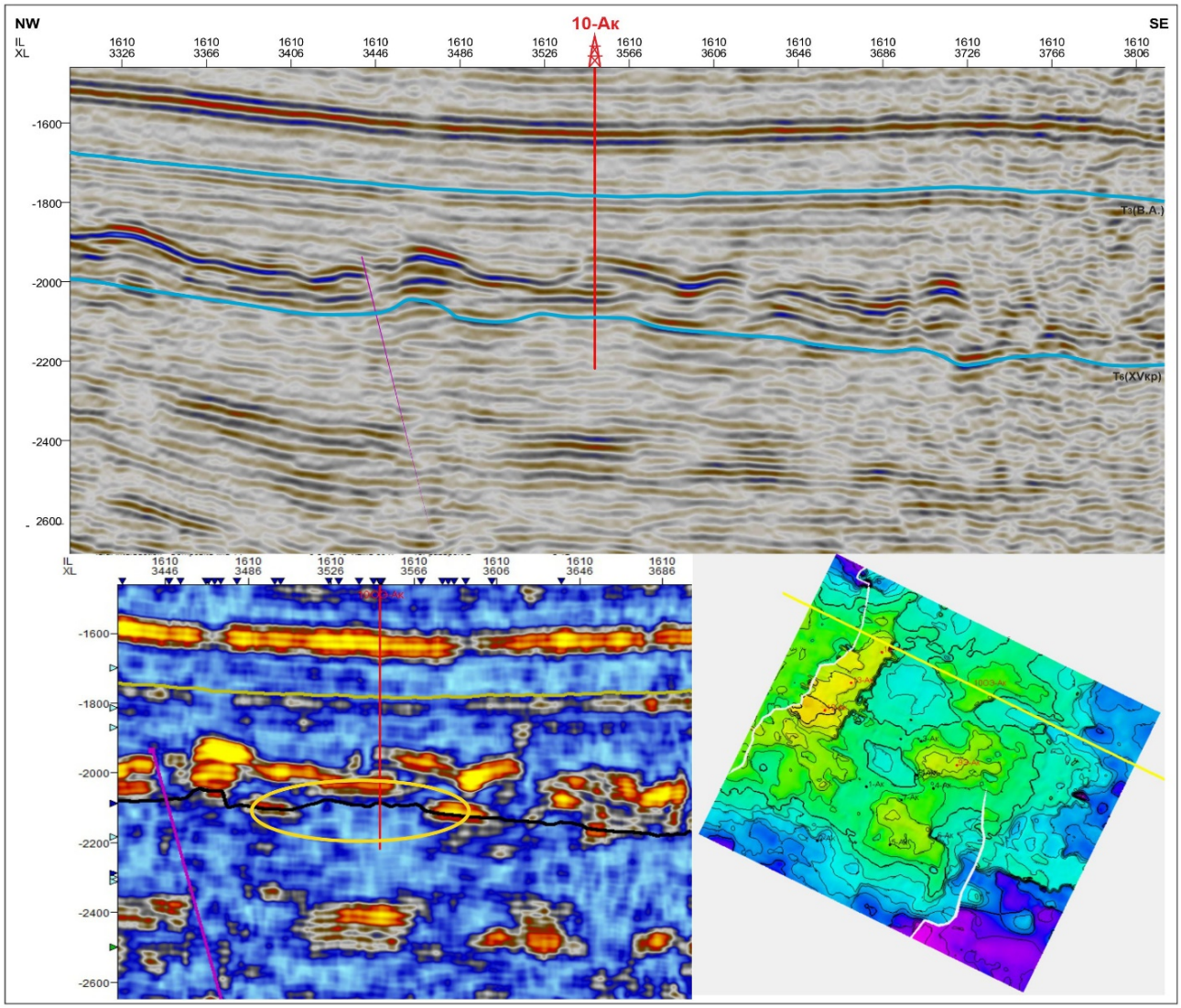


Рисунок 3 – Временной разрез по профилю Inline 1610 и Атрибутный разрез (RMS) по профилю

Литература

1. Абдуллаев Г.С., Богданов А.Н., Эйдельнант Н.К. Месторождения нефти и газа Республики Узбекистан // Ташкент: Zamin nashr. 2019. 247 с.
2. Абдуллаев Г.С., Миркамалов Х.Х., Евсеева Г.Б. Нефтегазоносные рифовые фации юрской карбонатной формации Амударьинской впадины (южного и юго-западного Узбекистана) и их связь с рифообразованием в палеобассейнах тесиса // Труды научно-практической конференции. Ташкент: ИГИРНИГМ. 2010.

УДК 550.837.3

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА МОНИТОРИНГОВЫХ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ПРОФИЛЯ «ТОКБАЙ»

Юнусов А.И.
iunusov.a28@gmail.com
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

В работе представлен подход к автоматизации обработки мониторинговых электротомографических данных, обеспечивающий высокую скорость обработки для построения псевдоразрезов кажущегося сопротивления на различных глубинах. Объектом исследования выбран профиль «Токбай», расположенный в западной части Чуйской впадины Северного Тянь-Шаня, в зоне тектонического влияния Иссык-Атинского разлома. Разработанный подход включает автоматическую фильтрацию данных, что позволяет сократить время обработки и минимизировать ошибки.

Ключевые слова: электротомография, Иссык-Атинский разлом, автоматизация обработки, разломные зоны, электрический мониторинг, Северный Тянь-Шань.

Введение. Электротомография (ЭТ) представляет собой геофизический метод, основанный на измерении кажущегося сопротивления и построении геоэлектрических моделей приповерхностных слоев. Этот подход получил широкое распространение благодаря своей эффективности в изучении сложных геологических структур, таких как разломные зоны, которые играют ключевую роль в геодинамических процессах и сейсмической активности. Актуальность метода обусловлена его способностью обеспечивать высокую детализацию данных при минимальном вмешательстве в окружающую среду, что делает его незаменимым для мониторинга тектонически активных регионов.

В данной работе представлен новый алгоритмический подход к автоматизации обработки мониторинговых данных электротомографии на примере профиля «Токбай». Повторные измерения, проводимые в течение трех суток, позволяют фиксировать краткосрочные вариации кажущегося сопротивления, что особенно важно для анализа динамики разломных структур и оценки их состояния [1]. Однако традиционная обработка таких данных остается трудоемким процессом, требующим значительных временных затрат и подверженным субъективным ошибкам при интерпретации. Разработанный подход включает автоматизированные процедуры обработки и визуализации данных, что позволяет повысить точность и надежность получаемых результатов. Основной целью исследования является разработка и тестирование алгоритмического подхода, позволяющего сократить временные затраты на обработку мониторинговых электротомографических данных и повысить воспроизводимость результатов. Результаты обработки демонстрируют потенциал предложенного подхода для оперативного анализа больших объемов данных, что открывает новые возможности для мониторинга геодинамических процессов и прогнозирования изменений в тектонически активных зонах. В 2024 году сотрудниками Научной станции РАН были проведены мониторинговые геофизические исследования методом электротомографии на профиле «Токбай». Исследования осуществлялись с использованием электроразведочной станции «Скала-48», разработанной ООО «Конструкторское бюро электрометрии» (г. Новосибирск) [2, 3]. Профиль расположен в районе поселка Токбай Сокулукского района Чуйской области Кыргызстана и пересекает зону Иссык-Атинского разлома [4, 5]. Данное местоположение делает профиль особенно значимым для изучения активных тектонических процессов и их влияния на геологическую среду (рисунок 1).

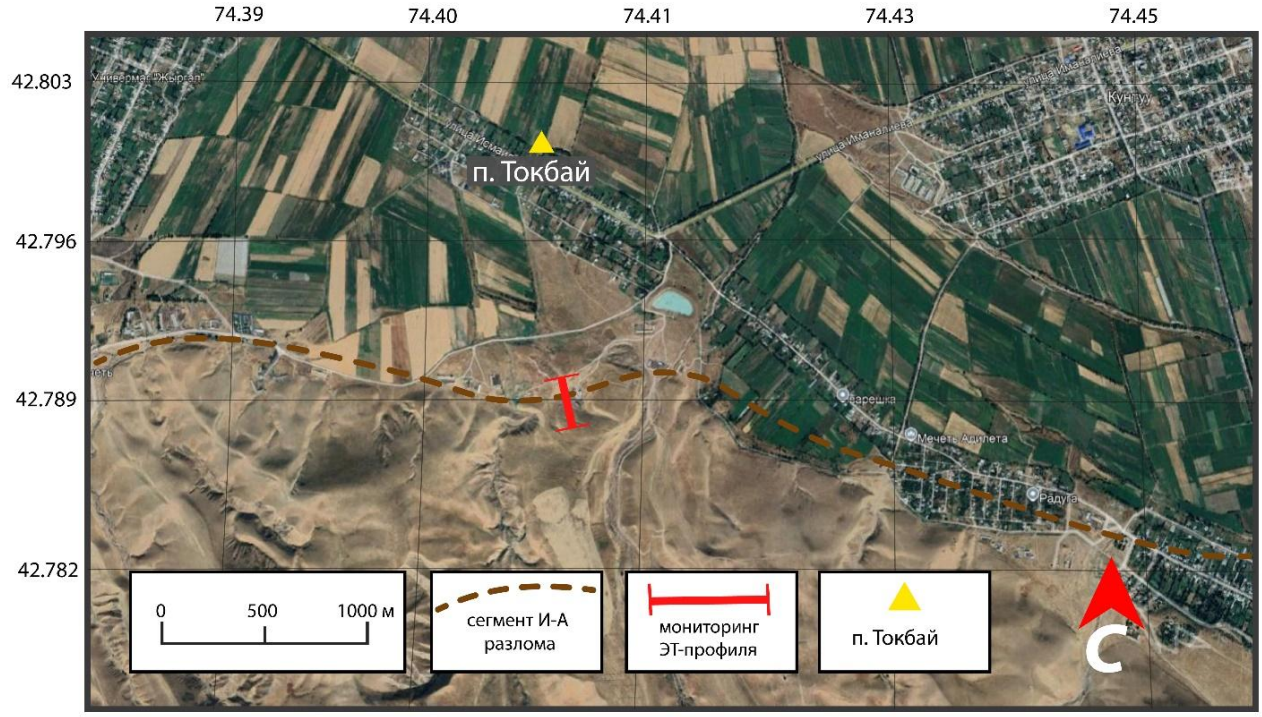


Рисунок 1 – Участок мониторинговых электротомографических наблюдений на профиле «Токбай» [1, 4]

Методика выполнения мониторинговых электротомографических наблюдений. Мониторинговые электротомографические исследования на профиле «Токбай» проводились в течение трех суток (с 05.06.2024 по 08.06.2024). Средняя продолжительность каждой записи составляла от 40 до 45 минут. Для полевых наблюдений применялась установка типа «Шлюмберже» с интервалом между электродами 5 м. Полученные данные сохранялись в формате *.d2d, после чего передавались на компьютер для последующей обработки [1, 3]. Процесс подготовки к полевым работам включал развертывание кос длиной 120 м в противоположные от станции стороны. После размещения кос и заземления электродов проводилась проверка исправности оборудования, включающая тестирование всех каналов и контрольное измерение каждого электрода для оценки качества заземления. При выявлении высоких переходных сопротивлений или нестабильности контактов, выполнялась корректировка расположения электродов или улучшение условий заземления. Только после успешного завершения тестирования начинался основной цикл измерений.

Автоматизированная обработка данных. Первоначальная обработка мониторинговых электротомографических данных проводилась вручную и включала несколько этапов. Результаты измерений в формате *.d2d загружались на персональный компьютер. На этапе первичной обработки исключались ошибочные данные, после чего файлы экспортировались в формат *.dat. Эти файлы вручную открывались в текстовом редакторе, где содержались значения кажущегося сопротивления ($\rho_к$) [6]. Данные копировались для дальнейшего анализа, и эта процедура повторялась для каждой мониторинговой сессии, что требовало значительных временных затрат и усилий. Для повышения эффективности обработки данных была разработана автоматизированная программа на языке Python [7]. Основная цель программы — извлечение значений кажущегося сопротивления из заданного диапазона строк каждого файла *.dat с последующим сохранением результатов в таблицу Excel для дальнейшего анализа, включая вычисление средних значений. Программа использует специализированные библиотеки для работы с данными и структурирования выходных файлов, что позволяет обеспечить высокую точность и скорость обработки.

Программа опирается на следующие библиотеки Python:

- **tkinter**: использовалась для создания графического интерфейса, позволяющего пользователю выбрать папку с *.dat файлами и указать путь для сохранения результатов. Модуль **filedialog** из **tkinter** предоставляет удобные методы **askdirectory** и **asksaveasfilename** для этих целей;
- **os**: применялась для работы с файловой системой, в частности, для перебора файлов в выбранной папке через метод **os.listdir** и формирования полных путей к файлам с помощью **os.path.join**;
- **numpy**: эта библиотека была выбрана для чтения и обработки числовых данных из *.dat файлов. Метод **np.loadtxt** позволяет эффективно считывать текстовые файлы с пропуском строк заголовков и преобразованием данных в массив;
- **pandas**: использовалась для создания таблицы из извлечённых данных и сохранения её в файл формата **Excel** через метод **to_excel**.

Теперь, благодаря разработанному автоматизированному подходу, этот процесс выполняется значительно быстрее и эффективнее. Созданная программа позволяет оперативно обрабатывать данные из множества файлов *.dat, исключая необходимость ручного вмешательства. Алгоритм автоматически загружает файлы из указанной пользователем папки, пропускает 12 строк заголовков и извлекает значения кажущегося сопротивления из каждого файла (рисунок 2). Данные собираются в структурированный массив и экспортируются в пять файлов Excel, соответствующих различным этапам анализа: предварительной фильтрации, расчетам параметров и построению псевдоразрезов. Процесс занимает считанные минуты даже при большом количестве сессий, обеспечивая высокую воспроизводимость и минимизацию субъективных ошибок. Такой подход существенно упрощает подготовку данных для построения геоэлектрических псевдоразрезов и анализа изменений свойств среды.

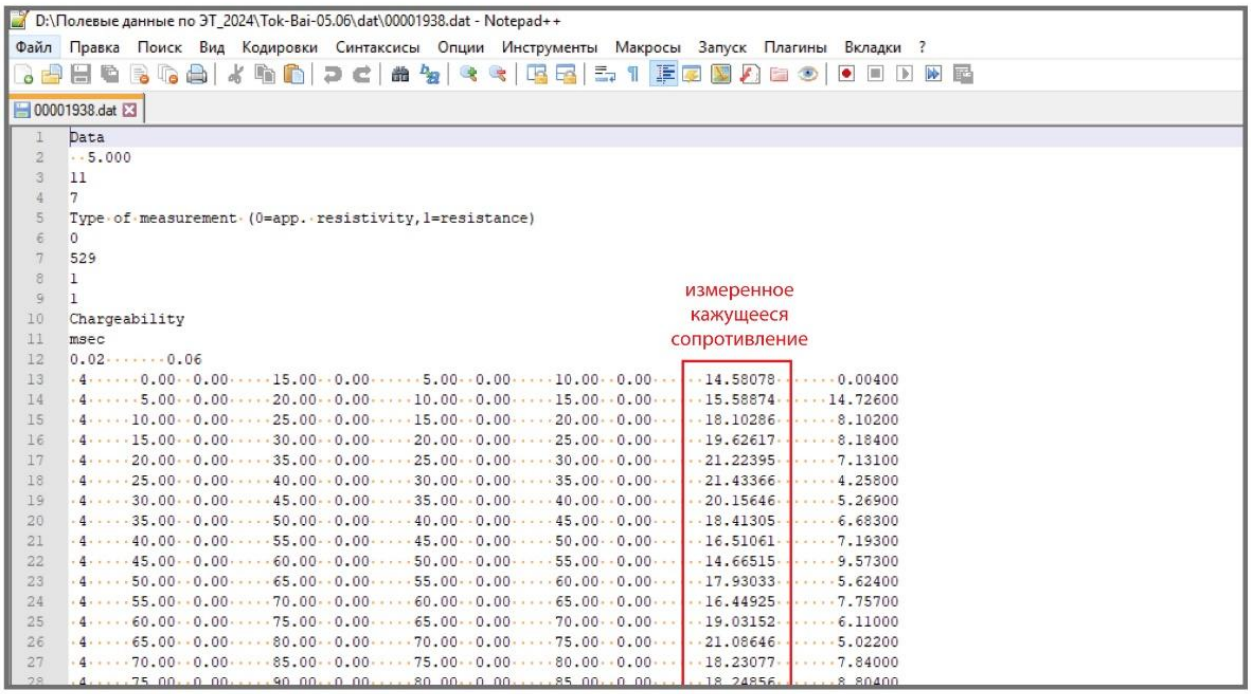


Рисунок 2 – Структура файла *.dat, представленная в текстовом редакторе, с выделенными данными кажущегося сопротивления

Формат файла *.dat представляет собой текстовый файл, который можно открыть и просмотреть в любом текстовом редакторе. Структура файла подробно описана в таблице 1.

Таблица 1 – Описание структуры файла 01_21_10.dat

Структура файла	№ строки и пояснения
Data	1-я строка – Название файла
5.00	2-я строка – Межэлектродное расстояние в метрах
11	3-я строка – Тип установки (Обобщенный)
7	4-я строка – Подтип установки (Шлюмберже)
Type of measurement	5-я строка – Текстовая строка (заголовок-описание строки 6)
0	6-я строка – Здесь 0 указывает на значения кажущегося сопротивления в данных
529	7-я строка – Общее число точек измерения
1	8-я строка – Тип задания горизонтальных координат точек измерения: 0, если координаты определяются относительно первого электрода установки, 1 – если относительно центра установки, то есть положения точки на псевдоразрезе
1	9-а строка – Признак данных вызванной поляризации: 0 – нет ВП, 1 – есть ВП
Chargeability	10-я строка – Поляризуемость
msec	11-я строка – Миллисекунды
0.02 – 0.06	12-я строка – 0.02 мс это пауза перед импульсом длительностью 0.06 мс для измерения ВП
4 · 0.00 · 0.00 · 15.00 · 0.00 · 5.00 · 0.00 · 10.00 · 0.00 · 154.2 · 0.74	13-я строка – 529 строк данных: количество электродов, координаты X, Z для первого и второго приемного электрода, координаты, измеренное кажущееся сопротивление для каждой точки и данные ВП

Результаты обработки данных. Для визуализации и анализа результатов мониторинговых электротомографических измерений, выполненных на профиле «Токбай», были построены псевдоразрезы кажущегося сопротивления ($\Delta\rho_к$). [8]. Этот этап обработки позволил представить пространственно-временные изменения геоэлектрических характеристик в графическом виде. Построение осуществлялось на основе данных, экспортированных в формат Excel после автоматизированной обработки, с учетом пяти псевдоглубин (4,8 м; 10,5 м; 14,4 м; 20,1 м; 24 м) и временных интервалов мониторинга, охватывающих трехсуточный период наблюдений.

Для создания псевдоразрезов формировались площадные карты, отражающие вариации ($\Delta\rho_к$) в зависимости от пространственного положения и времени. По горизонтальной оси (ось X) откладывались расстояния, соответствующий разносам электродов (MN/2), а по вертикальной оси (ось Y) отображалось время мониторинга (T) в минутах, что позволило проследить динамику изменений кажущегося сопротивления в течение трех суток. Каждая сессия измерений длилась в среднем 40–45 минут, обеспечивая последовательное накопление данных для построения временных срезов. Значения для всех псевдоглубин были представлены в единой цветовой шкале, охватывающей диапазон от -3 до 3 Ом·м [9]. Цветовая градация позволяла визуально выделить зоны с пониженным и повышенным сопротивлением, а также стабильные участки. Полученные псевдоразрезы, иллюстрирующие распределение кажущегося сопротивления на различных глубинах, представлены на рисунках 3 и 4.

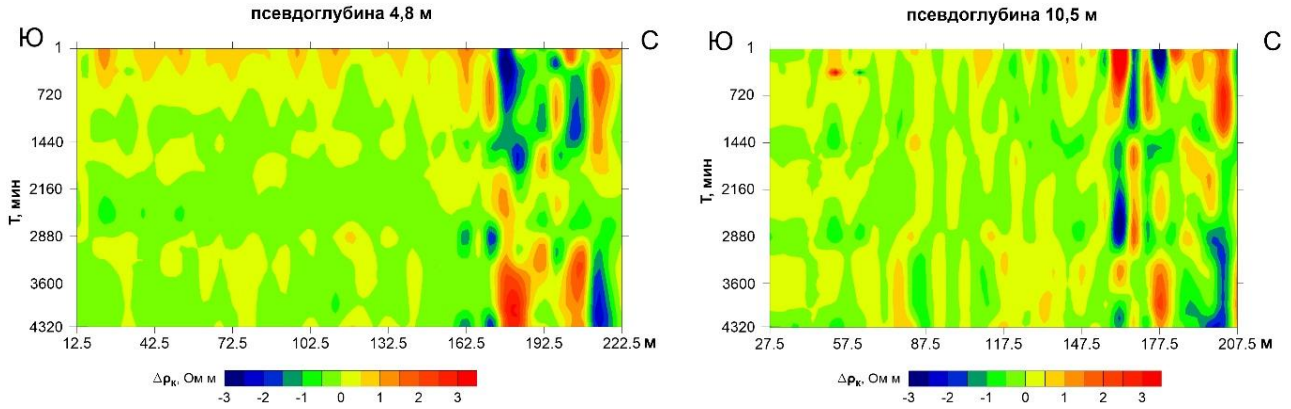


Рисунок 3 – Результат построения вариаций $\Delta\rho_к$, Ом·м на псевдоглубинах 4,8 и 10,5 м профиля «Токбай»

На рисунке 3, для псевдоглубин 4,8 м и 10,5 м, пространственное распределение вариаций кажущегося сопротивления в диапазоне расстояний от 42,5 м до 132,5 м преимущественно характеризуется зелёными оттенками, соответствующими значениям от -1 до 1 Ом·м. Это указывает на стабильные геоэлектрические характеристики в данной зоне, что может свидетельствовать об однородности геологической среды. В то же время, в диапазоне от 162,5 м до 200 м наблюдаются чередующиеся зоны с положительными и отрицательными вариациями $\Delta\rho_к$, что отражает неоднородности среды. Такие изменения, вероятно, связаны с локальными тектоническими структурами или колебаниями гидрогеологических параметров. Что касается временных изменений, наиболее выраженные аномалии фиксируются в интервале времени от 720 до 1440 минут (первые сутки наблюдений). В этот период выделяются крупные аномалии в диапазоне расстояний от 162,5 м до 212 м, что может указывать на динамические процессы в геологической среде. На третьи сутки (от 2880 до 4320 минут) вновь появляются локальные аномалии, что подчёркивает нестабильность в этой области.

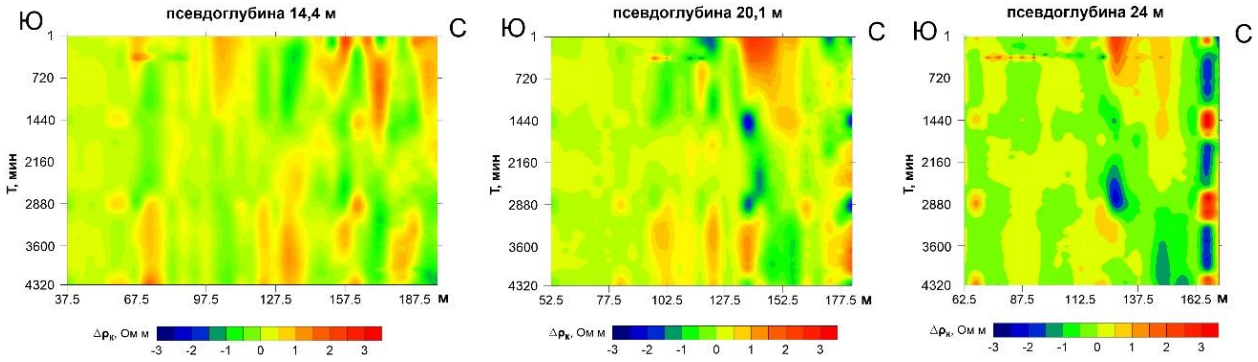


Рисунок 4 – Результат построения вариаций $\Delta\rho_к$, Ом·м на псевдоглубинах 14,1, 20,1 и 24 м профиля «Токбай»

На рисунке 4, для псевдоглубин 14,1 м, 20,1 м и 24 м, пространственное распределение вариаций кажущегося сопротивления в диапазоне расстояний от 37,5 м до 67,5 м характеризуется преобладанием зелёных оттенков, что свидетельствует о стабильных геоэлектрических характеристиках в этой зоне. В диапазоне от 127,5 м до 162,5 м доминируют зелёные и жёлтые оттенки (от -1 до 2 Ом·м), с локальными аномалиями в конце профиля, где наблюдаются отдельные участки с более выраженными вариациями (до 2-3 Ом·м), особенно на псевдоглубине 20,1 м. Временные изменения в первые сутки (с 720 до 1440 минут) проявляются в виде значительных положительных аномалий (до 3 Ом·м), которые наиболее выражены в диапазоне расстояний от 112,5 м до 152,5 м. Эти изменения, вероятно,

обусловлены тектонической активностью Иссык-Атинского разлома, что подчёркивает высокую эффективность метода электротомографии для мониторинга геодинамических процессов в тектонически активных зонах.

Заключение. Автоматизированный подход к обработке данных не только ускорил процесс анализа, но и повысил воспроизводимость результатов, обеспечив надёжную основу для построения псевдоразрезов кажущегося сопротивления. Полученные псевдоразрезы, демонстрируют пространственно-временные изменения, которые могут быть использованы для оценки состояния разломных структур и прогнозирования геодинамических процессов. Таким образом, предложенный подход для обработки данных, полученных методом электротомографии, представляет собой мощный инструмент для мониторинга тектонически активных регионов, открывая перспективы для дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания Научной станции РАН в г. Бишкеке.

Литература

1. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Забинякова О.Б. и др. Мониторинговые электротомографические исследования зоны Иссык-Атинского разлома (Северный Тянь-Шань) // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Т. 23. № 4. С. ES4012. DOI 10.2205/2023ES000881. EDN GYMNFS.
2. Аппаратура электроразведочная многоэлектродная «Скала»: руководство по эксплуатации. – 2019. – 14 с. – [Электронный ресурс]. URL: https://kbelectrometry.ru/catalog/skala-48k12/ (дата обращения: 21.11.2024).
3. Панин Г.Л. Многоэлектродная аппаратура методов сопротивлений «Скала-48» // Инженерная и рудная геофизика – 2008. Материалы конф. Геленджик. 2008. 2 с.
4. Абдрахматов К.Е., Джумабаева А.Б. Сегментация Иссык-Атинского разлома (Северный Тянь-Шань) // Вестник Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики. 2014. № 1 (3). С. 24-30. EDN YRRLFP.
5. Баталева Е.А., Матюков В.Е. Глубинное строение восточной части Иссык-Атинского разлома (Северный Тянь-Шань) // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы - 2022. Материалы LIII Тектонического совещания, г. Москва, 01–05 февраля 2022 г. Т. 1. М.: ГЕОС. 2022. С. 44-49. EDN FQRDSX.
6. Юнусов А.И. Результаты мониторинговых электротомографических исследований на профиле "Боом" // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Сб. материалов XVI Междунар. конф. молодых ученых и студентов, г. Бишкек, 24–26 апреля 2024 г. Бишкек: НС РАН. 2024. С. 291-296. EDN UEJZJE.
7. Русскоязычная документация по Python / Python Lessons [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pylessons.readthedocs.io/ru/latest/#python (дата обращения: 18.01.2025).
8. Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженно-деформированного состояния среды // Геофизические исследования. 2014. Т. 15. № 4. С. 54-63. EDN TANHDR.
9. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Забинякова О.Б. и др. Геоэлектрическая модель зоны Иссык-Атинского разлома (Северный Тянь-Шань) // Геофизика. 2023. № 3. С. 45-50. DOI 10.34926/geo.2023.35.22.006. EDN KKAOGI.

УДК 550.343

МОДЕЛИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Юсупов В.Р.
valijon.yusupov@mail.ru
Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

Приведены результаты анализа и обобщения повторных маршрутных и площадных исследований вариаций магнитного поля и современных движений земной коры. Анализированы обширные литературные данные ученых ведущих стран мира (Россия, Япония, Китай, Германия), геофизические и сейсмологические институты Украины, республик Центральной Азии, Кавказа и другие. Использованы также данные каталогов предвестников землетрясений по геомагнетизму, современным движениям земной коры, импульсного электромагнитного излучения земной коры и другие. Выделены долгосрочные, среднесрочные, краткосрочные предвестники, связанные с этапами подготовки землетрясений.

Ключевые слова: магнитное поле, вариация, землетрясения, современные движения, эпицентр

Введение. Анализированы и обобщены результаты многолетних повторных маршрутных и площадных съемок магнитного поля на Ташкентском, Ферганском, Кызылкумском полигонах, на сети стационарных магнитометрических станций, обширные работы в техногенных объектах (Чарвакское водохранилище, Полторацкое подземное газохранилище, площади газо-нефтяных и других месторождений, съемки в эпицентрах произошедших сильных землетрясений (Газлийские 1976 и 1984 годов, Исфара-Баткенского 1977 года, Таваксайского 1977 года, Назарбекского 1980 года, Чимионского 1982 года, Папского 1984 года и другие, касающиеся исследованию долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных предвестников землетрясений. Общая длина профилей повторных съемок составляет 7750 км, а количество пунктов повторных измерений более 1100 штук. Количество стационарных станций в разные годы составляло от 10-15 до 20-25, а в отдельные годы доходило до 37 станций.

Среднесрочные и краткосрочные предвестники исследованы преимущественно из данных мониторинга комплекса предвестников на геодинамических полигонах Узбекистана. Предварительный анализ показал, что предвестники имеют различные формы, конфигурации и знаки. Единая форма предвестника отсутсвует. Они имеют бухтообразные формы положительного и отрицательного знаков, ступенчатые, волнообразно-колебательные и другие формы. Многообразие форм проявления в первую очередь зависят от геолого-тектонического строения регионов и процессов в земной коре.

Как видно из вышеприведенных примеров, наиболее перспективными предвестниками к настоящему времени являются магнитометрические и геодезические способы. В Узбекистане мониторинг вариаций магнитного поля осуществляется с 1968 года. Созданы Ташкентский, Ферганский, Кызылкумский геодинамические полигоны. Организована обширная сеть стационарных магнитометрических наблюдений. В отдельные годы их количество доходило до 37. Получены уникальные результаты.

Отметим, что модели, созданные на основании аномальных изменений предвестников по профилю, имеют бухтообразные формы, а модели, построенные на основании изменений предвестников во времени, на пунктах имеют прямолинейные формы отрицательного и положительного знаков (рис. 1).

Модели среднесрочных предвестников созданы на основании аномальных изменений комплекса геофизических полей, современных движений земной коры,

гидрогеосейсмологических и других параметров, выделенных на Ташкентском, Ферганском, Кызылкумском геодинамических полигонах. Использованы также данные, полученные в России, Японии, США, Китае, Греции и в других республиках СНГ.

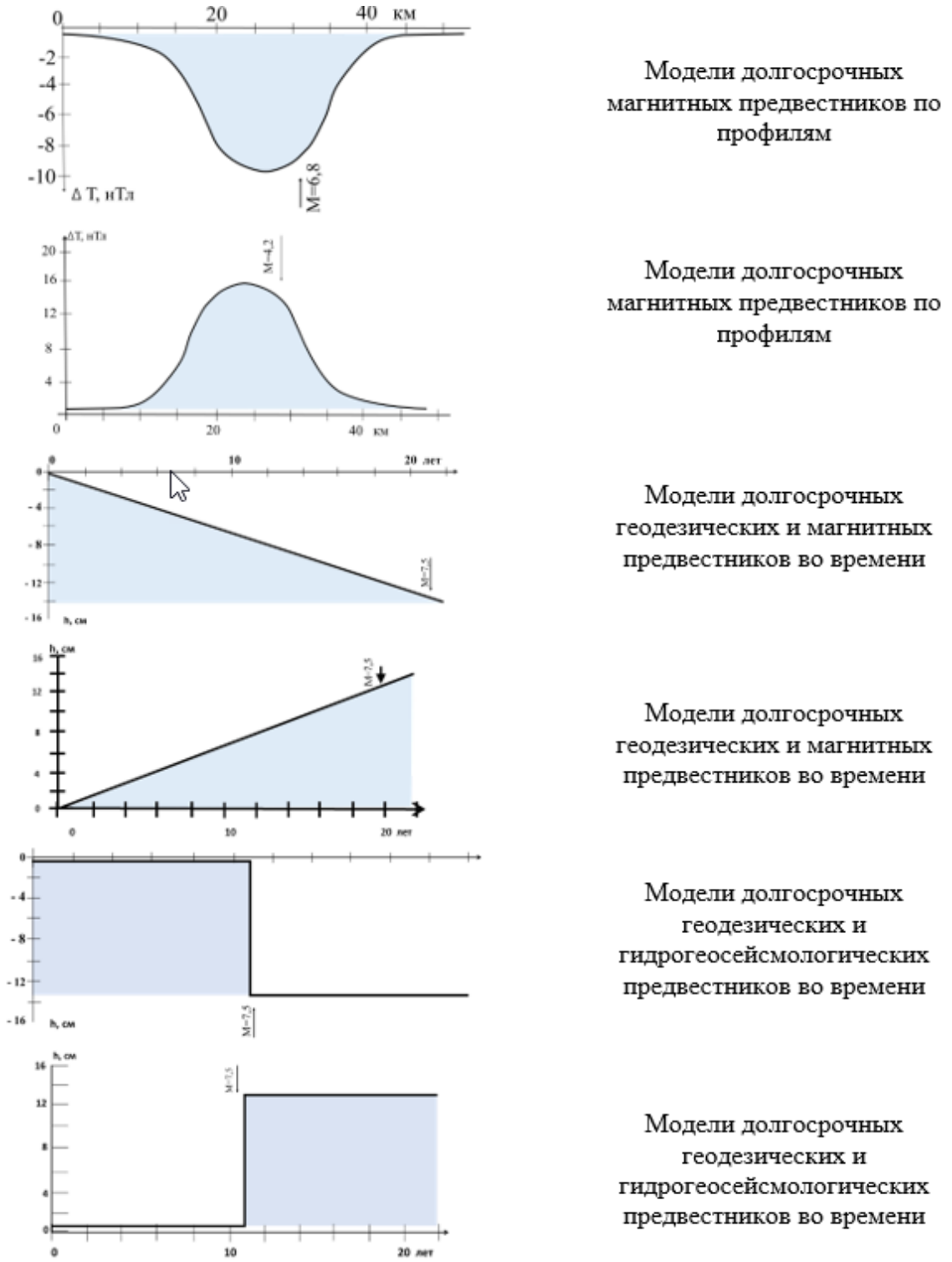


Рисунок 1 – Модели предвестников

К большому сожалению, в последнее время один из самых надежных и перспективных методов прогнозирования землетрясений - геодезический метод мониторинга современных движений земной коры, находится в исключительно низком состоянии. Нужно организовать повторные маршрутные съемки вдоль активных разломов: Каржантауского, Северо-Ферганского, Южно-Ферганского и по профилю, проходящему через эпицентры Каратагского

и Газлийских землетрясений. Расстояние между пунктами наблюдений должно составить в среднем 5-10 километров. Пункты должны быть закреплены специальными геодезическими реперами. С помощью повторных геодезических измерений можно выделить долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные предвестники сильных землетрясений методом космогеодезических GPS измерений вариаций современных движений земной коры [1-6]

Выводы:

- Переобработаны, переинтерпретированы и обобщены результаты повторных маршрутных и площадных съемок магнитного поля на Ташкентском, Ферганском, Кызылкумском полигонах, на сети стационарных магнитометрических станций, повторных съемок на техногенных объектах (Восточная Фергана, Чарвак, Полторацкое подземное газохранилище, площади газонефтяных месторождений), эпицентральных съемок в эпицентрах произошедших сильных землетрясений (Газлийских 1976 и 1984 годов, Исфара - Баткенского 1977 года, Таваксайского 1977 года, Назарбекского 1980 года, Чимионского 1982 года, Папского 1984 года и других), векового хода геомагнтного поля мировой сети геомагнитных обсерваторий за более столетний период;
- На основании анализа обширных литературных данных ученых ведущих стран мира (Россия, Япония, Китай, Германия, геофизические и сейсмологические институты Украины, республик Центральной Азии, Кавказа и другие), каталогов предвестников землетрясений по геомагнетизму, современным движениям земной коры, импульсного электромагнитного излучения земной коры и других выделены долгосрочные, среднесрочные, краткосрочные предвестники, связанные с этапами подготовки землетрясений;
- Анализ показал, что предвестники имеют различные формы, конфигурации и знаки. Единая форма предвестника отсутсвует. Многие имеют бухтообразные формы положительного и отрицательного знаков. Имеются ступенчатые, волнообразно-колебательные и другие формы. Многообразие форм проявления в первую очередь зависят от геолого- тектонического строения регионов и многообразия различных процессов в земной коре.
- По каждому типу построены 2-3 модели предвестников землетрясений. Они отличаются друг от друга по форме и длительности.
- Следует отметить, что исследования по созданию моделей долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных предвестников землетрясений выполнены впервые. Исследования в этом направлении до настоящего времени были направлены на разработку моделей очага или моделей процессов подготовки землетрясений.

Литература

1. Абдуллабеков К.Н., Юсупов В.Р. Особенности проявления предвестников землетрясений в разноранговых геотектонических структурах // Геология и минеральные ресурсы. 2023. № 1. С. 66-70.
2. Абдуллабеков К.Н., Юсупов В.Р. Закономерности проявления землетрясений // ДАН РУз. 2023. № 1. С. 92-98.
3. Abdullabekov K.N., Maksudov S.Kh., Yusupov V.R. Results of Geomagnetic Studies on the Problem of Forecasting Strong Earthquakes in Uzbekistan // International Journal of Geosciences. 2023. Vol. 14. No. 5. P. 437-449. https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=125377
4. Абдуллабеков К.Н., Юсупов В.Р. Некоторые закономерности проявления землетрясений по магнитометрическим и другим данным // Разведка и охрана недр. 2023. №12. С. 45-51.
5. Абдуллабеков К.Н., Юсупов В.Р. Основные результаты научных исследований по проблеме прогнозирования землетрясений и дальнейшие пути их развития // ДАН РУз. 2024 № 1. С. 90-96.
6. Абдуллабеков К.Н., Юсупов В.Р. Состояние научных исследований по проблеме прогнозирования землетрясений в Узбекистане и дальнейшие пути их развития // Геология и минеральные ресурсы. 2024. № 1.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ОПАСНОСТИ

УДК 551.582:338.48

INVESTIGATION ON DIVERSIFYING ECONOMIES IN UZBEKISTAN AS A RESPONSE TO CLIMATE CHANGE: A CASE STUDY ON ECOTOURISM IN THE SENTYAB (SENTOB) VILLAGE

Cantlow R., Orunbaev S.Z.
r.cantlow@osce-academy.net
Human Rights and Sustainability, OSCE Academy, Bishkek, Kyrgyzstan

The research partly addresses a gap in the literature and research by investigating whether a growth in sustainable tourism practices in the Sentyab Village, Uzbekistan, is a response to climate changes. In order to do this, the research primarily investigated whether changes to the climate have occurred in the area through quantitative research, by analysing data on precipitation, temperature, vapour pressure and diurnal temperature range (DTR). It was concluded that little changes to annual and seasonal climate trends have occurred, with the only significant findings being in the rise of temperature and the fall of the diurnal temperature range, so the climate is likely to have little influence in the rise of ecotourism, and this rise is more likely caused by the general trend in Uzbekistan of a growing tourism industry. Recommendations are still given to monitor the potential impact of high temperatures on agricultural practices and ways to invest in ecotourism practices should agriculture become more unstable in the future.

Keywords: climate change, Uzbekistan, ecotourism, climate adaptation, agriculture, Sentyab Village

Introduction. The Sentyab village is a small community of just 2,064 people but has already opened 10 homestays and guest houses. A stay in the village can offer eco-minded tourists lunches, guided walks, tours of their orchards, musical performances, and historical site visits to the Sentob petroglyph site, remains of a Buddhist temple, and the shrine of a medieval Sufi saint [1-3].

Meanwhile, the country of Uzbekistan and the Navoi Region, in which the Sentyab village is situated, has a well-established agricultural sector and farming-based economy; harvesting fruits and nuts from nearby forests and rearing livestock. However, with global concerns regarding the impact that climate change may have on this sector, it is important to understand current trends in the climate, to consider what preventative measures can be recommended, and what adaptations would be suitable for this village and wider region to adopt, or support further.

The World Bank has previously indicated its commitment to support Uzbekistan to transition into a market economy through economic, social and climate reforms for sustained growth and economic opportunities for all, which has to include small communities like Sentyab. One of the critical areas gaining investment from the World Bank's financial loan includes 'Green Transition', which aims 'to identify economic activities and investments based on their environmental sustainability', including 'to scale up action on climate change adaptation and mitigation and to attract investments into green projects.' As such, a focus on such activities, like ecotourism, in relation to historical climate trends and patterns occurring in this specific area, is useful to develop recommendations for how small communities can adapt and how investments can be utilised for optimal sustainable, climate-conscious development at the local level [4-6].

The research aims to answer the research questions below, using quantitative methods of data extraction, data analysis using basic statistical formulas and data visualisations, to draw conclusions on climate trends and a discussion on the relationship between the climate, agriculture and ecotourism [7, 8].

Finally, the research concludes by providing some recommendations for both the village of Sentyab informed from these findings and recommendations for fellow researchers interested in exploring the relationship between climate change and ecotourism.

Research Questions:

1. What trends in the climate are seen in the Sentyab region, Uzbekistan?

2. How has climate change influenced the adoption and increase in ecotourism practices in the Sentyab Village?

Hypothesis. It is proposed that the trends to the climate in the Sentyab region have changed in more recent years and follow global trends of rising temperatures, a disruption to natural seasonal changes and more extreme weather events such as heavy rain, heat waves and droughts caused by the overall global warming crisis.

As such, it is hypothesised that changes to the climate, and the subsequent risk this poses to traditional livelihoods practiced in Sentyab for centuries, including livestock agriculture and farming of nut trees, has encouraged a diversification of livelihoods in the Sentyab region of Uzbekistan. This follows global trends that indicate a rise in ecotourism as a diversification of local economies and livelihoods that can be viewed as an adaptation to climate change [9-12].

*Literature Review.*The relationship between climate change and ecotourism has been extensively studied in recent years, as the demand for tourism has resulted in its position as one of the leading sectors driving economic growth in countries across the world.

In Uzbekistan, tourism has flourished over the past 6 years, with only a temporary decline seen due to the COVID-19 pandemic in 2020 and 2021, due to the country's wealth of cultural heritage sites, vast national parks and historical ties to the silk road. It has even been stated that 'Uzbekistan is one of the top 10 countries in the world in terms of its touristic potential and historical monuments'. However, a consciousness has arisen about the environmental impact of tourism practices both at the local level and at the international level, as tourists themselves look for sustainable options for tourism in natural areas that are 'untouched', and local communities look to protect cultural, historical and environmental heritage whilst still being able to utilise this trend in tourism. Specifically for Uzbekistan, preservation of natural environments is not the only reason to turn to more sustainable ecotourism practices but concerns regarding water scarcity, waste management, energy usage and a rise in polluting transportation demands are also leading factors driving further research, and the need for further research, in this area. Therefore, most of the literature that ties tourism with climate change predominantly looks at how to conduct tourism sustainably because of the negative impact tourism can have on the environment. As such, the literature review reveals a gap in research that does not always frame sustainable tourism as a response to climate change worries or its impact on traditional economies like agriculture [13-15].

In this regard, literature exploring the relationship between (eco) tourism and agriculture offer insights into how communities utilize both sources of economic development and what opportunities and challenges may arise. For example, research studying 197 working farms in Israel who also incorporate rural tourism practices in their economic streams found that the agricultural side of their work does not interact much with the rural tourism side and there is not much added value to the visitor experience. However, it was also found that although agriculture may not have obvious benefits to tourism, tourism is used to supplement the income from farming, showing a recognition by farmers to diversify their economies. Similarly, the trend in market-economies to move towards service-based sectors like tourism, as opposed to product-based sectors, offers further evidence of the need and value in diversifying economies either away from, or in addition, to agriculture [16-20].

Finally, research has been conducted recording climate change trends and impacts in Central Asia generally, but these fail to look at specific areas at the micro-level, such as an analysis of the Sentyab village. Previous research has found the rising temperature trend in Central Asia is already significantly above the global mean, whilst other studies draw attention to the relationship between temperatures and precipitation, indicating a positive correlation, and highlight further concerns about melting glaciers and water management. In response, adaptation strategies have been proposed, indicating a potential need for the diversification of economies and link with the growth of ecotourism in the region generally.

Data and Methodology. Secondary, raw data was collected from the Google Earth desktop application and the Sentyab Village was identified as coordinates N42.5E67.5. The area for research was widened for significance and selected by using 'Half-Degree Grid boxes', which ensured a specific area, appropriate to the research question, could be used for data extraction and analysis. The

label of the gridbox that forms the basis of this research is 'CRU TS 4.08 grid-box data for 40.75 N, 66.75 E'.

The data collected was for temperature, diurnal temperature, precipitation and vapour pressure, known in the research as climate change indicators. These were selected to measure the changes to the climate in this region for reasons of accessibility, accuracy, depth, resource availability, and time constraints of the research. This secondary, raw data was selected as the most appropriate data to use as it gave a breadth of information and tracked trends over 122 years in a way that primary research would not be able to do.

Once the data was selected, it was extracted from the Google Earth application onto a personal spreadsheet. Basic formulas were then applied to the data to produce annual and seasonal averages, which contributed to the answering of RQ1.

Once these average figures were created, the data could be visualized into multiple graphs (see Appendices) to help indicate trends, patterns, comparisons and correlations between the four climate change indicators.

Results. Figure 1 shows a fairly consistent trend in precipitation rates but certainly there has been an increase by 5mm on average during this time.

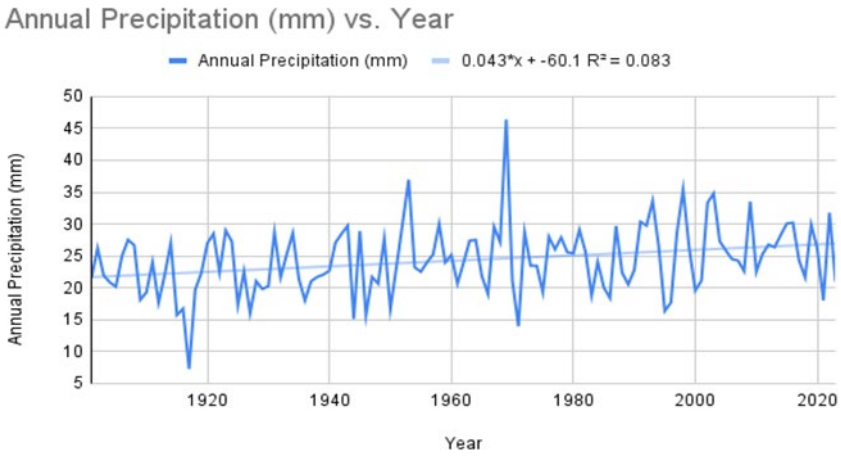


Figure 1 – Annual Average Precipitation 1901-2023

Figure 2 indicates a general stable trend seen over the last 123 years, with no anomalies found. However, there has been heavy rainfall in spring, with a wide range of differences in precipitation rates during the months of March-May.

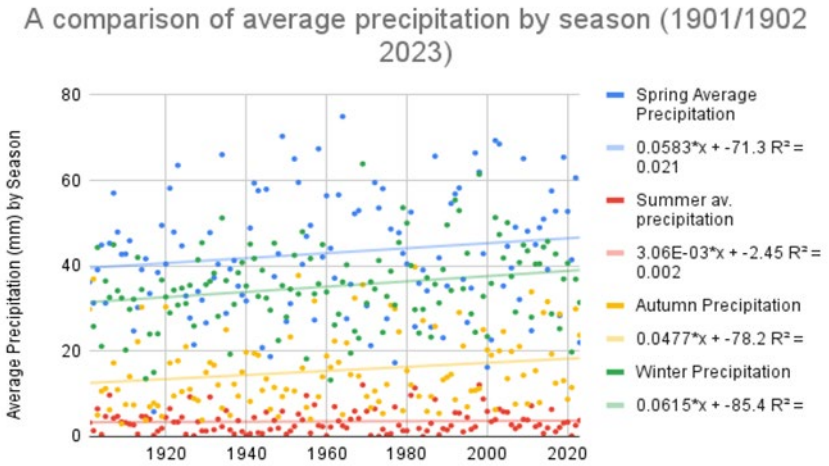


Figure 2 – Average Seasonal Precipitation 1901-2023

Figure 3 shows a more significant increase in the average temperatures annually, with a very sharp spike occurring from 2020-2023.

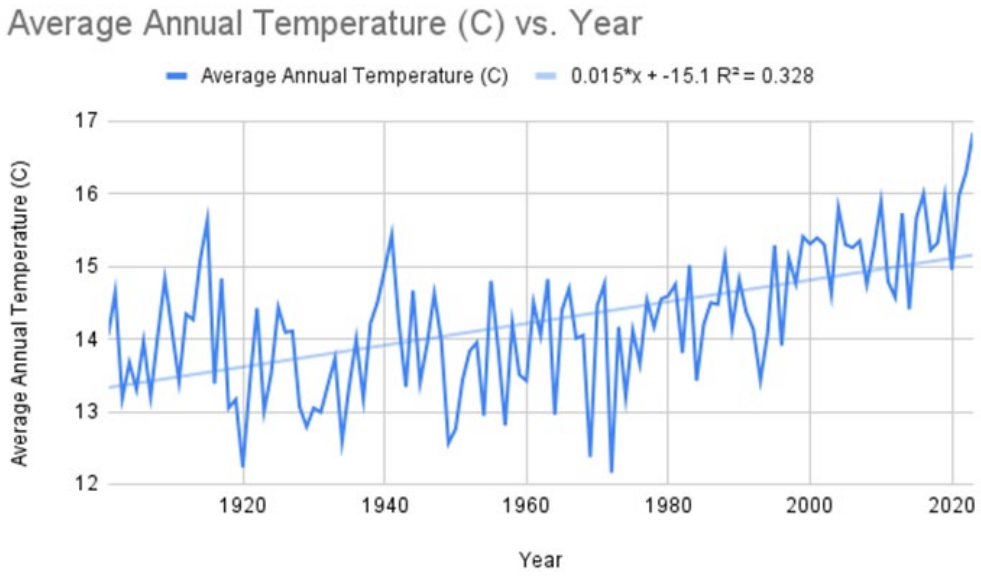


Figure 3 – Annual Average Temperature 1901-2023

Figure 4 shows the average temperature in autumn (Sep-Nov) has increased by 1.5C from 1901-2023. The autumn season is also getting warmer with less distinction with spring. Spring has seen an increase during these 123 years of 2C since the year 2000. Before this, the average temperatures were quite stable in spring. It also shows that the average temperatures for the summer season (Jun-Aug) has dramatically increased since 1985. The winter season (Dec-Feb) is also getting warmer and does not experience the same drops in temperatures with the maximum average lowest temperature for the season reaching -2C. However, overall, there are still distinct seasons but all seasons are getting warmer.

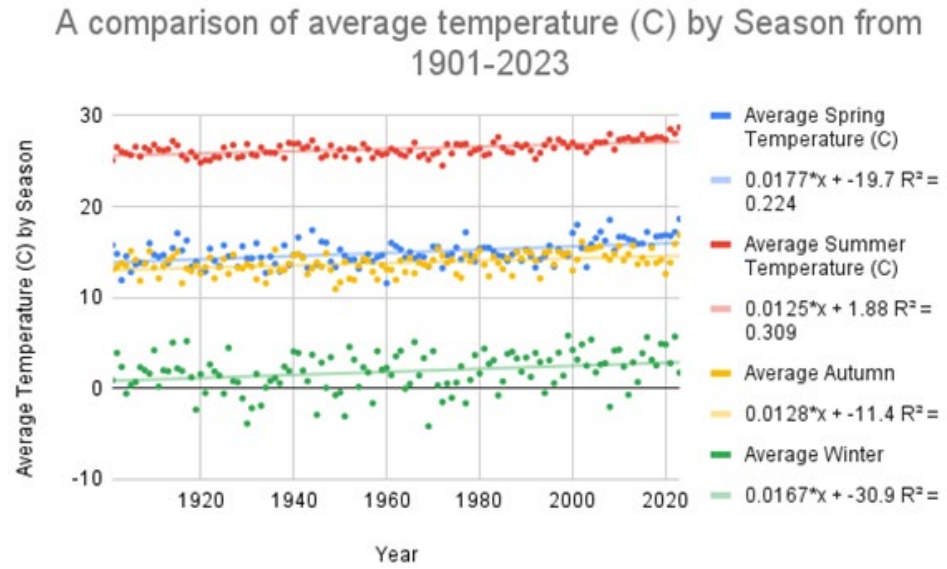


Figure 4 – Average Seasonal Temperature 1901-2023

Figure 5 shows there is a steady incline in average annual vapour pressure by 0.6HPa over the course of this time, showing more instances of higher peaks in vapour pressure from 1990s onwards.

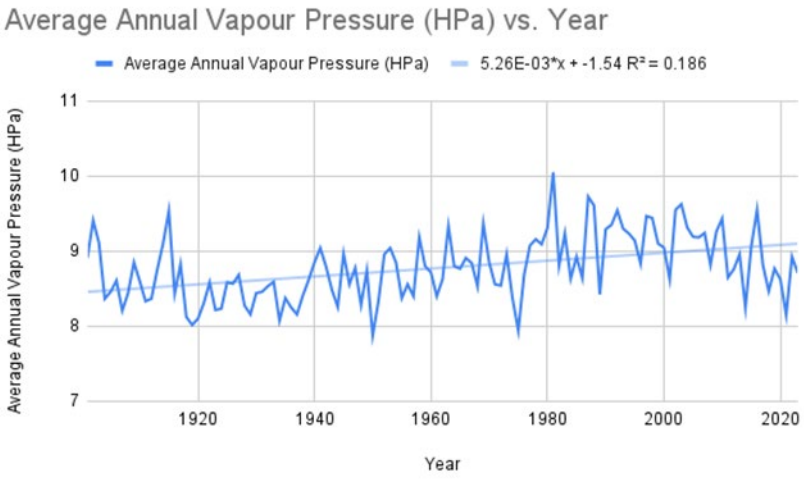


Figure 5 – Chart showing the average annual vapour pressure (HPa) from 1901-2023

Figure 6 indicates there are still distinct seasonal variations in average rates of vapour pressure in Sentyab with only minimal increases seen in each season from the years 1901-2023.

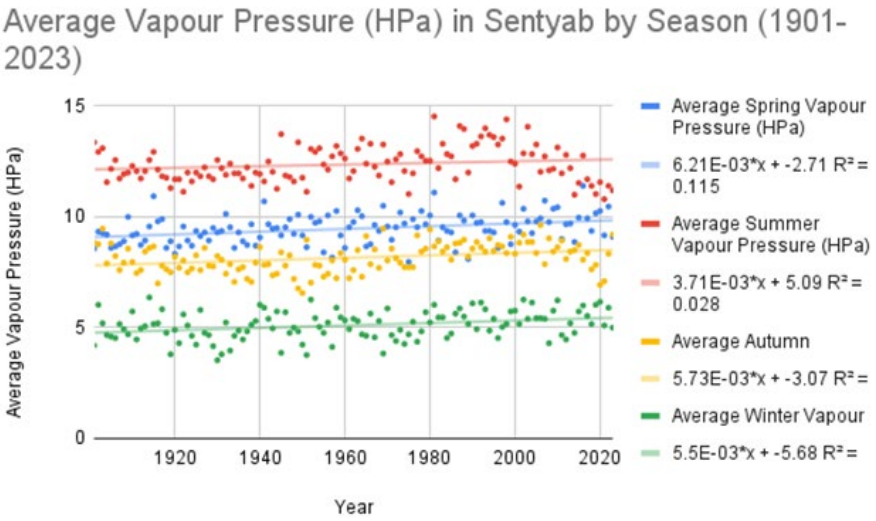


Figure 6 – Chart on the average vapour pressure (HPa) by season

Figure 7 shows a significant decrease in diurnal temperature in Sentyab from 1901-2023, decreasing around 1C but this decline has been consistent throughout these years.

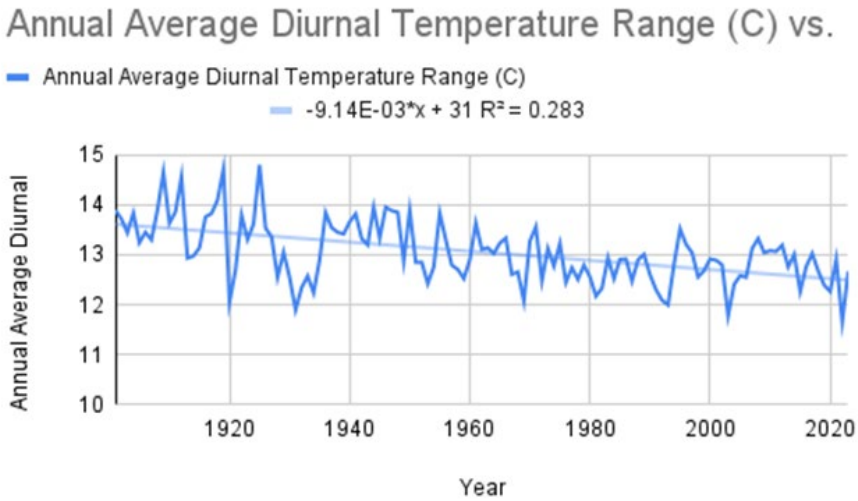


Figure 7 – Chart showing average annual diurnal temperature in the Sentyab area from 1901-2023

Figure 8 shows the decline seen in the annual average diurnal temperature also occurring in the seasons, with the greatest differences seen in the summer (Jun-Aug) and autumn (Sep-Nov) months. There are still distinct seasonal differences between winter and spring but less so between summer and autumn, though this seems to have been a trend since 1920. As such, the trend in this area has not seen much change in recent decades. In all seasons, the range of diurnal temperature also seems to have narrowed.

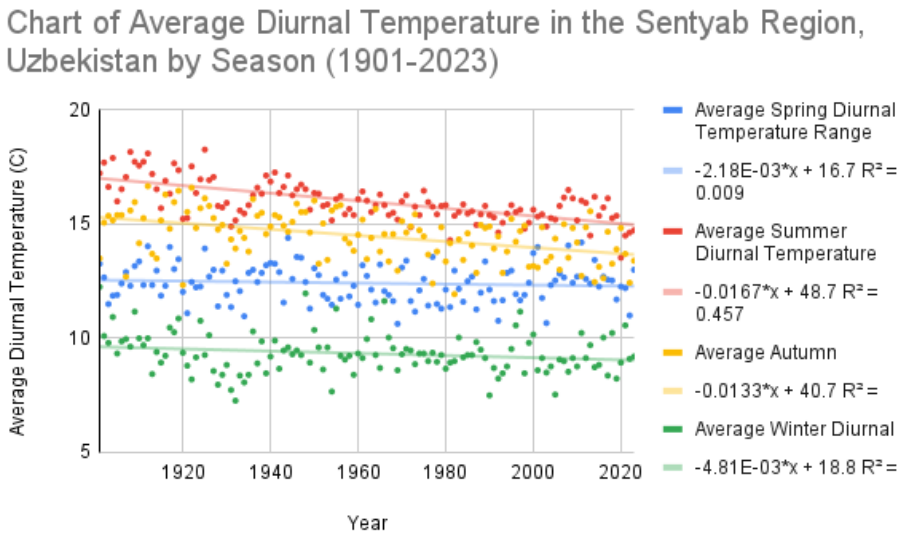


Figure 8 – Chart showing average diurnal temperature by season in the Sentyab area from 1901-2023

Figure 9 shows the trends found in figures 1, 3, 5 and 7. In comparison, it shows a split between diurnal temperature and temperature, occurring around 1940 that had not been seen before. This is as temperature increases and diurnal temperature decreases. The chart also shows the climate indicator with the largest difference from 1901-2023 being average annual temperature at 0.328 R^2.

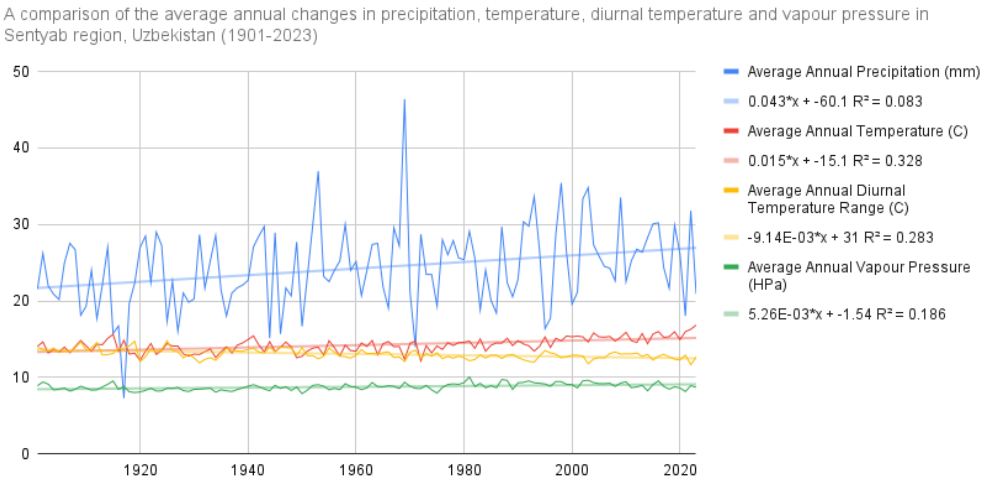


Figure 9 – Data visualisation charting a comparison in average annual changes in all climate indicators (temperature, precipitation, vapour pressure and diurnal temperature)

Discussion. Overall, the research has found that there has been some significant changes to the climate in the Sentyab Village area in relation to temperature and diurnal Temperature but has found little changes to vapour pressure and precipitation, as both show fairly consistent rates of gradual inclines but no dramatic changes. Also, the data analysis reveals that the Sentyab village still experiences distinct seasons, again seeing minimal changes in these trends since 1901. Perhaps the only climate indicator to see some change in this seasonal aspect of analysis has been Vapour

Pressure, which has seen a slight merge between summer and spring, and winter and autumn, in recent years but that is still not significant. As such, the trends found in temperature and diurnal temperature have been the most significant findings, and are the primary area of discussion and recommendations.

Diurnal temperature is 'a measure of the difference between the maximum and the minimum temperature over a 24 h period', and studies have found that greenhouses gases can influence changes to the diurnal temperature range (DTR). It has also been found that changes to DTR can be a risk factor for agriculture and agricultural-dependent economies. As such, mitigations should be made to account for even future influences of climate change on agriculture.

Having said this, another study has found reduced DTR, as found in my research, that lower DTR can actually enhance tree growth. Given the farming of fruit and nut trees by residents of the Sentyab village, the decrease in DTR could be beneficial for the agricultural economy.

Another key aspect to explore in response to the findings is the impact of increasing temperatures on agriculture. The findings align with other studies conducted on climate change in Central Asia that report significant increases in temperature. Multiple studies have shown adverse effects of an increase in temperatures on crop production and agricultural productivity, as well as on the rearing of livestock as potentially warming nights can cause heat stress, reduced milk production and affect fertility. More specifically, the types of product that is grown in Sentyab, which is fruit and nut trees, can be affected by changes to climate and higher temperatures. For example, the crops rely on distinct seasons with warm summers and cold winters. The research findings are positive in one sense, in that seasons are still distinct from one another. However, winters are definitely warming, as very cold temperatures are not seen anymore like they were in previous years. As such, applying the findings from other studies, it can be concluded that these increases in winter temperatures threaten the growth and production of these crops as yield and fruit quality is impacted. However, impacts do greatly vary by region and so projections cannot necessarily be homogenised.

Conclusions. To conclude, the main findings and area of discussion was the impact of high temperatures on traditional agricultural practices in the area and how this may have influenced a drive of investment in ecotourism practices, to diversify the economy and get 'ahead of the climate wave' that may be seen in the near future. Furthermore, it was discussed that although there is a rise in temperatures, the decline in diurnal temperature should not pose a threat to the ecotourism sector and would still accommodate tourists and their desire to visit outdoor attractions in the area.

However, some recommendations were made. Firstly, further investment in ecotourism infrastructure to help encourage energy efficiency, suitable road infrastructure, good waste management systems and comfortable accommodation options for tourists. Secondly, it is recommended that traditional agricultural income streams are still practiced because of a lack of dramatic changes in seasonal climates and their ability to supplement ecotourism incomes. In farming practices, adaptation strategies should also be adopted to mitigate against the impact of high temperatures on livestock.

As such, the research indicates significant increases in temperature do somewhat threaten the traditional agriculture economy and so diversification and the rise of ecotourism practices has been made on the grounds of climate change but general increases in the popularity of ecotourism within Uzbekistan is likely the most influential factor in this increase in ecotourism in Uzbekistan and the Sentyab village, arguably because changes to the climate are minimal in the area and the impact on core agricultural practices are yet to be seen [21-23].

Recommendations. It is recommended that Sentyab should be supported to develop more self-sufficient agricultural strategies that do not rely so heavily on upper-stream countries like Kyrgyzstan and Tajikistan for land irrigation, by utilising the increase in rain water seen in the region. It is recommended that communities and the state support an investment in rain water harvesting and support the implementation of adaptation projects in farming communities. This would ensure that any risk to farming and agriculture, due to the rising temperatures, could be mitigated somewhat and traditional income streams can be maintained. Also, it is important to consider the dependence ecotourism has on the agricultural sector in the sense of providing locally sourced food to meet an increased demand in food consumption.

Furthermore, a continuation of the development of ecotourism initiatives, in line with the global increase in demand and popularity is recommended, but this may mean investing in updating properties that can accommodate heat waves, having an adaptable programme, and investing in environmentally-friendly infrastructure to support the use of energy and increase in transportation needs. This would be beneficial for local community members and tourists alike, to ensure that ecotourism practices can prosper and grow. This recommendation aligns with previous research that has also recommended greater investment in tourism opportunities in Uzbekistan and the Navoy region, in which Sentyab Village is situated.

Finally, it is recommended that qualitative research would complement the quantitative findings and could help to triangulate these findings. This could include interviews exploring the discussion points present in this research and gathering feedback on the proposed recommendations.

References

1. Abdulkhaeva, Nilufar nabijon kizi. Sustainability and Tourism in Uzbekistan: An Assessment // Central Asian Journal of Academic Research. 2024. 2 (11-1). 157–160.
2. Agyeman, Yaw. 2019. Ecotourism as an Adaptation Strategy for Mitigating Climate Change Impacts on Local Communities Around Protected Areas in Ghana. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71025-9_159-1.
3. Fleischer, Aliza, and Anat Tchetchik. "Does Rural Tourism Benefit from Agriculture? // Tourism Management. 2005. 26 (4). 493–501.
4. Greene, J.C. 2007. Mixed Methods in Social Inquiry. San Francisco: Jossey-Bass.
5. Habeeb, A.A., Osman, S.F., Teama, F.E.I., & Gad, A.E. The detrimental impact of high environmental temperature on physiological response, growth, milk production, and reproductive efficiency of ruminants. // Tropical animal health and production. 2023. 55(6). 388. https://doi.org/10.1007/s11250-023-03805-y
6. Halilov, Bekzod, and Jevgenija Dehtjare. Ecotourism–An Important Factor in Sustainable Development and Environmental Protection: The Experience of Uzbekistan // Economics & Education. 2019. 4 (1). 62–66.
7. Harris, I., Osborn T.J., Jones P., and others. Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset // Scientific Data. 2020. 7: 109. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3.
8. Hatfield, Jerry L., Kenneth J. Boote, Bruce A. Kimball, L.H. Ziska, Roberto C. Izaurralde, Donald Ort, Allison M. Thomson, and D. Wolfe. Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production // Agronomy Journal. 2011. 103 (2). 351–70.
9. Ibbotson, Sophie. 2019a. The Best Ecotourism Experiences in Uzbekistan. The Culture Trip, December 3. https://theculturetrip.com/asia/uzbekistan/articles/the-best-ecotourism-experiences-in-uzbekistan.
10. Ibbotson, Sophie. 2019b. The 9 Greatest Ecotourism Experiences in Central Asia. Wanderlust, November 20. https://www.wanderlustmagazine.com/inspiration/central-asia-ecotourism-experiences/.
11. IPCC. 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC 1 (1). https://doi.org/10.1017/9781009325844.
12. Jamaliah, Malek M., and Robert B. Powell. Ecotourism Resilience to Climate Change in Dana Biosphere Reserve, Jordan // Journal of Sustainable Tourism. 2018. 26 (4). 519–36.
13. Khudoyberdieva, Iroda. Analyzing of Influential Factors for the Development of Livestock and Their Significance in Navoi Region // International Journal of Multidisciplinary Research and Publications (IJMRAP). 2022. 5 (2). 145–149.
14. Kulmatov R., Mirzaev J., Kulmatova D., and Allaberdiev R. 2019. The Modern Agroecological (Rivers Water, Irrigated Lands) Problems of Uzbekistan under the Climate Change with Focus of the Navoi Region. Rivojlantirish Yutuqlari, Muammolari va Istiqbollari Mavzuidagi Xalqaro Ilmiy-Amaliy Anjumani: 732.

15. Murtazaev, Isabek B., Nilufar Kh. Komilova, Iroda A. Khudoyberdiyeva, and Zulxumor A. Abdieva. Some Prospective Directions of Effective Development of the Economy of Navoi Region // Psychology and Education. 2021. 58 (1). 2047–57.
16. Osorio-Marín, Juliana, Eduardo Fernandez, Lorena Vieli, Alejandra Ribera, Eike Luedeling, and Nicolas Cobo. Climate Change Impacts on Temperate Fruit and Nut Production: A Systematic Review // Frontiers in Plant Science. 2024. 15. 1352169.
17. Rakhimov, Zafar Odilovich, and Aziza Yusufbekovna Talibova. The Significance of Rural Tourism Development in the Tourist Destination of the Navoy Region of Uzbekistan // Academic Journal of Digital Economics and Stability. 2023. 34. 215–218.
18. Sayfullayeva, Madina Sirojiddinovna. Directions for the Practice of Sustainable Tourism for Ecotourism Destinations in Uzbekistan // American Journal of Economics and Business Management. 2022. 5 (12). 98–109.
19. Stjern, C.W., B.H. Samset, O. Boucher, T. Iversen, J.-F. Lamarque, G. Myhre, D. Shindell, and T. Takemura. How Aerosols and Greenhouse Gases Influence the Diurnal Temperature Range // Atmospheric Chemistry and Physics. 2020. 20. 13467–13480. https://doi.org/10.5194/acp-20-13467-2020.
20. Torres, Rebecca, and Janet Momsen. 2011. Tourism and Agriculture: New Geographies of Consumption, Production, and Rural Restructuring. New York: Routledge.
21. World Bank. 2023. Uzbekistan's Transition to Market Economy to Accelerate by Strategic Reforms, Supported by the World Bank. December 9. https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2023/12/08/uzbekistan-s-transition-to-market-economy-to-accelerate-by-strategic-reforms-supported-by-the-world-bank.
22. Yao, J., Chen, Y., Chen, J., Zhao, Y., Tuoliewubieke, D., Li, J. et al. 2021. Intensification of extreme precipitation in arid Central Asia // Journal of Hydrology. 2021. 598. 125760. Available from: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125760
23. Zhang, X., R.D. Manzanedo, P. Lv, C. Xu, M. Hou, X. Huang, and T. Rademacher. Reduced Diurnal Temperature Range Mitigates Drought Impacts on Larch Tree Growth in North China // Science of the Total Environment. 2022. 848. 157808. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157808.

УДК 551.582:556

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON BISHKEK'S WATER SHORTAGES

Dzhenyshpekova B.[1], Orunbaeva S.A.[2], Orunbaev S.Z.[1]
b.dzhenyshpekova@osce-academy.net
[1] Human Rights and Sustainability, OSCE Academy, Bishkek, Kyrgyzstan
[2] International University of Kyrgyzstan, Bishkek, Kyrgyzstan

This paper investigates the role of climate variability in the water shortages faced by Bishkek, the capital of Kyrgyzstan, with a focus on historical and forecasted climate data. The study aims to understand how temperature and precipitation trends have impacted urban water security and to forecast future risks in light of projected climate changes. Utilizing the Climatic Research Unit Time series (CRU TS) dataset, which spans from 1901 to 2023, the paper employs a quantitative approach, including time-series and correlation analyses to explore long-term climate trends and their relationship with urban water shortages. The 2023 water crisis in Bishkek serves as a case study to contextualize the findings, highlighting the urgency of addressing water management issues in an era of climate change. Key findings suggest an expected rising of temperature in Bishkek by approximately 1.5 degrees C by 2050 and a slight decrease in precipitation patterns, which exacerbate the city's vulnerability to water scarcity. The paper concludes by emphasizing the need for climate adaptation measures to ensure Bishkek's water security in the coming decades.

Keywords: climate, rising temperature, water shortage, precipitation, vapor pressure, Bishkek.

Introduction. Kyrgyzstan is the only country in Central Asia whose water resources are fully formed on its own territory. 94% of the country is above 1000 meters above sea level and 40% is above 3000 meters. Over 80% of the country is within the Tian Shan mountain chain, which means the country is almost fully made of the mountains. And on the mountains, there are glaciers, which provide 40% of freshwater for the region.

Bishkek, the capital city of Kyrgyzstan, relies on a diverse array of water sources to meet the needs of its growing population. The primary source of drinking water comes from a network of 37 reservoirs, including the Orto-Alysh water intake that supplies approximately 40% of the city's potable water [1]. Additionally, groundwater aquifers play a crucial role in providing water for domestic, industrial, and agricultural purposes of Bishkek city. These aquifers are tapped through intra-urban and peri-urban wells [2].

Bishkek city's rivers such as the Chu River, Ala-Archa, and Alamedin also contribute to its water resources. The Ala-Archa River originates from glaciers in the Kyrgyz Ridge and is essential for replenishing local water supplies during warmer months due to its glacial melt [3]. Similarly, the Alamedin River provides irrigation and supports local ecosystems while being fed by seasonal precipitation and glacial melt [4]. Meltwater from the surrounding mountains is vital, especially during warmer months when glacial and snowmelt feed into rivers and aquifers, replenishing these critical sources. Artesian wells further supplement the drinking water supply, providing access to deep groundwater reserves.

However, Bishkek faces significant challenges in managing these water sources due to rapid population growth, aging infrastructure, and climate change impacts that threaten the sustainability of its water supply. For example, the summer 2023 was one of the hottest and most challenging years for Bishkek residents, because the city faced a water crisis, a situation where water supplies fall to critical levels. Some of the city's districts like Archa-Beshik remained without tap water for weeks, leading to protests by local residents. The situation was worsened by the heatwave when the air temperatures reached up to 40 degrees Celsius [5]. This heatwave increased water demand significantly as residents sought to cool off and maintain their gardens. The groundwater levels in Bishkek's key sources like Orto-Alysh intake dropped 15-20 meters compared to previous years. This crisis revealed vulnerabilities in Bishkek's water management system.

The primary factor behind this crisis is the increasing temperature trend in Bishkek. Analysis of Climate Research Unit Time-Series (CRU TS) data, which provides land-based temperature and precipitation records dating back to 1901, confirms a steady rise in urban temperatures [6]. If current trends continue, projections for 2050 suggest that Bishkek could face extreme heat events, leading to intensified water shortages.

The central hypothesis is that increasing temperatures – if current warming trends continue – will lead to severe water shortages by 2050. Key research objectives include analyzing temperature trends, assessing their correlation with precipitation patterns and vapor pressure, and evaluating the implications for future water security in Bishkek.

This paper is structured as follows: Section 2 reviews existing literature on climate change and water scarcity in urban environments. Section 3 presents the methodology, including data sources and analytical approaches. Section 4 discusses findings on temperature trends, precipitation shifts, and their impact on Bishkek's water resources. Finally, Section 5 concludes and outlines recommendations for mitigating future water crises.

Literature Review. Previous studies have explored various aspects of the water scarcity problem in Kyrgyzstan; however the gaps remain, particularly concerning the integration of long-term climate data in urban water security analyses. Scholars characterize Kyrgyzstan's water resource management as transitioning from Soviet-era centralized water governance to decentralized and market-based approaches. However, weak institutions, unclear responsibilities, and limited funding hinder progress, as Kai Wegerich (2009) argues. Another scholar Herrfahrdt-Pähle highlights inadequate local participation in policy-making [7]. The author argues that passivity of water users contributes to ineffective reforms and governance structures in Kyrgyzstan. Another scholar Assubayeva argues that limited access to reliable data, institutional inefficiencies, and a lack of skilled personnel and resources hinder effective decision-making, governance, and the ability to address water-related challenges [8]. Rogers and Hall (2004) stress that transparency, accountability, and participation are essential for effective governance – principles that are not adequately applied in Kyrgyzstan [9]. Efforts to implement Integrated Water Resource Management (IWRM), a globally recognized framework for coordinated governance, remain inconsistent due to technical and resource constraints [10, 11].

As for the studies concerning Bishkek particularly, Morris et al. (2006) conducted a groundwater residence time study in Bishkek, revealing deep infiltration of recent recharge in both peri-urban wellfields and beneath the city [12]. Their findings highlighted the influence of urban activities on groundwater quality, emphasizing the need for sustainable management practices. However, this study primarily focused on hydrochemical markers and did not incorporate extensive climate data analysis.

Harris et al. (2020) introduced Version 4 of the Climate Research Unit Time Series (CRU TS) dataset, offering high-resolution gridded climate data spanning from 1901 to 2018 [6]. This dataset has been instrumental in various climate studies, providing consistent and comprehensive data for long-term analysis. The Version 4 of the CRU TS dataset is extensively applied globally, however its utilization in assessing urban water crises, particularly in Central Asian contexts like Bishkek, remains limited.

Furthermore, Herrfahrdt-Pähle (2004) examined water governance in Kyrgyzstan's agricultural sector, identifying issues such as deficient irrigation infrastructure and poor water management [7]. The study pointed out that the water crisis in Central Asia is more about distribution and use rather than quantity. While this research provides valuable insights into water management practices, it does not address the urban water crises or the potential impacts of climate change on urban water security.

There is a gap in the existing literature regarding studies that integrate long-term climate data with urban water security analyses in Bishkek. Additionally, research incorporating human rights perspectives, specifically concerning access to safe drinking water during crises, is lacking. This study aims to address these gaps by employing the CRU TS dataset to analyze historical climate trends and predict future risks to Bishkek's water security. This approach is novel due to the

application of CRU TS data in a Central Asian urban water crisis context, as well as the inclusion of human rights considerations in the analysis. By utilizing the most recent data available, this research highlights the need for proactive measures to mitigate potential catastrophic outcomes by 2050.

Data and Methodology. This study uses a quantitative approach to examine climate trends and their impact on Bishkek's water crisis, focusing on temperature, precipitation, and vapor pressure. Historical climate data, sourced from the Climate Research Unit Gridded Time Series (CRU TS) dataset, provides high-resolution climate information from 1901 to 2023. The dataset was accessed via Google Earth Pro at a 0.5-degree spatial resolution.

To analyze climate trends, periodical graphs and correlation analysis were used. The graphs visualize long-term trends in temperature and precipitation, with a focus on the warming trend since the 1980s and projections until 2050.

In order to make projections for annual temperatures in Bishkek until 2050, a linear regression model of T=0.0414x-71.1 formula was used, where T stands for projected temperature and x is the years since 1901. For making forecasts for precipitation, the formula of P= –0.0185x+74.8 was used, where P stands for annual precipitation in millimeters.

Correlation analysis was employed to identify relationships between climate variables. It examines whether rising temperatures correlate with changes in precipitation, vapor pressure, and diurnal temperature range, aiding water resource management predictions.

Results. The study's findings highlight the potential risks to water availability in Bishkek by 2050, underscoring the importance of proactive climate adaptation strategies. The figure 1 illustrates the long-term trend of annual average temperatures in Bishkek from the early 20th century to projected values up to 2050. The blue line represents observed and projected temperature values, while the red line shows the linear trend over the time series.

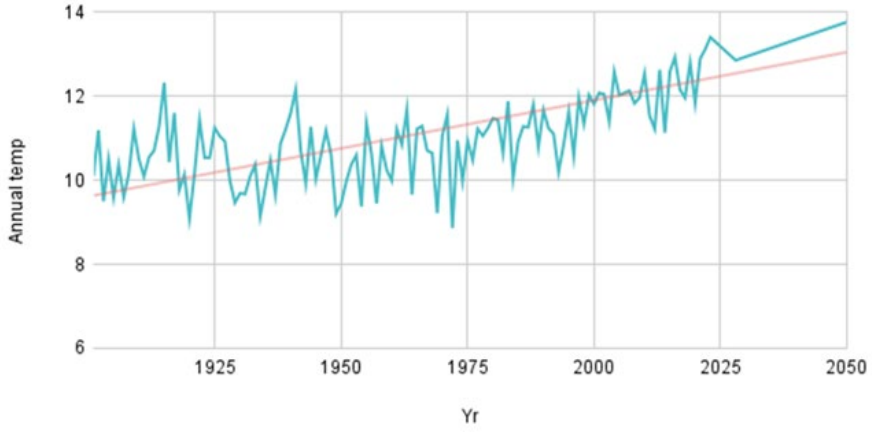


Figure 1 – Annual Average Temperature 1901-2023

The monthly average data, derived from the Climate Research Unit Time-Series (CRU TS), indicates a consistent warming pattern. Beginning at around 10°C in the early 1900s, the annual temperature has increased steadily, with projections suggesting values approaching or exceeding 14°C by mid-century. This continuous rise in temperature is indicative of a significant shift in the regional climate system, potentially driven by global and local factors including urbanization, greenhouse gas emissions, and land use changes. The observed warming trend aligns with broader regional climate patterns and poses substantial risks for water availability in Bishkek. Higher temperatures can intensify evapotranspiration, reduce effective recharge of groundwater, and increase water demand across domestic, agricultural, and industrial sectors. The implications of this trend highlight the urgent need for integrating climate projections into urban planning, particularly for water resource management and climate-resilient infrastructure development.

The figure 2 presents the temporal trend of average annual precipitation in Bishkek from the early 1900s with projections extending to 2050. The blue line represents historical and projected precipitation values. Unlike the clear upward trend observed in temperature, precipitation data show high interannual variability with no strong long-term increasing or decreasing trend. Fluctuations range widely, with several peaks and troughs throughout the record, indicating episodes of both wetter

and drier years. The overall pattern suggests that while precipitation levels have remained relatively stable on average, the irregular distribution across years could complicate water resource planning.

The slight downward trend in the linear projection indicates a possible marginal decline in precipitation towards mid-century. If this trend persists alongside rising temperatures, Bishkek may face increased risks of seasonal water shortages, exacerbated by higher evapotranspiration rates and urban demand. These dynamics underscore the importance of adaptive water governance that incorporates climate variability and enhances the resilience of urban water systems to both short-term fluctuations and long-term shifts in hydrological patterns.

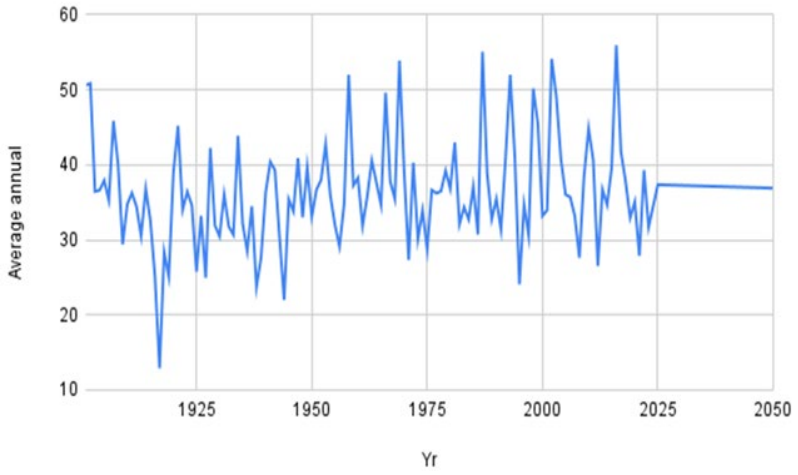


Figure 2 – Annual Average Precipitation 1901-2023

The figure 3 illustrates the relationship between annual temperature and annual precipitation in Bishkek for the period 1901 to 2023. Each dot represents a single year's observation of average temperature and corresponding precipitation. The scatterplot demonstrates a weak and statistically insignificant correlation between the two variables, as evidenced by the relatively flat trend line across the temperature range.

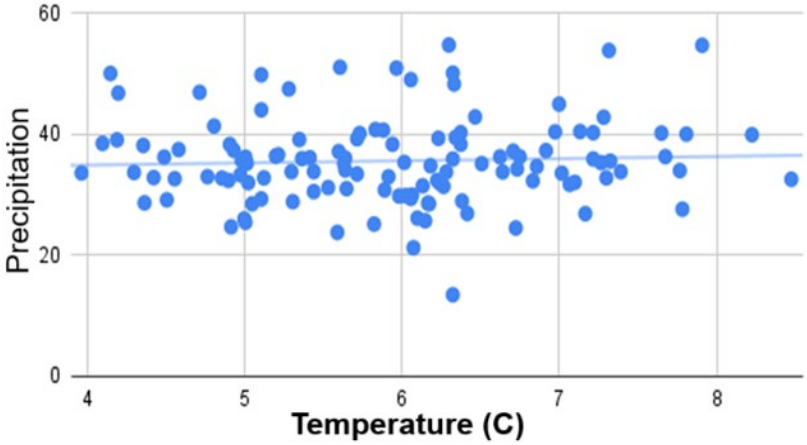


Figure 3 – Correlation between Annual Temperature (° C) and Annual Precipitation (mm/year) for a period 1901-2023

Despite increasing temperatures over the observed period, there is no strong corresponding change in annual precipitation. This decoupling suggests that rising temperatures have not been accompanied by systematic increases or decreases in precipitation, reinforcing the notion of hydroclimatic instability. While temperature trends are relatively consistent, precipitation remains highly variable and does not show a meaningful linear association with warming.

This disconnect has critical implications for water management, as warming may not be offset by increased precipitation. Instead, higher temperatures are likely to intensify evapotranspiration and

reduce effective water availability, further straining urban water resources under conditions of erratic and unpredictable rainfall.

The figure 4 presents the correlation between annual diurnal temperature and annual precipitation in Bishkek over the period from 1901 to 2023 using data from the CRU TS dataset. The scatterplot shows a clear negative linear relationship between the two variables, indicating that as precipitation decreases, the average diurnal temperature tends to increase. This pattern reveals an important climatological trend relevant to urban water management and sustainability in Bishkek. Years with lower precipitation levels are generally associated with higher diurnal temperatures, which can exacerbate urban heat conditions and place additional stress on water resources. The inverse correlation aligns with observations in semi-arid and continental climates where reduced rainfall contributes to land surface drying and increased surface temperatures through feedback mechanisms that reduce latent heat fluxes. The trend also has direct implications for water availability in Bishkek's hydrological system, which is highly dependent on glacial and snowmelt contributions from rivers such as the Ala-Archa and Alamedin.

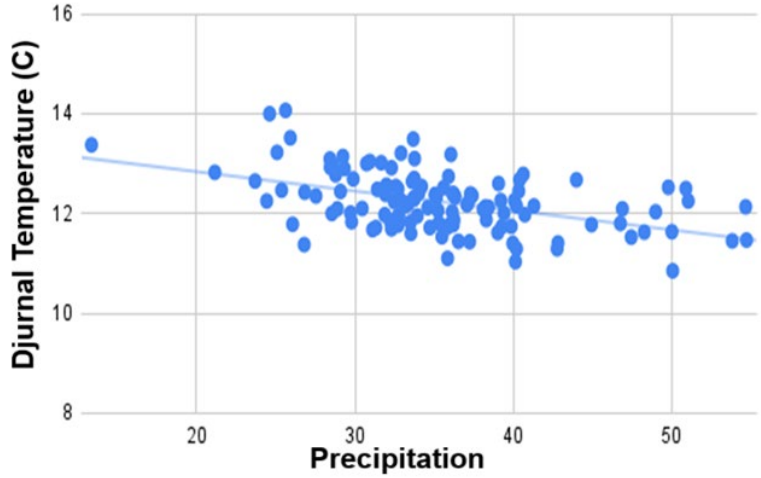


Figure 4 – Correlation between Annual Djurnal Temperature (° C) and Annual Precipitation (mm/year) for a period 1901-2023

The figure 5 shows a positive correlation between annual temperature and vapor pressure in Bishkek from 1901 to 2023. As temperatures rise, vapor pressure also increases, indicating higher atmospheric moisture content. This relationship reflects the Clausius-Clapeyron principle, where warmer air holds more water vapor. Elevated vapor pressure can enhance evapotranspiration and alter local hydrological cycles. In the context of climate change, rising vapor pressure may intensify humidity and heat stress, affecting both human comfort and water resource dynamics in urban settings like Bishkek.

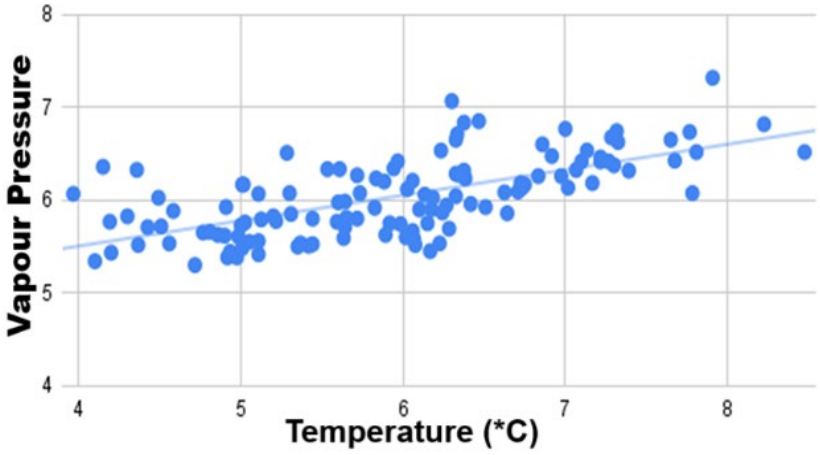


Figure 5 – Correlation between Annual Temperature (° C) and Vapor Pressure (Pa) for a period 1901-2023

Figure 6 illustrates the relationship between annual vapor pressure and annual precipitation in Bishkek over the period from 1901 to 2023. The scatter plot demonstrates a clear positive correlation indicating that as precipitation increases vapor pressure also tends to rise. Most of the data points are concentrated within the precipitation range of approximately 25 to 45 mm per year and vapor pressure values between 5.5 and 6.5 Pa. This trend suggests that higher atmospheric moisture content is generally associated with greater levels of precipitation in the region over the long term. The linear trendline reinforces this connection highlighting a consistent pattern in the climate behavior of Bishkek throughout the observed historical period.

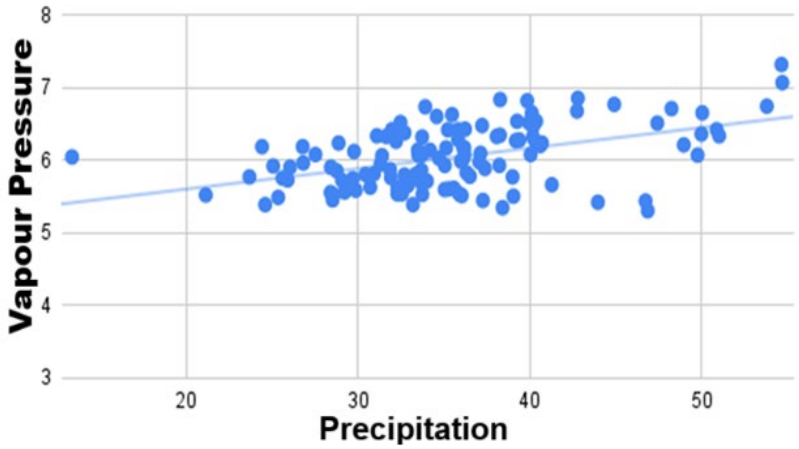


Figure 6 – Correlation between Annual Vapor Pressure (Pa) and Annual Precipitation (mm/year) for a period 1901-2023

Conclusions. This study provides a detailed analysis of climate trends in Bishkek and their potential impact on water availability. The findings indicate a significant rise in annual temperatures since the 1980s, with a clear warming trend until 2050 that aligns with global climate change patterns. This temperature increase accelerates evaporation rates and contributes to glacier retreat – two key factors that threaten the region's long-term water supply. While precipitation levels remain highly variable, there is a slight declining trend, which could reduce groundwater recharge and surface water availability over time.

These findings contribute to the growing body of research on climate change in Central Asia by offering localized insights into how temperature, precipitation, and other climate variables interact to influence water availability. While much of the global discourse on climate change focuses on large-scale impacts, this study highlights the urgent need for city-specific assessments, as climate effects manifest differently depending on geographic and environmental conditions.

The practical implications of these results are significant: Bishkek must prepare for potential water shortages by implementing sustainable water management practices, upgrading infrastructure, and integrating climate adaptation strategies into urban planning. Policymakers should prioritize investments in water conservation projects, such as rainwater harvesting, improved irrigation efficiency, and the development of artificial reservoirs to store excess water during wet periods. Additionally, better monitoring systems are needed to track groundwater levels and assess the long-term viability of current water sources. Public awareness campaigns can also play a critical role in promoting water conservation among residents and businesses, reducing unnecessary waste.

To further enhance our understanding of climate change impacts in Bishkek and inform effective action, future research should focus on the impact of rising temperatures and increasing evaporation on groundwater recharge rates in Bishkek. Investigating groundwater levels alongside precipitation and evaporation patterns will help determine the sustainability of groundwater resources and inform water conservation strategies. Future research should also explore how to enhance water storage and distribution systems to handle both flash floods and prolonged droughts. Future research should assess the effectiveness of current water conservation policies in Bishkek and explore climate-resilient infrastructure solutions. This includes promoting water-efficient technologies, encouraging

rainwater harvesting, and incentivizing water conservation at the household and industrial levels. Additionally, implementing a comprehensive risk assessment framework and early warning systems for water stress could help Bishkek proactively manage water resources. Studies on early warning systems will be valuable in mitigating the impacts of water scarcity before it becomes a crisis. By addressing these research gaps, we can strengthen our understanding of climate change impacts in Bishkek and develop effective strategies to mitigate its effects and build a more sustainable future.

References

1. IWPR. (2023, November 30). Bishkek water shortages highlight poor management. https://iwpr.net/global-voices/bishkek-water-shortages-highlight-poor-management
2. Litvak, R.G., Nemaltseva, E.I., & Tolstikhin, G.M. (2016). Groundwater environment in Bishkek, Kyrgyzstan. In Groundwater environment in Asian cities (pp. 383-412). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803166-7.00017-9
3. Djailoobayev, A.S. (n.d.). National report on the regional water partnership (Kyrgyz Republic). Global Water Partnership. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cacena_files/en/pdf/kyrgyzstan.pdf
4. Bishkek provides 32 settlements in Chui region with water. https://24.kg/english/267593_Bishkek_provides_32_settlements_in_Chui_region_with_water/
5. Heat wave: Record high air temperature registered in Bishkek on June 6-9. https://24.kg/english/267767_Heat_wave_Record_high_air_temperature_registered_in_Bishkek_on_June_6-9/
6. Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Scientific Data, 7(1), 1-10. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3
7. Herrfahrdt-Pähle, E., Kipping, M., Pickardt, T., Polak, M., Rohrer, C., & Wolff, C. F. (2006). Water governance in the Kyrgyz agricultural sector: On its way to integrated water resource management? Deutsches Institut für Entwicklungspolitik. https://www.idos-research.de/uploads/media/Studies_14.pdf
8. Assubayeva, A. (2023). Review of uncertainties in water security decision-making in Central Asia. Research Paper Series, no. 12. OSCE Academy.
9. Rogers, P., & Hall, A. (2004). Effective water governance. Global Water Partnership, Technical Committee Papers No. 7.
10. Molle, F. (2008). Irrigation management in Central Asia: A review of current practices. International Journal of Water Resources Development, 24(3), 1-15.
11. Wegerich, K. (2009). Water governance in Kyrgyzstan: From Soviet to post-Soviet systems. Central Asian Survey, 28(3), 1-20.
12. Morris, B.A., Darling, W.G., Gooddy, D.C., Litvak, R.G., Neumann, I., Nemaltseva, E.J., & Poddubnaia, I. (2006). Assessing the extent of induced leakage to an urban aquifer using environmental tracers: An example from Bishkek, capital of Kyrgyzstan, Central Asia. Hydrogeology Journal, 14(1), 225-243. https://doi.org/10.1007/s10040-005-0441-x

УДК 551.582:556.55

CLIMATE CHANGE IMPACTS ON THE KAYRAKKUM RESERVOIR: CHALLENGES AND ADAPTATION STRATEGIES IN TAJIKISTAN

Orunbaev S.Z., Erkaev N.
n.erkaev@osce-academy.net
Human Rights and Sustainability, OSCE Academy, Bishkek, Kyrgyzstan

The Kayrakkum Reservoir, a critical water resource in Tajikistan, plays a vital role in supporting regional agriculture and hydropower generation. This paper examines the impacts of climate change on the reservoir, focusing on rising temperatures, altered runoff patterns, and their consequences for water availability and hydropower efficiency. It also explores potential adaptation and mitigation strategies to ensure sustainable water resource management in the region. The findings highlight the urgent need for improved water management practices, climate-resilient agriculture, and strategic national policies to address the challenges posed by climate change.

Keywords: Kayrakkum Reservoir, climate change, water availability, temperature fluctuations, seasonal runoff patterns, Syr Darya basin, agriculture, irrigation, evaporation.

Introduction. The Kayrakkum Reservoir, situated in the Ferghana Valley of Tajikistan, is a vital resource for the region's agricultural and energy sectors (fig. 1). Constructed during the Soviet era in the 1950s, the reservoir was designed to serve dual purposes: supporting irrigation for cotton and cereal cultivation and generating hydropower. Over the decades, it has become a lifeline for the Ferghana Valley, one of Central Asia's most agriculturally productive regions. Its strategic importance is further emphasized by its location in a semi-arid climate, where water resources are inherently scarce and highly susceptible to climatic variability [1].



Figure 1 – Kayrakkum on the map (highlighted using openstreet.map)

The reservoir plays a critical role in sustaining the livelihoods of millions of people in Tajikistan and neighboring countries. It provides irrigation for over 300,000 hectares of farmland, enabling the cultivation of crops that are essential for food security and economic stability. Additionally, the Kayrakkum Hydropower Station, which relies on the reservoir, generates a significant portion of Tajikistan's electricity, supporting both domestic consumption and regional energy exports. The reservoir's contributions to agriculture and energy make it indispensable to the socio-economic fabric of the region. However, the sustainability of the Kayrakkum Reservoir is

increasingly under threat due to the impacts of climate change. Rising global temperatures and shifting precipitation patterns are altering the hydrological dynamics of the Syr Darya basin, the primary source of water for the reservoir. These changes are manifesting in reduced water availability, altered runoff patterns, and increased evaporation rates, all of which pose significant challenges to the reservoir's ability to meet the region's agricultural and energy needs.



Figure 2 – Evening coastal area of Kayrakkum (source: novastan.org)

One of the most pressing concerns is the impact of rising temperatures on water availability. Higher temperatures lead to increased evaporation rates from the reservoir's surface, reducing the volume of water available for irrigation and hydropower generation. This reduction in water availability has direct implications for agricultural productivity, particularly in the Sogd region, which relies heavily on the reservoir for irrigation. Lower crop yields and increased food insecurity are likely outcomes if adaptive measures are not implemented. In addition to affecting water availability, climate change is also altering the seasonal runoff patterns in the Syr Darya basin. Historically, peak runoff occurred during the summer months, coinciding with the agricultural growing season. However, rising temperatures are causing snow and glacial melt to occur earlier in the spring, leading to mismatches between water supply and agricultural demand. This shift exacerbates the challenges faced by farmers and highlights the need for innovative water management solutions [2].

The implications of these changes extend beyond agriculture to the energy sector. The Kayrakkum Hydropower Station, which depends on consistent water flows from the reservoir, is experiencing reduced efficiency due to altered water flow patterns and increased sedimentation. These factors contribute to a decline in electricity generation capacity, exacerbating energy shortages in Tajikistan. Addressing these challenges requires a comprehensive approach that integrates climate adaptation and mitigation strategies to ensure the long-term sustainability of the Kayrakkum Reservoir and the communities that depend on it.

Background and Significance. The Kayrakkum Reservoir, constructed in the 1950s during the Soviet era, stands as a testament to the ambitious efforts to harness the agricultural and energy potential of Central Asia. Designed with a dual purpose, the reservoir was intended to support large-scale irrigation for cotton and cereal cultivation while simultaneously generating hydropower. This strategic infrastructure project was part of a broader Soviet initiative to transform the arid landscapes of Central Asia into productive agricultural hubs. Over the decades, the reservoir has become a lifeline for the Ferghana Valley, one of the most agriculturally productive regions in Central Asia, supporting millions of livelihoods and contributing significantly to the regional economy. The reservoir's historical significance is deeply intertwined with the development of Tajikistan's agricultural sector. During the Soviet period, the Ferghana Valley was transformed into a major center for cotton production, often referred to as "white gold" due to its economic importance. The Kayrakkum Reservoir played a pivotal role in this transformation by providing a reliable water source for

irrigation. Even after the dissolution of the Soviet Union, the reservoir has remained a critical asset for Tajikistan, enabling the cultivation of not only cotton but also cereals, fruits, and vegetables that are essential for food security [3].



Figure 3 – Kayrakkum from the satellite

Geographically, the Kayrakkum Reservoir is an impressive feat of engineering. Spanning approximately 520 square kilometers, it stretches 55 kilometers in length and 20 kilometers in width, with an average depth of 8 meters. Its vast surface area and storage capacity make it one of the largest reservoirs in Central Asia. The reservoir is strategically located in the Ferghana Valley, a region shared by Tajikistan, Uzbekistan, and Kyrgyzstan, and is fed by the Syr Darya River, one of the two major rivers in the region. This location places it at the heart of a complex and interconnected water management system that serves multiple countries [4]. The climatic conditions of the region further underscore the importance of the Kayrakkum Reservoir. The Ferghana Valley experiences a continental, semi-arid climate characterized by hot, dry summers and cold winters. Rainfall is scarce and unevenly distributed, making the region heavily reliant on snowmelt and glacial runoff from the Syr Darya basin for its water supply. This dependence on seasonal water sources makes the reservoir particularly vulnerable to climatic fluctuations, which are becoming more pronounced due to climate change.

The reservoir's significance extends beyond agriculture to the energy sector. The Kayrakkum Hydropower Station, which harnesses the reservoir's water for electricity generation, is a key component of Tajikistan's energy infrastructure. Hydropower accounts for a substantial portion of the country's electricity production, and the Kayrakkum Reservoir plays a vital role in meeting both domestic energy needs and export demands. However, the reservoir's ability to support energy generation is increasingly threatened by challenges such as siltation, reduced water availability, and operational inefficiencies. Despite its critical importance, the Kayrakkum Reservoir faces numerous challenges that jeopardize its long-term sustainability. Siltation, caused by the accumulation of sediment over decades, has significantly reduced the reservoir's storage capacity. Additionally, the impacts of climate change, including rising temperatures and shifting precipitation patterns, are exacerbating water scarcity and altering the hydrological dynamics of the Syr Darya basin. These challenges highlight the urgent need for effective water management strategies and infrastructure upgrades to ensure the reservoir can continue to support agriculture and energy production in the face of a changing climate [5].

Importance of the Reservoir. The Kayrakkum reservoir, also known as the Tajik Sea, plays an indispensable role in the region's agriculture. It provides irrigation to more than 300,000 hectares of agricultural land, making it an essential factor for the production of crops such as cotton, rice and other agricultural products. The reservoir is especially important in dry years, when it helps to maintain stable agricultural production in the Sughd region of Tajikistan and neighboring countries. In addition, the Kayrakkum Reservoir supports the Kayrakkum Hydroelectric Power Plant, which

generates a significant portion of Tajikistan's electricity, which is crucial for the region's energy supply [6].

The role of reservoirs in maintaining agricultural production and energy supply in the Ferghana Valley cannot be overestimated. They provide a stable source of water for irrigation, which allows farmers to maintain high yields and stable income. In addition, reservoirs such as the Kayrakkum reservoir also serve as important recreational areas, attracting tourists and locals for recreation and fishing. In general, the Kayrakkum reservoir is an essential element of the socio-economic development of the region, providing both agricultural production and energy supply, as well as supporting the local economy through tourism.

Challenges. Despite its importance for the region, the Kayrakkum reservoir faces a number of serious problems. One of the main problems is siltation, which reduces the reservoir's capacity and reduces its efficiency. This is due to soil erosion in the Syr Darya River basin, which leads to precipitation accumulation in the reservoir. In addition, inefficiency in the operation and management of the reservoir also limits its potential. These problems are compounded by climate change, which alters precipitation patterns and increases the risk of droughts or floods, threatening the long-term sustainability of reservoirs. Climate change is exacerbating existing problems, affecting the stability of water and energy supply in the region. An increase in temperature and a change in precipitation can lead to a decrease in the water level in the reservoir, which negatively affects agriculture and energy. To solve these problems, it is necessary to introduce modern technologies and methods of water resources management, as well as improve the efficiency of reservoir operation. In addition, international cooperation and exchange of experience can help develop strategies for climate change adaptation and ensure the long-term sustainability of reservoirs.

On the graph (fig. 4) can see that the precipitation during the summer season is low: June, July, August and September, which help us to understand the reasons of the water scarcity in Kayrakkum - there is no rain to fill the water up, that’s why its drowning.

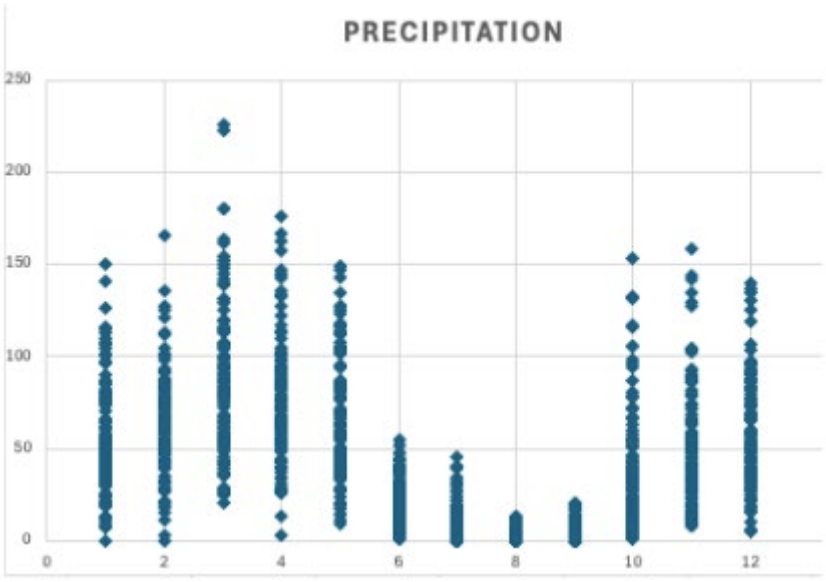


Figure 4 – The monthly precipitation in Kairakkum

Climate Change Impacts on Water Availability. Climate change has a significant impact on water availability in the region of the Kairakkum reservoir. An increase in temperature led to an increase in the evaporation rate from the reservoir surface, which led to a decrease in water availability. This trend is consistent with the expected negative impact on agricultural productivity, as reduced water availability directly affects food yields and stability. Changes in the flow structure are also a serious problem. Temperature fluctuations have led to a change in seasonal runoff in the Syr Darya basin, where the peak runoff now occurs in the earlier spring. This change creates a mismatch between water supply and demand in agriculture, which complicates the operation of

irrigation systems. As a result, agricultural production in the Sughd region is already beginning to suffer from reduced water availability [7].

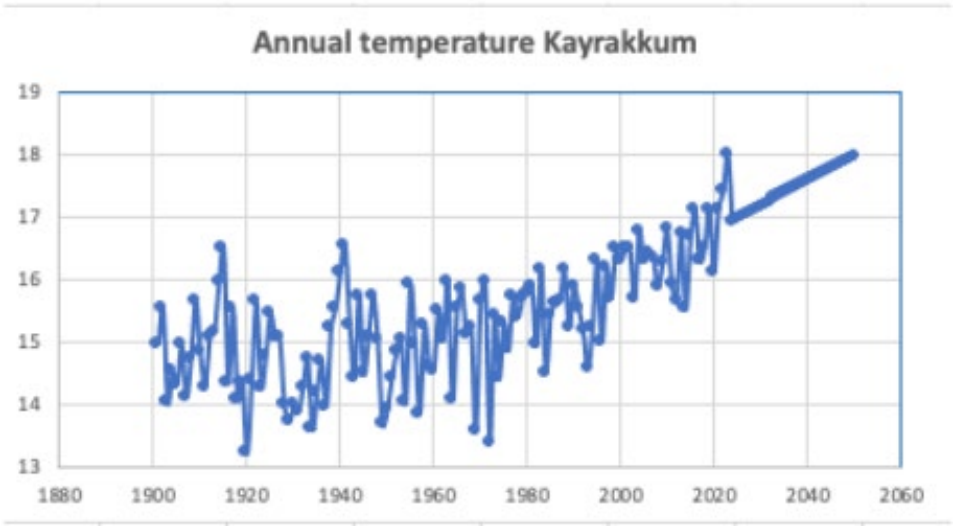


Figure 5 – The annual temperature in Kayrakkum and its prediction

On the graph which is made by me using the data on the Google Earth, I understood that the temperature in the Kayrakkum reservoir was always rising which is also a result of climate change. On my prediction for the future, I understood the there will be gradual increase of the temperature in the future as well which could be on the sign of the natural catastrophe lie in Aral Sea in Kayrakkum reservoir.

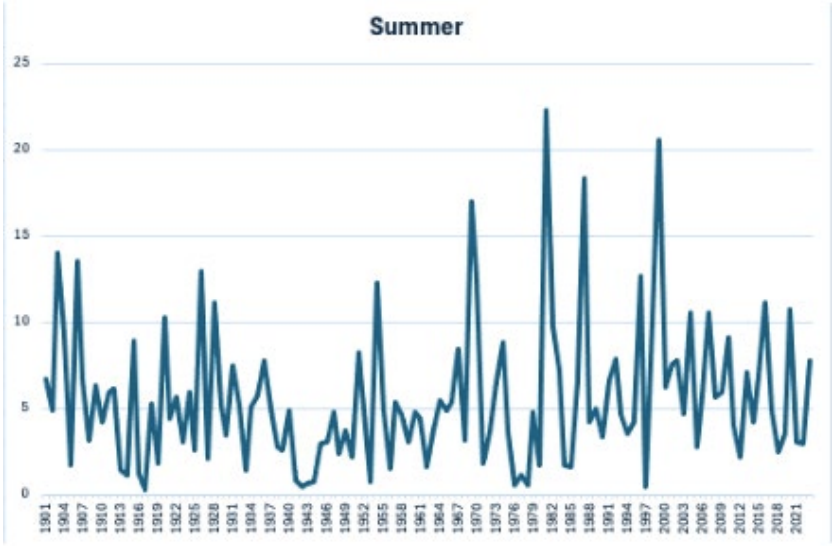


Figure 6 – The annual temperature in Kairakkum in summer

On the graph (fig. 6), was used the data for summer temperature, it was fluctuating up and this is one of the reasons of my hypothesis being correct. The impact of climate change on agriculture can lead to lower yields and increased food insecurity if adaptation measures are not taken. It is necessary to introduce drought-resistant crops and water-saving irrigation technologies to mitigate the effects of climate change. In addition, upgrading the infrastructure of reservoirs and hydroelectric power plants, taking into account climate change forecasts, can help increase the sustainability of the region's water and energy complex [8].

Effects on Hydropower Efficiency. The change in the structure of the water flow has a negative impact on the efficiency of the Kayrakkum HPP. Falling water levels and uncoordinated flows lead to a decrease in electricity production capacity, which exacerbates the energy deficit in

Tajikistan. In addition, an increase in sediment deposits in the reservoir reduces its capacity and damages the hydropower infrastructure, which further reduces the efficiency of the plant. Siltation of the reservoir is a serious problem that not only reduces its capacity, but also affects the productivity of hydropower facilities. This requires measures to be taken to clean up and prevent further siltation in order to maintain the functionality of the reservoir and hydroelectric power station. In addition, climate change leads to fluctuations in river flow, which makes it necessary to adapt water resource management systems to ensure stable operation of hydropower facilities.

The decrease in electricity production at the Kayrakkum HPP is exacerbating the energy deficit in Tajikistan, underscoring the need for adaptation measures. To ensure the smooth operation of the plant, it is necessary to modernize the infrastructure and introduce new technologies that will improve the efficiency of water resources and mitigate the effects of climate change. One of the key areas of adaptation is the introduction of modern water management systems. This includes monitoring river flow, forecasting changes in water availability, and optimizing the operation of hydroelectric power plants based on this data. In addition, an important aspect is cooperation with international organizations to share experiences and attract investments in the modernization of the hydropower infrastructure [9].

In general, solving the problems related to the impact of climate change on the Kayrakkum HPP requires an integrated approach. This includes not only technical measures to modernize the infrastructure, but also strategic planning and international cooperation. The implementation of such measures will help mitigate the effects of climate change and ensure stable electricity production for the development of Tajikistan's economy.

Adaptation and Mitigation Strategies. Effective management of water resources is a key aspect of solving problems related to climate change. Modernization of irrigation systems, improvement of infrastructure maintenance and the introduction of environmental protection methods can significantly increase the efficiency of water use. Tajikistan, for example, is implementing a National Water Strategy aimed at sustainable management of water resources, taking into account climate change. This approach includes improving public water supply, increasing water efficiency and productivity, and introducing water-saving technologies. In agriculture, the introduction of drought-tolerant crop varieties and water-saving irrigation technologies can help mitigate the effects of reduced water availability. Promoting sustainable farming practices also plays an important role in adapting to climate change. Tajikistan has launched a project to improve water and irrigation infrastructure, which aims to ensure sustainable and efficient use of resources in the agricultural sector. This project should contribute to improving the living standards of the rural population and food security [10].

Tajikistan's National Action Plan for Climate Change Mitigation provides a framework for addressing climate change-related challenges. Strategic measures, including infrastructure modernization and policy reforms, are necessary to ensure the long-term sustainability of reservoirs and other water bodies. It is also important to note that Tajikistan actively participates in international cooperation on water resources management and adaptation to climate change, which allows for the exchange of experience and attracting investments for the implementation of water reforms.

In the Central Asian region, climate change poses a significant threat to water resources, as freshwater reserves may decrease by 20% by 2050. In this regard, the states of the region are uniting to find solutions in the field of water resources management and adaptation to climate change. Forums and conferences, such as the Central Asian High-level Forum on Water and Climate Change, contribute to the discussion and development of strategies on water and climate resilience.4 Overall, improving water resources management in Tajikistan and Central Asia requires an integrated approach, including infrastructure modernization, the introduction of new technologies, and international cooperation. The implementation of such measures will help mitigate the effects of climate change and ensure the sustainable development of the water sector, which is essential for the economy and food security of the region [11].

Conclusion. In conclusion, the effects of climate change on the Kayrakkum reservoir pose a serious threat to regional agriculture and energy production. An increase in temperature and a change

in the structure of water flow lead to a decrease in water availability, which negatively affects the efficiency of the Kayrakkum HPP and irrigation of agricultural land. Climate change adaptation and mitigation strategies need to be developed to preserve the reservoir's role in supporting the regional economy. One of the key areas of adaptation is the modernization of infrastructure and the introduction of new technologies. For example, the Kayrakkum HPP modernization project is aimed at improving water resource efficiency and resilience to climate change. In addition, the introduction of drought-tolerant crop varieties and water-saving irrigation technologies can help mitigate the effects of reduced water availability. Future research should focus on developing innovative solutions to address the complex relationship between climate change and water management in Central Asia. This includes studying the impact of climate change on river flow, developing strategies to improve water resource efficiency, and creating sustainable water resource management systems.

It is also important to note that climate change is exacerbating existing environmental problems in the region, such as siltation of reservoirs and a decrease in the area of glaciers, which can lead to a significant reduction in water resources. Therefore, international cooperation and exchange of experience in the field of climate change adaptation are becoming increasingly important to ensure the long-term sustainability of the region's water and energy complex. In general, solving the problems related to climate change for the Kayrakkum reservoir requires an integrated approach, including technical, economic and political measures. The implementation of such measures will help mitigate the effects of climate change and ensure the sustainable development of the region.

References

1. Operational Guidelines for NWF (2024). Structure and contents of Detailed Project Proposal. Critical Ecosystem Partnership Fund (2025). Facebook Post. Climate Change: Tajikistan's Migratory Bird Population Declines. CABAR.asia.
2. Kundzewicz Z.W., Matacchini G., Radziejewski M., Swiatek D., Wilson T.L. Changes in flood risk parameters over Europe during past decades–results from model simulations based upon ECHAM4/OPYC3 scenarios // Hydrological Sciences Journal. 2007. 52(5). 854–871.
3. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
4. Trotsenko P. (2024) Согдийская область — самая северная часть Таджикистана с очень развитым сельским хозяйством, прежде всего потому, что через этот регион проходит река Сырдарья. [Sogd region is the northernmost part of Tajikistan with a very developed agriculture, primarily because the Syr Darya River passes through this region.] https://rus.azattyq.org/
5. Потребность в эффективном сотрудничестве и адаптации в связи с изменением. [The Need for Effective Collaboration and Adaptation in the Context of Change] Mountain Research and Development, 32(3RU).
6. Wikipedia (2025) Кайраккумское водохранилище https://ru.wikipedia.org/wiki/
7. EBRD (no date) ENVIRONMENTAL AND SOCIAL IMPACT ASSESSMENT: https://www.ebrd.com/documents/comms-and-bis/1395252412618.pdf
8. Asia-Plus (2021) 15 самых экологически чистых мест Центральной Азии. [15 of the most environmentally friendly places in Central: https://asiaplustj.info/news/centralasia/20210207/15-samih-ekologicheski-chistih-mest-tsentralnoi-azii
9. Эволюция природных комплексов водохранилищ Таджикистана и их влияние на прилегающие территории. [Evolution of natural complexes of reservoirs of Tajikistan and their impact on adjacent territories]. Available at: https://www.dissercat.com/content/evolyutsiya-prirodnykh-kompleksov-vodokhranilishch-tadzhikistana-i-ikh-vliyanie-na-prilegayu.
10. Ticketon (no date) Кайраккумское водохранилище. [Kayrakkum Reservoir]. Available at: https://ticketon.kz/place/kajrakkumskoje-vodohranilishhe.
11. Deutsche Welle (DW) (2021). Таджикистан призывает пересчитать запасы воды в регионе. [Tajikistan calls for a reassessment of water reserves in the region].

УДК 627.8.09:311.21

PHOTOVOLTAIC AND MICRO-HYDROPOWER POTENTIAL IN KYRGYZSTAN AND ITS LOW EXPANSION RATE

Orunbaev S.Z., Lehmann J.
lehmaja1@students.zhaw.ch
American University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan

Kyrgyzstan has significant potential for using photovoltaic (PV) and micro-hydropower technologies for electricity generation, but the expansion of these technologies has been limited so far. Micro-hydropower plants offer a sustainable energy solution, especially in mountainous regions with consistent water flow. The advantages include year-round electricity production. Photovoltaic (PV) energy is an attractive option in Kyrgyzstan due to high solar irradiation, offering low maintenance and quick installation. PV systems on rooftops or carports provide great potential, while off-grid systems can be used in remote areas without grid access. Both technologies have specific pros and cons: micro-hydropower plants are dependent on water availability, while PV systems do not generate energy at night without battery storage. The limited introduction of PV and micro hydropower in Kyrgyzstan is partly due to the low electricity prices. However, as electricity prices rise, there may be greater incentives for individuals to invest in their own PV systems, improving the country's energy supply.

Keywords: photovoltaic systems (PV), micro-hydropower, renewable energy, energy transition, rooftop solar, off-grid energy, solar irradiation, battery storage, decentralized energy solutions, mountainous regions, energy policy

1. Introduction.

Hydropower is a well-established renewable energy source that harnesses the potential energy stored in flowing water to generate electricity. Among the various scales of hydropower systems, micro-hydropower has gained particular attention for its ability to deliver clean, decentralized energy solutions in remote or underserved regions. Defined as systems producing between 5 kW and 100 kW, micro-hydropower plants are ideally suited for rural electrification and small-scale industry, often powering up to 35 households with a single installation.

Micro-hydropower distinguishes itself from larger-scale hydroelectric systems by avoiding massive infrastructure such as large dams, thereby minimizing environmental disruption. As illustrated in Figure 1a, the key components of a typical plant include the intake weir and settling basin, channel, forebay tank, penstock, and the powerhouse containing the turbine and generator. Importantly, micro-hydro installations often preserve a residual flow in the natural river channel, supporting downstream aquatic ecosystems and maintaining biodiversity.

The fundamental principle of energy generation in hydropower relies on the equation:

$$P=Q\times H\times g\times \eta \quad (1)$$

where:

- P is the electric power output in kilowatts (kW),
- Q is the water flow rate (m^3/s),
- H is the vertical head or height difference (m),
- g is the acceleration due to gravity (9.81 m/s^2),
- η is the efficiency of the system, typically between 0.7 and 0.8.

This relationship, illustrated in Figure 1b, highlights two essential factors: head and flow rate. The greater these two variables, the more power can be generated. However, micro-hydropower plants must be carefully designed based on seasonal flow patterns, especially in regions with pronounced dry seasons. From December to February, many rivers experience their lowest flows,

coinciding with peak electricity demand. Thus, the feasibility of micro-hydropower is heavily dependent on ensuring sufficient water availability during these months.

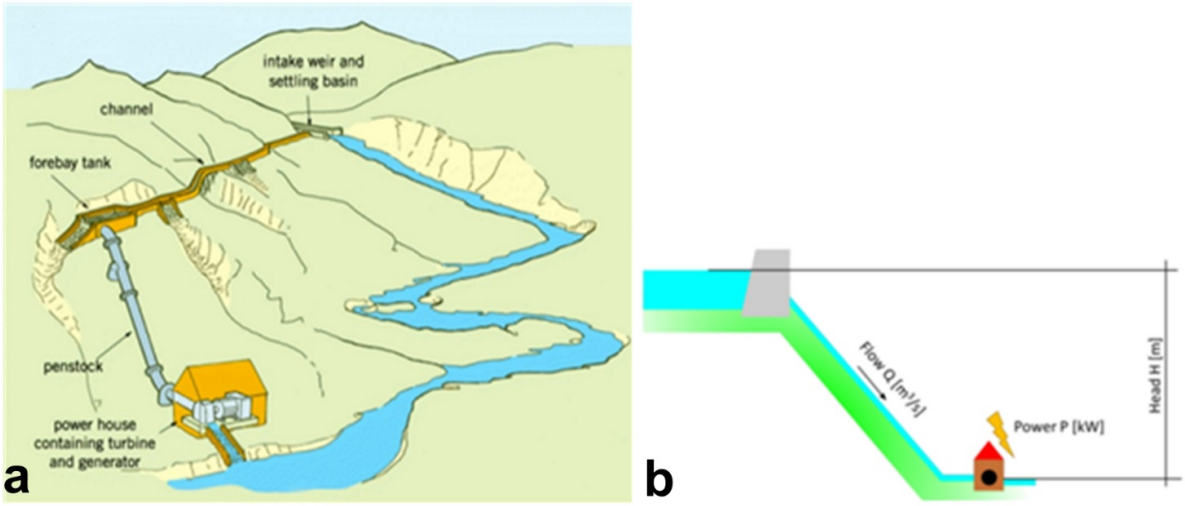


Figure 1 – a: Elements of Hydropower, b: Simple Equation of Hydropower (source: Hycon GmbH)

In conclusion, micro-hydropower represents a promising, low-impact solution for sustainable energy development. Its modularity, minimal ecological footprint, and suitability for off-grid communities make it a powerful tool in achieving energy resilience and climate adaptation goals.

Why Micro-Hydropower? Kyrgyzstan's mountainous terrain and abundance of rivers—fed by glacial meltwater and seasonal precipitation—make it one of the most hydropower-rich nations in Central Asia. According to the Ministry of Energy of the Kyrgyz Republic, only about 10% of the country's total small hydropower potential has been developed to date, presenting a remarkable opportunity for decentralized, clean energy expansion [1].

Micro-hydropower, as a subset of small hydropower, is particularly advantageous for Kyrgyzstan's rural and mountainous communities, where grid extension is often technically difficult and economically unviable. These systems can operate autonomously or in hybrid setups, offering sustainable electrification without the need for fossil fuels.

Advantages of Micro-Hydropower:

Year-Round Generation: When designed based on the minimum seasonal flow, micro-hydropower systems can ensure continuous electricity generation throughout the year—even during the winter months when electricity demand peaks due to heating requirements [2].

24-Hour Supply: Unlike solar PV, which is inherently intermittent, micro-hydropower can provide stable base-load electricity, ensuring both day and night power availability—a key feature for hospitals, schools, and small industries [3].

Localized Energy Security: With community-level ownership and local maintenance, micro-hydro can enhance energy independence and reduce reliance on centralized infrastructure, which is often prone to outages in mountainous zones.

Challenges and Considerations. Despite its many benefits, several technical and ecological challenges must be carefully addressed. Ecological Impact, Improper siting or overuse of river flow can lead to loss of aquatic biodiversity, river fragmentation, and degradation of riparian habitats, especially in areas with endemic or migratory species [4].

Higher Maintenance, in comparison with photovoltaic systems, micro-hydro infrastructure requires more frequent upkeep — particularly the penstock, turbine, and channel systems, which can be affected by sedimentation and freezing conditions [5].

Flow Dependence, the variability of water flow due to seasonal climate conditions and long-term hydrological shifts (e.g., glacial retreat) directly impacts energy output. Thus, feasibility studies must include long-term hydrological modelling.

Topographic Requirement, micro-hydropower is most efficient in locations with adequate elevation drop (head) and steady flow. Flat terrains or highly seasonal rivers limit its application.

In summary, while micro-hydropower is not a one-size-fits-all solution, it is a strategic asset for Kyrgyzstan's sustainable energy transition. By aligning technical design with ecological safeguards and community needs, micro-hydro systems can be both resilient and regenerative — supporting Kyrgyzstan's long-term goals of decarbonization and rural development.

What is Photovoltaic Energy? Photovoltaic (PV) energy is one of the most accessible and scalable forms of renewable energy, particularly suitable for countries like Kyrgyzstan, which enjoys over 2,700 hours of sunshine per year [6]. PV technology transforms sunlight directly into electricity through a clean and silent process, making it an ideal solution for both off-grid rural areas and urban rooftops.

How Photovoltaic Systems Work. As illustrated in Figure 2, the process begins with the energy source — the sun. Sunlight contains photons, which are particles of light energy. When these photons strike a PV cell (typically made from silicon-based semiconductors), they dislodge electrons, initiating a flow of direct current (DC). This process is called the photovoltaic effect.

However, since most electrical appliances and the national grid operate on alternating current (AC), an inverter is required. The energy inversion and conditioning unit converts DC to AC and ensures that the voltage and frequency match the grid or local usage requirements.

To enhance reliability, especially in isolated areas or during cloudy days, electricity can also be stored in battery banks before or after inversion. Finally, the power flows through an energy distribution system, which delivers electricity either to local loads (e.g., lighting, appliances) or to the national electric utility grid, supporting broader energy needs.

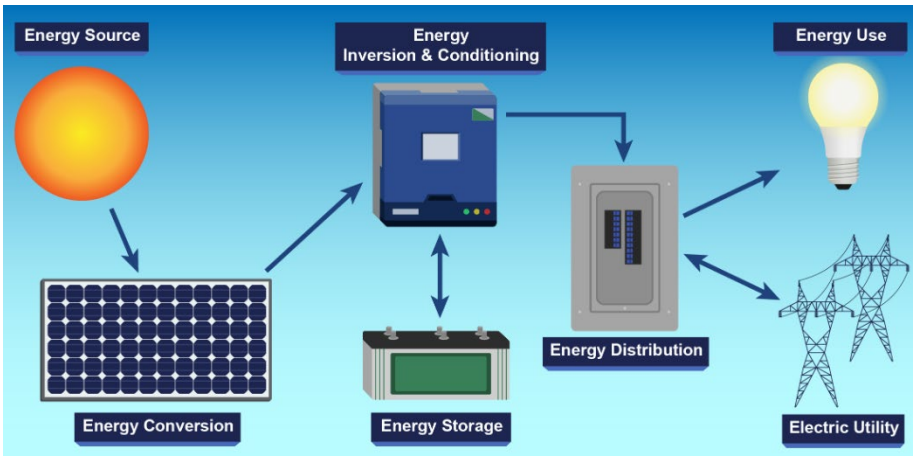


Figure 2 – PV Components (source: Electrical Technology)

PV Panel Orientation and Installation Optimization. Maximizing PV efficiency depends on panel orientation, tilt angle, and shading minimization.

Figure 3a (left) shows that the optimal irradiation angle is when sunlight hits the panel perpendicularly (90°). For most of Kyrgyzstan, this ideal orientation is south-facing, as it captures maximum solar radiation throughout the day.

Yet due to seasonal solar path shifts, the optimal fixed tilt angle is approximately 30–35°, which balances energy capture during both summer and winter [7].

For flat roofs or limited spaces, as seen in Figure 3b (right), east-west facing PV panels can optimize electricity production per unit area. This configuration allows for higher panel density and better utilization of morning and afternoon sun, though it requires more panels to achieve the same total power output as south-facing systems [8].

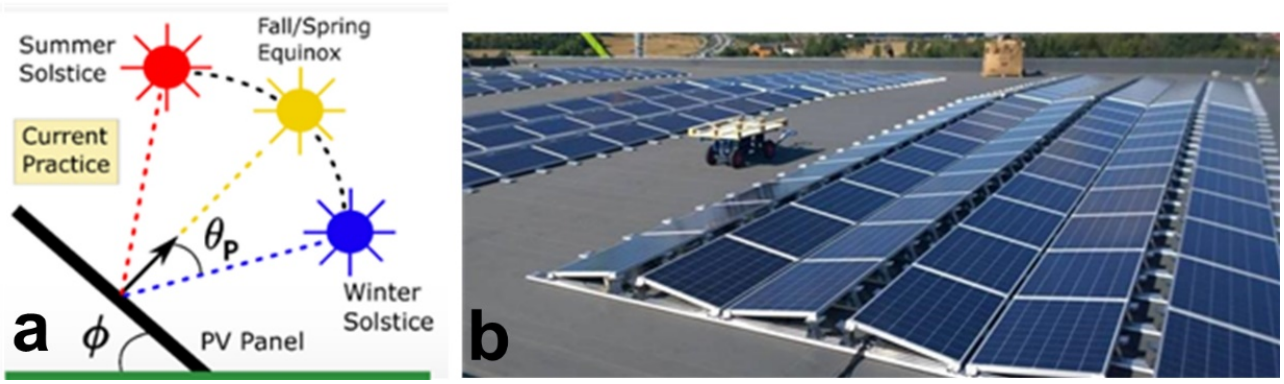


Figure 3 – a: Optimal Irradiation Angle for PV (source: MDPI), b: East-West Facing PV Panels for Maximum Electricity Production.

Importantly, shading must be minimized at all times. Even a single shadowed cell in a module can reduce the output of an entire string due to how PV arrays are electrically connected. Hence, panel placement, elevation, and row spacing on flat surfaces are critical design parameters.

Why PV for Kyrgyzstan? As global energy systems pivot toward renewable sources, photovoltaic (PV) energy has emerged as one of the most efficient, flexible, and accessible solutions — particularly for countries with abundant solar resources. Kyrgyzstan is geographically positioned to become a solar energy leader in Central Asia, with solar irradiation levels approximately 1.5 times higher than those in Switzerland [6]. This natural advantage makes photovoltaics a strategic complement to hydro and other renewables in the country's future energy mix.

Key Advantages of PV Systems in Kyrgyzstan

Low Maintenance Requirements. Unlike conventional power systems or even micro-hydro installations, PV systems have no moving parts, making them durable and easy to maintain. Routine cleaning and basic electrical checks are typically all that's required to ensure decades of reliable operation.

Fast and Simple Installation, PV modules can be deployed quickly, even in remote or mountainous regions, thanks to modular design and ease of transport. Installations can range from small off-grid systems for nomadic communities to larger grid-connected solar farms.

Flexible Siting and Scalability, PV panels can be installed almost anywhere — on rooftops, façades, agricultural lands, or unused open spaces. The only limitation is the need to avoid shading from nearby objects like trees or buildings, which can reduce efficiency.

Limitations and Considerations.

Intermittency and Storage Dependency, PV systems do not produce electricity at night, and their output drops significantly during cloudy or snowy conditions. This makes energy storage systems—such as lithium-ion batteries — critical for ensuring round-the-clock electricity availability.

High Initial Cost of Batteries, while the price of solar panels has dropped over 80% in the past decade, battery systems remain relatively expensive, often comprising over 30–40% of the total system cost. However, as global demand rises, battery prices are projected to continue falling [9].

Performance Affected by Snow and Weather, Snow accumulation on PV panels can temporarily block sunlight, especially in Kyrgyzstan's high-altitude regions. Although panels are usually installed at an angle to shed snow naturally, occasional manual clearing may be necessary. Additionally, rain or fog reduces solar input and can impact electricity generation during extended periods of poor weather.

The Case for PV in Kyrgyzstan

Despite these limitations, PV technology holds tremendous potential to decentralize energy access, stabilize supply during dry seasons (when hydro output is low), and reduce dependency on fossil fuels. For rural households and small communities — especially those not connected to the national grid — PV represents a clean, quiet, and highly adaptable energy source.

As part of an integrated energy strategy that includes hydropower, wind, and storage technologies, photovoltaics can significantly enhance energy security and sustainability in Kyrgyzstan, aligning with national goals and international climate commitments.

2. Field data and Methodology

This chapter presents a field-based assessment of potential micro-hydropower development in the Naiman region of Kyrgyzstan. The methodology combines hydrological field observations, site-specific measurements, and technical feasibility calculations to evaluate viable options for renewable energy generation using existing water infrastructure.

2.1 Site 1: Naiman Reservoir – Hydropower Retrofit

The Naiman Reservoir, located at Nookat district, Osh oblast, already functioning with a controlled residual flow and dam infrastructure, presents a highly cost-effective opportunity for hydropower development (fig.4a). Field measurements confirm a steady discharge of 2 m^3/s throughout the year. Given the hydraulic head of 22 meters, the potential energy output is substantial.

Using the standard hydropower equation 1, Where: η = efficiency (assumed 0.8 for small turbines), ρ = water density (1000 kg/m^3), g = gravity (9.81 m/s^2), Q = flow (2 m^3/s), H = head (22 m).

The resulting turbine capacity is approximately 302 kW, capable of generating 2.4 GWh annually under continuous operation. Field observations confirm that the necessary infrastructure (pipes, reservoir outlet structure, and turbine housing space) is already present, minimizing civil works and cost. This site thus represents a low-barrier investment for renewable energy development.

2.2 Site 2: Naiman Irrigation Canal – Screw Turbine Feasibility

In parallel, nearby agricultural irrigation canals offer another renewable energy opportunity using Archimedean screw turbines (fig.4b), which are suitable for low-head, high-flow applications. Field measurements on a canal adjacent to Naiman show: Water flow: ~1.5 m^3/s, Head: ~2 meters

This setup could accommodate a screw turbine of about 20 kW capacity, yielding enough electricity to power approximately five rural households or support communal infrastructure like water pumps or lighting.



Figure 4 – a: Naiman Reservoir, b: Outlet of Naiman Reservoir (Photo by Janis Lehmann)

Cost Estimation

The capital cost of micro-hydropower installations varies depending on multiple factors, including: Terrain accessibility and topography, Turbine type and scale (e.g., Pelton, Francis, Screw), Connection distance to existing grid infrastructure, Civil works required for intake, penstock, and power house.

In general: Estimated cost: USD $1,500 to $6,000 per kW [10], thus, for the 302 kW Naiman plant: ~$453,000 to $1.8 million, for the 20 kW screw turbine: ~$30,000 to $120,000.

These values are considered reasonable in the Kyrgyz context, where labor and material costs are lower than global averages, and the presence of existing water infrastructure can reduce initial capital outlay by up to 40%.

2.3 Rooftop Photovoltaic Installations: AUCA Case Study

This section outlines the methodological approach and technical data collected for evaluating photovoltaic (PV) system deployment options at institutional and off-grid levels in Kyrgyzstan. Emphasis is placed on rooftop installations, carports, and standalone PV systems with batteries for remote use. All energy generation estimates are based on PVGIS simulations, and cost estimates reflect global and regional benchmarks adapted to the Kyrgyz context.

Rooftop PV systems represent one of the most efficient and cost-effective applications of solar energy. Their advantages include: Low installation costs, due to existing structural support, Optimized orientation and tilt on pitched roofs, Minimal land footprint, particularly valuable in urban or semi-urban settings.

At the American University of Central Asia (AUCA) in Bishkek, a comprehensive rooftop survey was performed using Vectorworks software (fig.5a). The analysis demonstrated that the campus rooftops can accommodate approximately 1,135 solar panels.

Key parameters: Total installed capacity: 510 kW, Annual energy production: 1,501,539 kWh, Calculation method: PVGIS-based solar irradiation and tilt optimization, Panel type: 450 W monocrystalline modules. This production can cover a significant share of AUCA's annual electricity demand, reducing dependency on fossil fuels and offering long-term cost savings.

2.4 Carport Installations

Another promising on-site application involves carport PV installations (fig.5b). Although carports offer less surface area than rooftops, they provide dual-use functionality by combining vehicle shelter with clean energy generation. However, their initial capital cost is relatively higher due to the need for constructing robust steel or aluminum support structures.

For AUCA: Number of panels: 580 units, Installed capacity: 261 kW, Annual production: 353,308.65 kWh (PVGIS), Support structure: custom-engineered aluminum frame with wind load certification

While the energy yield per square meter is lower than that of rooftop systems due to spacing and shading, carports provide an aesthetic and functional renewable energy solution suitable for campus and institutional settings.

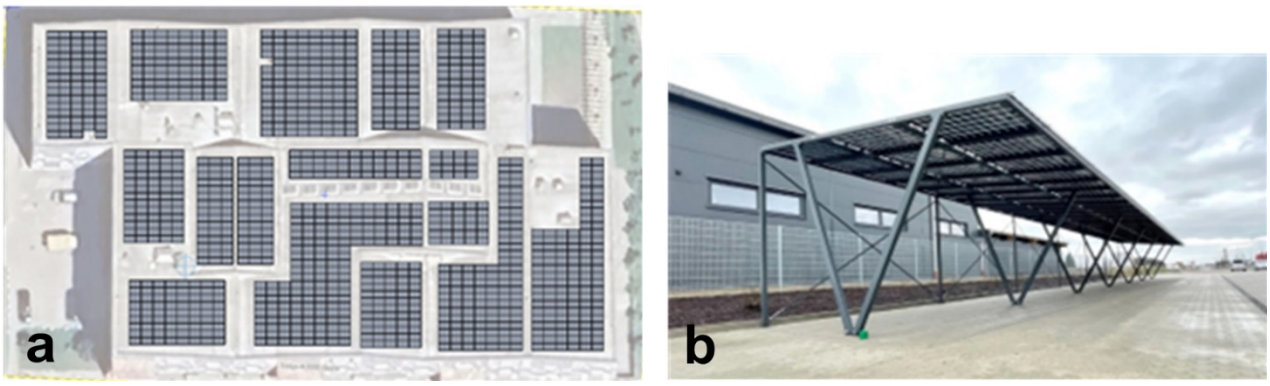


Figure 5 – a: AUCA Panel Plan (created by Janis Lehmann using Vectorworks), b: Potential Carport Construction for Panels (source: PVDach)

2.6 Off-Grid PV Systems with Battery Storage

Off-grid PV systems are essential for remote regions in Kyrgyzstan, particularly in mountainous terrain where grid connectivity is non-existent or unreliable (fig.6). These systems combine: PV modules, Battery banks (typically lithium-ion or $LiFePO_4$), Charge controllers and inverters.

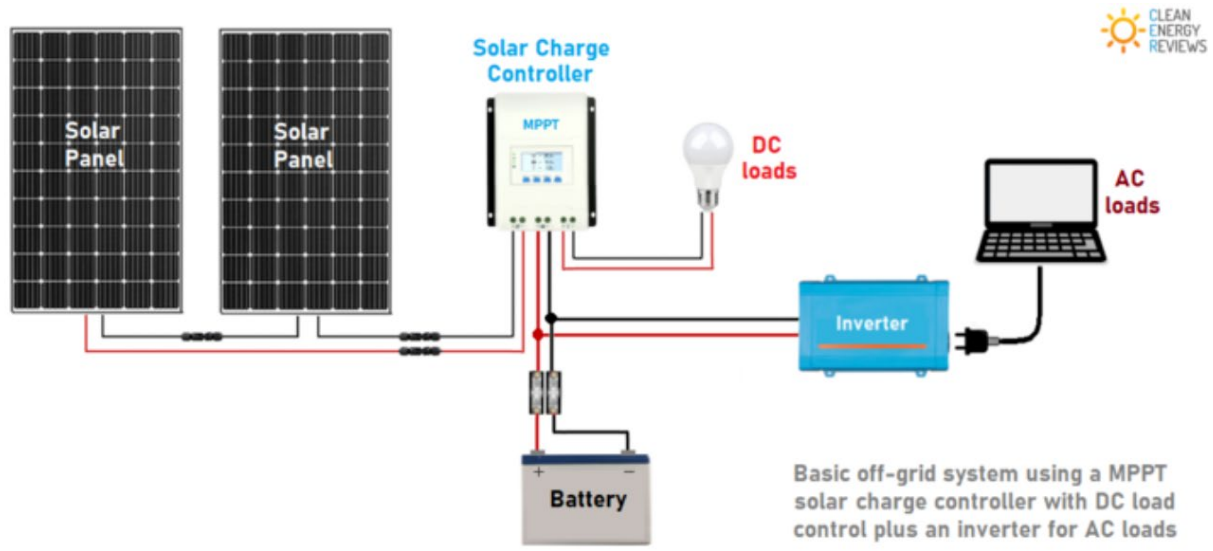


Figure 6 – Off-Grid System Scheme (source: Renewsys World)

Such systems are ideal for rural households, field monitoring stations, and isolated water pumping units. The system sizing depends on the daily load profile, solar availability, and required autonomy period (typically 2–3 days).

Cost ranges: Rooftop PV: USD $600–1,200 per kW, Carport PV: USD ~$1,200 per kW, Off-grid PV with batteries: USD $1,800–3,500 per kW depending on storage capacity and autonomy requirements

3. Discussion

Energy Transition and Kyrgyzstan's Electricity Demand

Kyrgyzstan stands at a pivotal point in its energy development. Rapidly increasing electricity consumption, especially in urban centers and industrial sectors, is outpacing the current supply—much of which relies heavily on large-scale hydropower infrastructure. While hydropower remains the backbone of the energy mix, growing seasonal variability in water availability, exacerbated by climate change, reduces its reliability (fig.7a). Without a shift to alternative energy sources, the country risks a rising dependence on fossil fuel imports, counteracting both its environmental commitments and economic resilience (fig.7b).

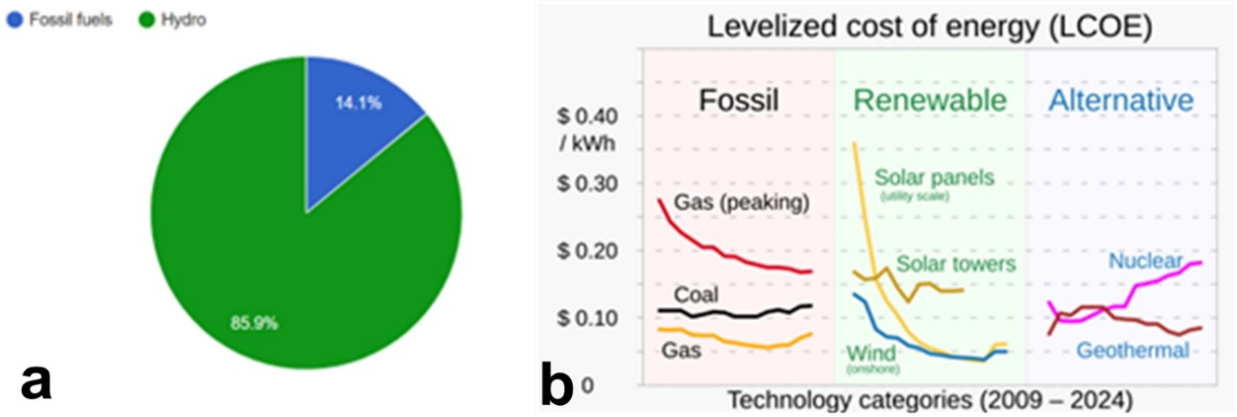


Figure 7 – a: Electricity Distribution in Kyrgyzstan (source: Global Petrol Prices), b: Costs of Different Energy Technologies per kWh.

Data show that the Levelized Cost of Electricity (LCOE) for photovoltaic (PV) and wind energy in Kyrgyzstan is approximately $0.05 per kWh — a figure now competitive with hydropower. This parity marks a significant inflection point for national energy policy. With falling installation

costs and maturing technology, decentralized solar and wind energy systems are no longer aspirational but practical solutions for grid diversification.

Rising Electricity Prices and Decentralized Generation

Economic indicators reinforce this transition. Electricity prices have steadily increased in recent years, driven by inflation, infrastructure degradation, and the high cost of imported energy in drought years. This trend is making household-level PV installations economically viable, especially in remote or underserved areas like Naryn, Jalal-Abad, and Batken, where grid reliability is low and outages are frequent.

Figure 8 illustrates this rise, showing a year-on-year increase in kWh prices across household and commercial sectors. If this pattern continues, more individuals and small businesses will reach the economic break-even point for investing in personal or cooperative renewable energy systems [10].

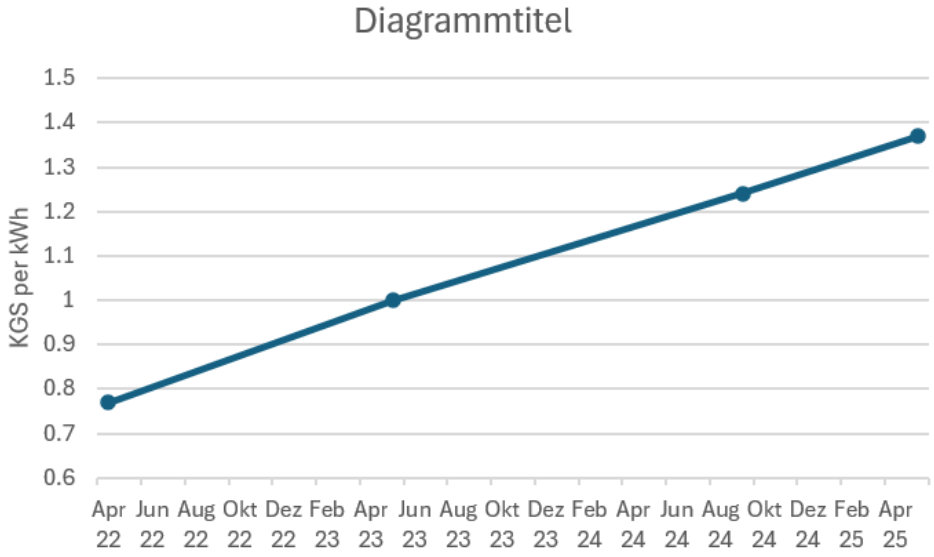


Figure 8 – kWh Price Increase (Chart by Janis Lehmann based on data from IEA)

4. Conclusion

The current energy outlook suggests a compelling opportunity for renewable energy transformation in Kyrgyzstan. A two-pronged strategy combining large-scale PV installations with pumped-storage hydropower (PSH) can ensure both daytime surplus generation and nighttime energy reliability. This hybrid system offers a flexible, low-emission pathway to meet rising demand without increased fossil fuel dependence.

Equally vital is the role of citizen participation and education. Empowering local communities with knowledge and tools to install rooftop solar, micro-hydro, or battery-supported off-grid systems can enhance energy security and stimulate the green economy. Educational outreach and vocational training can spark new entrepreneurial ventures and drive policy innovation from the grassroots level.

The ideal model is a decentralized, mixed-technology grid architecture supported by progressive regulation, financial incentives, and public awareness. By adopting this approach, Kyrgyzstan can lead Central Asia in building a resilient, inclusive, and sustainable energy future.

References

1. Ministry of Energy of the Kyrgyz Republic. (2023). National Hydropower Development Strategy 2023–2035. Note: This is a governmental publication and may not have a DOI. For related news, see: Akipress Article.
2. Asian Development Bank (ADB). (2022). Renewable Energy for Rural Development in Central Asia. Asian Development Bank. Note: This specific publication's DOI is not readily available. However, related information can be found on ADB's project page: ADB Project 53222-001.

3. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2020). Small Hydropower Plants in Remote Areas: Global Best Practices. Note: A DOI is not assigned to this publication. The document can be accessed directly: UNIDO SHP Brochure.
4. International Hydropower Association (IHA). (2021). Hydropower Sustainability Guidelines on Good International Industry Practice. Note: DOI not available. The guidelines can be accessed at: IHA Sustainability Guidelines.
5. ESMAP. (2020). Mini Grids for Half a Billion People: Market Outlook and Handbook for Decision Makers. World Bank Energy Sector Management Assistance Program. Note: This publication does not have a DOI but is available here: ESMAP Mini Grids Report.
6. United Nations Development Programme (UNDP). (2023). Renewable Energy Potential of the Kyrgyz Republic. Note: DOI not assigned. The report can be found here: UNDP Kyrgyzstan Renewable Energy.
7. MDPI. (2022). Optimization of Tilt Angle for PV Panels in Mountainous Regions. Energies, 15(6), 2102. https://doi.org/10.3390/en15062102
8. Comparative Performance Analysis of South vs East-West Facing PV Arrays. ResearchGate. (2021). Note: ResearchGate hosts various publications; specific DOIs depend on the original journal. Please refer to the original journal for DOI information.
9. IEA (2023) – World Energy Outlook 2023. DOI: 10.1787/4fdf9eaf-en
10. IRENA (2022) – Renewable Power Generation Costs in 2021. International Renewable Energy Agency. DOI: 10.46830/irena/PGC/2022/06

УДК 551.582

SUSTAINABILITY OF SPRING WATER RESOURCES AND VEGETATION IN SOUTHWEST KYRGYZSTAN UNDER CLIMATE CHANGE PRESSURES

Tagaibekov K., Orunbaev S.Z.
tagaibekov_k@auca.kg
American University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan

This study investigates the effects of climate change on spring water resources and vegetation health in southwestern Kyrgyzstan, a region vulnerable to climate variability. By analyzing seasonal changes in water quality and vegetation dynamics, the research explores how shifts in temperature and precipitation patterns influence the availability of spring water and the health of surrounding ecosystems. The analysis utilizes remote sensing data, field observations, and hydrological modeling to assess the impacts of climatic fluctuations on the physical and chemical properties of spring water, as well as the vitality of local vegetation. The findings indicate a strong correlation between rising temperatures, reduced precipitation, and declines in both water quality and vegetation cover, with implications for local water security and ecosystem sustainability. This study underscores the need for adaptive water resource management strategies in response to climate-induced stresses, particularly in regions dependent on spring-fed water systems. The results are vital for informing policies aimed at preserving water resources and maintaining ecosystem health in the context of ongoing climate change.

Keywords: climate change, spring water resources, vegetation health, water quality, southwestern Kyrgyzstan, remote sensing, climate variability, ecosystem sustainability, water security.

1. Introduction.

Southwest Kyrgyzstan, particularly the regions of Osh, Jalal-Abad, and Batken, is characterized by rugged mountainous terrain, deep valleys, and a semi-arid to continental climate. The region is part of the Tian Shan mountain range, where snowmelt and precipitation contribute significantly to water resources. The Fergana Valley, a fertile agricultural region, lies partially within this area, making water resources critical for both drinking and irrigation purposes. Several major rivers, including the Naryn and Kara-Darya, traverse the region and form a part of the Syr Darya River basin, one of Central Asia's most important water systems.

Spring water sources in this region emerge from underground aquifers, replenished by seasonal snowmelt and precipitation. Due to the region's elevation and complex hydrological networks, these springs play a crucial role in rural drinking water supplies and agricultural irrigation. Water resources are unevenly distributed across the districts, and seasonal flow variations lead to periodic shortages. Springs, which many communities rely on for both drinking and irrigation, are susceptible to drying up, particularly during the late summer and early autumn.

The study region's shared water resources with neighboring countries, Uzbekistan and Tajikistan, add a layer of complexity, as disputes over water access occasionally arise. Limited cooperative management of transboundary rivers and springs increases local competition for water, which can disrupt agricultural and domestic water supplies.

Economic Situation and Water Supply Issues

Kyrgyzstan is classified as a lower-middle-income country, with agriculture forming a significant part of the economy. In Southwest Kyrgyzstan, many communities depend on subsistence farming, livestock rearing, and small-scale agriculture. The region's economic stability is highly dependent on water availability, as it directly affects irrigation for crops such as fruits (mainly apricots), rice, vegetables, and other grain crops. Water supply challenges in the region include:

Limited infrastructure: Many villages lack centralized water supply systems and rely on unregulated spring water sources.

Seasonal fluctuations: Water availability varies with glacier melt and precipitation, leading to shortages in dry months.

Pollution and contamination: Agricultural runoff, poor sanitation contribute to water quality degradation, posing risks for human health and ecosystem balance. Industrial wastewater is one of the risks, because of the mining activities, which are vastly present in the Batken region (antimony, mercury, quartz, coal).

Agriculture is the backbone of the local economy, yet inefficient irrigation practices often lead to high water wastage. Traditional methods, like surface irrigation, contribute to the overuse of available spring water, putting additional pressure on limited resources. Moreover, ensuring safe and sufficient drinking water is critical not only for public health but also for overall economic stability, as waterborne illnesses can lead to reduced productivity and higher healthcare costs. Addressing water scarcity and improving water quality in these regions is essential to support both smallholder farmers and local communities. Despite governmental and international efforts to improve water management, the country faces constraints in funding, monitoring, and implementing sustainable solutions for water security.

Climate Change Influence on Water Quality and Vegetation Health

Changing climate patterns are beginning to impact water resources in Southwest Kyrgyzstan, with observable shifts in precipitation timing and reduced snowpack, which historically provided natural water storage in the mountains. These changes lead to decreased spring flow and variability in water availability, further straining agricultural productivity and drinking water supplies. The Batken region, in particular, has experienced noticeable climate shifts, including:

- Rising temperatures: Over the past few decades, temperatures have increased by approximately 0.8–1.2°C, accelerating glacial melt and altering seasonal water availability.
- Decreasing snow cover: Less snowfall in winter affects spring recharge rates, leading to lower water tables and diminishing spring water output.
- Irregular precipitation: Rainfall patterns have become less predictable, with prolonged dry periods and sudden extreme precipitation events increasing soil erosion and sedimentation in water sources.
- Vegetation stress: Changes in temperature and water availability affect plant growth cycles, reducing agricultural yields and altering the composition of natural vegetation. Drought stress leads to lower plant cover, further exacerbating soil degradation and desertification risks.
- Water contamination risks: Higher temperatures and changing hydrological patterns increase the risk of microbial contamination in springs, affecting both human and ecological health.

These climate-induced challenges disrupt traditional water usage patterns and threaten both food security and biodiversity in Southwest Kyrgyzstan. Understanding how spring water quality interacts with vegetation health under these changing conditions is essential for sustainable water management and ecological resilience.

Literature review. Access to safe and clean water is a rising issue in Kyrgyzstan. According to the article by Shatmanov et al. [1] 90% of the water systems use underground water resources, including springs. Batken region has one of the highest percentage (61%) of population with access to drinking water, however it also has the lowest share of centralized water supply. The article also stresses the poor condition of water treatment facilities or the absence of them in many province towns. Lack of treatment can cause spread of waterborne illnesses, underground and surface water contamination. The highest incidence rate with intestinal infections was registered in Batken region - 980 out of 100 000 population. This paper shows the importance of current research, drawing attention to springs water quality.

The vulnerability of water systems is further intensified by climate change, which alters the regional water balance and vegetation patterns. Remote sensing tools, particularly Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), have proven valuable in quantifying climate-induced environmental stress. For example, studies [2, 3] confirm that NDVI correlates strongly with vegetation health and soil moisture, making it a critical tool for monitoring drought conditions and ecological change.

There are many studies proving the effect of climate change on greenery, such as Chapter 17 of the volume Water Resource Management in Central Asia and Afghanistan [4], which demonstrates the effective use of remote sensing techniques to monitor vegetation dynamics across the Amu Darya River Basin. Utilizing the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from satellite imagery, the authors employed Google Earth Engine (GEE) to process and analyze large-scale temporal data. Similarly, Jamali et al. [5] showed that persistent NDVI anomalies in Central Asian foothills correspond with snowmelt changes and upstream flow reductions, thus affecting both irrigation and natural ecosystems.

Another key challenge is the management of transboundary water resources. As described in [6], the legacy of Soviet-era infrastructure and fragmented governance systems in Central Asia create complications in water distribution during low-flow years, which are becoming more frequent due to climate-induced hydrological changes.

Recent global assessments have also highlighted Central Asia as a climate risk hotspot. The IPCC Sixth Assessment Report (2021) identified the region as prone to warming trends above the global average, particularly affecting mountain-fed rivers critical to agriculture and drinking supply [7].

Furthermore, vegetation stress indicators derived from MODIS and Landsat imagery are increasingly used to monitor land degradation. For example, Zhou et al. [8] applied NDVI trends to assess desertification risk in Kazakhstan and Kyrgyzstan, identifying hotspots near over-irrigated croplands and dried-up river channels.

Collectively, these studies underscore the utility of satellite-based monitoring and multi-year NDVI data to assess climate impacts on both water availability and vegetation health in mountainous Central Asia. This approach forms the basis for building climate-resilient water management strategies, especially for rural communities dependent on springs and small reservoirs.

2. Data and Methodology

The Batken Region, located in southwestern Kyrgyzstan, is one of the country's most arid and agriculturally dependent areas. It shares borders with Tajikistan and Uzbekistan, and its rugged terrain is characterized by mountains, valleys, and sparse vegetation. Administratively, Batken Region is divided into three main districts: Batken, Leilek, and Kadamjay. Each district has a unique combination of geographic and climatic characteristics, yet they all face similar challenges related to water availability and management.

Sentinel Data

This study utilizes NDVI values derived from the Sentinel-2 satellite, which is part of the Copernicus Programme – an Earth observation initiative led by the European Union. With a spatial resolution of 10 to 60 meters and a revisit time of 5 days, Sentinel-2 is particularly well-suited for monitoring vegetation cover, crop condition, deforestation, and land degradation.

NDVI is a widely used remote sensing indicator that quantifies photosynthetic activity and green vegetation density by comparing the reflectance of red and near-infrared (NIR) wavelengths. It is calculated using the equation (1):

$$NDVI = ((NIR-Red))/((NIR+Red)) \quad (1)$$

Healthy vegetation strongly absorbs red light for photosynthesis and reflects near-infrared light; thus, NDVI values range from –1 to +1:

- Values near +1 (e.g., 0.7 - 0.9) indicate dense, healthy vegetation, typical for rainforest.
- Values around 0.3 to 0.6 suggest sparse or stressed vegetation, often seen in semi-arid or degraded areas.
- Values near zero or negative represent barren surfaces, water bodies, snow, or non-vegetated land.

Analysis of Climate variables

To acquire intelligence on climate variables I used the CRU TS data, which is easily accessible online and free of charge. The Climatic Research Unit Time-Series (CRU TS) dataset is one of the most widely used gridded climate datasets for environmental and climate research. It provides high-resolution monthly climate data on a 0.5° × 0.5° latitude-longitude grid across the global land surface,

covering variables such as temperature, precipitation, diurnal temperature fluctuations, cloud cover, and vapor pressure, with data extending from 1901 to near-present.

CRU TS is based primarily on station observations collected from multiple sources, including national meteorological agencies, the World Meteorological Organization (WMO), and the Global Historical Climatology Network (GHCN). However, because global station coverage is uneven, especially in mountainous or remote regions such as Central Asia, the CRU employs a climatological interpolation technique.

3. Results and discussion

The Batken Region experiences a continental arid climate, characterized by hot, dry summers and cold winters. Precipitation is generally low, averaging between 400 to 600 mm annually, though distributed unequally across the region, and is concentrated in the spring and autumn seasons. Summers can be harsh, with temperatures often exceeding 35°C, while winters are relatively cold, with temperatures dropping below -10°C in some areas. This climate pattern poses a significant challenge for water management, as the limited rainfall and high evaporation rates during the growing season exacerbate water scarcity.

The graph in Figure 1 shows how temperature has been rising ubiquitously in all three districts of the region with the same pace. The graph starts rising in the 1970s and the growth accelerates from the 2000s with decreased interannual fluctuations. The peak of temperature is reached in 2023 with values 14.675, 7.47, 15.88 ℃ in Kadamjay, Leilek, and Batken districts respectively. In 2024 the temperature has dropped, however, it cannot be said the trend will continue to go down in the following years.

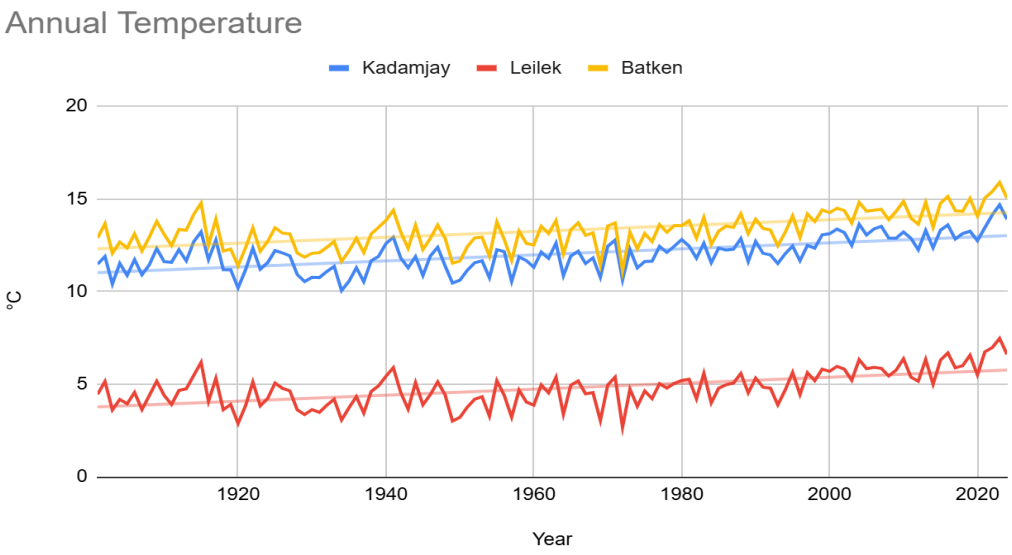


Figure 1 – Annual temperature dynamics by districts for 1901-2024 period

The graph in Figure 2 displays that the situation with precipitations in the region is different from the one with the temperature. The trendline remains stable for the past several decades, suggesting that interannual variability of precipitation has not changed. Regarding the difference between districts, Leilek usually has thrice as much precipitation as Kadamjay and double the amount of Batken's. The last year showed values 356, 1056.8, 520.4 mm in Kadamjay, Leilek, and Batken districts respectively.

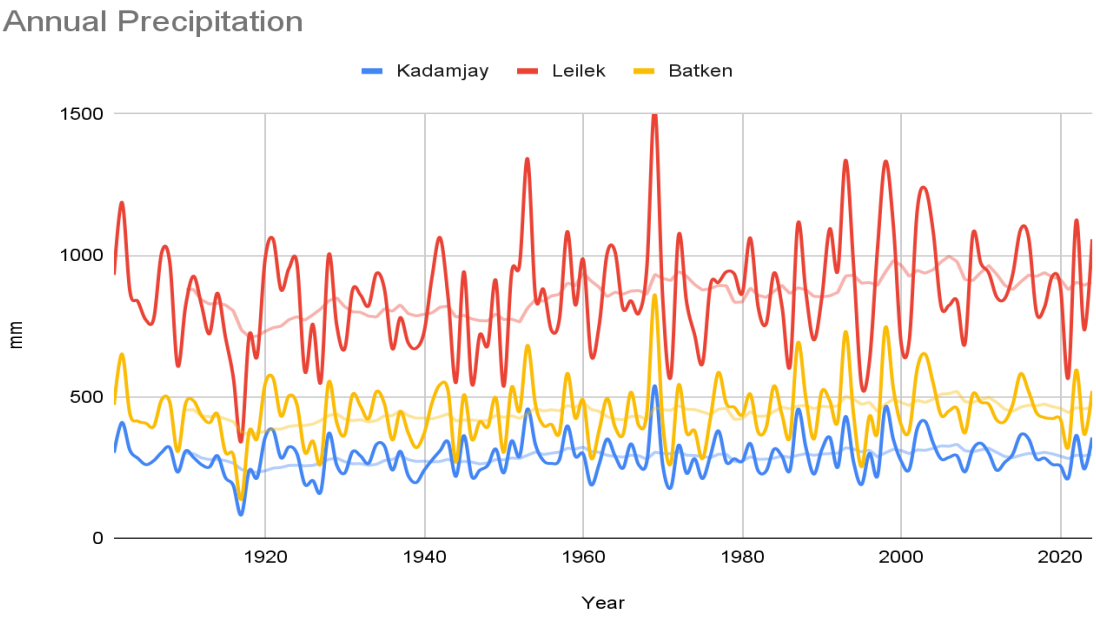


Figure 2 – Annual precipitation dynamics by districts for 1901-2024 period

Vegetation health assessment

Due to the availability of reliable, consistent Sentinel-2 data only from mid-2015 onward, the temporal boundaries of the NDVI analysis in this study are set from 2016 to the present. This time frame allows for the monitoring of recent trends in vegetation health in response to climatic variations and environmental stressors, while ensuring the use of high-quality, cloud-filtered, and atmospherically corrected satellite imagery.

For vegetation health assessment in this study, I used NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). The graph on Figure 3 shows the dynamics of vegetation abundance in the region overall and two districts separately, Kadamjay and Leilek, where the 38 out of 41 sampled springs are located. To be more precise in finding a correlation with climate and water parameters I calculated the values for the circle areas with a radius of approximately 500 meters. Looking at the NDVI layers, I found that this radius allows to include enough surrounding greenery, excluding unnecessary landscape. Since we have only 3 investigated springs in Batken district, I opted not to calculate the index values for this district separately, as it would be not accurate to correlate the data by 3 sample points.

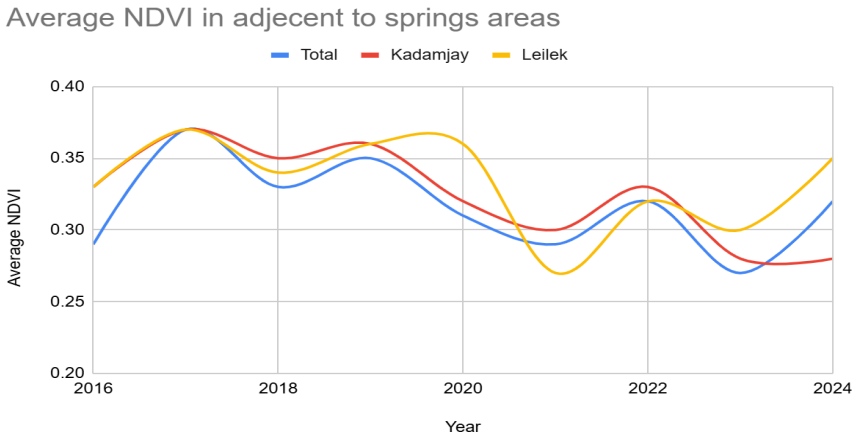


Figure 3 – Average NDVI values around sampled spring areas with radius 500 m for 2016-2024 period

The end of May was selected as the target period for NDVI analysis because it represents the peak of vegetation activity in Southwest Kyrgyzstan. In this region, the combination of spring rainfall, snowmelt, and moderate temperatures results in maximum plant greenness and biomass accumulation during late May (Fig. 4). By choosing this period, the NDVI values most accurately reflect the true vegetation health and density before the onset of summer drought stress. This timing also aligns with the key growing season for both natural vegetation and cultivated areas, making it ideal for assessing the relationship between vegetation vigor, climate variables, and spring water quality. Greenness metrics that characterize vegetation phenology on the curve to show the relationship between NDVI and time of the year (fig.4a), the next figure 4b shows characterization for the past 5 years.

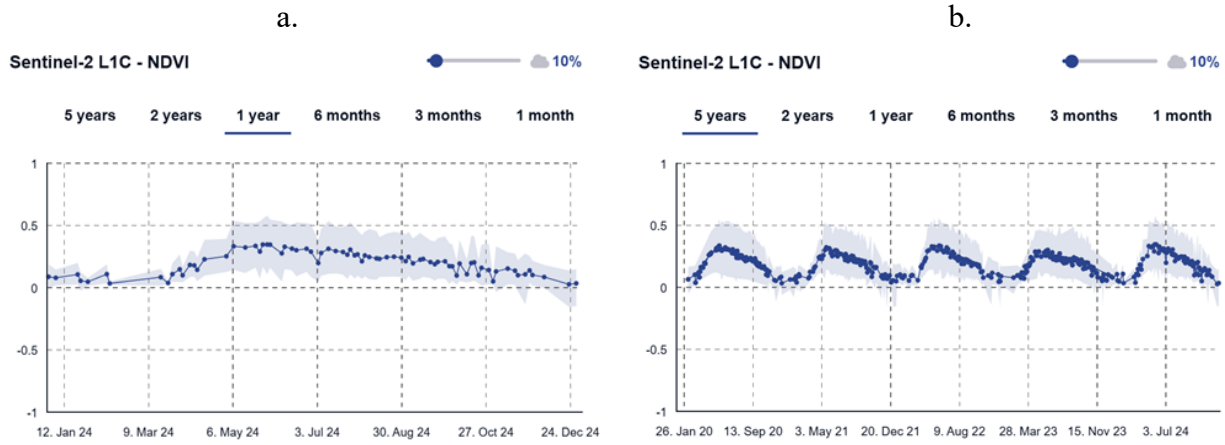


Figure 4 – a (left): The relationship between NDVI and time of the year, b (right): Vegetation phenology curve, NDVI over the past 5 years

Finally, correlation was carried out between Precipitation vs. NDVI and Temperature vs. NDVI for the whole Kadamjay, Leilek and for a total area.

The relationship between NDVI and precipitation was investigated across three spatial zones: Kadamjay, Leilek, and the total study area. Based on the scatter plot analysis, the Total area demonstrates a moderately positive correlation between precipitation and NDVI, as indicated by the upward trend of both the data points and the fitted linear regression line. This suggests that vegetation greenness in the aggregated zone responds positively to increasing precipitation, which is consistent with ecological principles where water availability enhances plant productivity and canopy density. The observed correlation is estimated in the range of $r \approx 0.45–0.55$, indicating a moderate strength of association.

In the Leilek zone, a weak to moderate positive correlation is observed between NDVI and precipitation (Fig. 5a). The scatter shows a slight upward trend, and the fitted regression line supports the presence of a weak linear association. This pattern may reflect a semi-arid agro-ecological system where vegetation is responsive to seasonal rainfall pulses, though other controlling factors such as irrigation or soil texture might moderate the strength of correlation. The correlation coefficient is estimated in the range of $r \approx 0.30–0.40$.

In contrast, the Kadamjay zone shows almost no correlation between NDVI and precipitation. The data points are relatively horizontally aligned, and the regression line is flat, indicating a negligible or non-existent linear association (Fig. 5a). This weak linkage could be attributed to several factors such as limited rainfall variability, dominance of non-vegetated land covers, or a decoupling of vegetation dynamics from short-term precipitation events due to deeper root systems, groundwater dependency, or anthropogenic influences. The estimated correlation coefficient approaches $r \approx 0$.

These regional differences highlight spatial heterogeneity in vegetation-climate interactions. While in some zones precipitation is a primary driver of vegetation variability as captured by NDVI, in others it may play a limited role. Further quantitative verification using Pearson correlation statistics for each zone is recommended, along with complementary analysis such as NDVI versus

temperature, to fully understand the climatic drivers of vegetation patterns in this montane and semi-arid environment.

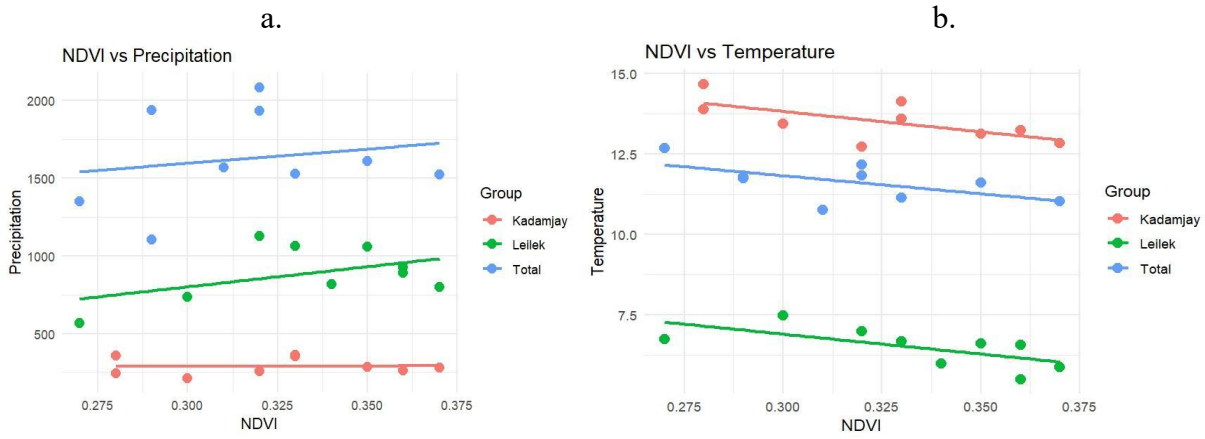


Figure 5 – a (left): Correlation between Precipitation and NDVI, b (right): correlation trend Temperature and NDVI

The correlation analysis between NDVI and temperature reveals a negative linear relationship across all three spatial domains Kadamjay Leilek and the total study area. The Total group demonstrates a moderately negative correlation as evidenced by the downward slope of the regression line and the clustered distribution of data points This suggests that as NDVI increases temperature tends to decrease indicating that vegetated surfaces associated with higher NDVI values are cooler due to evapotranspiration and surface shading effects. The estimated Pearson correlation coefficient is approximately $r \approx -0.45$ to -0.50 indicating a moderate inverse relationship at the aggregated level.

In the Leilek region a more pronounced negative correlation is observed with a steeper downward trend in the data. The relationship suggests that vegetated areas in Leilek not only exhibit higher NDVI but also maintain lower land surface temperatures likely due to effective vegetation cover and cooler microclimates possibly facilitated by irrigation or denser vegetation canopy. The estimated correlation coefficient lies in the range of $r \approx -0.50$ to -0.60 supporting a stronger inverse association compared to the total area.

In contrast Kadamjay shows a relatively weaker negative correlation. The regression line is slightly negative but not steep indicating, that temperature does not vary substantially with changes in NDVI within this zone. The limited correlation may be due to sparse vegetation or the dominance of surfaces that retain heat regardless of NDVI such as rocky terrain urban areas or low vegetation types. The correlation coefficient is likely in the range of $r \approx -0.20$ to -0.30.

These findings underscore that temperature and NDVI exhibit an inverse relationship across the study area, but the strength and ecological interpretation vary with land cover vegetation type and elevation. The stronger inverse relationship in Leilek may point to higher ecological sensitivity of vegetation to climate dynamics while the weaker relationship in Kadamjay suggests either climatic buffering or reduced vegetation-climate feedbacks across that terrain. Further quantitative validation with Pearson's *r* values and time-series analysis may enhance the interpretation of vegetation-climate interactions in this mountainous and semi-arid setting.

In the next analysis, Pearson's method is used to evaluate correlations between NDVI values and several water quality indicators, namely turbidity (FTU) and total dissolved solids (TDS). The analysis showed a slightly negative correlation between NDVI and TDS (Total Dissolved Solids) across the study area, indicating that areas with healthier vegetation tend to be associated with lower concentrations of dissolved minerals in spring water ($r \approx -0.27$). Notably, the correlation analysis revealed a strong positive relationship between NDVI and FTU (Formazin Turbidity Units), indicating that areas with healthier, denser vegetation tend to exhibit higher turbidity levels in spring

water ($r \approx 0.45$). These mixed results highlight the complexity of vegetation-water interactions, especially in semi-arid, mountainous landscapes (Figure 6).

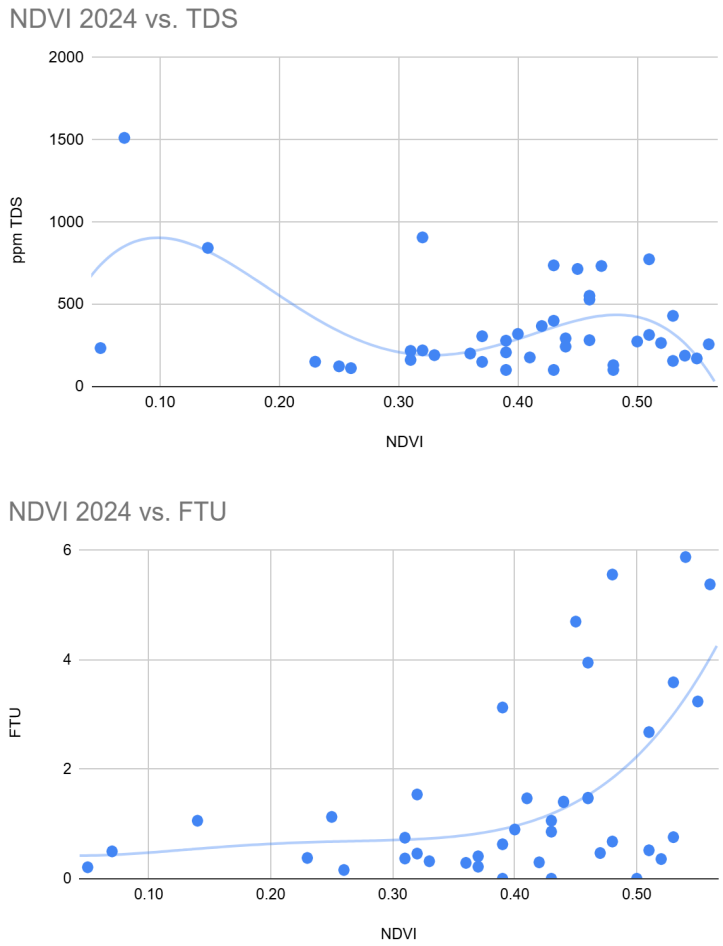


Figure 6 – Pearson correlation between NDVI and measured springs' TDS (left) and FTU (right) with polynomial regression line

4. Conclusion

The correlation analysis between NDVI, precipitation, and temperature across Kadamjay, Leilek, and the total area reveals distinct spatial patterns in vegetation-climate interactions. A positive correlation between NDVI and precipitation was observed in the Total area and Leilek, indicating that vegetation activity in these zones is sensitive to rainfall availability. In particular, the Leilek region showed a moderately positive response of NDVI to precipitation, reflecting the eco-hydrological dependence of vegetation on moisture input, possibly underpinned by seasonal precipitation dynamics and active agricultural practices.

Conversely, the NDVI-precipitation relationship in Kadamjay was negligible, suggesting that vegetation greenness in this region is either less responsive to rainfall or influenced by other dominant environmental factors such as soil composition, topographic exposure, or non-precipitation water sources like groundwater.

In terms of NDVI-temperature relationships, all regions exhibited a negative correlation, consistent with established land surface cooling effects associated with vegetated cover. The strongest negative correlation appeared in Leilek, suggesting that increased vegetation cover significantly reduces local temperatures, likely due to evapotranspiration and higher leaf area indices. Kadamjay again showed the weakest response, reinforcing the idea that vegetation cover in this region is limited or behaves differently in relation to climatic forcing.

A slightly negative relationship between NDVI and TDS supported the hypothesis that healthier vegetation can contribute to improved water quality by reducing mineral runoff. However, the study also uncovered a strong positive correlation between NDVI and turbidity (FTU) — an

unexpected result that contrasts with the common assumption that denser vegetation always reduces sediment input.

Overall, the results highlight regional heterogeneity in NDVI responses to climatic variables, and more complex interconnection of vegetation with water quality. These findings provide a basis for targeted vegetation management and climate-resilient land use planning, especially in the context of growing climate variability across mountainous Central Asia.

Given the limited temporal water sampling and absence of detailed land cover classification, the results are preliminary and warrant further investigation. Future studies should include multi-seasonal water monitoring, spring discharge measurements, and a more detailed analysis of vegetation type and land use function. These improvements will allow for more accurate and actionable conclusions.

References

1. Shatmanov A., Toktosunov A., Umetaliev A., Imanalieva A. Analysis of rural water supply systems in Kyrgyzstan: Quality, accessibility, and health risks // Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development. 2023. 13(1). P. 45–58. https://doi.org/10.2166/washdev.2023.012.
2. Li Z., Chen Y., Liu J., Li W. Monitoring vegetation response to climate variability in arid Central Asia using NDVI // Remote Sensing, 2020. 12(6), 973. https://doi.org/10.3390/rs12060973.
3. Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. 8(2). P. 127–150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.
4. Kulenbekov Z., Asanov A. Remote Sensing-Based Vegetation Monitoring under Climate Change in the Amu Darya Basin // Water Resource Management in Central Asia and Afghanistan / A.K. Biswas & C. Tortajada (Eds.). Springer. 2021. P. 255–270. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71533-9_17.
5. Jamali S., Troemel S., Kunstmann H. Spatio-temporal analysis of vegetation dynamics in Central Asia using MODIS NDVI and climate data // Environmental Research Letters. 2021. 16(4). 045002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe74a.
6. Abdullaev I., Rakhmatullaev S. Transformation of water management in Central Asia: From state-centric, hydraulic mission to market-oriented policies // Environmental Earth Sciences. 2014. 73(2). 849–861. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2879-9.
7. Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., et al. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Cambridge University Press. 2022. https://doi.org/10.1017/9781009325844.
8. Zhou L., Chen X., Wang Y. Spatiotemporal dynamics and driving forces of land degradation in Central Asia using NDVI // Sustainability. 2021. 13(18). 10198. https://doi.org/10.3390/su131810198.

УДК 550.34.06.013.24

ИЗУЧЕНИЕ РЕШЕНИЙ ПО ПОСТРОЕНИЮ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Алимов Б.Г., Курбанов Т.С., Артиков Ф.Р.
bahadirka84@gmail.com, timamail1978@gmail.com, farhadbek_uz@mail.com
Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

Механизмы очагов землетрясений играют важную роль в сейсмологии, позволяя анализировать тектонические процессы, прогнозировать сейсмическую опасность и разрабатывать методы инженерной защиты. Одним из ключевых параметров определения механизма очага является полярность первых вступлений продольных волн (Р-волн). В данной статье рассмотрены методы получения и обработки данных по полярности первых вступлений, алгоритмы построения механизмов очагов и их применение в прогнозировании и снижении сейсмических рисков.

Ключевые слова: землетрясение, механизмы очагов землетрясений, тип подвижек, полярности первых вступлений.

Введение. Изучение механизмов очагов землетрясений является одним из главного способа для получения информации о напряженно-деформированном состоянии глубинных частей земной коры и верхней мантии. Данные о напряженном состоянии земных недр используются для решения задач современной геодинамики, сейсмотектоническая деформация горных масс в комплексе с другими геолого-геофизическими параметрами, широко изучается в связи с задачами оценки сейсмической опасности, среднесрочного и долгосрочного прогноза сильных землетрясений.

Для определения механизмов очагов землетрясений применяются несколько основных методик, каждая из которых имеет свои преимущества и ограничения:

1. **Анализ первых вступлений сейсмических волн**. Этот метод основывается на анализе полярности продольных волн (Р-волн), зарегистрированных на сейсмостанциях. Если направление первой волны указывает на сжатие, регистрируется положительная полярность; если на растяжение — отрицательная. Комбинированный анализ таких данных позволяет определить две возможные плоскости разлома [1].

2. **Методы инверсии волновых форм**. Этот подход включает моделирование полной волновой формы, зарегистрированной на сейсмических станциях, и поиск оптимального решения методом инверсии. Такой метод позволяет повысить точность определения механизмов очагов, особенно при анализе сильных землетрясений [2].

3. **Определение моментного тензора**. Этот метод основан на анализе спектров сейсмических волн и позволяет получить детальное описание механизма землетрясения, включая распределение напряжений в очаговой зоне. В отличие от традиционных методов, моментный тензор учитывает более сложные типы деформаций, такие как нестандартные скользящие или обвальные процессы [3].

Механизмы очагов землетрясений классифицируют на три основных типа (рисунок 1):

- **Обратные (thrust-faulting)** – землетрясения в зонах сжатия, где висячее крыло поднимается относительно лежачего. Эти события характерны для субдукционных зон, например, в районе Японии и Алеутских островов [1].
- **Нормальные (normal-faulting)** – землетрясения, возникающие в зонах растяжения, когда висячее крыло разлома опускается относительно лежачего крыла. Подобные события происходят в рифтовых зонах, таких как Восточно-Африканский рифт [2].

• **Сдвиговые (strike-slip)** – землетрясения, возникающие на вертикальных разломах, где движение пород происходит в горизонтальном направлении. Такие события характерны для трансформных границ литосферных плит, например, разлома Сан-Андреас [4].

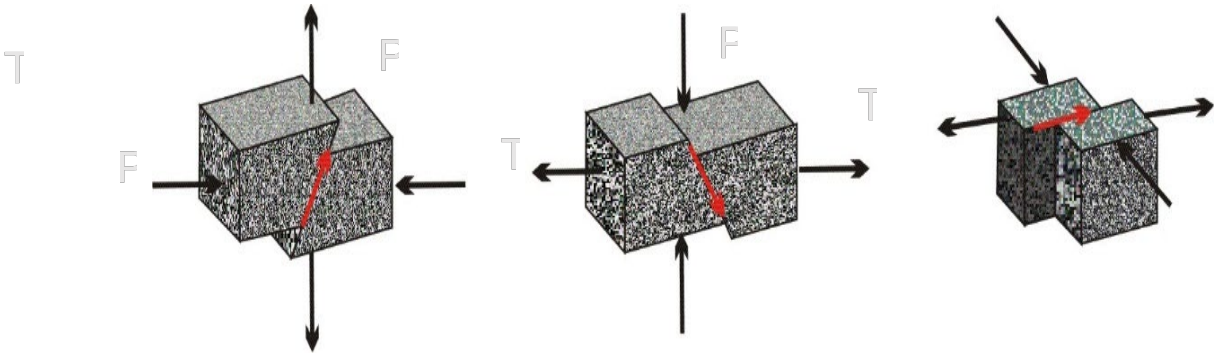


Рисунок 1 – Разделение основных типов подвижек. Слево на право а) взбросовый тип, б) сбросовый тип, в) сдвиговый тип

Определение механизмов очагов землетрясений позволяет (рисунок 2):

• **Реконструировать тектонические напряжения**. Анализ механизмов очагов помогает восстановить текущее состояние напряженности земной коры и выявить зоны потенциально высокой сейсмической активности.

• **Оценить сейсмический риск**. На основе статистического анализа механизмов очагов можно определить зоны повышенной вероятности разрушительных землетрясений и скорректировать сейсмостойкое строительство.

• **Изучить геодинамические процессы**. Анализ сейсмических данных позволяет выявить закономерности взаимодействия литосферных плит и прогнозировать будущие тектонические события.

• **Определить глубину и механизм разрыва**. Использование моментного тензора помогает более точно определить глубинные параметры землетрясения, что критично для прогнозирования последующих афтершоков.

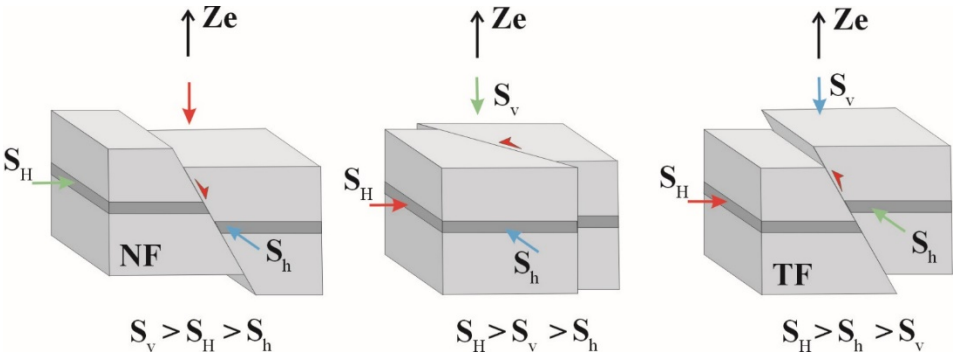


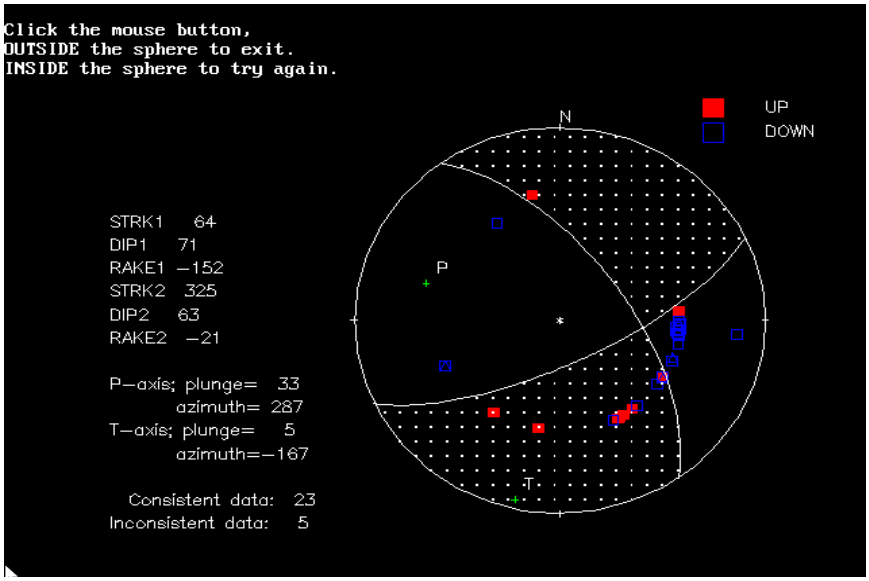
Рисунок 2 – Геодинамические типы напряженного состояния. Слево на право: а) горизонтальное растяжение, б) горизонтальный сдвиг, в) горизонтальное растяжение

Определение и принципы построения. Механизмы очагов землетрясений описывают ориентацию разломных плоскостей и направления движения в них. Они могут быть определены различными методами, включая анализ первых вступлений сейсмических волн, инверсные решения и применение данных моментных тензоров.

Существует несколько подходов к построению механизмов очагов. Рассмотрим один из простейших методов определения МОЗ, по полярности первых вступлений продольных волн P (рисунок 3).

Метод первых прибытии P-волн основан на определении знаков движения в различных сейсмостанциях, что позволяет установить возможные плоскости разлома.

а)



б)

```
EQ Date UTC:    2024-08-02 0539 37.80 ±  1.53
EQ Date Local:  2024-08-02 0539 37.80 ±  1.53
Place:
Magnitude:      MLv 4.9

Longitude:   64.89417  ±    6.261 km
Latitude:    40.60716  ±   32.394 km
Depth:        5.00  ±   11.08 km
 (Constrained)

Arrivals:  11/11              StdDev:  0.245    Sites:    6/6
Nearest:    170.0 km (2821)   Gap:    353.0°    Quality:  P   Accuracy:   F
Run:      wavs   1             Run by: user      Run Date: 2024-08-23 0428 UTC
                              Earth Model: Uzb5

ARRIVAL DATA
Active Arrivals: 11
site  phase     time              wt   calc  residual    dist  travTime  res/tt azim depart   AoI
 2821    eP  0540 02.39 ±  0.1  1.1    2.97     -0.57   169.99   24.59   -2.315  91° -2.83° 87.17°
 4269    eP  0540 03.77 ±  0.1  1.1    3.74      0.03   176.27   25.97    0.098  93° -2.72° 87.28°
 4269    eS  0540 23.29 ±  0.1  1.1   23.46     -0.16   176.27   45.49   -0.352  93° -3.10° 86.90°
 4271    eP  0540 07.17 ±  0.1  1.1    7.09      0.09   203.37   29.37    0.299  96° -2.35° 87.65°
 4271    eS  0540 29.38 ±  0.1  1.1   29.54     -0.15   203.37   51.58   -0.299  96° -2.62° 87.38°
 4273    eP  0540 07.62 ±  0.1  1.1    7.53      0.10   206.90   29.82    0.328  90° -2.30° 87.70°
 4273    eS  0540 30.59 ±  0.1  1.1   30.33      0.26   206.90   52.79    0.501  90° -2.57° 87.43°
 4270    eP  0540 07.91 ±  0.1  1.1    7.59      0.33   207.44   30.11    1.086  92° -2.30° 87.70°
 4270    eS  0540 30.36 ±  0.1  1.1   30.45     -0.08   207.44   52.56   -0.161  92° -2.56° 87.44°
 4268    eP  0540 09.10 ±  0.1  1.1    9.06      0.04   219.35   31.30    0.133  97° -2.17° 87.83°
 4268    eS  0540 33.25 ±  0.1  1.1   33.12      0.14   219.35   55.45    0.251  97° -2.40° 87.60°

MAGNITUDE DATA
MLv              peak(um)     dist
MLv 5.1  2821     10.744      169.99
MLv 4.9  4269      6.267      176.27
MLv 4.7  4271      3.000      203.37
MLv 4.9  4273      4.534      206.90
MLv 4.7  4270      2.888      207.44
MLv 4.9  4268      3.750      219.35
```

Рисунок 3 – Пример обработки землетрясения, произошедшая на территории Узбекистана (дата: 02.08.2024, время по Гринвичу: 05:39:37, Магнитуда Ml=4,7) по методу полярности первых вступлений P волн: а) расчет посроений механизма очагов землетрясений, б) бюллетень события

Для анализа механизмов очагов землетрясений используются международные и национальные каталоги (Таблица 1), такие как GCMT (Global Centroid Moment Tensor) и каталоги локальных сейсмических сетей. Эти данные позволяют отслеживать пространственно-временные изменения сейсмической активности [5]. Интерпретацию полученных данных в контексте регионального тектонического режима [6].

Таблица 1 – Приведение каталога в Международный формат параметров механизма очага землетрясения

Дата	время в очаге (UTC)	координаты		Оси главных напряжений				Нодальные плоскости					
				T		P		NP1			NP2		
		N	E	PL	AZM	PL	AZM	STR1	DP1	SLIP1	STR2	DP2	SLIP2
02.08.24	5:39:37	40.607	64.894	5	-167	33	287	64	71	-152	325	63	-21

По результатам расчетов основных параметров составляются рабочие каталоги землетрясений, для которых планируется определение механизмов очагов землетрясений.

Ориентацию двух нодальных плоскостей (NP1 - первая, NP2 - вторая) характеризуют как азимут простирания (STK), угол падения (DIP).

Азимут простирания плоскости измеряется от направления на север по часовой стрелке до направления простирания, изменяется от 0 до 360 градусов. Угол падения плоскости измеряется от горизонтали вниз до вектора падения плоскости, изменяется от 0 до 90 градусов.

Направление смещения в плоскости разрыва характеризует угол скольжения (SLIP), угол скольжения измеряется от линии простирания плоскости до вектора подвижки, SLIP изменяется от -180 до +180 градусов. Если в очаге взброс значение SLIP положительное, если в очаге сброс значение SLIP отрицательное.

Положение в пространстве трех главных осей напряжений: T – ось растяжения, N – промежуточная, P – ось сжатия. Характеризуют два параметра: PL - угол погружения, AZM - азимут. Азимут измеряется по часовой стрелке от направления на север до оси, $0 \leq AZM \leq 360$ градусов. Угол погружения измеряется от горизонтали до оси, $0 \leq PL \leq 90$ градусов.

Ориентацию двух нодальных плоскостей (NP1 - первая, NP2 - вторая) характеризуют: азимут простирания (STK), угол падения (DIP). Азимут простирания плоскости измеряется от направления на север по часовой стрелке до направления простирания, изменяется от 0 до 360. Угол падения плоскости измеряется от горизонтали вниз до вектора падения плоскости, изменяется от 0 до 90 градусов. Направление смещения в плоскости разрыва характеризует угол скольжения (SLIP), угол скольжения измеряется от линии простирания плоскости до вектора подвижки, SLIP изменяется от -180 до +180 градусов. Если в очаге взброс значение SLIP положительное, если в очаге сброс значение SLIP отрицательное.

Обсуждение результатов. Анализ механизмов очагов землетрясений позволяет не только выявлять закономерности сейсмического процесса, но и сравнивать их с другими геофизическими данными. Совокупный анализ помогает уточнить модели деформации земной коры и прогнозировать потенциальные очаговые зоны сильных землетрясений.

Заключение. Изучение механизмов очагов землетрясений является важной частью сейсмотектонических исследований. Их применение в реконструкции напряженного состояния земной коры, анализе сейсмического режима и оценке динамики землетрясений делает их незаменимым элементом в современной сейсмологии. Современные методы анализа, такие как определения МОЗ по полярностям первых вступлений продольных волн, позволяют точно оценивать параметры разломных процессов и их влияние на сейсмическую активность. Эти знания критически важны для прогнозирования землетрясений и снижения их последствий для общества.

Литература

1. Stein S., Wysession M. An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure / Blackwell. 2003. P. 98–112.
2. Lay T., Wallace T.C. Modern Global Seismology / New York, London: Academic Press. 1995. P. 67–89.
3. Kanamori H., Anderson D.L. Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology // Bulletin of the Seismological Society of America. 1975. 65. P. 1073-1095.
4. Aki K., Richards P.G. Quantitative Seismology. Cambridge University Press. 2002. P. 123–145.
5. Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // Journal of Geophysical Research. 1981. Vol. 86. No. B 4. P. 2825-2852.
6. Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2012. Vol. 200-201. P. 1-9.

УДК 550.34

СОПОСТАВЛЕНИЕ ОЦЕНОК СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Ашуров С.Х.
sarvarashurov1996@gmail.com
Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

Статья посвящена оценке сейсмической опасности в Восточном Узбекистане с использованием разломов земной коры. В качестве исходных данных использована база активных разломов AFEAD [4]. *Рассмотрены два подхода: моделирование разломов как отдельных объектов и их объединение в единые разломные зоны при небольших расстояниях (менее 5 км) между ними. Для каждого разлома определены максимальная магнитуда (Mmax) и частота повторения землетрясений различных магнитуд. С целью учета эпистемических неопределенностей сейсмический потенциал и параметры повторяемости землетрясений рассчитаны на основе нескольких эмпирических зависимостей. Для учета в исследовании также учтена фоновая сейсмичность. В качестве уравнений прогнозируемого движения грунта (GMPE) использованы современные модели для неглубокой активной коры. Типы грунтовых условий учтены через параметр VS30, отражающий скорость прохождения поперечных волн в верхней 30-метровой толще. Анализ показал, что выбор подходов существенно влияет на результаты оценки сейсмической опасности. Предлагается интегрировать оба подхода в рамках логического дерева для повышения точности оценок сейсмической опасности.*

Ключевые слова: активные разломы, сейсмическая опасность, уравнения движения грунта (GMPE), максимальная магнитуда (Mmax), фоновая сейсмичность, грунтовые условия (VS30).

Введение. Разломы играют ключевую роль в оценке сейсмической опасности, так как они являются основными источниками сейсмической активности. В современных исследованиях разломы рассматриваются как источники сейсмической опасности наряду с площадными источниками и сейсмогенными зонами. Ключевым фактором при оценке сейсмического потенциала разломных зон являются линейные размеры тектонического нарушения. Вместе с тем эта длина может быть различной в сейсмотектонических схемах разных авторов. Существует несколько точек зрения относительно «независимости» смежных сегментов активных разломов. В исследованиях одних авторов, например в работе [1], эти сегменты рассматриваются как самостоятельные структуры и, в соответствии с этим, проводится их сейсмологическая параметризация. В исследованиях других авторов, например в работе [2], проводится объединение близко расположенных разломов в единую разломную зону. Как правило, объединение разломов рекомендовано при расстояниях между двумя смежными сегментами менее 5 километров. Естественно, что в этом случае и сейсмический потенциал, и параметры повторяемости землетрясений на разломах будут существенно отличаться от предыдущего случая. В данном исследовании мы провели сопоставление оценок сейсмической опасности при использовании каждого из этих двух подходов.

Методика. Мы использовали базу данных активных разломов Евразии (Active Fault Database of Eurasia - AFEAD) [3]. Для каждого активного разлома в базе данных AFEAD [3] имеются сведения о его морфологии, кинематике с количественными показателями позднечетвертичных смещений (атрибут RATE). По скорости смещения разломы разделены на три ранга: 1-й ранг – более 5 мм/год. 2-й ранг – от 1 до 5 мм/год. 3-й ранг – менее 1 мм/год.

Разломы дифференцированы на четыре класса (A, B, C, D) по степени выраженности (достоверности) проявления современной геодинамической активности – атрибут CONF [4]. В рамках каждого подхода мы рассматривали три различные модели, различающиеся параметром CONF: а) разломы с параметром CONF A, B; б) разломы с параметром CONF A, B, C; в) разломы с параметром CONF A, B, C и D. Для примера приведем только последний вариант.

В первом подходе (рисунок 1) разломы учитываются без изменений на основе атрибута CONF.

Во втором подходе они объединяются (рисунок 2), после чего атрибут RATE (скорость смещения по разлому) усредняется по всей протяженности объединенного разлома.

Для оценки сейсмического потенциала активных разломов, как правило, используются соотношения, основанные на корреляции величины M_{max} с геометрическими характеристиками тектонического нарушения (длина разлома *L*, длина максимального возможного на данном разломе поверхностного разрыва *l,* отвечающая этой длине ширина разрыва *W*, площадь максимального поверхностного разрыва $A = l \cdot W$).

В нашем исследовании расчетное значение величины M_{max} для каждого активного разлома земной коры находилось путем усреднения с равным весом оценок сейсмического потенциала по пяти различным зависимостям, полученным в Hanks, Bakun, 2008 [5]; Leonard, 2010 [6]; Leonard, 2014 [7]; Wells, Coppersmith, 1994 [8], в которых величина M_{max} выражается через длину (*l)* и площадь (*A)* разрыва:

– Leonard, 2010; 2014: $M_{\max} = \lg(A) + 4.19$, (1)

– Leonard, 2010, 2014: $M_{\max} = 1.67 \cdot \lg(l) + 4.32$, (2)

– Hanks, 2008: $M_{\max} = \frac{4}{3} \cdot \lg(A) + 3.07$, (3)

– W&C, 1994: $M_{\max} = 0.9 \cdot \lg(A) + 4.33$, (4)

– W&C, 1994: $M_{\max} = 1.22 \cdot \lg(l) + 5$. (5)

Уточним, что в нашем исследовании предполагалось, что ширина разрыва составляет половину от его длины (W= *l*/2). Сама же длина разрыва *l*, который может образоваться в случае возникновения землетрясения с максимальной магнитудой M_{max}, составляет только определенный процент от всей протяженности разлома *L*.

В первом подходе, когда разломы рассматривались отдельно, длина разрыва принималась равной длине разлома *L=l*.

Во втором подходе соотношение *l/L* было проанализировано на основе работ [9, 10]. На основании экспериментальных данных было показано, что для больших разломов (например, разлом Сан-Андреас в США) это отношение не превосходит значения *l/L* =0.5 [9]. В исследовании [10] было предложено брать отношение *l/L* различным для разломов с разной длиной *L*. По аналогии с данной работой, мы включили в логическое дерево следующие соотношения между длиной разлома L и длиной максимального разрыва в очаге *l*:

- L > 100 км с весами w=0.6 и w=0.4 принимались значения *l*, составляющие 37% и 50% от длины разлома соответственно;
- 50<L <100 км с весами w=0.5 и w=0.5 принимались значения *l*, составляющие 37% и 50% от длины разлома;
- L < 25 км длина разрыва бралась равной длине разлома.

Для оценки среднегодовой повторяемости землетрясений различных магнитуд N*(M)* в модели активных разломов земной коры нами применялись четыре соотношения, полученные в исследованиях [11, 12] и их программная реализация, описанная в [13]. Зависимости [11, 12] различаются между собой характером высвобождения сейсмического

момента M_0, логарифм которого связан с магнитудой землетрясений линейной зависимостью:

$$\log(M_0) = c + dM \quad (6),$$

Значения констант c и d по мировым данным [14] следующие: c = 16.05, d = 1.5.

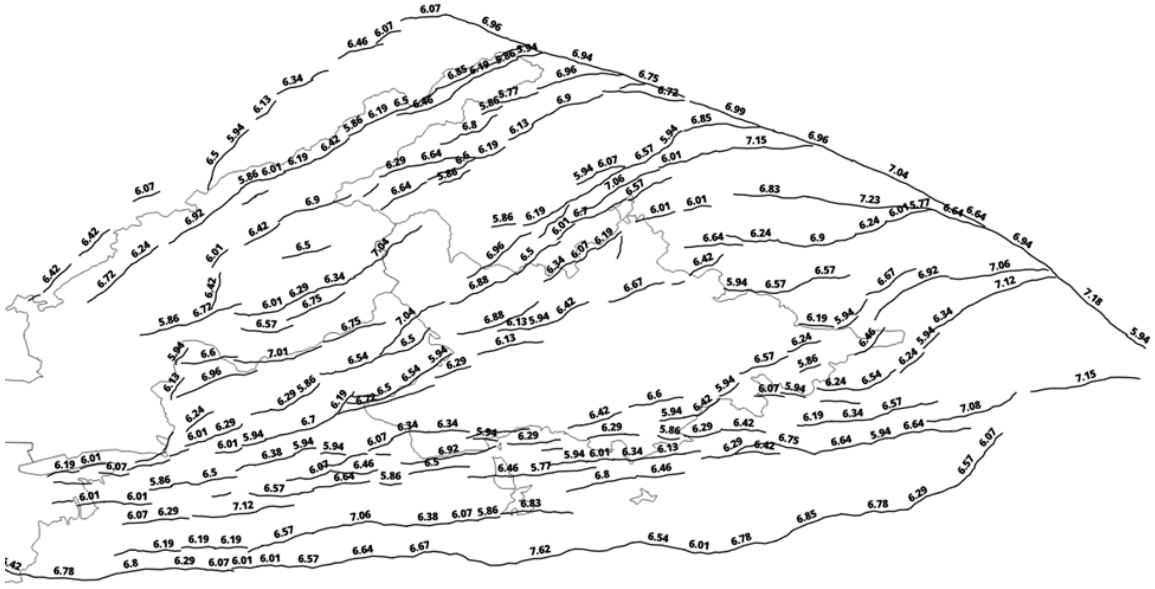


Рисунок 1 – Подход первый. Схемы моделей сейсмических источников в виде активных разломов земной коры (без объединения)

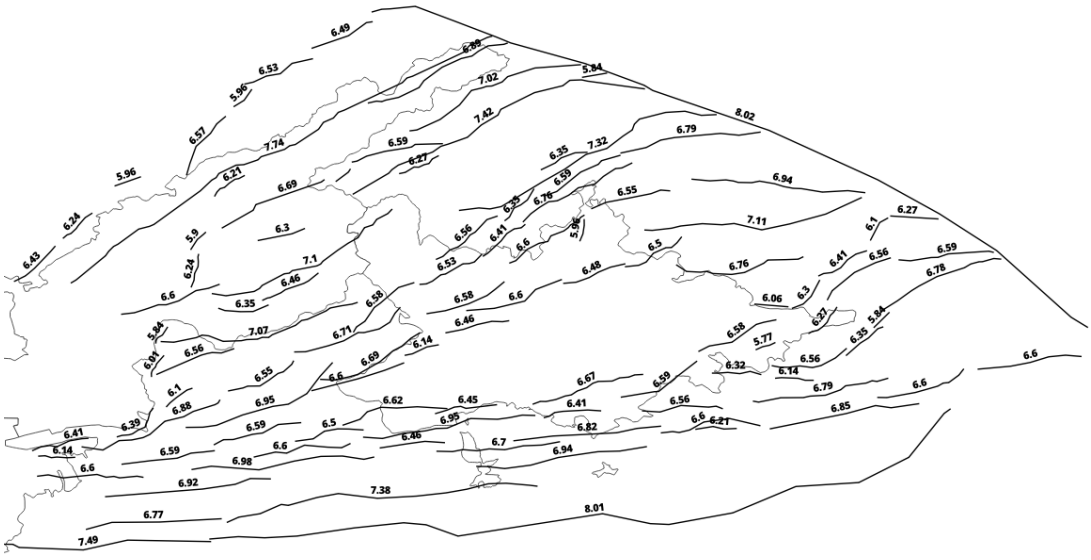


Рисунок 2 – Подход второй. Схемы моделей сейсмических источников в виде активных разломов земной коры (с объединением).

В работе [11] для средней частоты повторения землетрясений различных магнитуд N*(M)* получены три различных соотношения:

$$N_1(M) = \left(\frac{\overline{d} - \overline{b}}{\overline{d}}\right) \cdot \left(\frac{S}{\beta}\right) \cdot e^{\overline{b}(M_{\max} - M)} \cdot e^{-\left(\frac{\overline{d}}{2} M_{\max}\right)}, \quad (7)$$

$$N_2(M) = \left(\frac{\overline{d} - \overline{b}}{\overline{b}}\right) \cdot \left(\frac{S}{\beta}\right) \cdot \left[e^{\overline{b}(M_{\max} - M)} - 1\right] \cdot e^{-\left(\frac{\overline{d}}{2} M_{\max}\right)}, \quad (8)$$

$$N_3(M) = \frac{\bar{d}(\bar{d}-\bar{b})}{\bar{b}} \cdot \left(\frac{S}{\beta}\right) \cdot \left\{\frac{1}{\bar{b}} \cdot \left[e^{\bar{b}(M_{\max}-M)} - 1\right] - (M_{\max} - M)\right\} \cdot e^{-\left(\frac{\bar{d}}{2}M_{\max}\right)} . \quad (9)$$

В формулах (7-9) приняты следующие обозначения:
M – магнитуда землетрясения, для которого оценивается годичная частота возникновения;
$M_{\max}$ – величина максимального возможного землетрясения на разломе;
b – угол наклона графика повторяемости землетрясений в зоне разлома;
$\bar{b} = b\ln(10)$; $\bar{d} = d\ln(10)$;

$\beta = \sqrt{\frac{\alpha M_0(0)}{\mu W}}$; $\mu = 30\ GPa$ – модуль сдвига; D - смещение по разрыву; L – длина разрыва; $\alpha = \frac{D}{L}$; M_0 (0) - сейсмический момент, отвечающий землетрясению с магнитудой $M = 0$.

В более поздней работе [12] для средней частоты повторения землетрясений различных магнитуд N*(M)* получено соотношение:

$$N_4(M) = \frac{\mu A\, S(d-b)\left[1 - e^{-b\ln(10)(M_{\max}-M)}\right]}{bM_0 e^{-b\ln(10)(M_{\max}-M)}} \quad (10)$$

где S - скорость смещения (Slip rate); $A = l \cdot W$ – площадь разрыва.

Значение сейсмической активности N*(M)*, приведенное к магнитуде M=5.0, при расчете сейсмической опасности исследуемой территории находилось как среднее арифметическое по соотношениям (7 –10).

В обоих подходах для каждого разлома приведено значение сейсмического потенциала $M_{\max}$ – в числителе и среднегодовая частота возникновения землетрясения с магнитудой $M \geq 5.0$ – в знаменателе. Значение параметра b – углового коэффициента графика повторяемости землетрясений принималось равным 1 в каждом из подходов рассмотренных моделей разломов, что близко к его региональному значению.

Однако кинематическая модель разломов недостаточно полна, чтобы полностью представлять сейсмическую активность земной коры, особенно события с малой магнитудой. Поэтому в расчетную модель разломов нами был добавлен фоновый слой сейсмичности. Магнитуда землетрясений фонового слоя была лимитирована значением $M_{\max}$=5.0. Считалось, что для событий больших магнитуд плоскости разрыва должны быть классифицированы как разломы, и уже содержаться в базе данных AFEAD по разломам [3].

При сравнении подходов к оценке сейсмической опасности территории Восточного Узбекистана в инженерных показателях сейсмических воздействий в качестве законов затухания мы использовали уравнения прогнозируемого движения грунта (GMPE), полученные на основе записей сильных движений в других сейсмоактивных регионах мира с аналогичным типом земной коры, как в исследуемом регионе. Значительная часть таких уравнений встроена в программный комплекс CRISIS [15].

В исследовании [16] проведена типизация земной коры на основе геологических, геофизических и сейсмологических данных. Согласно этим исследованиям, территория Восточного Узбекистана и его окрестностей характеризуется неглубокой активной корой (active shallow crust). Для коры данного типа мы использовали уравнения прогнозируемого движений грунта из [17-19].

Данные модели разработаны по базе данных PEER NGA-West2 для неглубоких коровых землетрясений и представляют уравнения для средней горизонтальной компоненты пиковых ускорений и спектральных ординат псевдоускорений с 5% затуханием в диапазоне периодов от 0.01 до 10 секунд. В качестве расстояния каждая из трех моделей затухания использует кратчайшее расстояние до плоскости разрыва Rrup. Модели справедливы для диапазона расстояний Rrup = 0 - 300 км и диапазона магнитуд Mw = 3 – 8.5. Грунтовые

условия каждой из этих моделей описываются параметром V_{S30}, характеризующем скорость прохождения поперечных волн в верхнем 30-метровом слое грунтовой толщи.

При оценке сейсмической опасности в инженерных характеристиках сейсмических воздействий дифференциация грунтовых условий проводилась нами через параметр V_{S30}. Для грунтов I, II, и III категории по сейсмическим свойствам, в уравнениях движения грунта мы присваивали значения V_{S30}=750 м/с, V_{S30}=450 м/с и V_{S30}=270 м/с соответственно.

Результаты и обсуждение. Результаты двух подходов существенно различаются из-за влияния двух ключевых параметров: максимальной магнитуды (M_{max}) и годовой частоты повторяемости землетрясений (λ). В первом подходе разломы рассматривались как отдельные сегменты, причём для каждого сегмента были определены свои значения максимальной магнитуды и годовой частоты повторяемости землетрясений. Эти значения оказались ниже, чем при втором подходе, где разломы были объединены. Однако при этом суммарная сейсмическая опасность оказалась выше. Это объясняется тем, что суммарная годовая частота повторяемости землетрясений для отдельных участков ($\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4$) превышает значение λ для объединённого разлома.

Для примера, чтобы сравнить результаты оценки опасности, получаемые в рамках применяемых подходов, ниже приведены результаты только для II категории грунта (V_{S30} =450 м/с). Построения сделаны для вероятностей P=0.90, P=0.95, P=0.98, P=0.99 непревыщения уровня сейсмических воздействий в течение 50 лет.

На рисунках 1 и 2 представлены геометрическая конфигурация модели активных разломов для территории Восточного Узбекистана, основанная на базе данных AFEAD [1, 2]. Цифрами над каждым разломом приведены оценки сейсмического потенциала по формулам [3-6]. Результаты сопоставления оценок сейсмической опасности в крупных населенных пунктах Восточного Узбекистана при различной формализации активных разломов земной коры приведены в таблице 1: I) без объединения разломов; II) с объединением.

Таблица 1 – численные результаты оценок сейсмической опасности по модели активных разломов с параметром CONF A, B, C и D для нескольких крупных населенных пунктов территории Восточного Узбекистана

	PGA (g)							
	Подход 1				Подход 2			
	P=0.9	P=0.95	P=0.98	P=0.99	P=0.9	P=0.95	P=0.98	P=0.99
Ташкент	0.270	0.343	0.435	0.519	0.228	0.296	0.392	0.470
Чирчик	0.291	0.366	0.459	0.547	0.262	0.340	0.432	0.516
Чарвак	0.282	0.357	0.443	0.527	0.254	0.326	0.419	0.497
Алмалык	0.318	0.387	0.482	0.572	0.271	0.345	0.431	0.510
Ангрен	0.340	0.408	0.514	0.613	0.282	0.360	0.455	0.547
Бекабад	0.303	0.373	0.467	0.552	0.291	0.368	0.464	0.559
Андижан	0.235	0.290	0.378	0.438	0.213	0.260	0.346	0.406
Наманган	0.255	0.331	0.422	0.506	0.246	0.316	0.405	0.486
Фергана	0.336	0.404	0.498	0.589	0.285	0.362	0.453	0.536
Коканд	0.283	0.348	0.431	0.508	0.251	0.314	0.402	0.470
Гулистан	0.143	0.180	0.222	0.261	0.138	0.171	0.219	0.260

Выводы. Сопоставление оценок сейсмической опасности, получаемых в результате применения двух различных подходов к формализации активных разломов, показало, что учет активных разломов без их объединения, дает несколько более высокие значения величин максимальных ускорений колебаний грунта. Различия составляют несколько десятков Gal. Поскольку мы не можем отдать предпочтение одному из этих подходов, целесообразно в дальнейших исследованиях включать каждый из них в логическое дерево.

Литература

1. Poggi V., Parolai S., Silacheva N., Ischuk A., Abdrakhmatov K., Kobuliev Z., Ismailov V., Ibragimov R., Karaev J., Ceresa P., Santulin M., and Bazzurro P. Development of a regional probabilistic seismic hazard model for Central Asia // NHESS. 2025. V. 25. P. 817–842. https://doi.org/10.5194/nhess-25-817-2025.
2. Ищук А.Р., Линдхольм К., Ильясова З.Г., Муродкулов Ш.Я. Вероятностный анализ сейсмической опасности территории Таджикистана // Проблемы сейсмологии. 2022. Т. 4. № 1. С. 29–49.
3. AFEAD. Available from: http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database_map.html (Accessed May 5, 2022).
4. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736. DOI: 10.5800/GT-2017-8-4-0314.
5. Hanks T.C., Bakun W.H. M-logA observations for recent large earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. 2008. V. 98. No. 1. P. 490–494. https://doi.org/10.1785/0120070174.
6. Leonard M. Earthquake Fault Scaling: Self-Consistent Relating of Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release // Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. V. 100. No. 5A. P. 1971–1988.
7. Leonard M. Self-consistent earthquake fault-scaling relations: update and extension to stable continental strike-slip faults // Bulletin of the Seismological Society of America. 2014. V. 104. P. 1971–1988.
8. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 1994. V. 84. No. 4. C. 974–1002.
9. Штейнберг В.В., Пономарева О.Н. О размерах очагов сильных землетрясений // Вопросы инженерной сейсмологии. 1987. Вып. 28. С. 63–72.
10. Nowroozi A. Empirical relations between magnitude and fault parameters for earthquake in Iran // Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. V. 75. No. 5. P. 1327–1338.
11. Anderson J.G., Luco J.E. Consequences of slip rate constants on earthquake occurrence relations // Bulletin of the Seismological Society of America. 1983. V. 73. P. 471–496.
12. Youngs R.R., Coppersmith K.J. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates // Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. V. 75. P. 939–964.
13. Bungum H. Numerical modelling of fault activities // Computers & Geophysics. 2007. V. 33. P. 808–820.
14. Kanamori H., Anderson D.L. Theoretical basis of some earthquake early warning methods // Bulletin of the Seismological Society of America. 1975. V. 65. P. 1–21.
15. Ordaz M., Aguilar A., Arboleda J. CRISIS2007. Program for Computing Seismic Hazard, Institute of Engineering UNAM, Mexico. Available from: http://www.iingen.unam.mx (Last accessed March 31, 2016).
16. Chen Y-S., Weatherill G., Pagani M., Cotton F. A transparent and data-driven global tectonic regionalization model for seismic hazard assessment // Geophys. J. Int. 2018. V. 213. No. 22. P. 1263–1280.
17. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5 % Damped Linear Acceleration Response Spectra // Earthquake Spectra. 2014. V. 30. No. 3. P. 1087–1115.
18. Abrahamson N., Silva W., Kamai R. Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions // Earthquake Spectra. 2014. V. 30. No. 3. P. 1025–1049.
19. Chiou B.S.-J., Youngs R.R. Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra // Earthquake Spectra. 2014. V. 30. No. 3. P. 1117–1153.

УДК 550.343.4(575.3)

НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ТАДЖИКИСТАНА

Ёқубов Ш.А.
yakubov.shokir@mail.ru
Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана,
г. Душанбе, Таджикистан

Первым и самым важным звеном в оценке сейсмической опасности является оценка возможности появления сейсмических воздействий определенной силы на заданной площади в течение заданного интервала времени. Исследования в этой области базируются на комплексном изучении структуры земной коры, современной геодинамики, сейсмотектоники, региональной сейсмичности. Результатом этих исследований является карта сейсмической опасности (карта сейсмического районирования).

Ключевые слова: Таджикистан, сейсмическая опасность, единица ускорения, балл, сейсмическая уязвимость, землетрясение, сейсмический риск, макросейсмика.

В соответствии с современными международными требованиями, на основе карты сейсмической опасности должно быть оценено сейсмическое воздействие в виде двух параметров: интенсивности сотрясения (в баллах или в единицах ускорения) и ее повторяемости; набора спектров реакций в данном пункте от будущих землетрясений, который должен отражать тип грунтовых условий и параметры очаговых зон.

Карты сейсмической опасности (оценка сейсмического воздействия) служат основанием для разработки норм и правил сейсмостойкого строительства, рационального землепользования и долгосрочного государственного социально-экономического планирования, с их помощью оценивается сейсмическая уязвимость народного хозяйства и возможный ущерб от разрушительных последствий сильных землетрясений (сейсмический риск).

Далее под термином «сейсмическая опасность» будем понимать характер проявления сейсмических воздействий от сейсмических колебаний земной поверхности в определённом месте. Существует два подхода к оценке сейсмической опасности: детерминистский и вероятностный.

Используемая в настоящее время оценка сейсмической опасности территории Таджикистана (карта общего сейсмического районирования), построенная с использованием существовавших 40 лет назад методов оценки сейсмической опасности и показывающая величины колебаний земной поверхности в трёх градациях - 7, 8 и 9 баллов по шкале MSK-64 [1] (рисунок 1), уже не отвечает существующим потребностям сейсмостойкого проектирования зданий и сооружений.

Инструментальные данные по сильным движениями на территории Таджикистана и в Центральной Азии, в частности, довольно малочисленны и недостаточны для составления эмпирических уравнений затухания сейсмических колебаний в единицах сейсмических ускорений. В последнее время наблюдается значительный прогресс в этой области в других регионах мира, и многие современные уравнения затухания эмпирически выведены на более или менее достаточном количестве инструментальных данных. Макросейсмические данные не всегда корректны для оценки закономерностей затухания (неравномерное расположение населённых пунктов с типичной застройкой, влияние рельефа и состава пород на интенсивность сотрясений, неполнота и достаточный субъективизм данных и прочее). Выход находят, используя эмпирические уравнения затухания, полученные для аналогичных в геологическом отношении регионов при помощи большого количества инструментальных

записей сейсмических ускорений.

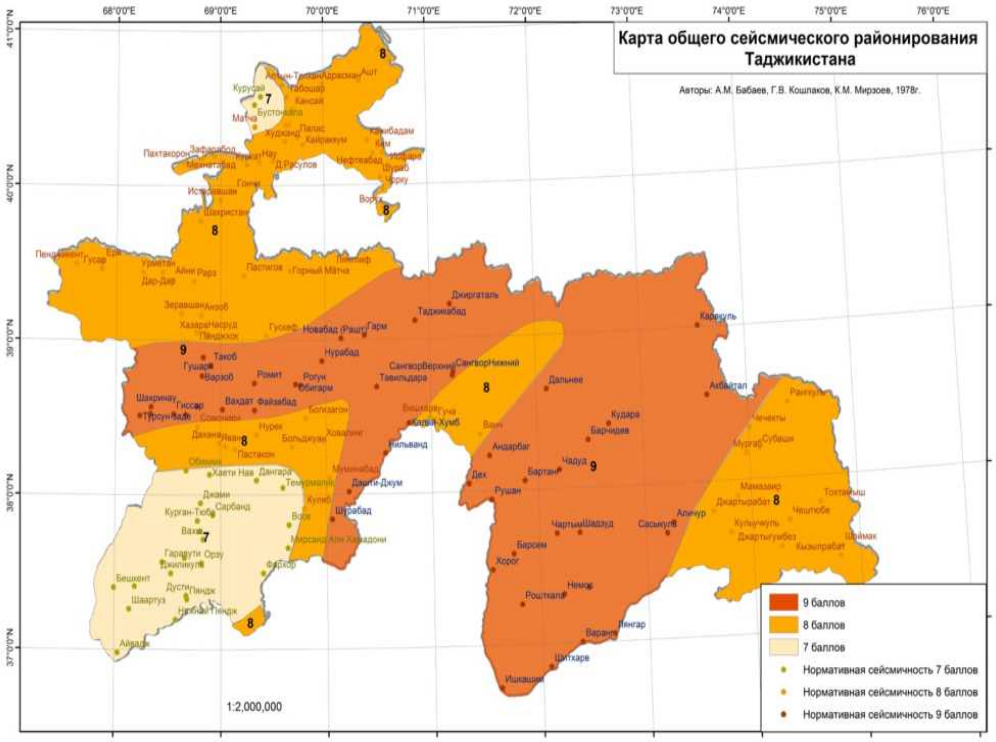


Рисунок 1 – Карта общего сейсмического районирования территории Таджикистана [1]

В 1984г. была составлена карта сейсмогенерирующих зон территории Таджикистана [1] (рисунок 2), но карта сейсмической опасности на её основе в то время так и не была составлена. Основываясь на этой карте, в лаборатории оценки сейсмической опасности Института геологии были составлены две карты сейсмической опасности территории Таджикистана: в значениях пиковых ускорений грунта и в баллах шкалы MSK-64.

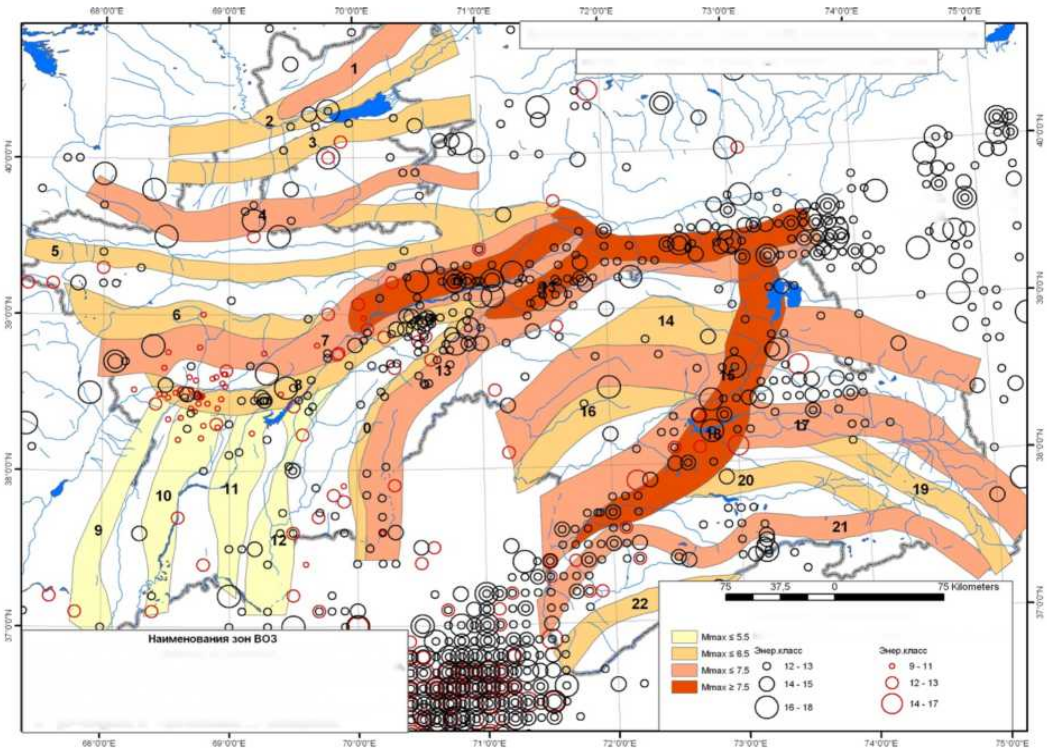


Рисунок 2 – Карта сейсмогенерирующих зон территории Таджикистана [1]

Анализ нескольких эмпирических зависимостей затухания колебаний земной поверхности при землетрясениях, полученных в последние годы, позволил сделать допущение, что наибольшее соответствие условиям Таджикистана имеет формула затухания, предложенная Аккаром и Буммером в 2007 г. (Akkar K. and Bummer J.) для вычисления пиковых ускорений грунта для горизонтальной составляющей сейсмических колебаний [2]:

$$\log 10[PGA] = 4.185 - 0.112M + (-2.963 + 0.29M)\log w\, iRfi + 7.593^2 + + 0.0995_s + 0.025_л - 0{,}03F_N + 0.104F_R \quad (1),$$

где PGA - горизонтальная составляющая сейсмических ускорений в см/сек^2, M -моментная магнитуда, Rjb - ближайшее расстояние от проекции плоскости разрыва на поверхность, S - коэффициент, учитывающий тип грунта (*SS и SA* приняты равными 0) и F - коэффициент, учитывающий тип разлома - $F_N = 0$ для сбросов и $F_R = 1$ для взбросов (принято $F_N = 0$ и $F_R = 1$).

При построении карты сейсмических воздействий для территории Таджикистана были приняты допущения, что сейсмические источники являются линейными с одинаковой вероятностью возникновения землетрясений заданной максимальной магнитуды (для конкретного линейного источника) в каждой точке этого линейного источника (активного сейсмогенерирующего разлома или осевой линии зоны ВОЗ при ее сложном строении).

Было выполнено вычисление распределения значений ускорений в величинах пиковых ускорений грунта PGA (Peak Ground Acceleration) для горизонтальной составляющей. Для этого использовалось программное обеспечение ArcGIS Desktop с модулем Spatial Analyst и уравнение затухания ускорений в функции расстояния от источника.

Суть построения предложенной карты сейсмической опасности в единицах пиковых ускорений грунта (PGA) в следующем.

В соответствии с картой сейсмогенерирующих зон (зон ВОЗ) [3], за линейный источник землетрясений принимался активный разлом или осевая линия зоны ВОЗ с заданной максимально возможной магнитудой землетрясений. Были выбраны следующие значения локальных магнитуд для сейсмогенерирующих разломов: MLH = 5,5; MLH = 6,5; MLH = 7,0; MLH = 7,5 и MLH = 8. Затем были посчитаны зависимости затуханий ускорений от расстояний по формуле (1). При этом, поскольку в формуле (3) используется значение моментной магнитуды Mw, значения локальной магнитуды MLH были пересчитаны в значения Mw по формулам (3, 4):

$$M_s = 0.97MLH + 0.19 \quad (2)$$

$$M_w = 0.67M_s + 2.07 \qquad 3.0 < M_s 6.1 \quad (3)$$

$$M_w = 0.99M_s \qquad 6.2 < M_S < 8.2 \quad (4)$$

Далее, поскольку землетрясение происходит на глубине в зоне разлома, то положение эпицентра на поверхности не совпадает с местом выхода на поверхность этого разлома, показанного на карте. В связи с этим, при выполнении расчётов были приняты следующие допущения:

- углы падения активных разломов, определяющих зоны ВОЗ, изменяются от 50^0 до 70^0, и средняя величина была принята в 60^0;
- средняя глубина гипоцентров землетрясений с магнитудой M = 7-8 составляет 20 км, а для землетрясений с M = 6-6,5 – 15 км (для территории Средней Азии).

Таким образом, положение эпицентров землетрясений с M = 7-8 смещается в сторону падения плоскости разлома на расстояние в 12 км от положения его на поверхности, а для землетрясений с M = 6-6,5 – на расстояние в 9 км.

С учетом этих допущений в ГИС программе ArcGIS Desktop строилась карта проекции на поверхности осевых линий зон сейсмогенерирующих разломов, которая использовалась в дальнейшем для выполнения расчетов [4].

При помощи программы ArcGIS Spatial Analyst рассчитывалось распределение по площади значений пиковых ускорений грунта в зависимости от магнитуды и расстояния от линейного сейсмического источника по формуле (3), т.е. вычислялась матрица значений пиковых ускорений грунта для ячеек с задаваемыми размерами. При помощи этой же

программы строилась карта распределения ускорений по площади.

Результаты вычислений сейсмических воздействий представлены на рисунке 3.в значениях пиковых ускорений грунта. Важно, что карта отражает вклад каждого из линейных источников землетрясений (активных разломов) в вычисляемое значение PGA в каждой ячейке, т.е. представлен интегральный результат, когда учитывается расстояние расчетной ячейки от всех, принимаемых во внимание сейсмогенерирующих разломов с различными значениями максимальных магнитуд и сохраняется максимальное значение ускорения. Это максимально возможные значения пиковых ускорений для скального грунта для максимального рассматриваемого землетрясения (МРЗ) без учета местных грунтовых условий (MCE - Maximum Considered Earthquake). [5]:

Данная карта сейсмической опасности территории Таджикистана является более точной по сравнению с предыдущей картой оценки сейсмической опасности в значениях баллов по шкале MSK- 64 поскольку по ней можно определить значение ускорения в любом задаваемом квадрате на территории Таджикистана.

Детерминистский подход основан на учёте максимального потенциала сейсмического источника, определяемого его геологическими особенностями. При этом, как правило, принимается во внимание один источник с задаваемой максимальной магнитудой и фиксированное расстояние от этого источника до участка, сейсмическое воздействие на котором оценивается.

Следует также отметить, что эта оценка основана на детерминистском подходе и не учитывает многие факторы.

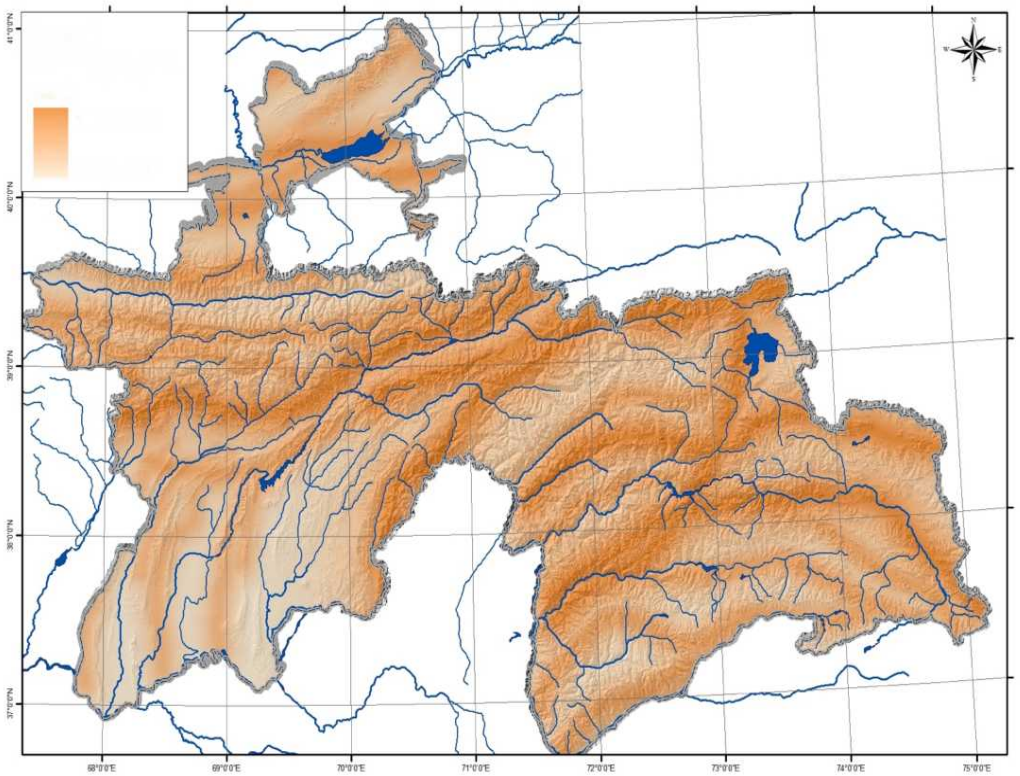


Рисунок 3 – Карта сейсмической опасности территории Таджикистан в единицах пиковых ускорений грунта

Выводы. Используя предложенный способ, значения PGA можно вычислить для ячеек различного размера (500м х 500м; 1км х 1км; 2км х 2км и т.д.), т.е. в программе ArcGIS Desktop по такой карте можно определить значения PGA в любой точке оцениваемой территории. Также возможно вычислить распределение затуханий сейсмических колебаний от единичного эпицентра землетрясения известной магнитуды или от группы эпицентров. Возможно и использование различных уравнений затухания сейсмических колебаний.

Литература

1. Бабаев А.М., Кошлаков Г.В., Мирзоев К.М. Сейсмическое районирование Таджикистана (объяснительная записка). Душанбе: Дониш. 1978. 68 с.
2. Akkar S, Bommer J. Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2007. 36 (10). 1275-1301.
3. Бабаев А.М., Лысков Л.М., Мирзоев К.М, Раджабов Н., Лазариди Л.К. Природные ресурсы Таджикской ССР. Сейсмогенные зоны. Масштаб 1:500000. М.: Изд-е ГУГК СССР. 1984.
4. Bormann P. Magnitude of seismic events, in IASPEI, New Manual of Seismological Observatory Practice. 2002. Vol. 1. Pp. 16-50, ed. Bormann, P., GeoForschungsZentrum, Potsdam.
5. Scordilis, E.M. Empirical Global Relations Converting Ms and mb to Moment Magnitude // J. Seismol. 2006. 10 (2). 225-236.

УДК 550.343.4(574)

НОВАЯ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩАЯ ЗОНА В ДЖУНГАРО-СЕВЕРО-ТЯНЬ-ШАНЬСКОМ РЕГИОНЕ

Ельдеева М.С.[1], Абдрахматов К.Е.[2]
m.eldeeva@seismology.kz, kanab53@yandex.ru
[1] Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований МЧС РК, г. Алматы, Казахстан

[2] Институт сейсмологии НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

Выполнена оценка сейсмогенерирующих зон Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона, сейсмический потенциал которых довольно высок. Например, выявлены зоны возможных генераций землетрясений с различными магнитудами. Проведенные исследования по выделению и изучению зон активных разломов в пределах Восточного Джунгарского Алатау показали, что имеются свидетельства того, что в недавнем прошлом в этом регионе имели место разрушительные землетрясения, что позволяет пересмотреть предыдущие оценки сейсмической опасности.

Ключевые слова: активный разлом, смещение, сейсмогенерирующая зона, магнитуда.

Карта сейсмогенерирующих зон Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона [1] является основой для составления карты сейсмического районирования территории Республики Казахстан. На территории Джунгарского Алатау и прилегающей к ней севернее части Казахской платформы выделяются следующие зоны с соответствующей возможной магнитудой потенциальных эпицентров землетрясений (дана в скобках): 15 – Алатайская (M ≤ 5,5), 16 – Северо- (M ≤ 5,5), – и Южно- (M ≤ 6,5) Колпаковские, 17 – Восточно-Джунгарская, разделенная на три подзоны: – северо-западная (M ≤ 5,5), центральная (M ≤ 6,0), и юго-восточная (M ≤ 7,0), 18 - Западно-Джунгарская с двумя подзонами – (M ≤ 5,5 и M ≤ 6,0), 19 - Саркандская с двумя подзонами – (M ≤ 6,5 и M ≤ 7,0), и 20 – Арасанская (M ≤ 7,0). Ниже дается краткая характеристика некоторых зон, входящих в изученную нами территорию по А.В. Тимушу (2011).

Восточно-Джунгарская сейсмогенерирующая зона ориентирована на северо-запад в соответствии с одноименным разломом [2]. По ряду признаков этот разлом является одновременно глубинным сдвигом и глубинным сбросом [3]. Движения вдоль него возобновлялись неоднократно. Мощность земной коры изменяется в пределах 46-48 км, а толщина активной мантии увеличивается с северо-запада на юго-восток и в районе наибольших новейших поднятий составляет более 10 км. В новейший этап этот разлом разграничивает блоки с разнонаправленными движениями. Максимальная амплитуда вертикальных перемещений (более 3,5 км) отмечается на юго-восточном фланге разлома. Многочисленные складчато-разрывные дислокации четвертичных отложений свидетельствуют о его активности вплоть до голоцена. Часть этих дислокаций имеют несомненно сейсмотектоническое происхождение [3]. В сейсмологическом отношении этот район изучен слабо. Суммарная ИНД вдоль Главного Джунгарского разлома достаточно высока (3,5-5,5 км) и удерживается на этом уровне от горного устья р.Теректы до пересечения с р.Тентек. Весь комплекс данных свидетельствует о том, что отсутствие крупных сейсмических событий здесь временное (исторические сведения практически не исследованы) и максимальная магнитуда землетрясений может достигать на указанном отрезке 7,0. Далее на северо- запад сейсмогенный потенциал быстро снижается и возможная магнитуда оценивается в 6,0-5,5, а затем не более 5,0.

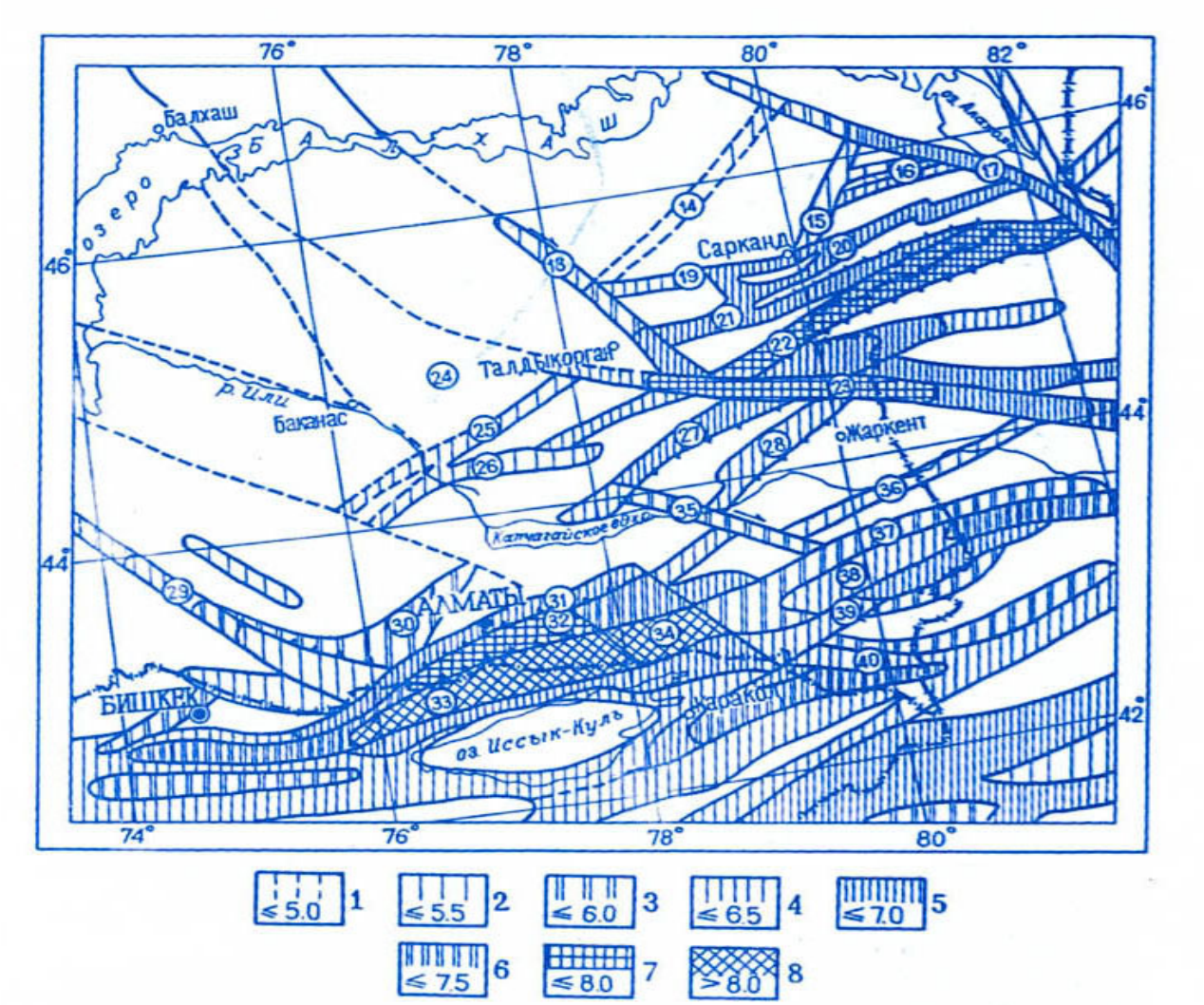


Рисунок 1 – Сейсмогенерирующие зоны Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона [1]:
1-8 – сейсмопотенциал; Названия (цифры в кружках): 14 – Жанабулакская, 15 – Алатайская, 16 – Северо - и Южно-Колпаковская, 17 – Восточно-Джунгарская, 18 – Западно-Джунгарская, 19 – Саркандская, 20 – Арасанская, 21 – Мынчукурская, 22 – Бороталинская, 23 – Южно-Джунгарская, 24 – Баканасская, 25 – Кокшеельская, 26 – Малайсаринская, 27 – Алтынэмелъская, 28 – Конуроленская, 29 – Кендыктасская, 30 – Дегересская, 31 – Алматинская, 32 – Заилийская, 33 – Кеминская, 34 – Северо-Кунгейская, 35 – Калканская, 36 – Дубунская, 37 – Северо-Кетменская, 38 – Централъно-Кетменская, 39 – Басулытауская, 40 – Баянкольская

Саркандская сейсмогенерирующая зона протягивается субширотно по одноименному разлому, ограничивающему Центрально-Джунгарскую мегантиклиналь с севера. Мощность земной коры в этом районе 44-46 км, а активной мантии до 10 км. Восточный фланг сейсмогенерирующей зоны находится над глубинной деструктивной зоной в коре, проникающей до поверхности Мохо. В течение неотектонического этапа вдоль Саркандского разлома произошли значительные перемещения эпигерцинской денудационной поверхности, максимальная амплитуда которых в районе сочленения с Алатайским разломом составляет около 3 км. В районе пересечения его с Акозекским разломом выявлены аномальные дислокации поверхности, которые возможно имеют сейсмотектоническую природу [4-8]. Суммарная ИНД на протяжении всей зоны неодинакова. На отрезке от Алатайского до пересечения с Арасанским разломом она наибольшая (3,5-4,5 км), а западнее уменьшается до 2,9-1,9 км. Все эти данные дают основание предполагать здесь возможность возникновения

землетрясений с максимальной магнитудой до 7,0 на восточном фланге и M= 6,5 - на западном.

Карта сейсмогенерирующих зон изученного нами района с изменениями, внесенными после полученных в результате проведенных исследований, выглядит следующим образом (см. рисунок 2). Как следует из этих данных, появилась новая сейсмогенерирующая зона, названная нами Лепсинской, а сейсмотектонический потенциал некоторых выявленных ранее зон существенно изменился. Северо-Колпаковская зона удалена, поскольку в ее пределах не выявлено ни одного активного разлома и практически отсутствуют сейсмодислокации.

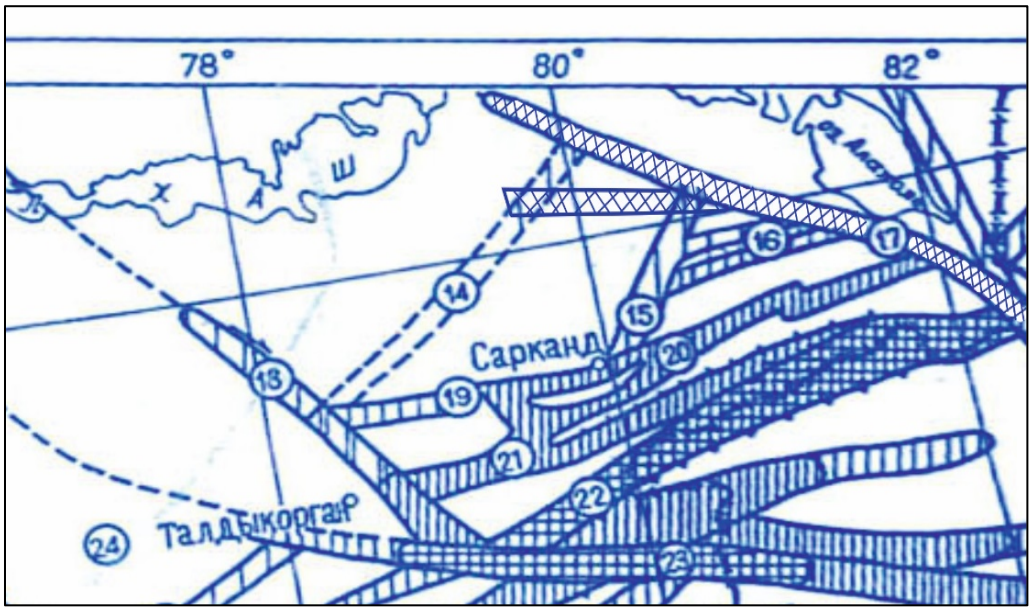


Рисунок 2 – Новая сейсмогенерирующие зоны Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона [1]

Вывод. Указанные изменения приведут к изменению сейсмической опасности Северной Джунгарии в сторону повышения и, соответственно, в сторону повышения расчетов сейсмического риска на указанной территории.

Литература

1. Тимуш А.В. Сейсмотектоника литосферы Казахстана. Алматы. 2011. 590 с.
2. Афоничев Н.А. Новейшая тектоника и рельеф северного склона Джунгарского Алатау // Вопросы географии Казахстана. Алма-Ата. 1960. Вып. 7.
3. Войтович В.С. Природа Джунгарского глубинного разлома. М.: Наука. 1969. 191 с. (Труды ГИН АН СССР. Вып. 183).
4. Курдюков К.В. Современные разломы вдоль подножия Джунгарского Алатау // Природа. 1953. № 12. С. 100-102.
5. Никонов А.А. Голоценовые и современные движения земной коры. Геолого-геоморфологические и сейсмотектонические вопросы. М.: Наука. 1977. 238 с.
6. Трифонов В.Г. Позднечетвертичный тектогенез. М.: Наука. 1983. 224 с. (Труды ГИН АН СССР. Вып. 361).
7. Курскеев А.К., Тимуш А.В. Альпийский тектогенез и сейсмогенные структуры (Джунгаро-Северо-Тянь-Шан. регион). Алма-Ата: Наука. 1987. 179 с.
8. Campbell, G.E., Walker R.T., Abdrakhmatov K., Schwenninger J.L., Jackson J., Elliott J.R., Copley A. The Dzhungarian fault: Late Quaternary tectonics and slip rate of amajor right-lateral strike-slip fault in the northern Tien Shan region // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2013. 118. 5681–5698. doi:10.1002/jgrb.50367.

УДК 550.34.097

ОНЛАЙН-ОПРОС НАСЕЛЕНИЯ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД СБОРА МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

Зверева А.С.
zvereva.as59@gmail.com
Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск, Россия

Разработана анкета-опрос по сбору макросейсмических данных онлайн посредством опроса населения в социальной сети «Вконтакте» и мессенджере «Telegram». Анкета составлена с использованием описательной части сейсмической шкалы ШСИ-17 (МШИЗ-18) на основании двух основных категорий-сенсоров «Люди» и «Предметы быта». Результаты сбора макросейсмических данных трех ощутимых землетрясений в районе г. Сочи показывают возможность использования для анализа макросейсмических данных в регионах с умеренной сейсмичностью и высокой плотностью населения информацию, полученную онлайн способом сбора из социальных сетей и мессенджеров. Предложенный подход для обработки и интерпретации таких данных позволяет получить информацию о балльности по современной шкале сейсмической интенсивности ШСИ-17, принятой в качестве нормативного документы на территории Российской Федерации, и может использоваться для шкалы (МШИЗ-18).Этот метод также может использоваться на территории стран Центральной Азии, особенно для оперативной оценки воздействий сильных землетрясений в труднодоступных для полевых выездов населенных пунктов, а также для землетрясений умеренной силы, при которых полевые выезды финансово нецелесообразны.

Ключевые слова: Северный Кавказ, макросейсмические данные, сейсмичность, шкала сейсмической интенсивности, землетрясение

Введение. В настоящее время, в сейсмически активных регионах России и во многих странах Центральной Азии важной задачей является корректная оценка интенсивности и силы воздействия сейсмических событий на окружающую среду, инфраструктуру и население. Для этого применяются два подхода: первый реализован на основании анализа комплекса сейсмологических данных, а второй– на инструментальных инженерно-сейсмометрических данных. В настоящем исследовании рассматривается первый подход. Сейсмологические данные включают в себя: инструментальные параметры очага, проведение опроса местного населения с помощью специализированных анкет для оценки сейсмических эффектов в зоне землетрясения, а также визуальная экспертная инспекция по выявлению повреждений и разрушений в окрестности очага [1-3].

Задача сбора макросейсмической информации по-прежнему остается актуальной, поскольку макросейсмические данные отражают характер пространственного распределения сейсмических сотрясений на земной поверхности, представленные как в виде непосредственных описаний повреждений и последствий, так и в интегральном виде – в баллах макросейсмической шкалы. Детальные исследования макросейсмических эффектов землетрясений в природной и урбанизированной средах необходимы в работах по оценке сейсмической опасности и сейсмического риска. Накопление эмпирических данных по макросейсмическим эффектам землетрясений позволяет усовершенствовать имеющиеся уравнения макросейсмического поля, повысить их точность и построить модели для малоизученных районов.

Традиционные способы сбора макросейсмической информации, такие как непосредственное полевое обследование, почтовая рассылка опросных листов, телефонные опросы и др. проводились сотрудниками сейсмостанций, в зоне ответственности которых происходило землетрясение [4]. В частности, на территории Западного Кавказа в

Причерноморье продолжительное время такую работу проводили только две станции: «Сочи» (SOC) и «Анапа» (ANN), в штат которых входили сейсмологи, способные провести макросейсмическое обследование с выездом на места или опросом жителей по телефону. В пределах горной территории Северного Кавказа и многих районах Кыргызстана, Таджикистана осуществить оперативные полевые работы по оценке макросейсмического эффекта достаточно сложно: во-первых, большая часть территории – это труднодоступные горные районы; во-вторых, в ходе землетрясений из-за обвалов и оползней некоторые населенные пункты будут временно недоступны; в-третьих, для быстрого реагирования МЧС в случае разрушительного землетрясения необходима информация о последствиях землетрясений в оперативном режиме и, наконец, для землетрясений умеренной силы полевые выезды проводить нецелесообразно из-за больших финансовых издержек.

В настоящее время особенностью современного процесса инструментальных сейсмологических наблюдений является автоматизация сбора данных на всех этапах. Таким образом, возникла необходимость развития новых способов получения макросейсмических данных, в удовлетворяющих современным требованиям. В связи с этим целесообразно применять опыт многих международных сейсмологических центров и отдельных российских центров ФИЦ ЕГС по сбору макросейсмических данных через онлайн-опросы: Европейский Средиземноморский сейсмологический центр (EMSC) [5], NEIC, Геологическая служба США, Национальный центр информации о землетрясениях (USGS NEIS) [6] и отдельные российские центры ФИЦ ЕГС РАН, Северная Осетия (https://sofgsras.ru), Байкал (https://seis-bykl.ru), Камчатка (https://glob.emsd.ru). Массовое развитие сети Интернет во всех сферах позволило организовать проведение сбора информации об ощутимости землетрясения с помощью онлайн-опросов и социальных сетей сотрудниками Центрального отделения ФИЦ ЕГС РАН (Обнинск).

Целью настоящего исследования являлось повышение эффективности сбора макросейсмических данных о землетрясениях на территории Северо-Западного Кавказа. В работе решались следующие задачи:

- разработка анкеты по сбору макросейсмических данных в социальной сети «Вконтакте» и мессенджере «Telegram»;
- анализ возможной применимости данных об ощутимости в населенных пунктах, собранных средствами Интернет и разработка методики их обработки;
- внедрение оценки балльности землетрясений на основании шкалы сейсмической интенсивности ШСИ-17(МШИС-18) [7,8].

Регион исследования.Территория Северо-Западного Кавказа в геолого-тектоническом отношении охватывает восточное Причерноморье, включая Туапсинский прогиб, западную часть Большого Кавказа, Индоло-Кубанскую впадину и западную часть Скифской платформы. Для региона характерна продольная тектоническая зональность и поперечная сегментация. Современный сейсмический мониторинг на территории Северо-Западного Кавказа проводится региональной сетью сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН в непрерывном режиме наблюдений, что позволяет оперативно оценивать параметры землетрясений [9]. На основе палеосейсмологических, геологических и сейсмологических данных установлено, что в южной части региона возможны землетрясения с M=6–7, а в северных и центральных его районах – землетрясения с M=4–5 [10, 11]. В последние годы, по данным регистрации сети ФИЦ ЕГС РАН сейсмических событий широкого спектра магнитуд с $M \geq 1$, наблюдается активизация сейсмичности в Причерноморье и вблизи Краснодара, о чем свидетельствуют серии ощутимых землетрясений в мае 2023 г. и в июле 2024 г. в районе Туапсе, в июне 2023 г. и январе 2024 г. вблизи Краснодара, а также ощутимые землетрясения с эпицентрами около Белореченска в июне 2022 г. и апреле 2024 г. [12-14].

Методика. Сбор макросейсмических данных посредством сети Интернет осуществляется главным образом с помощью интерактивных опросных листов или анкет, размещенных на сайтах сейсмологических агентств [4]. Таким образом, для сбора

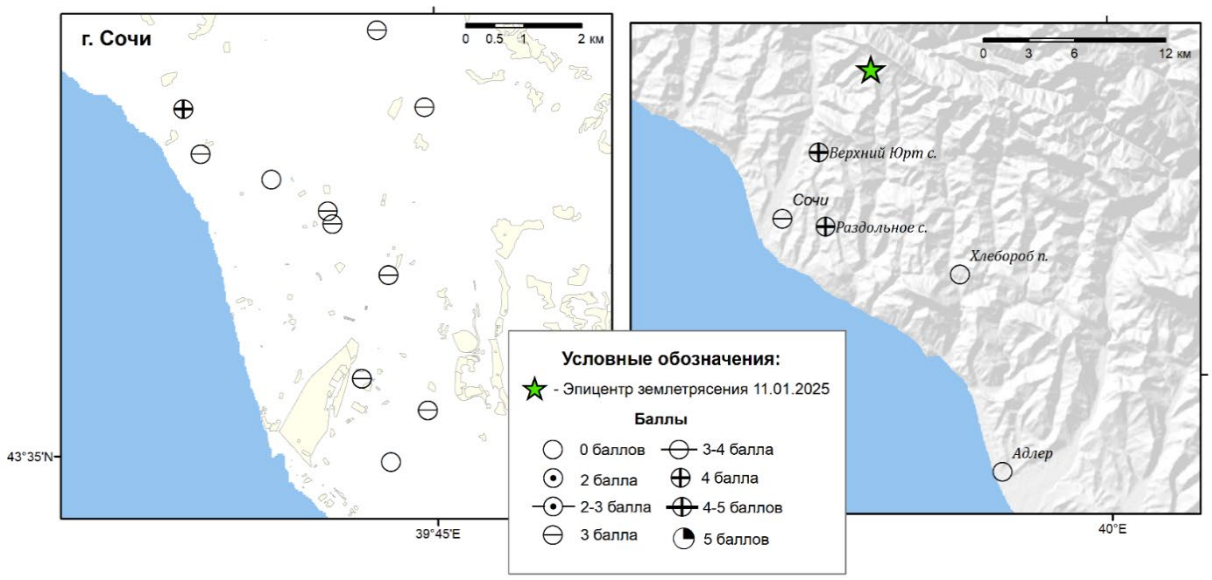
макросейсмических данных на территории Северо-Западного Кавказа была разработана анкета-опросник, основанная на алгоритмах обработки макросейсмических данных на 12-балльных сейсмических шкалах семейства Меркалли. Ранее для территории Северного Кавказа оценка интенсивности осуществлялась по шкале MSK-64 [15], однако с 1 сентября 2017 г. для оценки макросейсмической интенсивности разработана шкала сейсмической интенсивности ШСИ-17, введенная в качестве национального стандарта [7], а затем 20 декабря 2018 г. межгосударственный стандарт [8] – макросейсмическая шкала интенсивности землетрясений МШИЗ-18.

Макросейсмические оценки интенсивности в данных шкалах, такие как описание реакций людей, объектов домашнего обихода, зданий различных классов сейсмостойкости и природных явлений не имеют противоречий и в значительной части просто совпадают [16]. Расхождение наблюдается в инструментальных частях шкал. В шкале MSK-64 используются «эффективные ускорения» и предполагается удвоение амплитуды ускорения при возрастании интенсивности на 1 балл. А в ШСИ-17 и МШИЗ-18 амплитуды ускорений при возрастании интенсивности на один балл увеличиваются в 2.5 раза. Для расчета сейсмостойкости зданий и сооружений статистически обоснованы инструментальные части шкалы ШСИ-17.

Разработанная анкета для сбора макросейсмической информации была составлена с использованием описательной части сейсмической шкалы ШСИ-17 (МШИЗ-18) на основании двух основных категорий-сенсоров «Люди» и «Предметы быта» и содержала в себе информацию о местонахождении наблюдателя в момент землетрясения, этаже, общем количестве этажей, типе здания, о степени воздействия на людей, предметы быта, на другие объекты, на здания и сооружения и т.д. Итоговая оценка интенсивности сотрясений производилась на основе всех макросейсмических данных, собранных для каждого населенного пункта по наблюдавшимся макросейсмическим эффектам без учета возможного влияния инженерно-геологических условий. Итоговые результаты балльности были рассчитаны в двух шкалах ШСИ-17 и MSK-64 для унификации данных с предыдущими макросейсмическими данными и исторических событий.

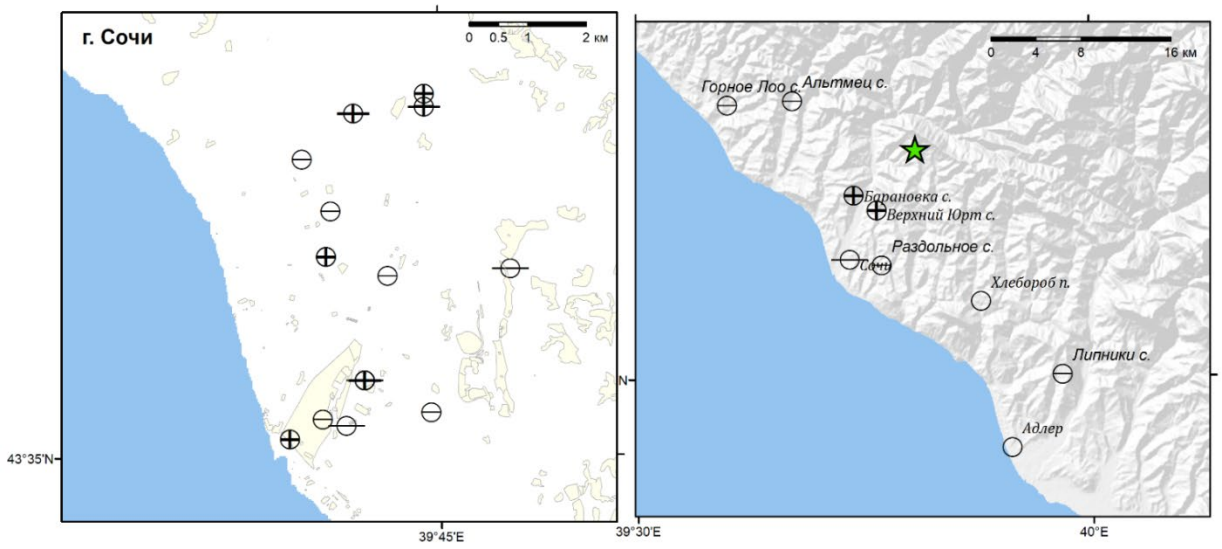
Результаты и обсуждение. Апробация созданной анкеты для сбора макросейсмических данных проводилась на примере трех ощутимых землетрясений, произошедших в январе-феврале 2025 г. в районе г. Сочи. Сбор информации об ощутимости землетрясения от населения проводился путем заполнения онлайн-анкеты, распространение информации о которой проводилось через социальную сеть «Вконтакте» и мессенджер «Telegram». Предварительный анализ данных показал, что землетрясение не вызвало повреждений зданий и каких-либо явлений на грунте, поэтому оценка интенсивности базировалась главным образом на реакции людей и предметов быта.

Проведено макросейсмическое обследование трех землетрясений: 11.01.2025 г. в 01:47 UTC с h=11 км, M_w=3.0; 11.01.2025 г. в 17:43 UTC с h =11 км, M_w =3.2 и 13.02.2025 г. в 12:12 UTC с h=11 км, M_w=4.1, произошедших на расстоянии 11-16 км от г. Сочи [17, 18]. Все перечисленные землетрясения имели макросейсмический эффект в г. Сочи и близлежащих населенных пунктах. На основании полученных данных были рассчитаны средние значения интенсивности в каждом населённом пункте по шкале MSK-64 [15] (рисунки 1-3). Сельские населенные пункты и крупные города по площади и численности населения могут различаться в десятки и сотни раз. Село небольшой площади можно интерпретировать как отдельную точку в пределах макросейсмического поля, но рассматривать таким образом крупный город, территория которого может достигать нескольких сотен квадратных километров, неправильно. Поэтому важной задачей в процессе организации опроса был сбор макросейсмической информации в различных районах г. Сочи.



а ***б***

Рисунок 1 – Карта распределения пунктов-баллов землетрясения 11 января 2025 г. в 01:47 UTC: *а* – на территории г. Сочи, *б* – ближайших населенных пунктов

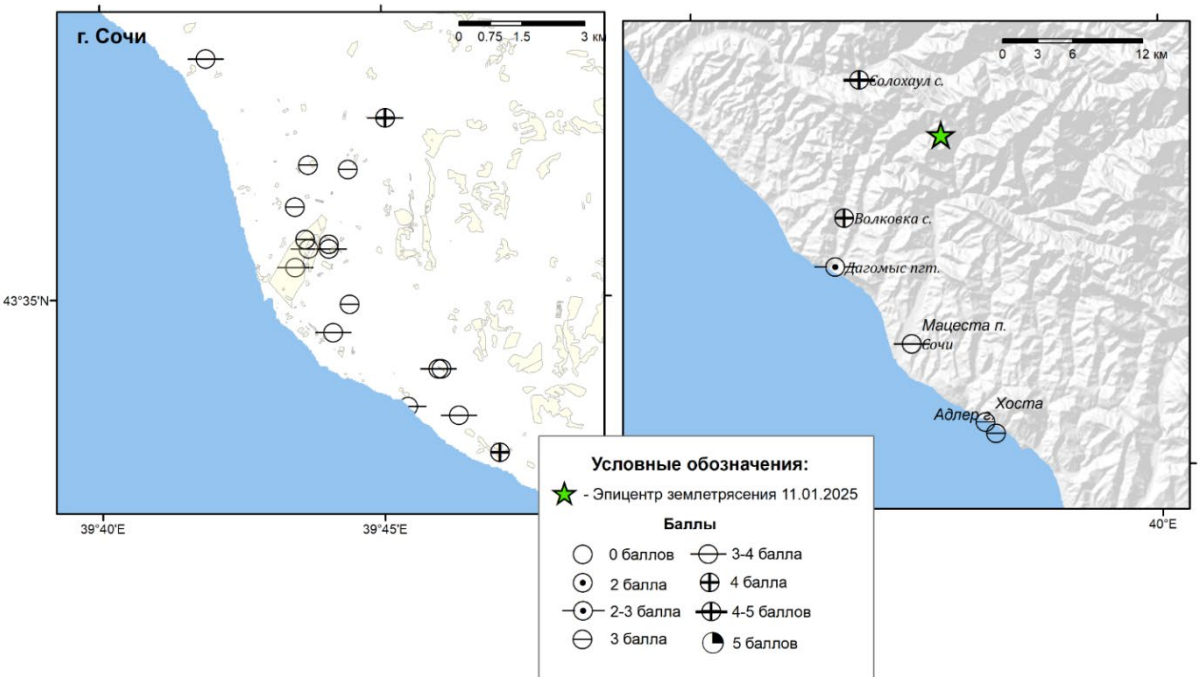


а ***б***

Рисунок 2 – Карта распределения пунктов-баллов землетрясения 11 января 2025 г. в 17:43 UTC: *а* – на территории г. Сочи, *б* – ближайших населенных пунктов

Для землетрясения 11.01.2025 г. в 01:47 собраны макросейсмические данные [17] от 22 респондентов в пяти населённых пунктах: *I*=4 балла Верхний Юрт (7 км) и Раздольное (9 км); *I*=3-4 балла в г. Сочи (11 км); землетрясение не ощущалось в отдельных районах г. Сочи (11 км), п. Хлебороб (15 км) и в г. Адлере (28 км). По шкале ШСИ-17 [7] интенсивность в г. Сочи составила *I*=3.6±0.2 по 58 определениям всех категорий-сенсоров.

Для землетрясения 11.01.2025 в 17:43 собраны макросейсмические данные от 40 респондентов [17] в девяти населённых пунктах: *I*=4 балла в селах Барановка (6 км) и Верхний Юрт (7 км); *I*=3-4 балла в г. Сочи (11 км); *I*=3 балла в селах Раздольное (9 км), Альтмец (13 км), Верхнее Лоо (20 км), Липники (24 км); землетрясение не ощущалось в отдельных районах г. Сочи (11 км), п. Хлебороб (15 км) и в г. Адлере (28 км). В отдельных районах г. Сочи на верхних этажах 5-12-этажных зданий землетрясение ощущалось интенсивностью 4-5 баллов. По шкале ШСИ-17 [7] интенсивность в г. Сочи составила *I*=4.6±0.2 по 56 определениям по всем категориям-сенсорам.



а ***б***

Рисунок 3 – Карта распределения пунктов-баллов землетрясения 13 февраля 2025 г. в 12:12 UTC: *а* – на территории г. Сочи, *б* – ближайших населенных пунктов

Для землетрясения 13.02.2025 в 12:12 собраны макросейсмические данные от 41 респондента [18] в семи населённых пунктах: *I*=4-5 баллов в с. Солохаул (7 км); *I*=4 балла в с. Волковка (12 км); *I*=3-4 балла в г. Сочи (16 км); *I*=3 балла в г. Адлере (40 *км*), поселках Мацесте (23 км) и Хосте (29 км), в некоторых районах г. Сочи (16 км); землетрясение не ощущалось в отдельных районах г. Сочи (11 км), и Адлер (40 км), а также в п. Хлебороб (24 км). По шкале ШСИ-17 [7] интенсивность в г. Сочи составила *I*=4.0±0.06 по 108 определениям по всем категориям-сенсорам.

Заключение. Результаты сбора макросейсмических данных трех ощутимых землетрясений в районе г. Сочи показывают возможность использования для анализа макросейсмических данных в регионах с умеренной сейсмичностью и высокой плотностью населения информацию, полученную онлайн-способом сбора из социальных сетей и мессенджеров. Предложенный подход для обработки и интерпретации таких данных позволяет получить информацию о балльности по современной шкале сейсмической интенсивности ШСИ-17, принятой в качестве нормативного документы на территории Российской Федерации, и может использоваться для шкалы (МШИЗ-18). Также для вовлечения в процесс сбора макросейсмических данных более широких кругов населения необходимо дальнейшее расширение работ по популяризации информации о землетрясениях среди местного населения.

Этот метод также может использоваться на территории стран Центральной Азии, особенно для оперативной оценки воздействий сильных землетрясений в труднодоступных для полевых выездов населенных пунктов, а также для землетрясений умеренной силы, при которых полевые выезды финансово нецелесообразны. Сбор данных по макросейсмических воздействиям позволит ускорить спасательные работы, уменьшить количество жертв, провести уточнение оценки сейсмической опасности региона Центральной Азии.

Литература

1. Шебалин Н.В. Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии) // Магнитное поле Земли: математические методы описания. Проблемы макросейсмики: Сб. науч. тр. М.: ГЕОС. 2003. С. 57-200. (Вычислительная сейсмология. Вып. 34).

2. Татевосян Р. Э. Макросейсмические исследования. М.: Наука и образование. 2013. 383 с.
3. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Сущев С.П., Малаева Н.С. Оценка сейсмического риска на территории Краснодарского края // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50. № 4. С. 36–57. https://doi.org/10.21455/VIS2023.4-3
4. Радзиминович Я.Б., Хритова М.А., Гилёва Н.А. Современные способы получения макросейсмических данных и возможности их применения на территории Восточной Сибири // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 59–74.
5. Euro-Mediterranean Seismological Centre (EMSC). Earthquake contributions [Site]. – URL: https://www.emsc-csem.org/Earthquake_data/ (дата обращения 15.03.2024).
6. National Earthquake Information Center (NEIC). [Site]. – URL: https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/national-earthquake-information-center-neic
7. ГОСТ Р 57546–2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. Введ. 2017-07-19. М.: Стандартинформ. 2017. 32 с.
8. ГОСТ 34511–2018. Межгосударственный стандарт. Землетрясения. Макросейсмическая шкала интенсивности. М.: Стандартинформ, 2019. 28 с.
9. Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Дягилев Р.А., Мехрюшев Д.Ю., Зверева А.С. Оценка регистрационных возможностей сейсмической сети в западной части Северного Кавказа через геометрию сети и локальный уровень микросейсмических шумов // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 3. С. 35–60. doi: 10.21455/si2020.3-3.
10. Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатиков А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН. 2014. 256 с.
11. Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Овсюченко А.Н., Донцова Г.Ю., Кучай М.С., Акимов В.А., Раджендран С.П. Опыт детального сейсмического районирования Северо-Западного Кавказа с учетом результатов палеосейсмогеологических исследований // Предупреждение чрезвычайных ситуаций: Опыт. Реалии. Перспективы. 2019. С. 288-294.
12. Габсатарова И.П., Коломиец Ю.Н., Королецки Л.Н., Адилов А.З., Магомедов Х.Д., Саяпина А.А., Багаева С.С., Походенко В.П., Иванова Л.Е. I. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Северный Кавказ // Землетрясения России в 2022 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2024. С. 23–30.
13. Королецки Л.Н., Габсатарова И.П., Клянчин А.И. Туапсинская активизация в мае 2023 г. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тез. XVII Междунар. сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2023. С. 56. EDN: CLLCMI L.N.
14. Зверева А.С., Клянчин А.И. Землетрясение 24 января 2024 г. в районе г. Краснодара с Mw=4.1, I0=5баллов // Российский сейсмологический журнал. 2024. Т. 6. № 2. С. 70–81. DOI: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.05. EDN: WPLUZT.
15. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР. 1965. 11 с.
16. Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О., Токмулина Г.М. Соотношения баллов различных шкал сейсмической интенсивности // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 3. С. 75-91.
17. Зверева А.С., Клянчин А.И. Дуплет ощутимых землетрясений 11 января 2025 г. в районе г. Сочи // Российский сейсмологический журнал. 2025. Т. 7. № 1. С. 74–80. DOI: 10.35540/2686-7907.2025.1.05. EDN: UTSBSZ.
18. Зверева А.С., Габсатарова И.П., Клянчин А.И. Землетрясение 13 февраля 2025 г. вблизи г. Сочи с Mw=4.1, I0=4–5 баллов // Российский сейсмологический журнал. 2025. Т. 7. № 1. С. 95–102. DOI: 10.35540/2686-7907.2025.1.08. EDN: HUQKFT.

УДК 550.385+550.348

ВЫЗЫВАЮТ ЛИ СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ И МЕЖПЛАНЕТНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ?

Зинкин Д.В., Пилипенко В.А.
zinkin.deniz@yandex.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

В геофизической литературе активно обсуждается возможность триггерного воздействия солнечной активности и связанных с ней возмущений геомагнитного поля на сейсмичность Земли. В частности, популярна идея о солнечных вспышках и межпланетных ударных волнах как триггерах планетарной сейсмической активности. В работе проведена статистическая проверка этих гипотез. Методом наложенных эпох рассмотрена статистика поверхностных землетрясений на освещенной стороне Земли до и после солнечных вспышек и межпланетных ударных волн 2010–2020 гг. в интервале ±2 дня и ±1 час, соответственно. Статистически значимых изменений сейсмичности в рамках наложенных ограничений по глубинам и по локальному времени очага землетрясения не обнаружено. Полученные результаты ставят под сомнение гипотезу о солнечной вспышке или импульсе внезапного начала магнитной бури как возможных триггерах землетрясений.

Ключевые слова: триггеры землетрясений, электромагнитные предвестники землетрясений, солнечные вспышки, межпланетные ударные волны.

Введение: солнечные вспышки и межпланетные ударные волны как триггеры землетрясений. В геофизической литературе активно обсуждается возможность триггерного воздействия солнечной активности и связанных с ней возмущений геомагнитного поля на сейсмичность Земли. Предполагается, что в таких ситуациях, когда накопленное напряжение вдоль сейсмического разлома находится вблизи критического уровня, даже слабое внешнее воздействие может спровоцировать неустойчивость литосферных блоков и служить триггером землетрясения.

При поисках триггерного воздействия сильных вариаций геомагнитного поля на сейсмичность особое внимание обращалось на солнечные вспышки (СВ) и межпланетные ударные волны. После СВ УФ и мягкое рентгеновское излучение за ~10 мин доходят до Земли и дополнительно ионизируют дневную ионосферу. Увеличение ионизации, и соответственно проводимости Е-слоя ионосферы, вызывает появление дополнительных ионосферных токов и возмущений геомагнитного поля. Магнитное возмущение от СВ может включать длительную (несколько десятков минут) бухту магнитного поля и резкий всплеск поля в момент достижения излучением СВ ионосферы [1]. Если СВ сопровождалась корональным выбросом массы на Солнце, то облако солнечной плазмы достигает магнитосферы Земли через 2-3 дня, в зависимости от скорости солнечного ветра, и вызывает магнитную бурю. Ударные волны, идущие перед движущимся к земле потоком солнечной плазмы, проявляются на земной поверхности в виде резкого скачка геомагнитного поля на дневной стороне, т.н. внезапным началом магнитной бури (storm sudden commencement, SSC). SSC примерно на 1 час опережает начало главной фазы магнитной бури.

Геомагнитные возмущения, возникающие при СВ или SSC (~10-100 нТл) относительно невелики по амплитуде по сравнению с магнитными бурями и суббурями (до нескольких тысяч нТл). Однако, поскольку СВ и SSC с характерным временем τ~1-3 мин существенно более быстрый процесс по сравнению с магнитной бурей (τ~1 час), то при СВ и SSC вариабельность магнитного поля dB/dt может быть выше, чем при бурях и суббурях. Утверждалось, что как СВ [2,3], так и магнитные бури с SSC [4], приводят к заметным изменениям сейсмичности. Сообщалось, что после магнитных бурь с SSC количество слабых

землетрясений в Киргизии возрастает на 3–4 в день в области с размерами порядка сотни км на 2-7 сутки [5]. Гульельми и др. [6] утверждали, что SSC подавляет глобальную сейсмичность в интервале времени ±1 час. Активно развивается гипотеза о СВ как триггере сейсмичности [7-10]. Возрастание числа землетрясений наблюдалось в этих работах на 2-7 день после СВ. Обнаружено увеличение суточного числа локальных землетрясений в Киргизии на 2 сутки после СВ [11]. В этом случае неясно, являются ли триггером непосредственно SSC или СВ, или тесно следующая за ними магнитная буря.

Свидетельства о триггерном высвобождении накопленной в коре энергии в виде слабых землетрясений под действием мощных электромагнитных импульсов были получены и при экспериментах с пусками магнитогидродинамического (МГД) генератора. Облучение коры электромагнитными импульсами в Таджикистане вызывало заметную активизацию сейсмичности в ее верхнем 5-километровом слое через 5–6 суток после облучения [12, 13]. Эти результаты подтвердились в других геолого-геофизических условиях при изучении влияния пусков МГД-генератора на сейсмичность Северного Тянь-Шаня [14]. Позднее, вместо МГД-генератора использовался конденсаторно-тиристорный источник, но также была обнаружена заметная активизация сейсмичности после электромагнитного облучения [15].

Однако во всех приведенных выше работах не проводилось разделения на дневные и ночные сейсмические события, что представляется не вполне корректным, т.к. амплитуды СВ или SSC на ночной стороне имеют крайне малую величину, поэтому они никак не могут повлиять на очаг землетрясения, находящийся с ночной стороны. Также зачастую не проводилась дискриминация по глубинам очагов. В данной работе мы попытались статистически проверить идею о СВ и SSC как планетарном триггере землетрясений с учетом этих аспектов.

Исходные данные и метод анализа. При отборе сейсмических событий за основу были взяты каталоги Геологической службы США и Европейского сейсмологического общества. Согласно статистическому распределению, представительная магнитуда за выбранный промежуток времени M=4. Была сгенерирована выборка всех землетрясений, начиная с малых магнитуд M=3.0. Из архива зарегистрированных SSC мировой сетью магнитных станций рассматривались только события классов A и B, наблюдаемые не менее чем 5 магнитными обсерваториями. Из СВ рассматривались только вспышки класса X с наибольшей величиной пика интенсивности рентгеновского излучения.

Статистические закономерности определялись методом наложенных эпох (МНЭ). В качестве нулевой (реперной) точки использовался момент SSC или СВ. Для поиска возможных триггерных эффектов SSC рассматривался интервал ±1 час относительно нулевого момента. Более длительный интервал может захватывать более мощное и длительное возмущение – начало магнитной бури. Для СВ в МНЭ рассматривался интервал ±2 дня. Анализ проведен как для каждого года отдельно, так и многолетних интервалов. Если сейсмическая активность никак с СВ или SSC не связана, то ее динамика на МНЭ графике до и после этих событий будет примерно одинакова. Если же эти возмущения являются триггером землетрясений, то динамика их числа должна показывать систематическое усиление после реперного момента времени, превышающее дисперсию σ. При отборе сейсмических событий использовались следующие пороговые величины: минимальная магнитуда Mo и максимальная глубина гипоцентра Ho, что позволяло исключить из рассмотрения глубокофокусные землетрясения с H>Ho. Также проводилась выборка временного интервала момента землетрясения, при этом отбирались только те землетрясения, очаги которых во время SSC или СВ были в дневном секторе (от 06 LT до 18 LT).

Вспышка 6 сентября 2017 г. и сейсмическая активность. В качестве характерного примера, доказывающего триггерное воздействие мощной СВ на планетарную сейсмичность, часто приводится событие 6 сент. 2017 г, когда в 11:53 UT произошла вспышка класса X9.3 [16]. При этом число землетрясений с M>4.0 заметно увеличилось после СВ, например

отмечалось, что суммарное число землетрясений за 5 дней после вспышки увеличилось в 2 раза по сравнению с их числом за 5 дней до вспышки.

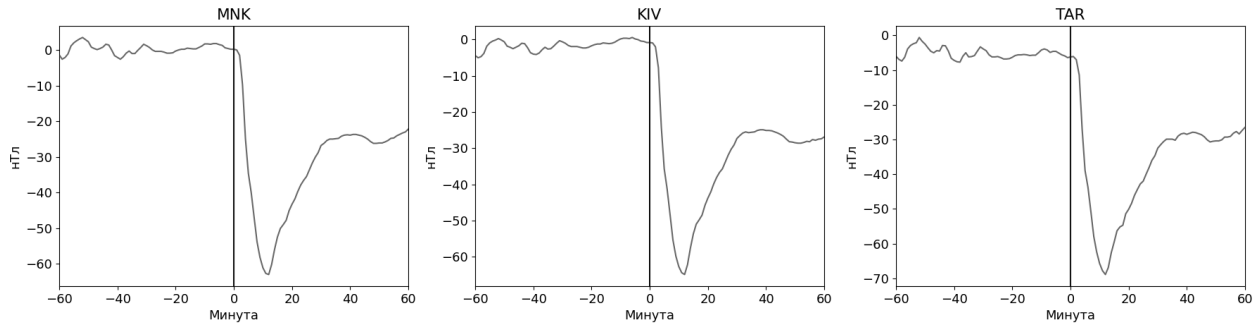


Рисунок 1 – Магнитограммы (X-компонента) дневных среднеширотных станций в интервале 11-13 UT 06.09.2017

Чтобы посмотреть, каким магнитным возмущением сопровождалась эта вспышка, мы воспользовались порталом геомагнитных данных SuperMag. Рисунок 1 показывает магнитограммы (X-компонента) дневных среднеширотных станций Минск (MNK), Киев (KIV), Тарту (TAR) в интервале 11-13 UT 06.09.2017, где магнитный эффект СВ отчетливо проявился. Магнитограммы показывают, что максимальная величина возмущения достигает ~70 нТл, что менее 100 нТл, как полагалось в [16].

Рисунок 2а показывает число землетрясений после СВ. Эта гистограмма, казалось бы, показывает, что число землетрясений заметно увеличилось после СВ.

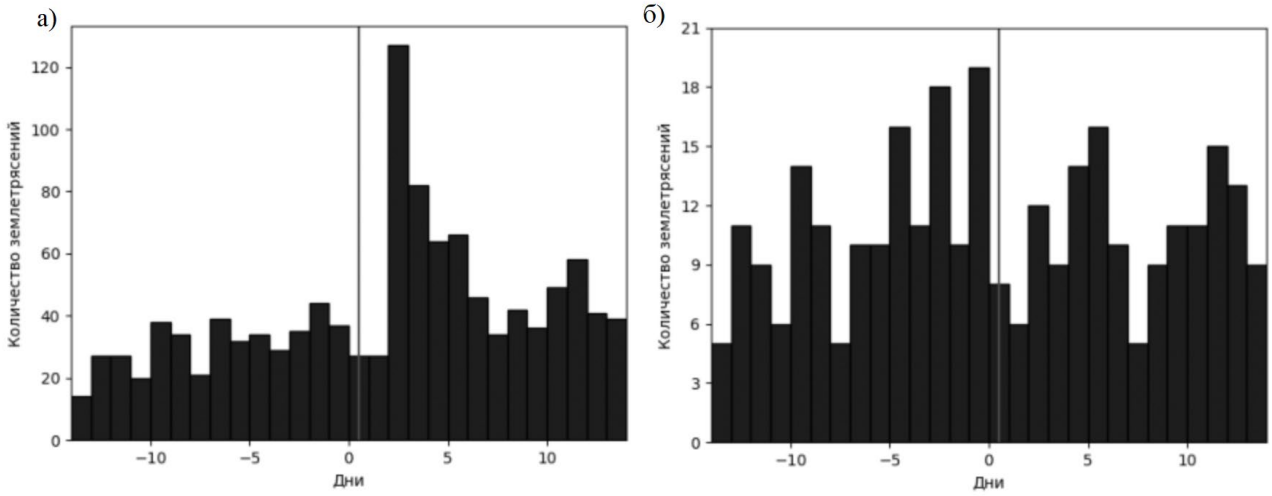


Рисунок 2 – Среднесуточное число землетрясений с M>4 во всех секторах местного времени и на всех глубинах в интервале ±14 суток относительно СВ 06.09.2017 (а); среднесуточное число поверхностных землетрясений с H <10 км (б)

Однако эта гистограмма построена для землетрясений во всех секторах местного времени и на всех глубинах. Электромагнитные поля с характерным временем нарастания T~100 с, возбуждаемые СВ, не могут проникнуть в область очага глубокофокусных землетрясений, т.к. глубина их проникновения ограничена скин-длиной δ. При среднем сопротивлении верхних слоев ρ~10^2 Ом·м оценка по соотношению (1) дает величину ~ 10 км.

$$\delta[\text{км}] = \frac{1}{2\pi}\sqrt{10\rho[\text{Ом·м}]T[\text{с}]} \qquad (1)$$

Поэтому нет физических оснований рассматривать гипотетическое воздействие СВ на глубокофокусную сейсмическую активность. Если же ограничиться только поверхностными

землетрясениями H <10 км, то эффект усиления сейсмической активности для этого события пропадает (рисунок 2б).

Землетрясения и СВ. Гистограмма с потоком поверхностных землетрясений (H<10 км) с M>4.0 за 2011-2023 гг. (всего 68 вспышек) показана на рисунке 3а. Аналогичная гистограмма, но с дополнительным ограничением на локальное время (LT) землетрясений, изображена на рисунке 3б. Рассматривались только те события, очаги которых в момент СВ находился с дневной стороны.

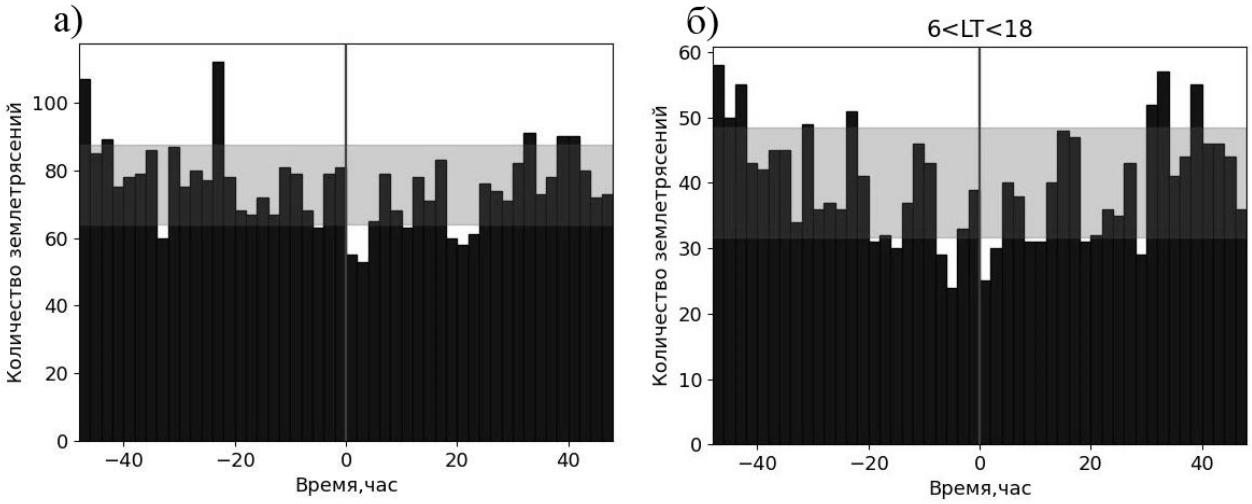


Рисунок 3 – Гистограмма МНЭ с потоком землетрясений (число событий за 2 часа) поверхностных (H<10 км) с M>4.0 за 2011-2023 гг. (всего 68 вспышек) для интервала времени ±2 дня относительно вспышек без ограничения на LT момента землетрясения (а). Гистограмма МНЭ с потоком землетрясений с учетом локального времени сейсмического толчка (от 06 LT до 18 LT) (б). Полупрозрачной заливкой на гистограммах обозначен интервал, обозначающий среднее количество землетрясений за изучаемый период ± стандартное отклонение

По графикам видно, что в случае, когда LT не учитывается, наблюдается некоторое уменьшение количества поверхностных землетрясений после СВ. Точный подсчет дает 1893 события до нулевого момента и 1744 после него. Для проверки статистической значимости такого уменьшения сформулируем нулевую гипотезу, которая соответствует представлению об отсутствии связи между землетрясениями и СВ: вероятности отдельному событию попасть в интервал –48÷0 ч или 0÷48 ч одинаковы и равны 0.5. В действительности указанные вероятности равны 0.52 и 0.48 соответственно. Подсчет по схеме Бернулли свидетельствует, что различие эмпирических вероятностей существенно в том смысле, что нулевую гипотезу следует отвергнуть, причем вероятность ошибиться не превышает 0.05. Это означает, что если судить по данным без учета LT, то можно сделать вывод, что СВ некоторым образом подавляют сейсмичность в верхнем слое земной коры.

При аналогичном рассмотрении исключительно тех поверхностных землетрясений, очаги которых во время СВ были в дневном секторе, количество событий до нулевого момента составляет 966, а после 957. В таком случае нулевую гипотезу об отсутствии связи между СВ и сейсмической активностью уже нельзя отвергнуть и вывод получается совсем иной – СВ не являются триггером поверхностных землетрясений.

Землетрясения и SSC. Гистограмма с потоком поверхностных землетрясений (H <10 км) с M>4.0 за 1990-2019 гг. (всего 608 SSC) показана на рисунке 4а. Аналогичная гистограмма, но с дополнительным ограничением на LT землетрясений, изображена на рисунке 4б, когда рассматривались только те события, очаги которых в момент SSC находились с дневной стороны.

В случае с SSC в обоих рассмотренных случаях разница в количестве землетрясений до и после нулевого момента недостаточна, чтобы опровергнуть нулевую гипотезу, и статистически значимого влияния SSC на активность землетрясений не наблюдается. Однако вид гистограммы значительно изменяется при учете LT. Сразу после SSC количество дневных и ночных землетрясений опускается значительно ниже среднего, а спустя несколько десятков минут после нулевого момента количество только дневных событий возрастает выше среднего. Снова, как и при рассмотрении СВ, получается, что учет LT приводит к новым результатам.

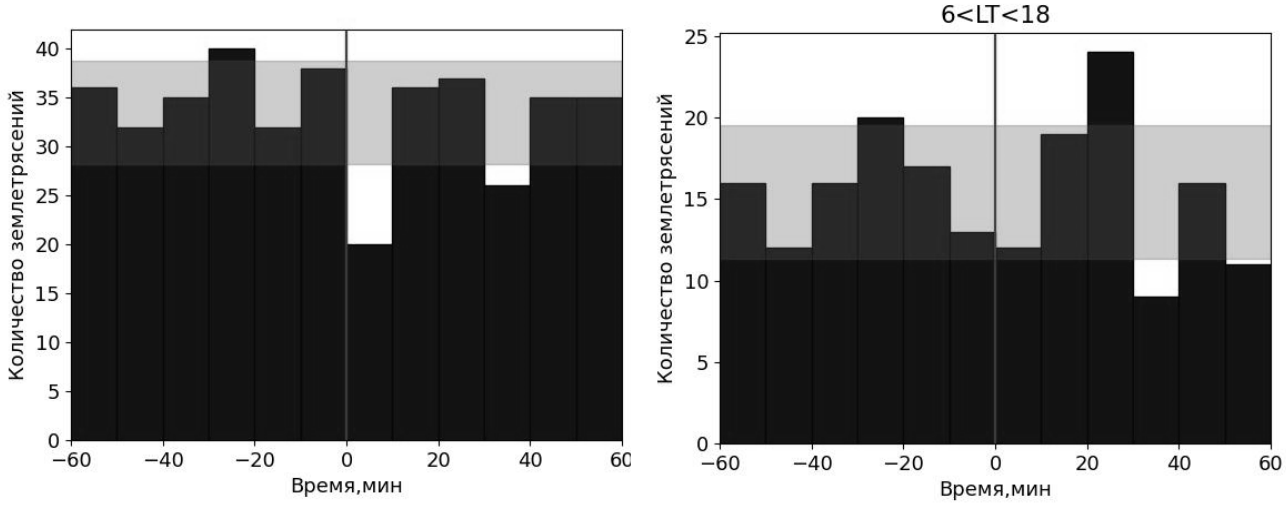


Рисунок 4 – Гистограмма МНЭ с потоком (число событий за 10 минут) поверхностных землетрясений (H<10 км) с M>4.0 за 1990-2019 гг. (всего 608 SSC) для интервала времени ±60 минут относительно SSC без ограничения на LT момента землетрясения (а) и гистограмма МНЭ с учетом LT (от 06 LT до 18 LT) (б).. Полупрозрачной заливкой на гистограммах обозначено среднее количество сейсмических событий за изучаемый период ± стандартное отклонение

Обсуждение. Рассматриваемый в работе вопрос является частью фундаментальной проблемы о воздействии солнечной активности и связанных с ней вариаций магнитного поля Земли на геофизические процессы. Результаты, касающиеся этой проблемы, зачастую противоречивы. Механизм триггерного воздействия на землетрясения остается неясным. Оценки энергии возможных триггеров – волны Релея от дальнего землетрясения, электромагнитного импульса, изменения атмосферного давления в циклонах, примерно на 5-6 порядков меньше, чем энергия, выделяемая при сейсмическом событии. По оценкам [17] для сильных возмущений проводимости ионосферы после СВ амплитуды магнитных пульсаций могут достигать ~100 нТл, теллурического поля ~0.01 мВ/м, а плотности электрического тока в литосфере ~10^{-6} А/м^2. Плотность мощности выделения тепла таким током пренебрежимо мала ~10^{-7} Вт/м^3 [18]. Расчеты растекания тока от электрического диполя, запитываемого импульсным МГД-генератором или электроимпульсной установкой, показали, что на глубине расположения очагов землетрясений (5–10 км) плотность тока составляет 10^{-7}–10^{-8} А/м^2 [15]. Таким образом, плотность тока от искусственного источника, влияющего на региональный сейсмический режим, по порядку величины сопоставима с плотностью теллурических токов, генерируемых СВ или SSC. Это косвенно указывает на реальность сейсмоэлектромагнитных связей. Более того, электрический ток в литосфере будет концентрироваться в слоях с повышенной электрической проводимостью (например, в разломах), где его плотность резко возрастет.

Проведенный нами статистический анализ, основанный на качественных представлениях о возможных механизмах воздействия геомагнитных возмущений на поверхностные землетрясения, показывает, скорее, отсутствие ожидаемых триггерных

эффектов. Однако интересно заметить, что в некоторых случаях, если не учитывать глубину гипоцентров землетрясений и не учитывать локальное время, можно действительно обнаружить статистические отличия, казалось бы, подтверждающие наличие триггерных эффектов. Не до конца ясно ошибочные ли это отличия и о чем они говорят в плане механизма триггерного воздействия? Вряд ли возможно ли такое, что солнечная активность действует только на глубокофокусные землетрясения и не воздействует на поверхностные?

Сделанный нами вывод о сомнительности CB и SSC как триггере землетрясений, не отрицает в принципе возможности триггерных эффектов в геофизических процессах. Идея триггерных воздействий на сейсмичность (вспышки, бури, тайфуны, МГД-генератор и т.д.) остается весьма популярной, но статистика в большинстве случаев дает неоднозначный результат. Не исключено, что триггерное воздействие может проявиться только при определенных условиях. Проведенный статистический анализ показывает, как важно правильно отбирать исходные данные и как сильно физические предположения при создании анализируемой выборки могут повлиять на результаты. Возможно, именно поэтому работы в этой области носят такой противоречивый характер.

Заключение. Мы попытались проверить идею о CB и SSC как планетарном триггере землетрясений. В отличие от предшествующих работ, мы применили физически разумные ограничения – отбирались только поверхностные землетрясения и только те, очаг которых находился на дневной стороне в момент SSC или CB. Рассмотрение методом наложенных эпох в рамках ограничений не выявило явных отличий в динамике сейсмичности до и после CB/SSC. Однако, выходя за рамки ограничений, как делалось и в предшествующих работах, некоторые отличия в динамике землетрясений до и после CB/SSC начинают наблюдаться. Таким образом, подчеркивается важность введения ограничений при поиске геомагнитного триггера землетрясений, связанного с CB или SSC. По-видимому, имеет смысл строить физические предположения касательно механизма триггерного воздействия и искать их подтверждения, тщательно отбирая исходные данные.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН. Благодарим Любушина А.А. за полезные обсуждения.

Источники данных. Интернет-ресурс Геологической службы США (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/) и Европейской геофизической службы (https://www.isc.ac.uk), информация о SSC получена от Observatorio del Ebro (https://obsebre.es), геомагнитные данные взяты с портала SuperMag (https://supermag.jhuapl.edu).

Литература

1. Curto J.J. Geomagnetic solar flare effects: A review // Journal of Space Weather and Space Climate. 2020. V. 10. P. 27.
2. Барсуков О.М. Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения // Физика Земли. 1991. № 12. С. 93–97.
3. Соболев Г.А., Шестопалов И.П., Харин Е.П. Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли // Физика Земли. 1998. № 7. С. 85-90.
4. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. 2002. № 4. С. 3-15.
5. Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Харин Е.П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли. 2001. № 11. С. 62-72.
6. Гульельми А.В., Лавров И.П., Собисевич А.Л. Внезапные начала магнитных бурь и землетрясения // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1. № 1. С. 98-103.
7. Новиков В.А., Сорокин В.М., Ященко А.К., Мушкарев Г.Ю. Физическая модель и численные оценки теллурических токов, генерируемых рентгеновским излучением солнечной вспышки // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 1. С. 23-44.

8. Новиков В.А., Сорокин В.М. Электромагнитные триггерные эффекты в системе "ионосфера-атмосфера-литосфера" и их возможное использование для краткосрочного прогноза землетрясений // Физика Земли. 2024. № 5. С. 97-112.
9. Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Novikov V.A. A possible mechanism of stimulation of seismic activity by ionizing radiation of solar flares. Earthquake Sciences. 2019. 32 (1). 26-34.
10. Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Mushkarev G.Yu., Novikov V.A. Telluric currents generated by solar flare radiation: physical model and numerical estimations // Atmosphere. 2023. V. 14. No. 3. P. 458.
11. Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н. О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума // Физика Земли. 2011. № 3. С. 55-71.
12. Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Доклады РАН. 1997. Т. 353. № 4. С. 542–545.
13. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние электромагнитных полей на скорость сейсмотектонических деформаций, релаксация упругих напряжений, их активный мониторинг // Физика Земли. 2011. № 10. С. 82-96.
14. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С. 152-160.
15. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1641–1649.
16. Novikov V., Ruzhin Y., Sorokin V., Yaschenko A. Space weather and earthquakes: possible triggering of seismic activity by strong solar flares // Annals of Geophysics. 2020. 63. 5. P. 554. doi:10.4401/ag-7975.
17. Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Mushkarev G.Yu., Novikov V.A. Telluric currents generated by solar flare radiation: physical model and numerical estimations // Atmosphere. 2023. V.14. No. 3. 458.
18. Файнберг Э.Б., Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Васильева Т.А. Генерация тепловых потоков в недрах Земли мировыми геомагнитными бурями // Физика Земли. 2004. № 4. С. 54–62.

УДК 550.834

ВОЗМОЖНОСТЬ ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ НАРУШЕНИЙ В БЕТОННОЙ ПЛОТИНЕ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ

Коковкин И.В., Уколов Д.А, Селезнев В.С., Пархоменко Е.Э.
d.ukolov@g.nsu.ru
Единая геофизическая служба РАН, г. Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты обработки сейсмологических записей, полученных с двух станций, установленных в нескольких километрах от Саяно-Шушенской ГЭС. Производится сравнение частот собственных колебаний плотины, которые были выделены на шумовых записях с обоих станций, продемонстрирована их обратная зависимость с уровнем наполнения водохранилища. Обнаружены атипичные изменения частот плотины при высоком уровне ее наполнения, что может свидетельствовать о наличии структурных нарушений в конструкции, которые раскрываются при большом давлении воды на тело плотины. Дальнейшее детальное изучение выявленных аномалий позволит оценить динамику структурных нарушений во времени.

Ключевые слова: частота собственных колебаний, Саяно-Шушенская ГЭС, мониторинг, структурная целостность.

Введение. Плотины представляют собой критически важные инженерные сооружения, играющие ключевую роль в управлении водными ресурсами. Они предназначены для регулирования потоков рек, предотвращения наводнений, создания резервуаров для водоснабжения, а также генерации электроэнергии посредствам ГЭС. Нестабильность плотин может повлечь значительные экологические и экономические последствия, поэтому, необходимо осуществлять систематический мониторинг их технического состояния. В частности, можно вести контроль за их динамическими параметрами, такими как частоты собственных колебаний, которые являются важным показателем оценки структурной целостности этих сооружений. Изменение состояния целостности сооружения, такое как появление трещин или смена напряженно-деформированного состояния будет выражено скачкообразным изменением на всех собственных частотах плотины.

Методика исследований. Методика исследования заключается в преобразовании сейсмических записей, полученных на некотором расстоянии от объекта исследования в спектрограммы, согласно [1, 2]. При этом сейсмическая запись разбивается на определенные по времени участки, вычисляются спектры этих участков записи и с заданным сдвигом спектры выстраиваются в единую картину, располагаясь один под другим. На полученном графическом представлении хорошо выделяются монохроматические колебания с разной добротностью, показывающей насколько пик на конкретной частоте шире или уже в частотном диапазоне. Таким образом регистрируются как собственные частоты колебания зданий и сооружений (они как правило низкодобротные, т.е. широкие), так и сигналы от работающего оборудования точно также, как и от вибрационных источников сейсмических волн. Точность определения частот связана с длиной отрезка сейсмограммы.

Целью исследования является выявление структурного нарушения в плотине Саяно-Шушенской ГЭС, путем изучения значений частот ее собственных колебаний в зависимости от заполненности водохранилища.

В 2024 году, нами была установлена трехкомпонентная сейсмологическая станция «Филиал» (X-север, Y-запад, Z-вертикально), расположенная в 3 км, от объекта исследования (рисунок 1). Саяно-Шушенская ГЭС является источником упругих волн собственных колебаний, которые ранее были определены методом стоячих волн и регистрировались на сейсмостанции «Черемушки», на удалении от самой гидростанции в 4.5 км [3]. Станция

«Филиал» позволила оперативно получать данные по информационно-телекоммуникационной сети интернет шумовых записей, содержащих в себе информацию о частотах собственных колебаний плотины.

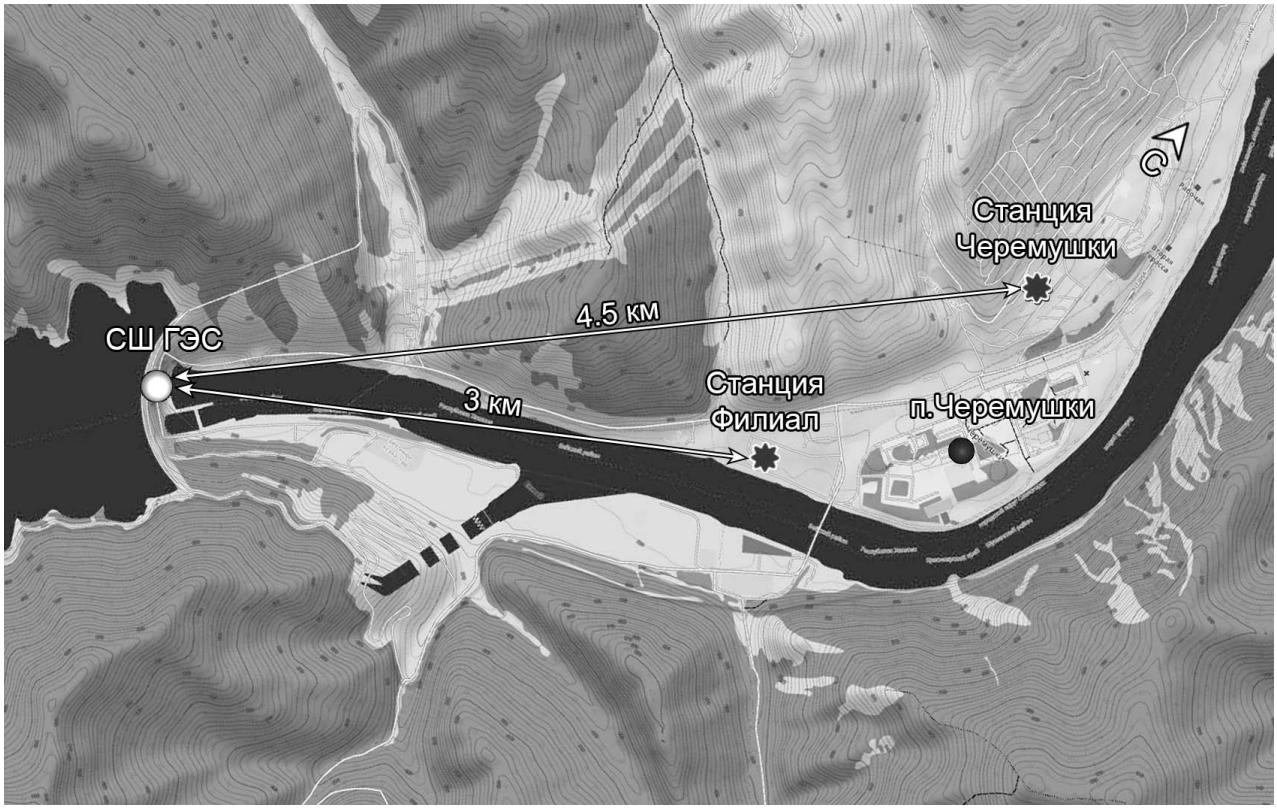


Рисунок 1 – Схема расположения станции наблюдения

Результаты. Со станции «Филиал», начиная с 24 мая 2024 нами были получены микросейсмические записи, которые на рисунке 2 представлены в виде усредненных по 24 часа спектров. Выборка данных осуществлялась в интервале от 1 до 3 Гц, ввиду отсутствия полезного сигнала на не рассматриваемых частотах. В данный интервал попадают частоты первых 5 мод собственных колебаний плотины, которые представлены в виде пиков максимальных амплитуд. На рисунке 2 также продемонстрирован уровень наполнения водохранилища (УВБ), с которым наблюдается обратная зависимость частот.

Осуществлено сравнение наших данных с данными, полученными в 2008 году, с сейсмостанции «Черемушки» (рисунок 3). Нужно отметить, что на рисунке 3, в отличии от рисунка 2, усреднение осуществлялось за 5 суток и построение проведено с 1 января, а не с 24 мая, как на рисунке 2. Если сравнить графики с мая, видно, что кривые демонстрируют значительное сходство, даже присутствует аналогичное уменьшение амплитуд на первой частоте в сентябре-октябре.

Для наглядности получаемых значений произведено построение зависимостей частоты 3 моды (рисунок 4) и 4 моды (рисунок 5) колебаний СШ ГЭС от УВБ, за 2008 и 2024 год. Отметим, что записи по частотам за 2024 год со стации «Филиал» были дополнены данными со станции «Черемушки», т.к. при сравнении материалов, сходство оказалось около 99%.

Проведя сравнение зависимостей частот собственных колебаний плотины от уровня наполнения Саяно-Шушенского водохранилища, можно сделать выводы о том, что с плотиной происходят необратимые изменения, т.к. частота собственных колебаний увеличилась при тех же уровнях воды в водохранилище. Но нас интересует именно выявление структурного нарушения, которое может проявляться при повышенных уровнях воды. На рисунке 5, на частоте 4-й моды за 2024 год, при УВБ порядка 535-536 м, видны нетипичные скачки частоты, на частоте 3-й моды (рисунок 4) они также наблюдаются, но изменения не такие резкие.

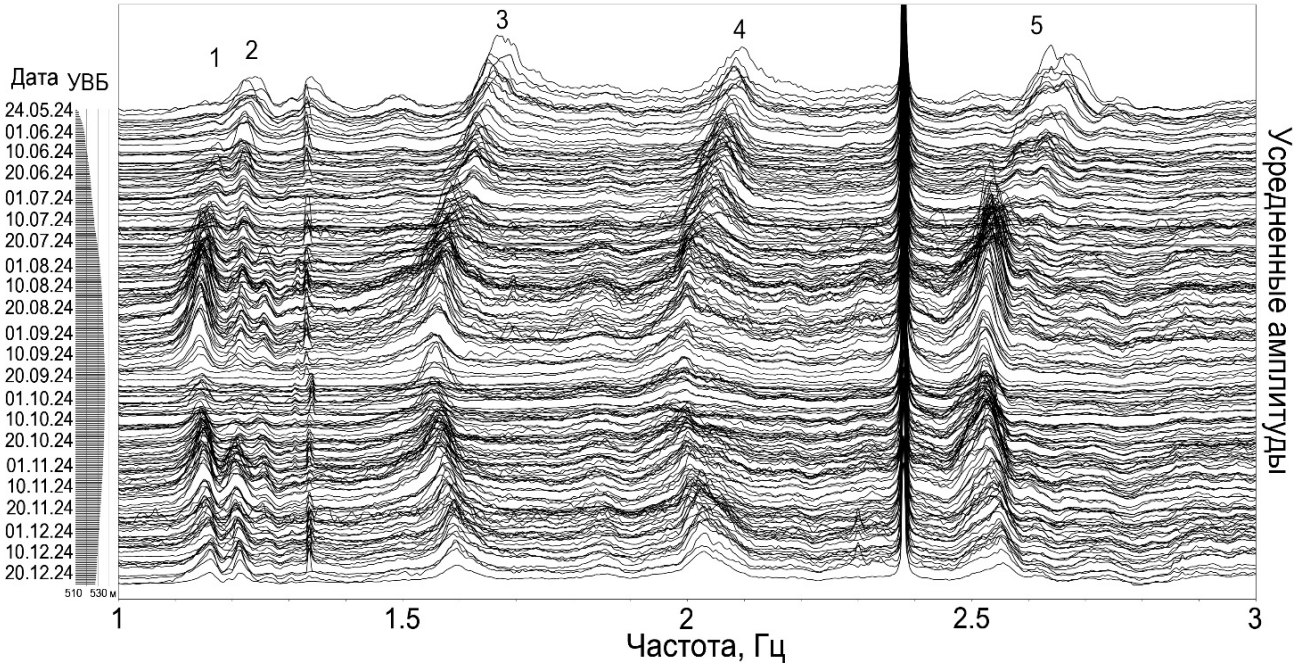


Рисунок 2 – Графики усредненных за 24 часа спектров по компоненте Y со станции «Филиал», с 24.05.24 г. по 31.12.24 г. в выборке от 1 до 3 Гц. Слева нанесен уровень воды водохранилища СШ ГЭС (УВБ), вверху номера мод колебаний плотины

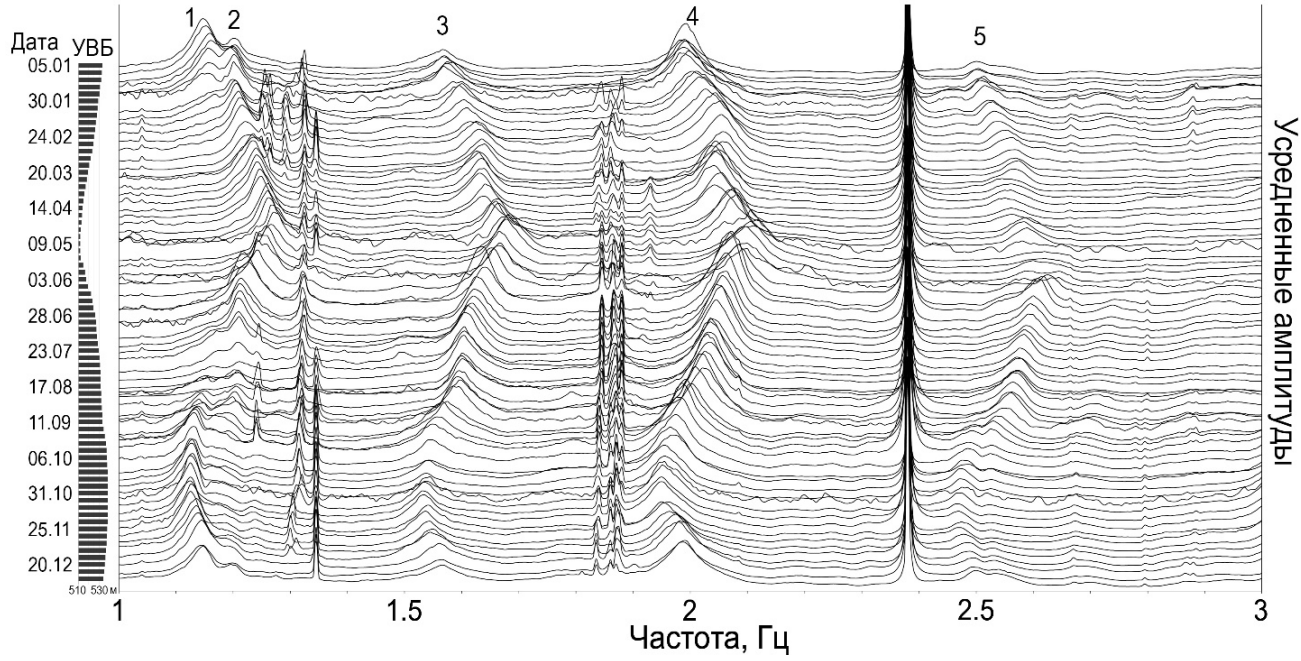


Рисунок 3 – Графики усредненных за 5 суток спектров по компоненте Y со станции «Черемушки», с 01.01.08 г. по 31.12.08 г. в выборке от 1 до 3 Гц. Слева нанесен уровень воды водохранилища СШ ГЭС (УВБ), вверху номера мод колебаний плотины

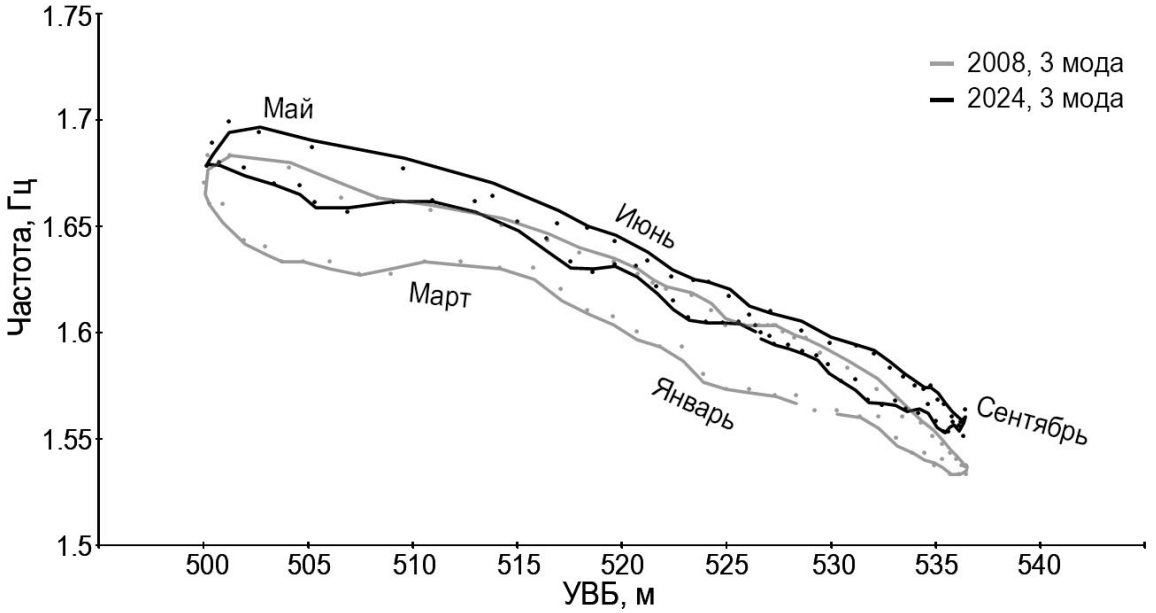


Рисунок 4 – Зависимость частоты собственных колебаний плотины (на примере 3-й моды, E-компонента) от уровня верхнего бьефа (УВБ) и времени года, по данным за 2008 и 2024 год. Точками показаны значения, осредненные за сутки, кривыми – их сглаженная аппроксимация

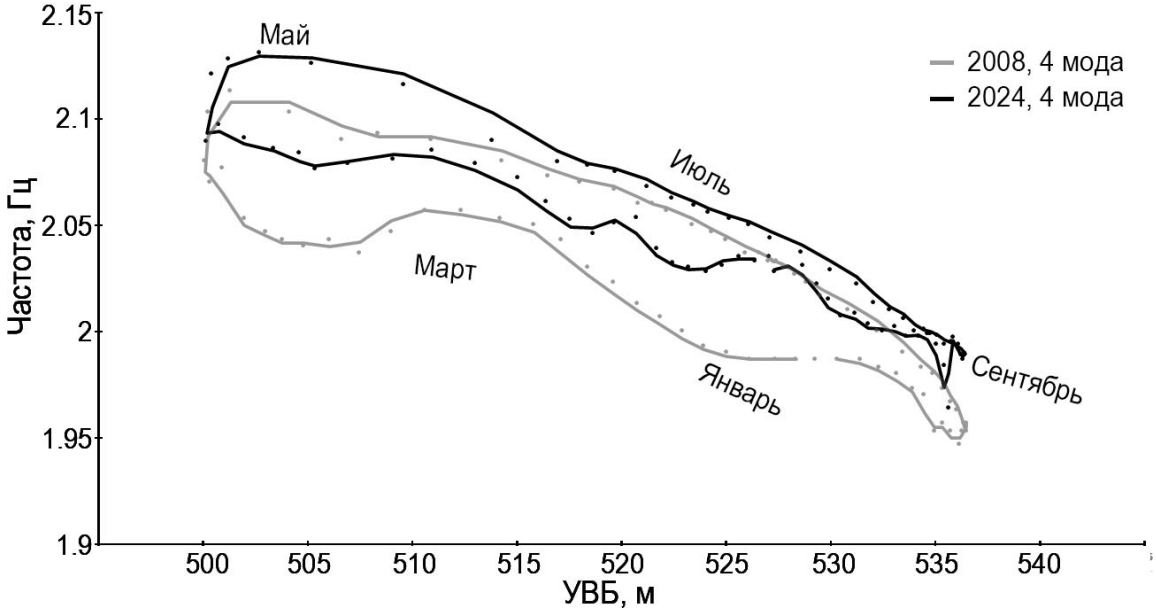


Рисунок 5 – Зависимость частоты собственных колебаний плотины (на примере 4-й моды, E-компонента) от уровня верхнего бьефа (УВБ) и времени года, по данным за 2008 и 2024 год. Точками показаны значения, осредненные за сутки, кривыми – их сглаженная аппроксимация

Выводы. В результате проведенного исследования, на микросейсмических записях выделены частоты собственных колебаний плотины СШ ГЭС, которые были сопоставлены с уровнями наполнения водохранилища. Анализ данных показал, что при достижении максимальных уровней наполнения, наблюдаются атипичные изменения частот. Эти отклонения могут свидетельствовать о наличии повреждений или дефектов в конструкции плотины, которые раскрываются при большом давлении воды на плотину.

Данные наблюдения подчеркивают необходимость регулярного мониторинга динамических характеристик плотин. Выявление подобных аномалий может быть важным фактором для предотвращения возможных аварий и обеспечения безопасности эксплуатации

гидротехнических сооружений. Нами будет проводиться дальнейшее изучение в этой области для разработки более точных методов диагностики состояния плотин и повышения надежности их функционирования.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 24-27-00145, https://rscf.ru/project/24-27-00145, с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

1. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления // Изобретения (патенты). 2012. № 26 (II ч.). С. 364-365. Пат. 2461847 RU. МПК G01V1/28. G01M7/02.
2. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. SpectrumSeism. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021666241. 11.10.2021. Заявка № 2021665611 от 11.10.2021.
3. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кречетов Д.В. Определение частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сейсмическим сигналам (на примере плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным мониторинга 2001-2021 гг. // Российский сейсмологический журнал. 2023. Т. 5. № 2. С. 32–50.

УДК 550.311:622.276

РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОДНОГО ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ГАЗА

Кузьмин Д.К.
dimak1292@mail.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

В статье описывается методика определения локальных напряжений в окрестности продуктивного пласта на подземном хранилище газа. С помощью аналитической модели деформируемого пласта рассчитываются горизонтальные напряжения растяжения в окрестности эксплуатируемого горизонта, вмещающего газ. Распределение напряжений характеризуют циклические деформации земной поверхности, свойственные ПХГ при отборе и закачке газа в весенний и осенний периоды. Вычисленные горизонтальные напряжения дают возможность сопоставить полученные значения с порогом прочности на разрушения вмещающих пород.

Ключевые слова: геодинамический полигон, нивелирование, моделирование, деформации, напряжение.

Введение. При освоении нефтегазовых месторождений и эксплуатации ПХГ в последнее время остро ставится вопрос о влиянии геодинамических процессов природного и природно-техногенного генезиса на деформации горных пород и земной поверхности. Данные процессы оказывают негативное воздействие на инфраструктуру объектов нефтегазового комплекса и, как следствие, снижают уровень их промышленной безопасности.

Известно, что при проектировании геодинамических полигонов, на стадии горно-геологического обоснования, в соответствии с инструктивными требованиями необходимо проведение оценок ожидаемых смещений земной поверхности эксплуатируемого объекта недропользования.

Специфика эксплуатации ПХГ состоит в том, что в качестве геологического объекта используется, либо водоносный пласт, либо истощенное газовое месторождение, либо выработка в каменных солях. В осенне-зимние месяцы происходит отбор газа, а в весенне-летние – закачка. Необходимость строгого контроля герметичности и объемов закачиваемого и отбираемого газа обеспечивает высокую изученность основных параметров ПХГ: геометрические размеры и конфигурация объекта, физические свойства горных пород, амплитуда циклического изменения пластового давления. Циклические деформации геологической среды, обусловленные эксплуатацией ПХГ, приводят к накоплению усталостных трещин в объектах инфраструктуры, приводящих к нарушению целостности цементного камня и устойчивости колонн скважин, и как следствие, реальной возможности нарушения герметичности объектов и потере устойчивого режима эксплуатации.

В работах [1, 2] были произведены теоретические расчеты ожидаемых вертикальных смещений при эксплуатации ПХГ в течение одного года. Для проведения математического моделирования для условий ПХГ использовалась геомеханическая модель, которая учитывает весомость среды, генетическую составляющую и пороупругие свойства резервуара [3-10]. Кроме того, эта модель учитывает изменения коэффициента сжимаемости за период разработки месторождений [11-16]. Модель верифицирована как для сухопутных, так и для шельфовых месторождений [17-20], а также для анализа техногенно-индуцированных сейсмических процессов [21, 22].

Результаты, полученные в работе [2] позволили уточнить положение и размеры зоны газо-водяного контакта, который и определяет истинные «динамические» размеры газохранилища. Геометрические параметры моделируемого пласта, исходя из анализа физико-

геологической модели ПХГ представлены трехступенчатой призмой со средней глубиной залегания 650м и эффективной толщиной пласта 25м. На рисунке 1(а) и 1(б) показаны смоделированные поднятия и оседания земной поверхности в цикле закачки и отбора газа в 2016 г. Амплитуды смещений, полученные на основе модели деформируемого пласта, в обоих циклах остаются неизменны, поскольку изменение пластового давления ΔP=4МПа были одинаковы в обоих циклах.

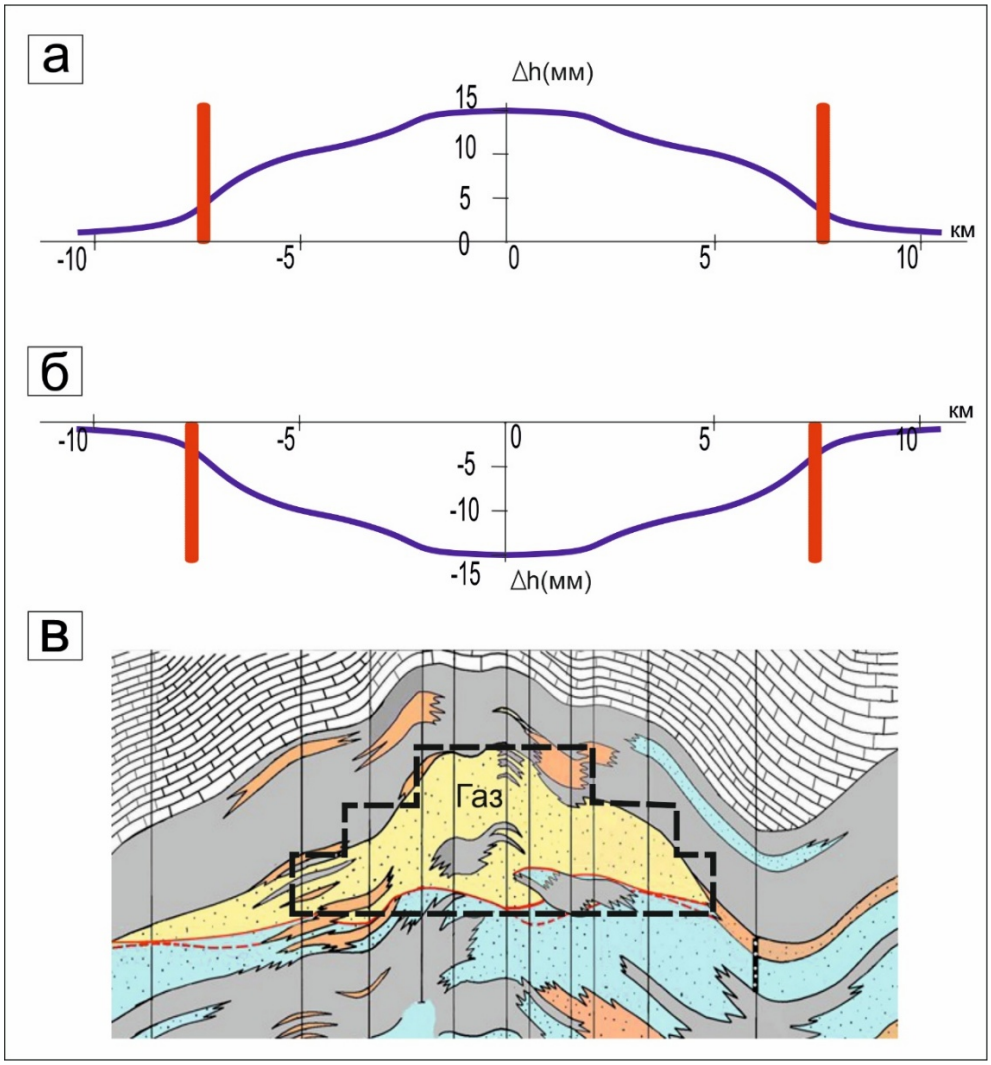


Рисунок 1 – Сопоставление наблюдаемых и расчетных вертикальных смещений в период закачки (1) и отбора (2) газа, и геологический профиль с пластом газонасыщенной породы (3). Красные вертикальные линии – границы горного отвода

Расчет горизонтальных напряжений в окрестности эксплуатируемого горизонта. Возникновение пороупругого включения, которое в данном случае является пластом, приводит к формированию не только аномальных деформаций, но и аномальных напряжений. Эти локальные напряжения будут концентрироваться в окрестности пласта и затухать по направлению к земной поверхности. Задача расчета локальных напряжений в окрестности призматического включения аналитически была решена в [5] и адаптирована для данных условий путем обобщения на пороупругую среду [16].

При моделировании вертикальных смещений земной поверхности в статье [2] в геометрическую основу вошли прямоугольные призмы пирамидального построения. Данные параметры использованы и при расчете горизонтальных напряжений в текущей работе. Глубина кровли газонасыщенного пласта d = 635 м, глубина подошвы D = 660 м. При общей мощности горизонта 25 м, ширина по средней линии $(D-d)/2$ соответствует 8 км.

Формула для расчета локальных горизонтальных напряжений имеет следующий вид:

$$\sigma_{22} = Ph_{inc} \cdot [\pi - A - B + 3C] \quad (1)$$

Где,

$$A = 2x_3 \left[-\frac{(x_2 - a)}{(x_3 + D)^2 + (x_2 - a)^2} + \frac{(x_2 + a)}{(x_3 + D)^2 + (x_2 + a)^2} + \frac{(x_2 - a)}{(x_3 + d)^2 + (x_2 - a)^2} - \frac{(x_2 + a)}{(x_3 + d)^2 + (x_2 + a)^2} \right]$$

$$B = tg^{-1}\frac{x_2 - a}{x_3 - D} - tg^{-1}\frac{x_2 + a}{x_3 - D} - tg^{-1}\frac{x_2 - a}{x_3 - d} + tg^{-1}\frac{x_2 + a}{x_3 - d}$$

$$C = tg^{-1}\frac{x_2 - a}{x_3 + D} - tg^{-1}\frac{x_2 + a}{x_3 + D} - tg^{-1}\frac{x_2 - a}{x_3 + d} + tg^{-1}\frac{x_2 + a}{x_3 + d}$$

В выражении (1) коэффициент $Ph_{inc} = \frac{(1-2\nu)\Delta P}{2\pi(1-\nu)}$ является физическим сомножителем, где $\Delta P = 4$ Мпа – изменение давления в пласте, а ν – коэффициент Пуассона.

В геометрическом множителе формулы (1) x_3 – бегущая координата по вертикальной оси z; x_2 – бегущая координата по горизонтальной оси x; d = 635 м – глубина до верхней кромки модельного источника; D = 660 м – глубина до нижней кромки модельного источника; a = 4км – полуширина модельного источника – пласта.

Распределения локальных горизонтальных напряжений в окрестности газового пласта, построенные по формуле (1), представлены на рисунке 2. Черным контуром обозначен источник модельного включения.

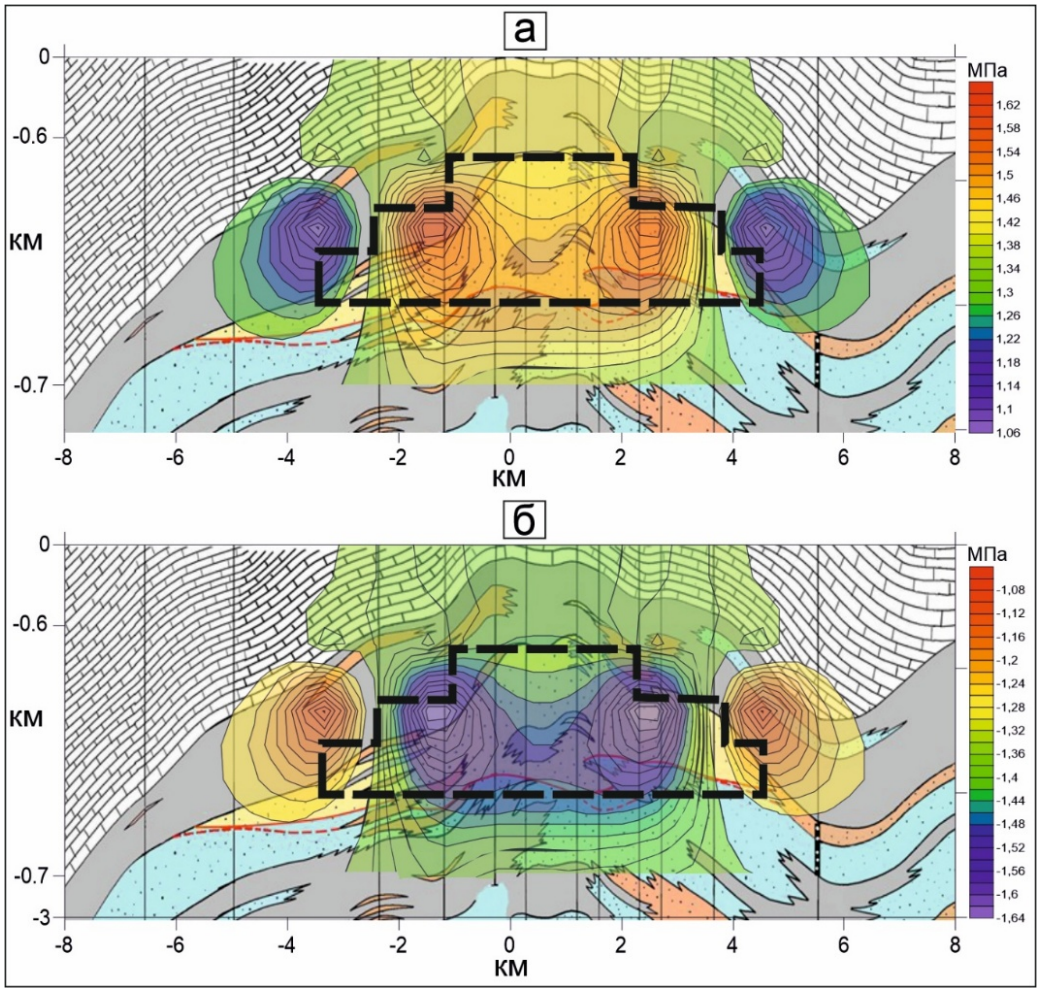


Рисунок 2 – Распределения горизонтальных напряжений в окрестности газового пласта в период закачки (а) и отбора (б) газа

Как видно из рисунка 2(а), в период закачки газа $\Delta P = +4$ МПа формируются горизонтальные напряжения расширения порядка 1-1,6 МПа. Соответственно при отборе газа $\Delta P = -4$ МПа (рисунок 2(б)) формируются горизонтальные сжимающие напряжения того же порядка. Области максимальных величин напряжений концентрируются в окрестности пласта, на глубине 650м от земной поверхности. Далее, с увеличением расстояния от пласта, напряжения затухают, однако в непосредственной близости к земной поверхности (на малых глубинах) наблюдаются значения порядка1,32-1,34 МПа.

Результаты и обсуждение. Полученные значения горизонтальных растягивающих и сжимающих напряжений в приповерхностных слоях пород дают возможность проведения оценки напряженно-деформируемого состояния недр в окрестности эксплуатируемого горизонта. Важно обратить внимания на порог разрушения трещиноватых пород. Так, нижний порог прочности известняка при растяжении равен 2,5 МПа.

Геологическая структура на низких глубинах исследуемого ПХГ представлена прослоями глин в многометровых толщах известняков и доломитов. Увеличение пластового давления при закачке газа до 8 МПа могут привести к горизонтальным растягивающим напряжениям в приповерхностной зоне со значениями 2,6-2,8 МПа. Отсюда следует, что максимальный порог вариаций давления при отборе и закачке газа не должен превышать 7 МПа. Такой способ оценки напряженно-деформируемого состояния пласта при эксплуатации ПХГ позволяет избежать негативных геодинамических последствий [23].

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН

Литература

1. Арутюнов А.Е., Грунин А.Г., Зубарев А.П., Кузьмин Ю.О., Никонов А.И., Осипов А.А., Полухина С.С. Горно-геологическое обоснование и проектирование геодинамических полигонов на подземных хранилищах газа (на примере Касимовского ПХГ) // Маркшейдерский вестник. 2012. № 4 (90). С. 43-51.
2. Абрамян Г.О., Кузьмин Д.К., Кузьмин Ю.О. Решение обратных задач современной геодинамики недр на месторождениях углеводородов и подземных хранилищах газа // Маркшейдерский вестник. 2018. № 4. С. 52-61.
3. Абрамян Г.О., Кузьмин Д.К., Ломоносов М.Д. Анализ современных деформационных процессов на газонефтяном месторождении Центральной Азии // Наука и технологические разработки. 2022. Т. 101. № 3. С. 20-32.
4. Кузьмин Д.К. Метод вычислений градиентов смещений земной поверхности для оценки геодинамической опасности объектов нефтегазового комплекса // Геофизические процессы и биосфера. 2024. Т. 23. № 3. С. 78-98.
5. Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная малыми природно-техногенными воздействиями // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал МГГУ). 2002. № 9. С. 48-55.
6. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство Экономических Новостей. 1999. 220 с.
7. Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная разработкой месторождений нефти и газа // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. Вып. 2. М.: ГЕОС. 2002. С. 418-427.
8. Кузьмин Ю.О. Актуальные вопросы использования геодезических измерений при геодинамическом мониторинге объектов нефтегазового комплекса // Вестник СГУГИТ. 2020. Т. 25. № 1. С. 43-54.
9. Кузьмин Ю.О. Деформационные последствия разработки месторождений нефти и газа // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20. № 4. С. 103-121.
10. Кузьмин Ю.О. Энергетика взаимосвязи объемных деформаций и сейсмичности в зонах разломов // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 3. С. 63–73.
11. Жуков В.С., Кузьмин Д.К. Оценка сжимаемости порового пространства коллекторов Увязовского ПХГ // Наука и технологические разработки. 2022. Т. 101. № 3. С. 5-20.

12. Жуков В.С., Кузьмин Д.К. Оценка сжимаемости порового пространства коллекторов Увязовского ПХГ // Наука и технологические разработки. 2022. Т. 101. № 3. С. 5-20.
13. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Экспериментальная оценка коэффициентов сжимаемости трещин и межзерновых пор коллектора нефти и газа // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 658-666.
14. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Сопоставление подходов к оценке сжимаемости порового пространства // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 1006–1017.
15. Кузьмин Ю.О. Современные объемные деформации разломных зон // Физика Земли. 2022. № 4. С. 3-18.
16. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика индуцированных разломов // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 3. С. 5-65.
17. Кузьмин Ю.О., Кузьмин Д.К., Фаттахов Е.А. Сравнительный анализ результатов измерений донными и платформенными инклинометрами на месторождении Северного Каспия // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 4. С. 55-66.
18. Конырбаев Д.К., Кузьмин Ю.О., Кузьмин Д.К., Шыракбаев Д.А., Суесинов Д.Ж. Анализ результатов геодинамического мониторинга на месторождении п-ова Бузачи, Республика Казахстан // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 3. С. 110-141.
19. Кузьмин Ю.О., Дещеревский А.В., Фаттахов Е.А., Кузьмин Д.К., Казаков А.А., Аман Д.В. Инклинометрические наблюдения на месторождении им. Ю. Корчагина // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 53. № 3. С. 31–41.
20. Кузьмин Ю.О., Дещеревский А.В., Фаттахов Е.А., Кузьмин Д.К., Казаков А.А., Аман Д.В. Анализ результатов деформационных наблюдений системой инклинометров на месторождении им. В. Филановского // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 4. С. 86–94.
21. Кузьмин Ю.О. Индуцированные сейсмические процессы на месторождениях нефти и газа // Проблемы недропользования. 2019. № 4 (23). С. 9-17.
22. Рахматуллин М.Х., Сахаутдинов Р.В., Кузьмин Ю.О. Организация сейсмического мониторинга в нефтедобывающих районах Республики Татарстан // Геофизические процессы и биосфера. 2024. Т. 23. № 2. С. 40-55.
23. Кузьмин Ю.О. Геодинамический риск объектов нефтегазового комплекса // Российская Газовая Энциклопедия. М.: Большая Рос. Энцикл. 2004. С. 121-124.

УДК 550.34

СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП АКТИВИЗАЦИИ СЕЙСМИЧНОСТИ В РЕГИОНЕ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ, АНАЛИЗ КОНТУРОВ РОЕВ И АФТЕРШОКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Лютикова В.С., Литовченко И.Н.
nikki.valo16@gmail.com, litovira@rambler.ru
Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований МЧС РК,
г. Алматы, Казахстан

В работе исследовался процесс современной активизации сейсмичности в регионе Северного Тянь-Шаня и прилегающих территориях за 2017-2025 гг. Анализировались контуры роев и афтершоков землетрясений. Получены каталоги роев и афтершоков, построены карты-схемы пространственно-временного распределения роев землетрясений и афтершоков сильных землетрясений за период наблюдений. Полученные результаты могут быть применены для выделения зон активизации потенциально опасных участков в регионе исследования, где могут произойти сильные землетрясения и зоны релаксации.

Ключевые слова: сейсмичность, контуры роев, контуры афтершоков землетрясений, сильные землетрясения.

Введение. Современный этап активизации сейсмичности в регионе Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий анализируется за 2017-2025 гг., а также возникновение контуров роев и афтершоков землетрясений. В сейсмичности региона выделялись контуры роев и афтершоков землетрясений. По каталогу сейсмических событий [1], проводился процесс распознавания роев землетрясений, афтершоки в каталоге уже распознаны. По экспериментальным данным о сейсмичности региона и алгоритму распознавания роев землетрясений [2-11], рассматривались пространственно-временные распределения землетрясений на территории 39-46°СШ, 70-85°ВД, по которым выделялись контуры роев и афтершоков, а также сильных землетрясений.

В современную эпоху земная кора Северного Тянь-Шаня – энергетически насыщенное структурное образование, которое как бы «висит» над «аномальной мантией» [2, 3].

По результатам анализа и исследования сейсмичности Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий, распознавались рои землетрясений, выделялись афтершоки сильных землетрясений и строилось пространственно-временное распределение. Определены зоны концентрации контуров роев и афтершоков землетрясений в отдельных участках региона Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий. Дополнительно к этим исследованиям [9, 10, 11, 12].

Рассчитывались термодинамические параметры в очагах землетрясений, на основе которых исследовался и анализировался сейсмический процесс региона.

Исходные данные и метод распознавания. Общая сейсмичность региона исследования за 2017-2025 гг., которая весьма неравномерная выступает в качестве исходных данных. Современный этап активизации сейсмичности региона позволяет распознать рои землетрясений и построить контуры их распределения, вынести также контуры афтершоков сильных землетрясений. Так на рисунке 1 представлена карта-схема общей сейсмичности региона.

Рои землетрясений за период 2017-2025 гг. (по глубинам, справа - шкала глубин показана разным цветом) представлены на рисунке 2.

Под роем подразумеваются достаточно слабые землетрясения, как особый вид сейсмической активности. На современном этапе активизации сейсмичности региона исследований, рои происходят в разных частях сейсмоактивного региона. Рой – это группа

близких землетрясений, определенной магнитуды (чаще низких энергетических классов), которые происходят один за другим с течением времени. Рои происходят не по схеме одного крупного землетрясения и нескольких более мелких афтершоков. Роевая активность не имеет закона затухания, как последовательность афтершоков. Применялся метод распознавания роев землетрясений, описанный подробно в [7, 10, 11].

Алгоритм и результаты обработки данных. Исследование и анализ процесса возникновения и выделения контуров роев землетрясений в регионе Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий дает достаточно четкую прогностическую информацию [6, 8, 10]. Алгоритм распознавания роев подробно описан в [7, 8, 11]. Результаты обработки данных представлены на рисунках 2, 3, 4, 5.

На современном этапе активизации сейсмичности в 2017-2025 гг, в том числе роевой активности, рои землетрясений импульсивно возникают и также затухают по неизвестным причинам. Природу возникновения роев пока не могут точно понять, но предпринимаются активные попытки выяснить и уточнить ее. Афтершоки представлены на рисунке 3. На рисунке 4 представлены совмещенные контуры роев и афтершоков за 2017-2025 гг.

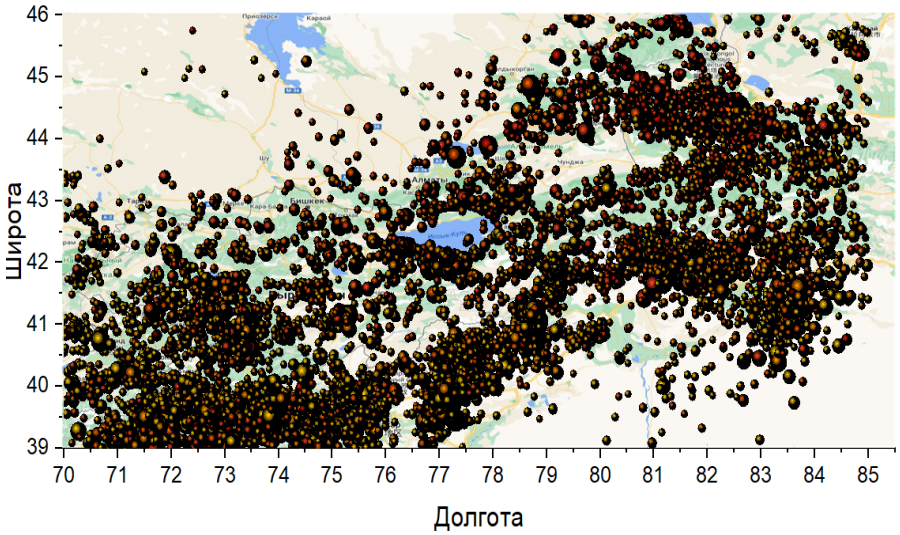


Рисунок 1 – Карта-схема пространственно-временного распределения землетрясений за период 2017-2025 гг. (К≥7)

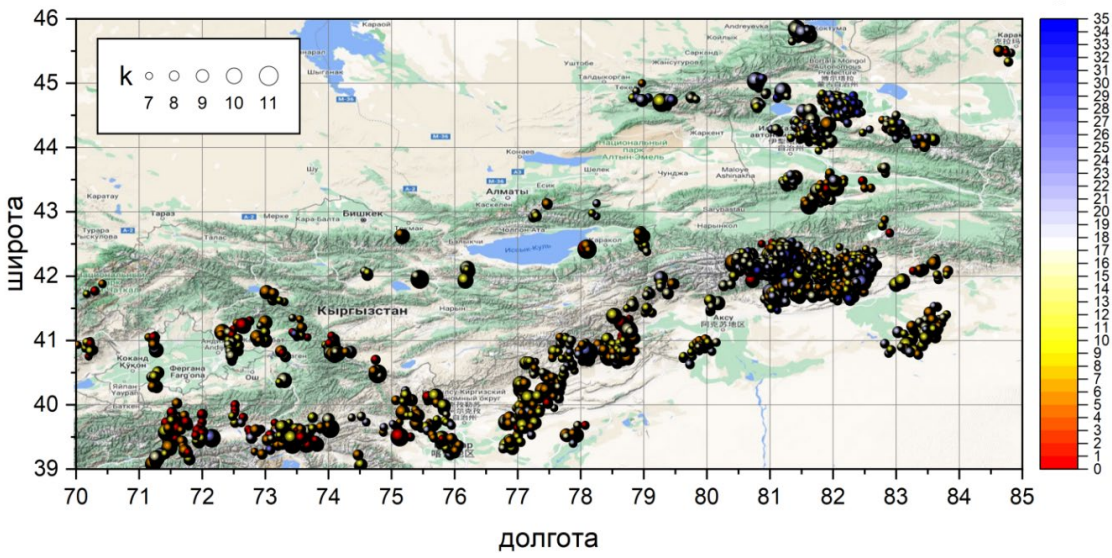


Рисунок 2 – Карта-схема пространственно-временного распределения роев землетрясений за период 2017-2025 гг. (К - энергетический класс, шкала разным цветом – глубина км)

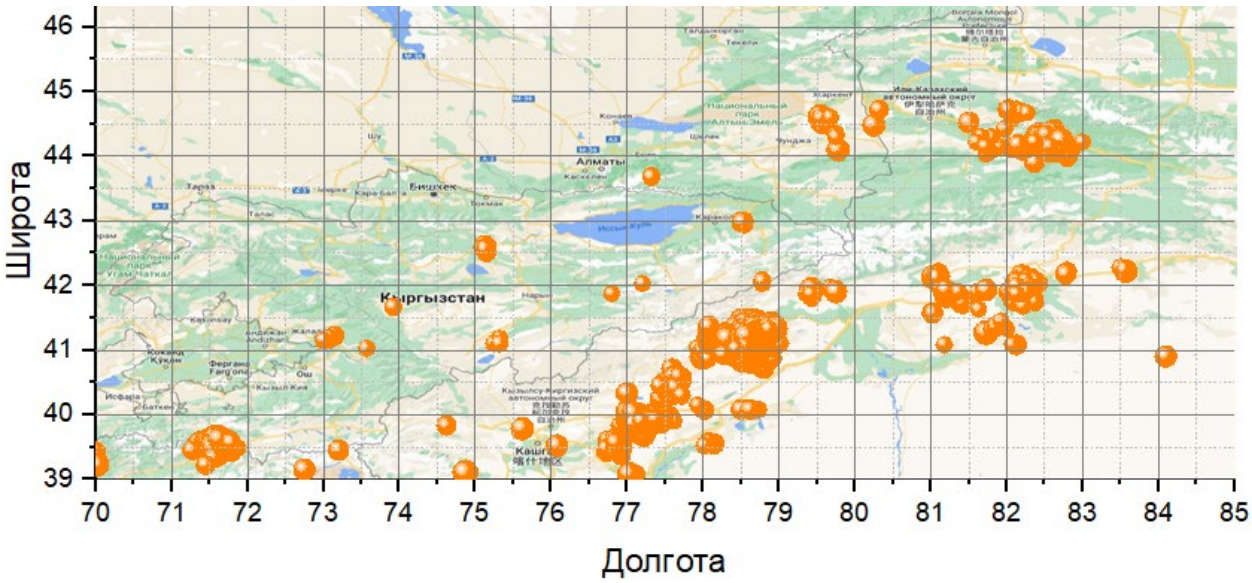


Рисунок 3 – Карта-схема пространственно-временного распределения афтершоков землетрясений за период 2017-2025 гг. (К - энергетический класс)

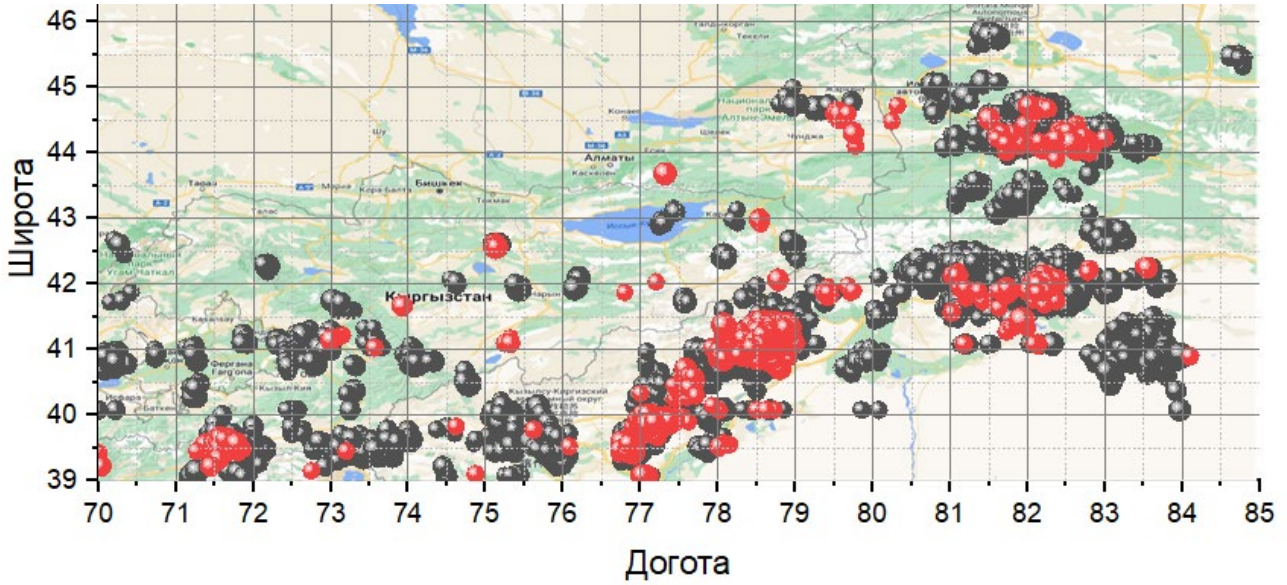


Рисунок 4 – Карта-схема пространственно-временного распределения роев и афтершоков землетрясений за период 2017-2025 гг. (К - энергетический класс)

Результаты. Отметим, что в процессе исследований получен новый взгляд на физическую природу магнитуды землетрясений, и динамические параметры слабых землетрясений, которые рассматриваются в [2, 3-9, 10, 11, 13, 14]. Из общей совокупности всех землетрясений за период времени 2017-2025 гг., выделялись рои землетрясений по алгоритму их распознавания, (см. рисунки 2, 4). Как результат получена карта-схема пространственно-временного распределения таких сейсмических событий (см. рисунок 5): представлены рои – черным цветом, сильные землетрясения – красным цветом, их афтершоки – оранжевым цветом. Радиус – в зависимости от К.

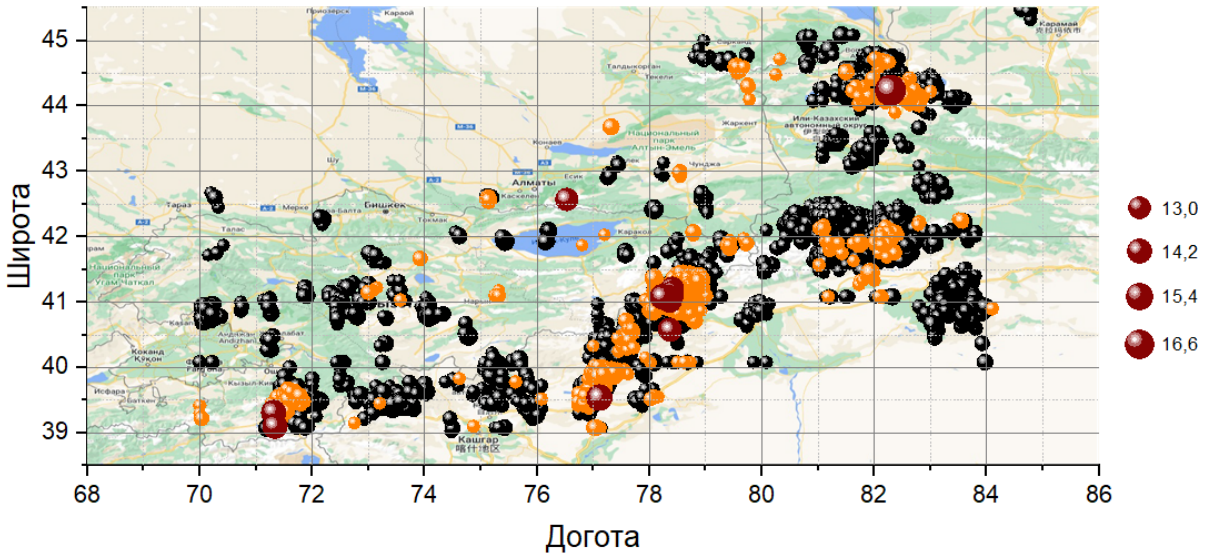


Рисунок 5 – Карта-схема пространственно-временного распределения роев, сильных землетрясений и афтершоков землетрясений за период 2017-2025 гг. (К - энергетический класс)

Выводы. В результате проведенного анализа сейсмичности на современном этапе активизации в регионе Северного Тянь-Шаня и прилегающих территориях, процесса возникновения роев землетрясений, получены научно-практические результаты, которые могут быть использованы для выделения зон активизации потенциально опасных участков возникновения сильных землетрясений в регионе Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий.

Итак, на рисунке 5 представлена карта-схема пространственно-временного распределения роев землетрясений, сильных землетрясений, их афтершоков за 2017-2025 гг. Как можно видеть, разным цветом показаны скопления роев, сильных землетрясений и их афтершоков за период 2017-2025 гг. За последние 9 лет (с 2017 по 2025 гг.), основная группа роев землетрясений группируется в юго-восточной части региона, с продвижением на северо-восток в 2024-2025 году. В юго-западной части рои землетрясений наблюдались с 2017 года. Отдельные зоны скопления роев землетрясений наблюдаются в виде сплошной полосы по южной части региона исследования с постепенным ее переходом вдоль горных хребтов к северо-востоку. Во временном распределении зоны концентрации роев наиболее активным в процессе их возникновения оказался 2022 год. Можно отметить активные 4 зоны, в которых происходили и могут произойти сильные события. Контуры афтершоков локализованы в области уже произошедших сильных землетрясений. (см. рисунок 5).

Работа выполнена в лаборатории физики геодинамических и сейсмических процессов в рамках ПЦФ шифр программы BR24992763 «Оценка сейсмической опасности территорий областей и городов Казахстана на современной научно-методической основе». Источник финансирования - Министерство образования и науки Республики Казахстан

Литература

1. Региональный каталог землетрясений / Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция МЧС РК (СОМЭ). Электронный ресурс: http://some.kz/
2. Курскеев А.К. Землетрясения и сейсмическая безопасность Казахстана. Алматы. 2004. 504 с.
3. Курскеев А.К. Гравитационное взаимодействие планет Солнечной системы и сейсмичность Земли. Алматы: Эверо. 2021. 547 с.
4. Курскеев А.К., Колумбетова К.К., Литовченко И.Н., Амиров Н.Б., Лютикова В.С. О физической природе магнитуды землетрясений // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений для территории Республики Казахстан (16.06 - 18.06.2022). Алматы. 2022. С. 141-148.

5. Литовченко И.Н. Физические параметры очаговых зон сильных землетрясений земной коры Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий // Известия НАН РК. Серия геологическая. 2009. № 5. С. 59-67.
6. Литовченко И.Н., Лютикова В.С. Универсальный алгоритм распознавания образов роевых последовательностей землетрясений в современной сейсмичности региона Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий // Глубинное строение, минерагения, современная геодинамика и сейсмичность Восточно-Европейской платформы и сопредельных регионов. Материалы XX Всерос. конф. с междунар. участием. Воронеж. 2016. С. 236-240.
7. Лютикова В.С. Рои землетрясений как отклик энергонасыщенных структур земной коры на воздействие астрофизических факторов // Сборник материалов Всемирного конгресса инженеров и ученых EXPO 2017. Астана. 2017. С. 328-331.
8. Лютикова В.С., Литовченко И.Н. Технология распознавания образов (в выявлении роев землетрясений) // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Материалы докл. XI Междунар. конф. молодых ученых и студентов. Бишкек. 2019. С. 104-108.
9. Лютикова В.С., Литовченко И.Н. Обучающий алгоритм распознавания образов при решении практических задач // Робототехника и Искусственный интеллект. Материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, (Железногорск, 14 декабря 2019 г.). Железногорск. 2019. [Электронное издание]. С. 231-237.
10. Лютикова В.С., Литовченко И.Н. Технология распознавания образов в выявлении роев землетрясений // Знания-Онтологии-Теории (ЗОНТ-2019). Материалы VII Междунар. конф. Новосибирск. 2019. С. 233-237.
11. Lyutikova V.S., Litovchenko I.N. Modern pattern recognition tools (by the example of earthquake swarms). Astana. 2023. P. 7-10.
12. Панас Н.М., Ассиновская Б.А. Динамические параметры слабых землетрясений восточного склона Балтийского щита / Российский сейсмологический журнал. 2022. Т. 4. № 4. С. 65-78. DOI: 10.33540/2686-7907/2022.4.05. EDN:AFPGFJ
13. Лютикова В.С., Литовченко И.Н. Искусственный Интеллект в задачах сейсмологии, алгоритмы и методы распознавания образов роев (на примере сейсмичности Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий) // In the Worlds of Science and Education. Алматы. 2025. С. 21-25. Doi 10.24412/3007-8946-2025-15-21-25
14. Lyutikovs V.S., Litovchenko I.N. Analysys of physical nature of thermodynamic and rheological parameters in earthquake spots and the universality of their calculation methodology // Endless Light in Sciense. Астана. 2024. С. 3-7. Doi 10.24412/2709-1201-2024-3012-3-7

УДК 622.2:504.5

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

Мирзоев Г.Г.
g-mirzoev@inbox.ru
Владикавказский научный центр РАН, с. Михайловское, РСО-Алания, Россия

В статье рассматривается необходимость перехода к новой стратегии оценки и прогнозирования устойчивости ограждающих дамб на хвостохранилищах. Проведен анализ аварий на хвостохранилищах и рассмотрены различные методы, которые использовались разными авторами. Объектом исследования является Фиагдонское хвостохранилище, расположенное в Республике Северная Осетия – Алания. Проведены расчеты опасности техногенного массива. Статья представляет методы оценки опасности хвостохранилищ через Индекс опасности хвостохранилища (ИОХ) и Индекс риска хвостохранилища (ИРХ). Методы помогают выявить наиболее рискованные объекты и спланировать меры по предотвращению чрезвычайных ситуаций. Также отмечается необходимость дальнейшей работы над разработкой единого методологического подхода к изучению свойств хвостов для повышения точности и достоверности данных, а также безопасности эксплуатации хвостохранилищ.

Ключевые слова: хвостохранилище, экологическая безопасность, окружающая среда, индекс опасности и риска хвостохранилищ

Введение. Согласно государственному докладу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации [1], в настоящее время в России наибольший объём образования отходов производства приходится на вид экономической деятельности «добыча полезных ископаемых», который составляет 7,257 млрд тонн. При этом данный объём с каждым годом увеличивается.

Так за последние два десятилетия наблюдается ухудшение экологической ситуации, вызванное масштабным перемещением опасных материалов в результате аварий на хвостохранилищах. Подобные инциденты могут привести к неконтролируемым утечкам и выбросам опасных веществ в окружающую среду. Это загрязнение может иметь серьёзные последствия и нанести ущерб здоровью человека, инфраструктуре, а также негативно повлиять на экономическую деятельность, окружающую среду и природные ресурсы.

Практически ежегодно в различных странах происходят аварии (разрушения) гидротехнических сооружений. Ни одна страна, даже экономически высокоразвитая, не смогла полностью предотвратить подобные инциденты. За последние 60 лет в мире было зарегистрировано 323 аварии на хвостохранилищах [2]. При этом анализ показывает, что количество аварий в течение первых трех десятилетий не увеличивалось, а затем даже снизилось после 1990 года в течение двух десятилетий (1990–1999 и 2000–2009 годы).

Однако за последнее десятилетие количество аварий вновь достигло уровня 1970-х годов. В 2019 году произошло семь аварий на хвостохранилищах, две из которых были крупными и привели к многочисленным жертвам.

При этом в результате указанных 323 аварий зарегистрировано 2 599 человеческих жертв [2]. Анализ данных показывает, что количество погибших ра последние 10 лет в результате аварий на хвостохранилищах составило 480 человек [2].

Анализируя произошедшие 323 аварии на хвостохранилищах было подсчитано, что в общей сложности почти 250 миллионов кубических метров отходов было сброшено. И опять за последние 10 лет количество сброшенных отходов значительно увеличилось, превысив более 100 миллионов кубических метров отходов в окружающую среду [2].

Горнометаллургический комплекс вносит значительный вклад в общее количество минеральных отходов, образующихся в мире ежегодно (около 25 млрд тонн, в том числе в России 7 млрд тонн или 38–40%). Темп накопления отходов в последнее время настолько высок, что создаёт реальную экологическую угрозу.

В районах с развитой горнорудной промышленностью накопление отходов горнопромышленного комплекса приводит к серьёзным экономическим и экологическим проблемам. Промышленная и экологическая безопасность техногенных месторождений напрямую связана с устойчивостью гидротехнических сооружений и во многом зависит от состояния их отдельных элементов, за которыми проводятся регулярные наблюдения.

Основные требования к созданию и эксплуатации хвостохранилищ включают обеспечение устойчивости склонов, предотвращение оползней, обрушений и оплывания, снижение пыления, контроль фильтрации технических вод и др. [3, 4].

В настоящее время становится всё более актуальной необходимость поиска новых решений для оптимизации природоохранной деятельности и снижения экологических последствий строительства и эксплуатации техногенных месторождений.

Для обеспечения экологической безопасности хвостохранилищ и предотвращения загрязнения окружающей среды, минимизации рисков возникновения аварийных ситуаций и обеспечения безопасного обращения с отходами необходим комплексный подход, включающий изучение физико-механических свойств хвостов не только на макро-, но и на микроуровне.

Объект исследования. Объектом исследования является Фиагдонское хвостохранилище, расположенное в Республике Северная Осетия — Алания. Оно введено в эксплуатацию в 1970 г и расположено в узком, каньонообразном ущелье р. Хаником-дон, правом притоке р. Фиагдон на высоте 1250 м над уровнем моря. Имеет резко вытянутую V-образную форму. Ограничено с обоих бортов скальными песчано-сланцевыми и известняковыми отложениями юрского и мелового возрастов. От долины р. Фиагдон хвостохранилище отделено высокой насыпной дамбой. Площадь хвостохранилища около 56 000 м2. В хвостохранилище захоронено около 2,4 млн тонн промышленных отходов» [5].

Суммарные запасы металлов в хвостохранилище составляют: Pb — 4560 тонн; Zn — 8400 тонн; Cu — 2880 тонн; Ti — 3840 тонн; Fe — 163 тыс. тонн; Mn — 3360 тонн; Ag — первые десятки тонн. Также в хвостохранилище содержатся значительные запасы других элементов, некоторые из которых являются токсичными.

Накопленные в хвостохранилище промышленные отходы представляют собой масштабный источник длительного загрязнения гидросферы, литосферы и биосферы. Загрязнение происходит за счёт водного и воздушного переноса различных токсичных компонентов на значительные расстояния.

Методология исследования. Одним из инструментов, предназначенных для оценки потенциальной опасности хвостохранилищ, является Индекс Опасности Хвостохранилища (ИОХ) и Индекс Риска Хвостохранилища (ИРХ), предложенные Винкельманом-Оэем, Ридлем и др. в 2023 году [2].

Оценивая хвостохранилища с использованием индекса ИОХ, можно быстро получить представление о потенциале опасности хвостохранилища. Это позволит впоследствии разработать и реализовать дополнительные меры обеспечения безопасности на хвостохранилище.

Этот индекс рекомендуется использовать для ранжирования хвостохранилищ на региональном, национальном и международном уровне и расстановки приоритетов в соответствии с рассчитанным потенциалом опасности.

Критерии, лежащие в основе индекса опасности хвостохранилищ (ИОХ), были разработаны и согласованы международными экспертами и усовершенствованы с учётом результатов анализа аварий хвостохранилищ в прошлом.

Метод индекса опасности хвостохранилищ (ИОХ) включает в себя следующие параметры: емкость хвостохранилища, токсичность хвостовых материалов, статус управления хвостохранилищем, природные условия и безопасность дамбы.

Процедура расчёта ИОХ включает пять шагов. В случае, если значения некоторых параметров недоступны или невозможно идентифицировать, необходимо использовать максимальные значения (наихудший сценарий). Таким образом, ожидается, что опасность, связанная с недоступным параметром хвостохранилища (например, токсичностью), будет самой высокой.

«Ёмкость хвостохранилища» ($ИОХ_{Ёмк}$) — это объём хранимых хвостов на объекте ($м^3$). «Токсичность» оценивается на основе класса опасности для воды (WHC) материалов в хвостохранилищах. Чтобы комплексно оценить токсичность, важно иметь параметр, отражающий все потенциальные угрозы водной экосистеме в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Метод WHC считается проверенной методологией в мире, который объединил все потенциальные угрозы для водных экосистем.

В качестве альтернативы можно самостоятельно определить степень токсичности по классификации ООН (табл. 1) [2]. «Статус» управления хвостохранилищем зависит от стадии его использования (табл. 2).

Таблица 1 – Классы опасности $ИОХ_{Токс}$

Класс опасности	**$ИОХ_{токс}$**
Не опасно	0
Низкий уровень опасности	1
Средний уровень опасности	2
Высокий уровень опасности	3

Таблица 2 – Статусы хвостохранилища $ИОХ_{Управ}$ [2]

Статус хвостохранилища	**$ИОХ_{управ}$**
Рекультивированное	0
Закрытое	1
Законсервированное	2
Заброшенное/бесхозное	3
Активное	3

«Природные условия» ($ИОХ_{Природ}$) – относятся к экологическим рискам, которые часто связаны с авариями хвостохранилищ. В частности, землетрясения, проливные дожди и наводнения.

«Безопасность дамбы» ($ИОХ_{Дамба}$) – фактор прочности откосов насыпных дамб.

ИОХ рассчитывается по следующей формуле с учетом всех остальных параметров:

$$ИОХ = ИОХ_{Ёмк} + ИОХ_{Токс} + ИОХ_{Управ} + ИОХ_{Природ} + ИОХ_{Дамба} \quad (1)$$

Согласно методике [2] Индекс Опасности Хвостохранилища (ИОХ) может принимать минимальное значение –0, максимальное –17. Для более точной оценки текущего состояния уровня опасности хвостохранилища разработана градация, условно разделяющая хвостохранилища на четыре категории в зависимости от рассчитанного значения ИОХ (Таблица 3).

После определения индекса ИОХ определяется уровень риска аварий на хвостохранилище с использованием метода ИРХ [2], учитывающего общий потенциал опасности прямого воздействия на население $ИВХ_{насел.}$ (Таблица 4), а также оценку воздействия на окружающую среду $ИВХ_{окр.}$ (Таблица 5) т.е водоёмы ниже по течению, которые могут стать потенциальными реципиентами риска в случае аварии.

Таблица 3 – Уровни опасности хвостохранилища [2]

Уровни опасности		**Диапазон ИОХ**
Безопасный	I	От 0 до 4 включ.
Повышенной опасности	II	От 4 до 8 включ.
Опасный	III	От 8 до 13 включ.
Критический	IV	От 13 до17 включ.

Таблица 4 – Индекс воздействия на население

Население подверженное риску на 10 км (чел)	**$ИВХ_{насел.}$**
<100	2
100-1000	3
1000-10000	4
10000-100000	5
≥100000	6

Таблица 5 – Индекс воздействия на окружающую среду

Расход потока, $м^3/с$ или площадь водоёма, $км^2$	**$ИВХ_{окр}$**
<100	2
100-1000	3
>1000	4

Для получения значения ИРХ производится суммирование $ИВХ_{насел.}$ с $ИВХ_{окр.}$.

Согласно методике [2] Индекс Риска Хвостохранилища (ИРХ) может принимать минимальное значение – 4, максимальное – 27. Разработана градация на четыре категории риска хвостохранилища в зависимости от рассчитанного значения ИРХ (Таблица 6).

Таблица 6 – Уровни риска хвостохранилища

Уровни риска		**Диапазон**
Низкий	I	От 4 до 9 включ.
Средний	II	От 9 до 14 включ.
Повышенный	III	ОТ 14 до 21 включ.
Опасный	IV	От 21 до 27 включ.

Результаты и обсуждение. В табл.7 представлены исходные данные для расчета Индекса Опасности Фиагдонского хвостохранилища

Таблица 7 – Общие сведения о Фиагдонском хвостохранилище

Общие сведения	**Значение**
Объем хвостохранилища (млн $м^3$)	2,4
Токсичность хвостовых материалов	Средний уровень
Статус управления	Законсервированное
Расположение в зоне, подверженной сейсмоопасности	Да

Расчет выполняется в следующей последовательности:

1-й шаг: определение индекса «Вместимость» хвостохранилища

$ИОХ_{Ёмк}$ = Log10 [2400000] = 6,3

2-й шаг: определение индекса «Токсичность» для среднего уровня опасности

$ИОХ_{Токс}$ = 2

3-й шаг: определение индекса «Управление условиями» - хвостохранилище является законсервированным

$ИОХ_{Управ}$ = 2

4-й шаг: определение индекса «Природные условия» - хвостохранилище находится в сейсмической зоне - HQ-500, и эталонный PGA превышает 0,1 $м^2/с$.

$ИОХ_{Прир}$= $ИОХ_{сейсм}$ + $ИОХ_{навод}$ = 1+1=2

5-й шаг: определение индекса «Дамба» - находится в устойчивом состоянии

$ИОХ_{Дамба}$ = 1

6-й шаг расчет Общего ИОХ

ИОХ = $ИОХ_{Ёмк}$ + $ИОХ_{Токс}$ + $ИОХ_{Управ}$ + $ИОХ_{Нат}$ + $ИОХ_{Дамба}$ = 6,3+2+2+2+1=**13,3**

На рисунке 1 представлено графическое изображение расчета ИОХ хвостохранилища. В соответствии с данными таблицы 3 ИОХ соответствует «Критическому уровню опасности».

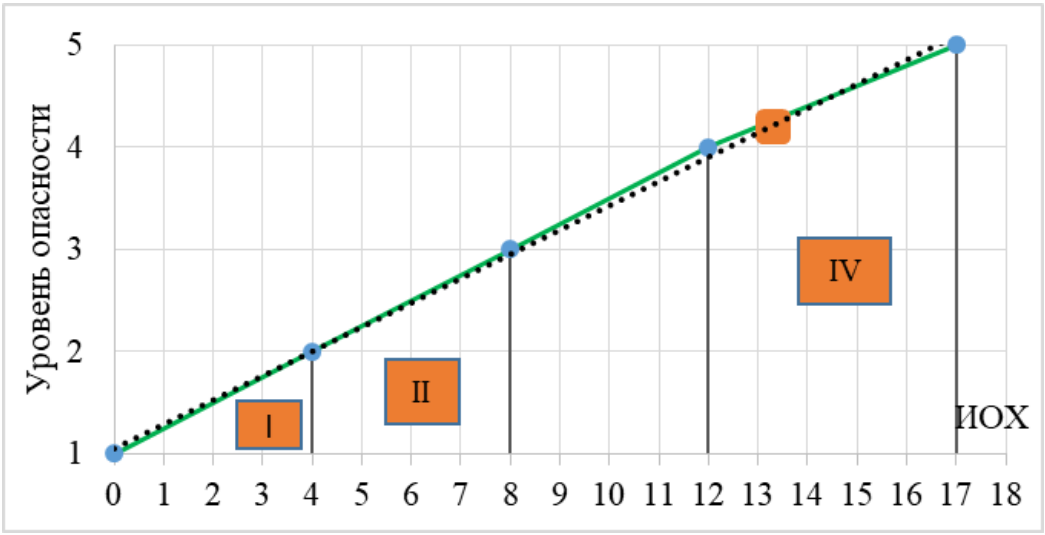


Рисунок 1 – Оценка уровня опасности Фиагдонского хвостохранилища

Далее расчет ИРХ выполняется в следующей последовательности

Шаг 1-й Влияние на население:

Так как население вниз по течению до 10 км от хвостохранилища примерно составляет 1201 человек (с. Верхний Фиагдон, с. Даллагкау, с. Дзивгис, с. Гусыра), то по таблице 4 $ИВХ_{насел.}$ = 4.

Шаг 2-й Влияние на окружающую среду:

$ИВХ_{окр}$ — это фактор, учитывающий размер ближайшего к хвостохранилищу водоема, расположенного ниже по течению на расстоянии 10 км от хвостохранилища, который может быть загрязнен в результате аварии на хвостохранилище. Вблизи Фиагдонского хвостохранилища находится р. Фиагдон и расход реки составляет 29 м3/с, то $ИВХ_{окр}$ = 2.

Шаг 3-й Общий ИВХ:

ИВХ = $ИВХ_{нпр}$ + $ИВХ_{окр}$ = 4+2 = 6.

Шаг 4-й ИРХ:

ИРХ = ИВХ + ИОХ = 13,3 + 6 = **19,3** – Повышенный уровень риска (Таблица 6) (Рисунок 2).

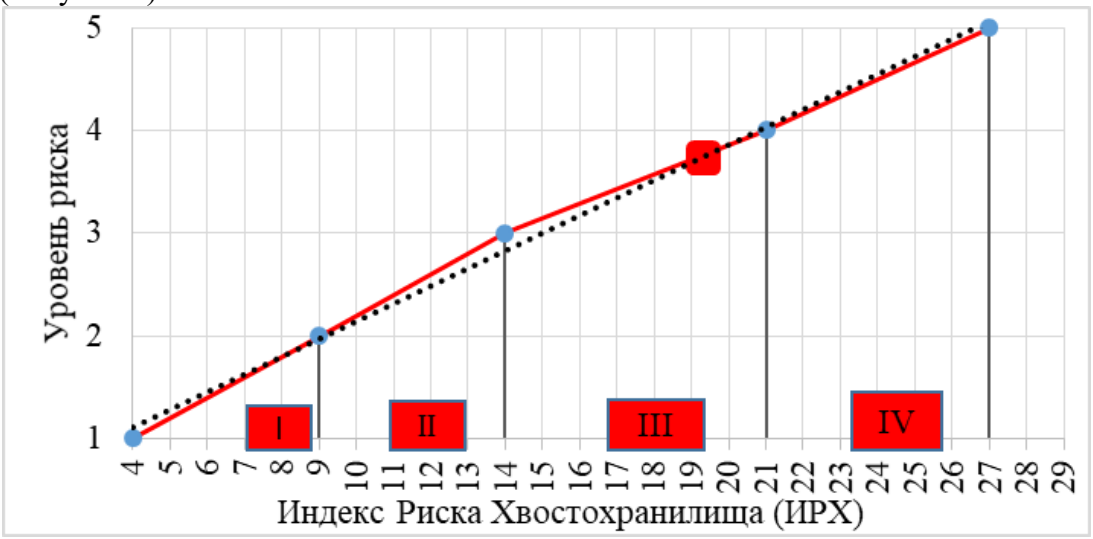


Рисунок 2 – Оценка уровня риска Фиагдонского хвостохранилища

Выводы. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Индекс опасности хвостохранилища (ИОХ) — метод оценки потенциальной опасности отходов, сбрасываемых в хвостохранилища, учитывает химический состав, объем, удаленность от населенных пунктов и водоемов, наличие защитных экосистем. А Индекс риска хвостохранилища учитывает общий потенциал опасности прямого воздействия на население, а также оценку воздействия на окружающую среду. Применение индексов помогает выявить рискованные объекты и спланировать меры в случае чрезвычайных ситуаций.
2. Методология ИОХ и ИРХ основана на простом индексном методе, доступном и понятном для специалистов. Ранжирование хвостохранилища по степени потенциальной опасности и риска являются важными инструментами планирования экологической безопасности.
3. Критерии ИОХ и ИРХ разработаны с участием международных экспертов и прошли процедуру согласования, что гарантирует их эффективное использование на региональном и международном уровнях. Это способствует обмену информацией и совместным действиям по улучшению экологической безопасности.
4. Несмотря на значимость проведенных исследований, требуется дальнейшая разработка единого методологического подхода к изучению физико-механических свойств грунтов в районе хвостохранилища. Это поможет улучшить точность и достоверность получаемых данных для планирования мероприятий по безопасной эксплуатации данных объектов.
5. Аналогичные результаты, полученные для Унальского хвостохранилища в республике Северная Осетия – Алания [6] позволят разработать мероприятия по повышению экологической безопасности хвостохранилищ, и улучшить экологическую обстановку в регионе.

Литература

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова. 2023. 686 с.
2. Винкельман-Оэй Г., Ридль А., Мадай Ф., Ковач А. Методология обеспечения безопасности хвостохранилищ. Дессау-Рослау: German Environment Agency, 115/2023. 2023. 89 с.

3. Хвостохранилища: нормативные документы по АСДК / [Электронный ресурс] // sodislab.com: [сайт]. URL: https://www.sodislab.com/ru/shm-standards-tailings (дата обращения: 30.04.2024).
4. Безопасность гидротехнических сооружений на объектах промышленности и энергетики: Сб. документов. Сер. 03. Вып. 1. 4-е изд., испр. и доп. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». 2010. 456 с.
5. Гурбанов А.Г., Лексин А.Б., Газеев В.М., Гурбанова О.А., Лолаев А.Б., Илаев В.Э. Закономерности в характере распределения в вертикальных разрезах и по латерали содержаний базовых металлов в керне скважин в Фиагдонском хвостохранилище (Республика Северная Осетия - Алания) // Вестник Владикавказского научного центра. 2019. № 2. С. 78–88.
6. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Петров Ю.С., Оганесян А.Х., Дзебоев С.О., Мирзоев Г.Г. Ключевые аспекты экологической безопасности намывных массивов хвостохранилищ // Евразийский союз ученых. Серия: междисциплинарный. 2024. Т. 1. № 04 (112). С. 7-15.

УДК 551.324

СТАДИИ ДЕГРАДАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ЛЕДНИКОВ ТЯНЬ-ШАНЯ

Оморова Г.К., Эрменбаев Б.О.
omorovagulbara@gmail.com
Институт водных проблем и гидроэнергетики НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

В статье исследуются стадии деградации современных ледников Тянь-Шаня, начавшиеся после завершения Малого ледникового периода. Процесс дегляциации характеризуется прогрессивной регрессией ледников, сопровождающейся изменением их морфологии и динамики. В статье выделены семь стадий деградации, отражающие эволюцию ледниковых систем: от дендритовых ледников с незначительной скоростью отступания до стадии погребённых льдов, характеризующейся полной утратой активной ледниковой массы и покрытием её обломочным материалом. Проведённый анализ пространственного распределения стадий деградации в пределах различных орографических зон Тянь-Шаня выявил значительную вариабельность, обусловленную климатическими факторами и экспозицией склонов. Полученные результаты имеют важное значение для прогноза динамики ледниковых систем, оценки водных ресурсов региона и разработки стратегий адаптации к изменяющимся климатическим условиям.

Ключевые слова; ледниковая деградация, регресс ледников, стадии дегляциации, ледниковая морфодинамика, абляция, изменение климата, моренно-ледниковые комплексы, водный баланс региона.

Введение. Современное оледенение Тянь-Шаня испытывает значительные изменения, обусловленные глобальными климатическими тенденциями. Деградация ледников в данном регионе является сложным и многокомпонентным процессом, начавшимся после окончания Малого ледникового периода. На фоне общего сокращения ледникового покрова наблюдаются локальные различия в темпах регрессии, связанные с орографическими, климатическими и гидрологическими факторами. Изучение стадий деградации ледников имеет важное значение для понимания динамики криосферных процессов, прогнозирования водных ресурсов и оценки рисков, связанных с дегляциацией. В условиях ускоренного таяния ледников возрастает необходимость детального анализа морфологических изменений и трансформации ледниковых комплексов. Настоящее исследование направлено на систематизацию стадий деградации современных ледников Тянь-Шаня, выявление закономерностей их трансформации и определение пространственного распределения различных стадий в пределах орографических зон региона. Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании изменений гидрологического режима, разработке мер по адаптации к изменению климата и управлению водными ресурсами.

Методология. Исследование стадий деградации ледников Тянь-Шаня проведено на основе анализа данных многолетних гляциологических наблюдений, топографических карт и спутниковых снимков. В качестве основного метода использован сравнительный морфологический анализ ледниковых систем, включающий классификацию стадий деградации по типу и скорости их регрессии.

Для оценки динамики отступания ледников использованы данные дистанционного зондирования, в том числе аэрофотосъёмка и спутниковые изображения высокой пространственной разрешающей способности. Анализ морфометрических параметров ледников осуществлён с применением ГИС-технологий, что позволило детализировать пространственное распределение стадий деградации и выявить закономерности их эволюции.

Исследование стадий деградации ледников Тянь-Шаня основано на комплексном подходе, включающем следующие методы:

1. Сравнительный морфологический анализ
   - Классификация стадий деградации ледников по типу и скорости их регрессии.
   - Определение изменений морфологии ледниковых систем на основе исторических и современных данных.
   - Анализ данных дистанционного зондирования

2. Использование спутниковых снимков высокой разрешающей способности и аэрофотосъёмки.
   - Определение динамики ледников на основе многовременных изображений.
   - Вычисление скорости регрессии ледников по спутниковым данным.
   - Геоинформационные технологии (ГИС-анализ).

3. Анализ морфометрических параметров ледников (площадь, длина, объем).
   - Пространственное картографирование стадий деградации ледников.
   - Определение закономерностей распределения деградации ледников по орографическим зонам.
   - Полевые гляциологические исследования.

4. Измерение скорости фронтального отступания ледников.
   - Фиксация изменений ледниковых комплексов в течение полевого сезона.
   - Сравнение с историческими данными гляциологических наблюдений.
   - Анализ архивных и литературных данных.

5. Сопоставление полученных данных с результатами предыдущих исследований.
   - Использование материалов гляциологических станций Тянь-Шаня.
   - Верификация и обобщение результатов.

6. Сравнение данных различных методов для повышения точности оценки.
   - Выявление пространственно-временных закономерностей деградации ледников.
   - Оценка климатических факторов, влияющих на интенсивность регрессии ледников.

Процесс современной деградации ледников Тянь-Шаня начался после окончания, так называемой, малой ледниковой эпохи. Пик последней трансгрессии Тянь-Шанских ледников приходится на вторую половину XIX века [1]. Регрессия ледников началась с конца XIX века и продолжается до настоящего времени. На фоне общей деградации ледников выделяются случаи трансгрессии отдельных ледников (например, ледника Мушкетова в 1971-1973 годах [2]), но эти случаи не могли изменить общей тенденции регресса тянь-шаньских ледников.

На месте отступающих ледников формируются моренно-ледниковые комплексы, которые окаймляют современные ледники Тянь-Шаня (рисунок 1). По альпийской схеме распада вюрмского оледенения современный моренно-ледниковый комплекс коррелируется с мореной последней стадии этого распада – мореной «фернау».

Процесс деградации можно разделить на несколько стадий в зависимости от скорости отступания ледников. При переходе ледника с одной стадии деградации в последующую изменяется не только скорость его деградации, но и тип ледника. На первой стадии находятся ледники, скорость отступания которых пока еще не значительна. Это ледники дендритового типа. Затем от стадии к стадии скорость отступания возрастает. На второй стадии находятся сложно-долинные ледники. На третьей стадии – простые долинные ледники. На четвертой – котловинные ледники. На пятой – присклоновые и на шестой склоновые ледники. Процесс продолжается до полного таяния активной части ледника. После этого ледник переходит в 7-ую стадию, погребенных льдов. На этой стадии находятся забронированные ледники, или так называемые каменные глетчеры.

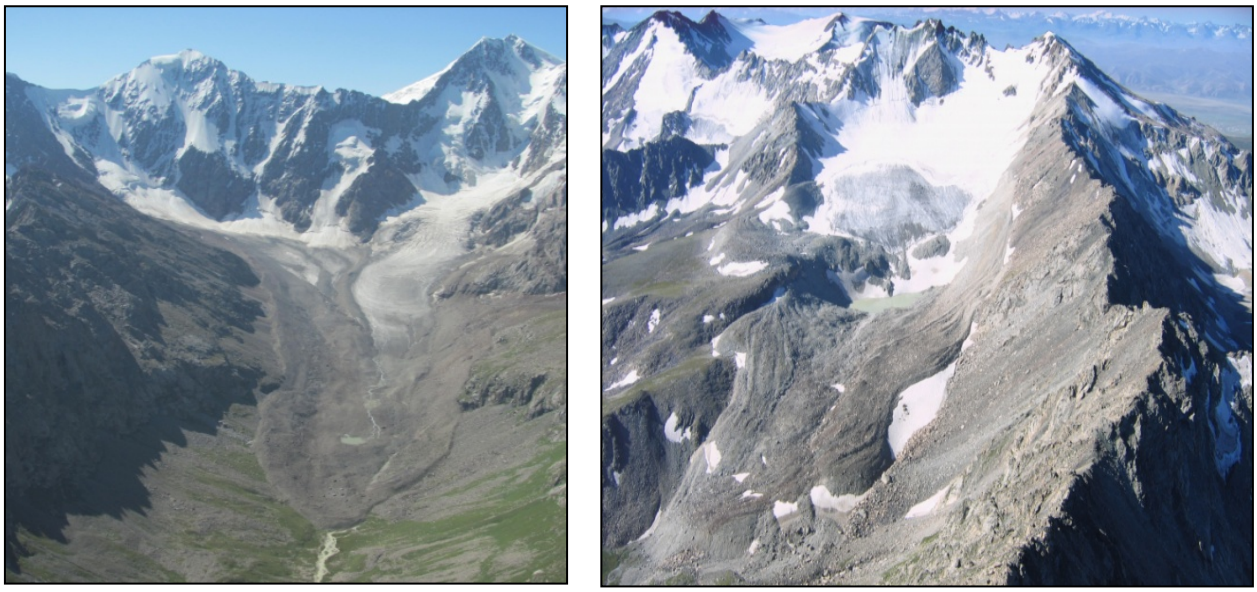


Рисунок 1 – Моренно-ледниковые комплексы, окаймляющие и заканчивающие современные ледники Тянь-Шаня, начали свое формирование со второй половины XIX века, после максимума их последней трансгрессии

Каждый ледник на предыдущей стадии своей деградации являлся частью более крупного ледника. Скорость отступления дендритовых ледников, находящихся на первой стадии деградации, меньше чем у ледников последующих стадий. Она изменяется от 0,001 до 0,005 длины ледника в год, т.е. максимальное отступление ледника может составлять в год всего 0,001 его длины, как например, на леднике Каинды в Центральном Тянь-Шане (рисунок 2).

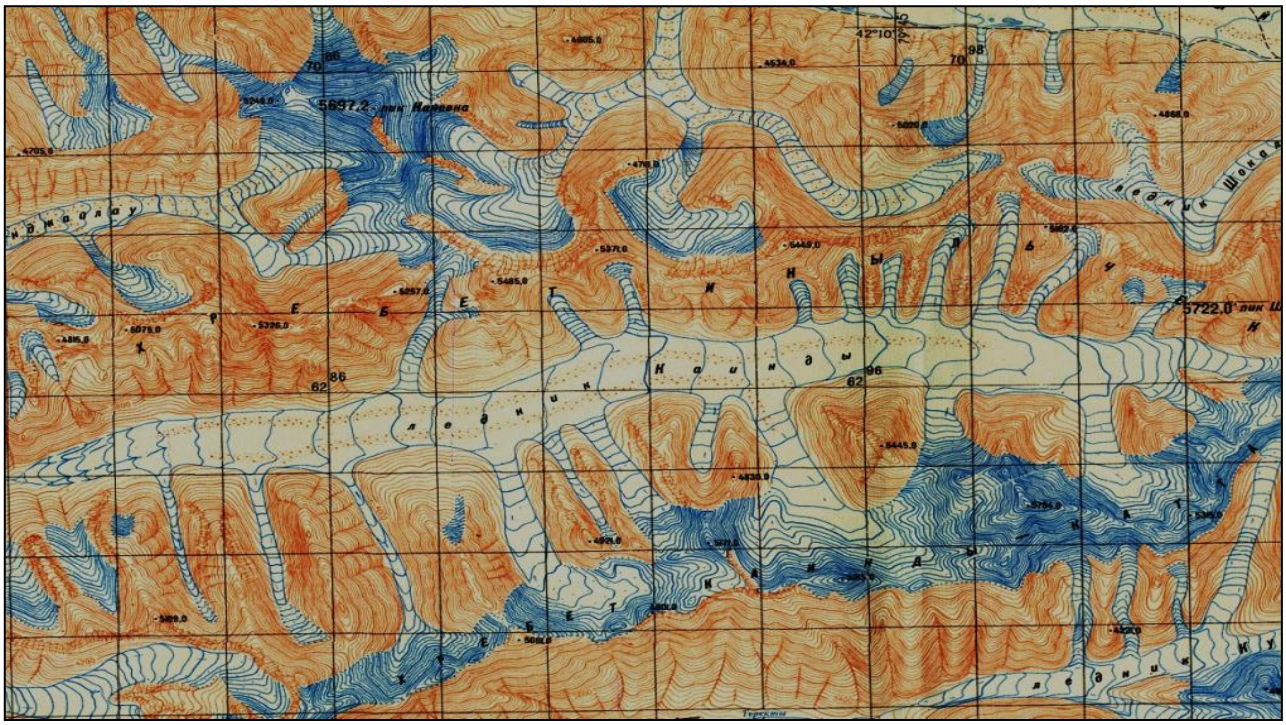


Рисунок 2 – Топографическая карта дендритового ледника Каинды (Центральный Тянь-Шань)

Незначительно отступают ледники на второй стадии деградации. По типу это сложно-долинные ледники (рисунок 3). Относительная скорость их отступания изменяется от 0,005 до 0.01 их длины в год, т.е. потребуется от 100 до 200 лет, чтобы эти ледники полностью растаяли, при условии сохранения тех же скоростей деградации.

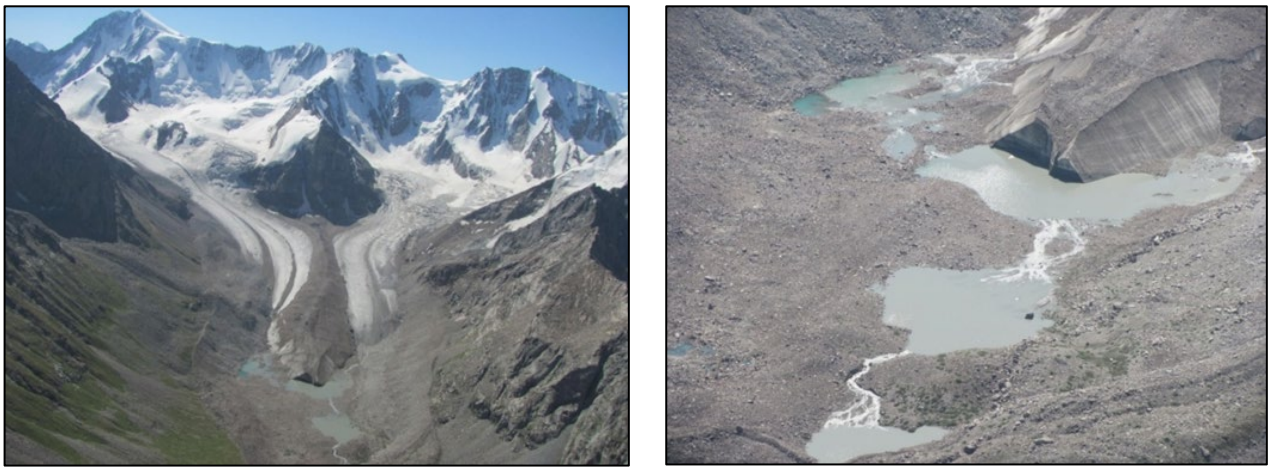


Рисунок 3 – Сложнодолинный ледник Айлама на северном склоне хребта Терскей-Ала-Тоо за последние 50 лет отступил всего на 300 м

На третьей стадии деградации сложно-долинные ледники распадаются на простые (рисунок 4), которые отступают со скоростью 0.01 – 0.02 своей длины в год. Такая картина наблюдается на всех ледниковых центрах Тянь-Шаня, за исключением Центрального Тянь-Шаня.

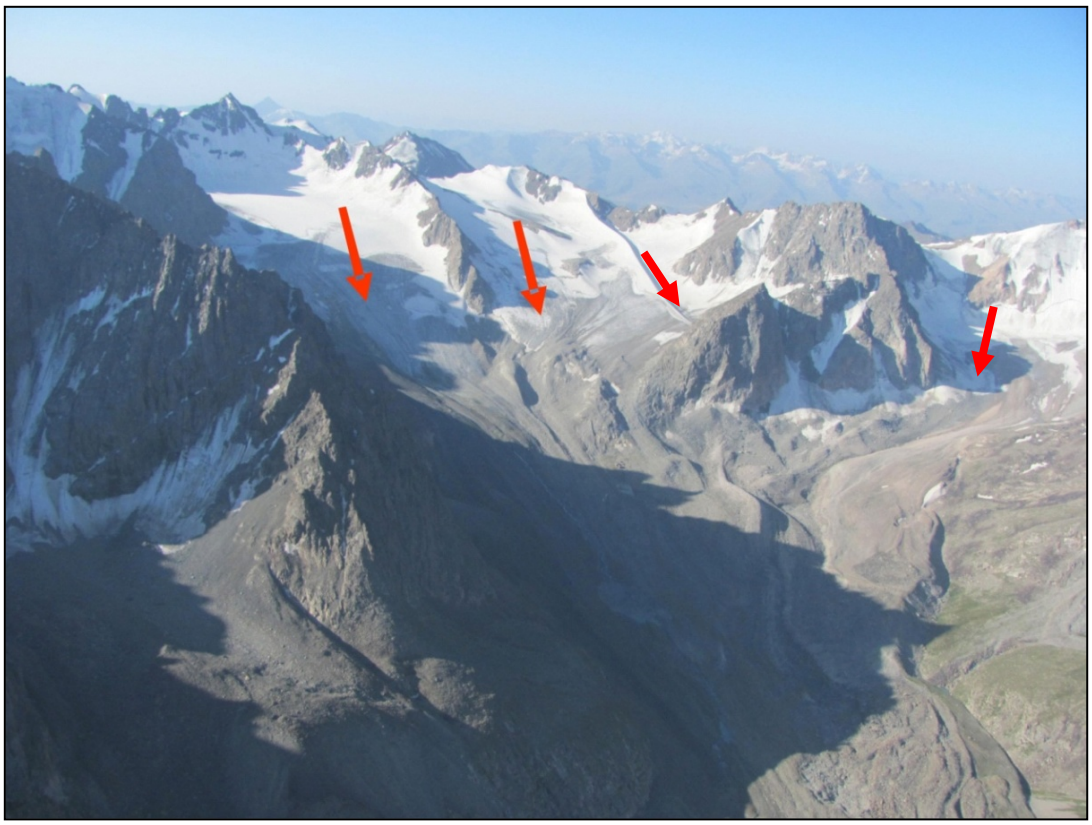


Рисунок 4 – Сложнодолинный ледник в верховьях долины реки Ала-Арча на северном склоне Кыргызского хребта распадается на 4 простых долинных ледника

На четвертой стадии деградации находятся ледники котловинные или каровые (рисунок 5). Они отступают со скоростью 0.02– 0.05 своей длины в год.



Рисунок 5 – Пример перехода простого долинного ледника в котловинный

На 5-ой стадии, котловинные, каровые и простые долинные ледники распадаются на присклоновые (рисунок 6). Скорость их отступания возрастает до 0.05 – 0.1 своей длины в год.

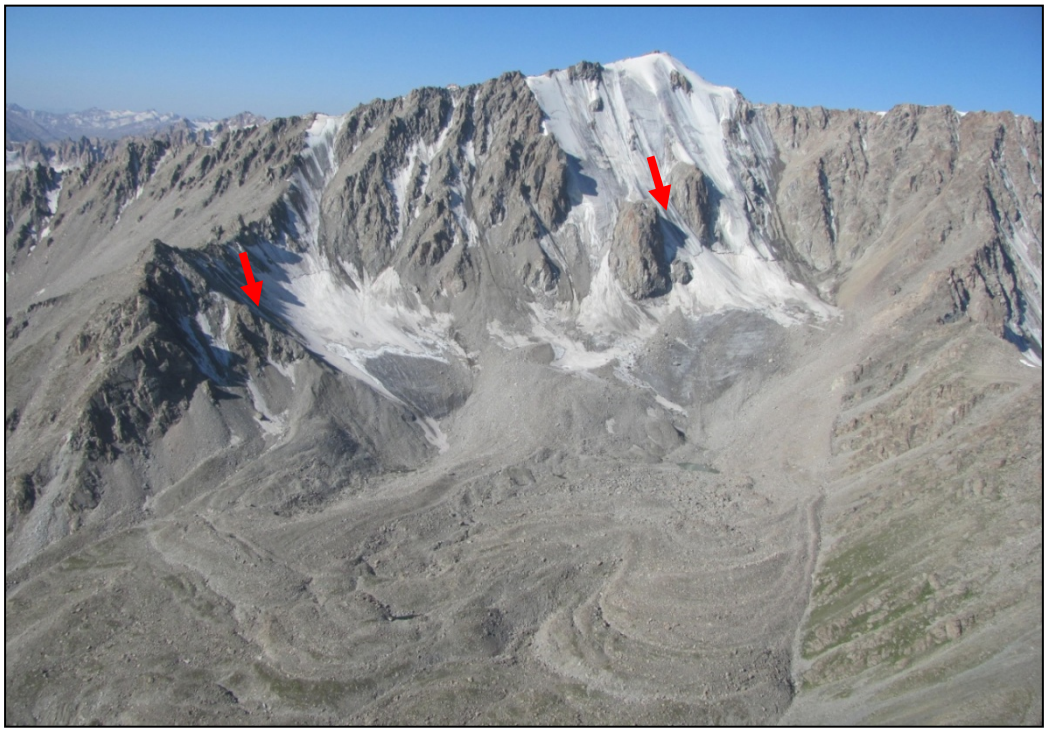


Рисунок 6 – На пятой стадии регресса долинные и котловинные ледники распадаются до присклоновых ледников. Присклоновые ледники Кыргызского хребта

На 6-ой стадии регресса присклоновые ледники переходят в склоновые (рисунок 7). Скорость отступания ледников на этой стадии от 0.1 до 0.2 длины ледников в год.

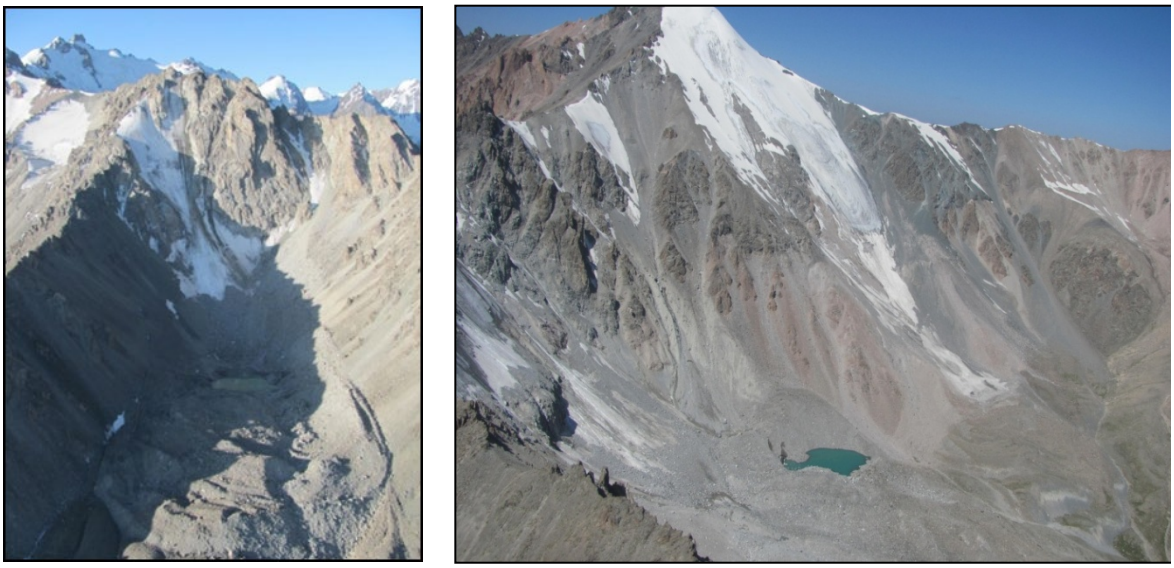


Рисунок 7 – Склоновые ледники Чирканак и Тезтор на северном склоне Кыргызского хребта

Седьмая стадия деградации – это стадия погребенных льдов, когда открытой активной части у ледников уже нет. Она стаяла и покрылась обломочным материалом. От ледника остается погребенная часть. Она обладает свойствами текучести, поэтому на этой стадии формируются забронированные ледники или так называемые каменные глетчеры (рисунок 8). Они могут сплывать вниз по долине на несколько километров. Скорость деградации погребенных ледников резко замедляется, так как они изолированы от влияния температуры и солнечной радиации чехлом мореного материала. Поэтому они могут сохраняться десятки и сотни лет.

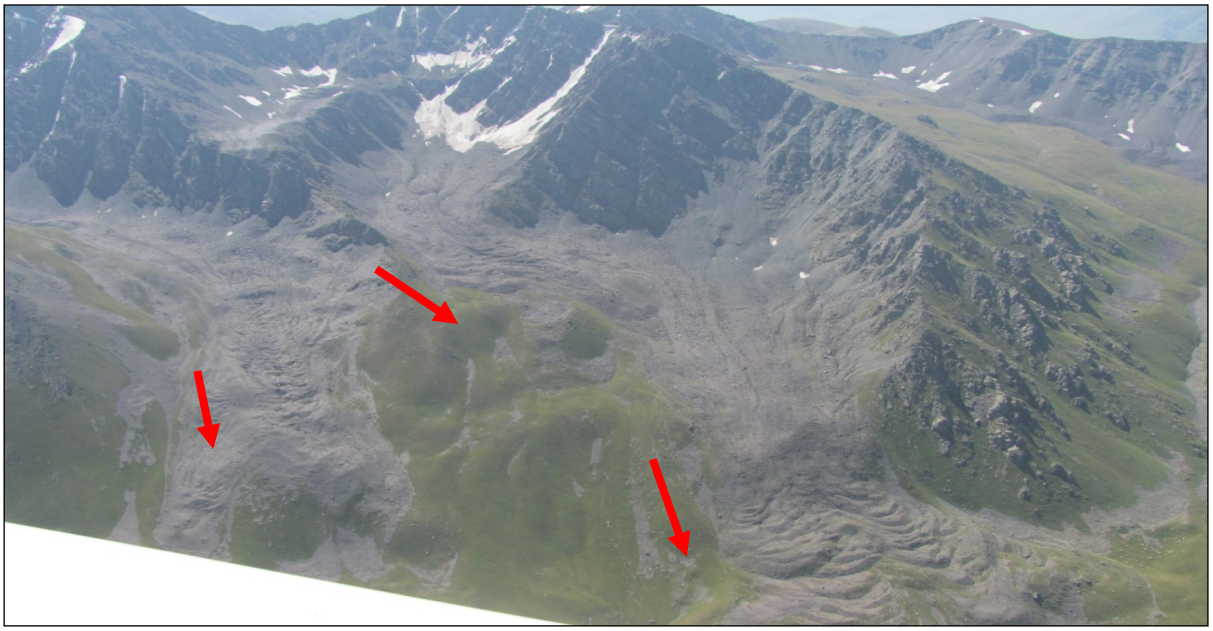


Рисунок 8 – Пример движения забронированных ледников на северном склоне Кыргызского хребта, в верховьях долины реки Аксу

Предварительный анализ стадий в деградации ледников по областям оледенения Тянь-Шаня, в пределах Кыргызской Республики, показывает следующее.

В Западной области оледенения и в области Внутреннего Тянь-Шаня большинство ледников находятся на 5 и 6 стадиях деградации.

В Южном и Северном Тянь-Шане, на склонах хребтов южной экспозиции большая часть ледников находится на 4, 5 и 6 стадиях деградации, а на северных склонах преобладают ледники 3 и 4 стадий деградации.

На Центральном Тянь-Шане преобладают ледники на 2 и 3 стадиях деградации. Поэтому Центральный Тянь-Шань еще надолго, по крайней мере, на ближайшее столетие останется богатым источником чистой ледниковой пресной воды.

Выводы. Современная деградация ледников Тянь-Шаня проходит поэтапно, охватывая семь стадий, от дендритовых ледников до стадии погребённых льдов.

1. Скорость регрессии ледников возрастает по мере перехода на более поздние стадии деградации.
2. Пространственное распределение стадий деградации ледников отражает влияние климатических и орографических факторов, с более высокой степенью дегляциации на южных склонах и в западных районах Тянь-Шаня.
3. Основными факторами деградации ледников являются повышение температуры воздуха, усиление абляции и изменение осадочного баланса.
4. Дальнейшее сокращение ледников приведёт к трансформации гидрологического режима региона, что требует разработки адаптационных стратегий для управления водными ресурсами.

Литература

1. Диких А.Н. Основные особенности существования современного оледенения Тянь-Шаня // Оледенение Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим. 1976. С. 3-14.
2. Диких А.Н. Режим современного оледенения Центрального Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим. 1982. 159 с.
3. Оледенение Тянь-Шаня / М.Б. Дюргеров, М.Г. Кунахович, В.Н. Михаленко [и др.]; Под ред. М.Б. Дюргерова. М. 1995. С. 131-168.

УДК 631.67

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ЛЕДНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАЙКЕРИТА

Петрас Р.А., Орунбаев С.Ж.
pr12198@auca.kg
Американский Университет в Центральной Азии, г. Бишкек, Кыргызстан

На данный момент в Кыргызстане наблюдается дефицит воды в засушливых регионах страны, таких как Ошская, Баткенская, Джалал-Абадская и другие области. Это оказывает влияние на местное сельское сообщество, которое зависит от скотоводства и фермерского хозяйства, которые невозможны при недостатке воды. Для решения этой проблемы реализуются различные проекты, направленные на эффективное распределение водных ресурсов, просвещение и восстановление экосистем, и одним из этих направлений является создание искусственных ледников. Их конструкция в упрощенном виде представляет из себя трубопровод 2-3 километра длиной и вертикально направленную трубу высотой около 20 метров [3], вокруг которой в холодное время года и намерзает ледник. Эти сооружения, простые и дешёвые в создании и эксплуатации, зарекомендовали себя как эффективную меру против засухи. Однако у них есть две основные проблемы: недолговечность и излишняя потеря воды при высоких температурах. Есть различные способы решить эту проблему, но в условиях Кыргызстана вероятно самым эффективным способом будет преобразование обыкновенного льда в пайкерит. Эта смесь на основе растительных материалов (обыкновенно опилок) обладает множеством преимуществ в сравнении с обыкновенным льдом, которые позволят запасать большее количество воды и увеличить долговечность искусственных ледников.

Ключевые слова: искусственный ледник, пайкерит, лед, вода, эффективность, долговечность

Введение. По сообщению ассоциации «Кыргыз жайыты» [3], на данный момент в Кыргызстане существует 30 искусственных ледников, первый из которых был построен в Таласской области в 2018-ом году. Все они были построены возле деревень и на пастбищах в засушливых и горных регионах, где из-за дефицита воды наблюдались конфликты между жителями и серьёзная деградация пастбищ [5]. Тяжелая ситуация с водными ресурсами вызвана географическими и климатическими особенностями, эффект которых в последнее время усилился из-за изменения климата и деградации экосистем. Их появление способствовало значительному улучшению водоснабжения, и как следствие восстановлению пастбищ и росту экологического энтузиазма среди жителей. Однако у искусственных ледников есть серьёзная проблема – их недолговечность. К сожалению, точный срок эффективной работы неизвестен. Приводятся разные оценки – от трех недель до трех месяцев, но в этой работе будет рассматриваться условный срок в 1 месяц. Этого времени функционирования явно недостаточно для значительной части нуждающихся регионов, наблюдаются серьёзные сезонные колебания температуры и нехватка осадков [3]. В таких условиях обыкновенный искусственных ледник не может продержаться достаточное количество времени, чтобы эффект от него был значительным. Кроме того, при высоких температурах возможно высвобождение воды больше необходимого уровня. Это приводит к тому, что вода утекает быстрее, ещё сильнее сокращая срок работы искусственного ледника.

Описание материла. Для решения этой проблемы можно заменить обыкновенный лед на пайкерит – смесь растительного материала и льда. По прочности он уступает бетону [7], и поэтому этот материал уже рассматривался как перспективный в кораблестроении и строительстве сооружений внутри Северного полярного круга [4]. Повышенная прочность достигается за счет отсутствия присущему обыкновенному льда недостатка – уязвимости к

трещинам [7]. Когда они образуются во льду, они повреждают его на значительную глубину из-за его однородной структуры, но в пайкерите трещины останавливаются вкраплениями растительных материалов, которые предотвращают дальнейшее их распространение. Эта особенность этого материала может позволить сделать искусственные ледники выше, что позволит накапливать больше воды в холодное время года. Однако при подготовке этого исследования не было возможности провести физические тесты на прочность, а потому эта тема требует дальнейшей проработки. Другая особенность пайкерита – его медленно таяние. Скорость его таяния меньше, чем у льда из-за его анизотропной и неоднородной структуры [7]. Соответственно, если условный обычный искусственный ледник может простоять месяц, то искусственный ледник из пайкерита просуществует уже два месяца, а это около трети самого жаркого и сухого сезона. Чтобы изучить этот вопрос подробнее, были проведены эксперименты с несколькими образцами пайкерита и обыкновенного льда, примерно по 0.5 литра объема каждый. Оценивались несколько параметров: масса блока, температура поверхности, и температура воздуха вокруг. Изменение массы блока позволяло судить о скорости таяния блока, а температура его поверхности – о его теплопроводности. Общее время наблюдений составило 21 час в разных условиях.

Экспериментальные данные. Первый эксперимент был тестовым, и поэтому в нем ещё не оценивалась температура поверхности и массы блоков были подобраны недостаточно соразмерно. Он проводился в тени при комнатной температуре, равной 23 градусам по Цельсию. Тестировались три блока из обычного льда, пятнадцатипроцентного пайкерита (15% массы опилок на блок), и двадцатипроцентный пайкерит. Блоки перед экспериментом находились 22 часа в морозильной камере холодильника Indesit B16FNF при температуре в -18 градусов Цельсия. Наблюдения велись с 14:00 до 19:30. Синий цвет (обыкновенный лёд) теряет массу быстрее всех образцов, спускаясь до значения ниже 300 граммов. Блок (15%) показал себя как лучший образец, потеряв массу в 2 раза медленнее в сравнении с обыкновенным льдом.

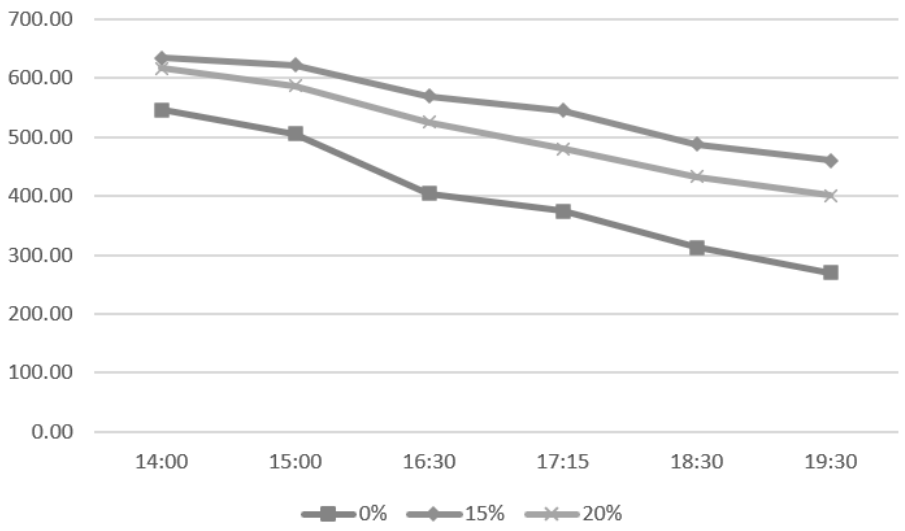


Рисунок 1 – График скорости таяния блоков в первом эксперименте

Второй эксперимент измерял и массу, и температуру поверхности блоков. Тестировались четыре образца: обыкновенный лёд, пайкерит (15%), пайкерит (20%), комбинированный пайкерит (13% опилок + 5% соломы). Этот эксперимент также проводился в тени при комнатной температуре на протяжении 8 часов. Блоки перед экспериментом находились 28 часов в морозильной камере холодильника Indesit B16FNF при температуре в -18 градусов Цельсия. За это время ледяной блок потерял больше двух третей своей массы, в то время как блоки пайкерита потеряли максимум половину (15%). Температура среды была около 25 градусов и практически не колебалась, как и температура льда, которая оставалась на

уровне между -1 и 0 градусов Цельсия, в то время как температура пайкерита достигла 10 градусов. Блок из пайкерита снова продемонстрировали свою более высокую эффективность в сравнении со льдом.

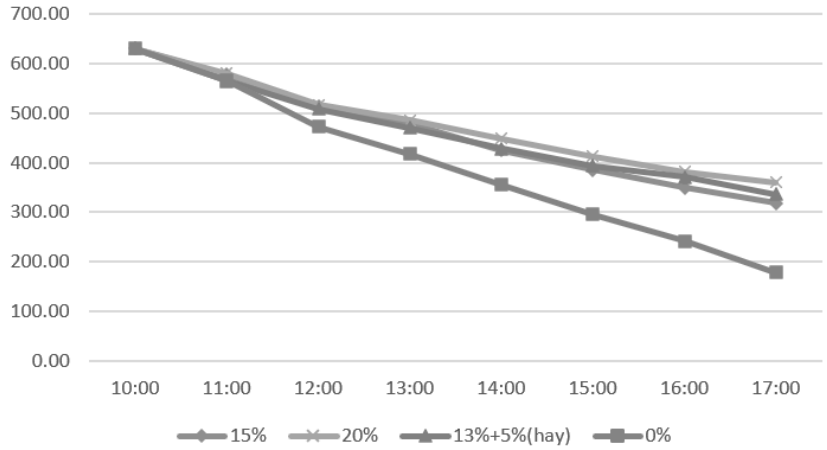


Рисунок 2 – График скорости таяния блоков в втором эксперименте

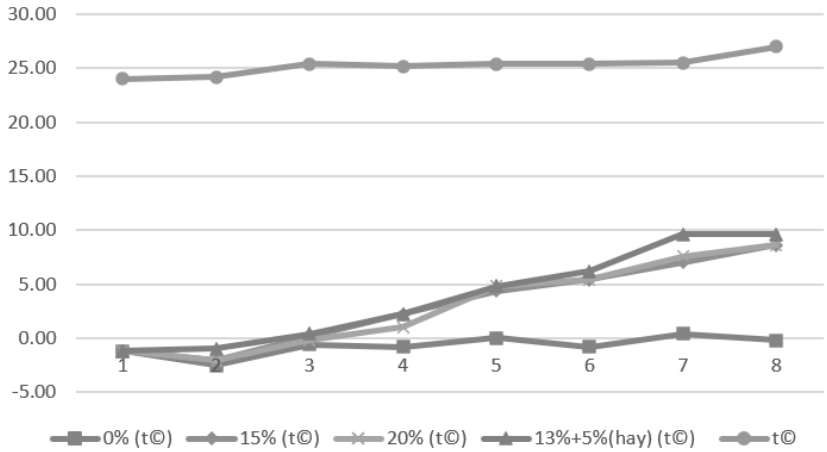


Рисунок 3 – График динамики температуры окружения и поверхности блоков во втором эксперименте

Третий эксперимент был поделен на две фазы. В обеих набор образцов не отличался от предыдущего. Первая проходила на улице в облачную погоду в течении 4 часов при невысокой температуре в 3-4 градуса по Цельсию. Блоки перед экспериментом находились 48 часов в морозильной камере холодильника Indesit B16FNF при температуре в -18 градусов Цельсия. Массы блоков не изменились, не считая 1 или нескольких грамм, потерянных при открытии контейнеров. Однако температура поверхности у всех букв изменилась, особенно значительно в самый первый час наблюдений: с -8 до -2 и -3 градусов у пайкерита и льда. Вывод первой фазы очевидный: при невысоких температурах блоки льда и пайкерита практически не тают, а, следовательно, как материал для искусственного ледника в этих условиях они равноценны. Вторая фаза эксперимента проходила в более теплых условиях (5-7 градусов) на освещенном солнцем месте на протяжении того же времени. В этих условиях блоки из пайкерита оказались более уязвимыми, чем обычный лёд, и потеряли больше массы. В данном случае соотношение первоначальной массы к финальной у них составило 1.3-1.5 против 1.24 у льда. Также сильно повысилась температура поверхности, что особенно заметно у блока пайкерита (20%), температура поверхности которого в один момент превысила температуру окружающей среды. Это можно объяснить ошибкой измерения, либо же тем, что это был самый тёмный блок, а соответственно его светоотражающая способность была минимальной. В результате этого

эксперимента пайкерит показал свой главный недостаток перед обычным льдом – большую уязвимость к прямому свету солнца. Однако, любопытно, что самым лучшим блоком среди образцов пайкерита оказался комбинированный образец. Вероятно, это вызвано тем, что за исключением льда это был самый светлый блок из всех. Также, благодаря тому, что волокна соломы длиннее и прочнее, он показал большую стойкость к таянию, не развалившись на куски как прочие блоки из пайкерита.

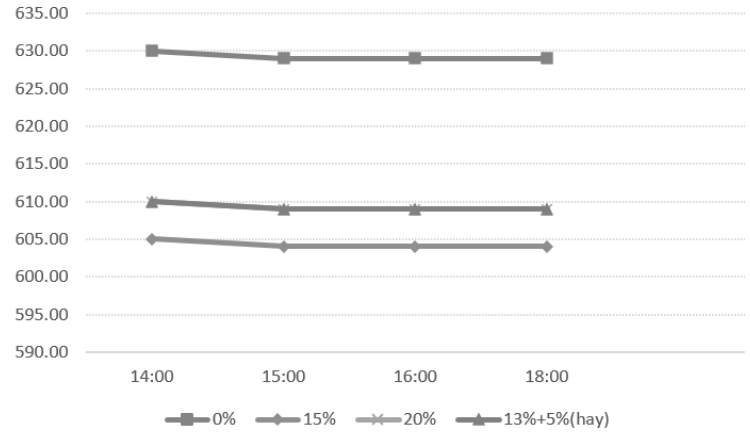


Рисунок 4 – График скорости таяния блоков в первой фазе третьего эксперимента

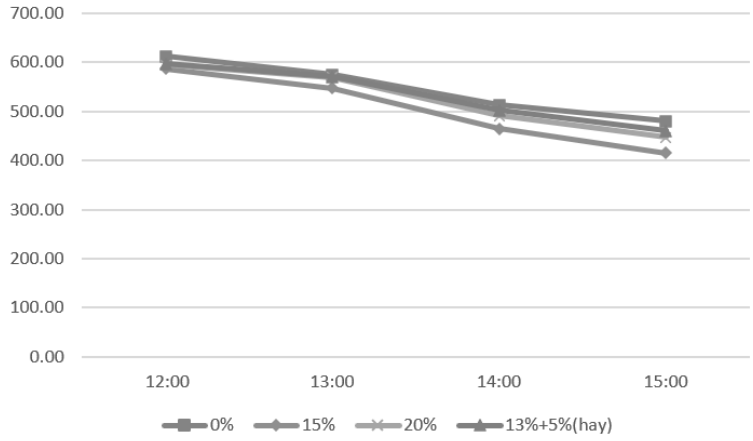


Рисунок 5 – График скорости таяния блоков во второй фазе третьего эксперимента

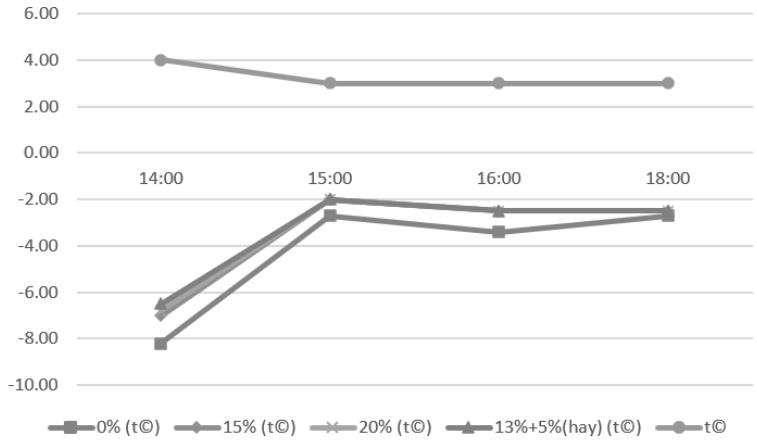


Рисунок 6 – График динамики температуры окружения и поверхности блоков в первой фазе третьего эксперимента

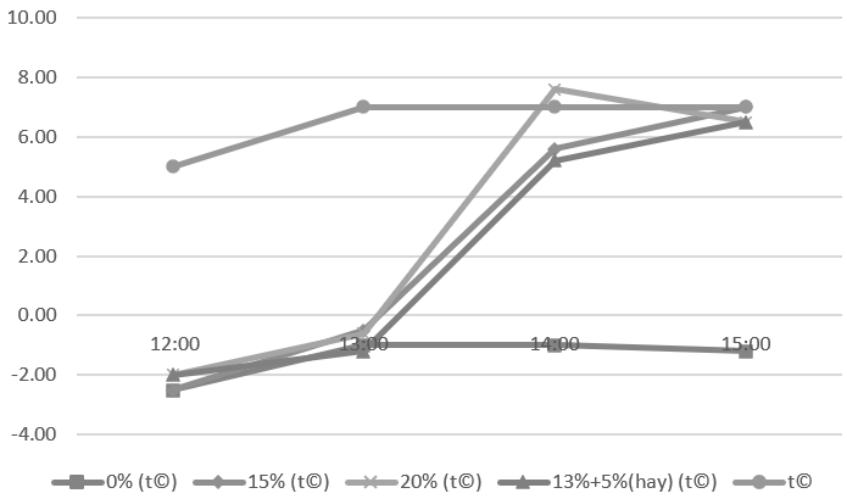


Рисунок 7 – График динамики температуры окружения и поверхности блоков во второй фазе третьего эксперимента

В последнем, четвертом эксперименте исследовался только пятнадцатипроцентный блок соломенного пайкерита. Условия были аналогичны второй фазе третьего эксперимента, но температура была выше и варьировалась между 7 и 9 градусами. Блоки перед экспериментом находились 96 часов в морозильной камере холодильника Indesit B16FNF при температуре в -18 градусов Цельсия. Соотношение финальном массе к изначальной составило 1.6. Спустя 6 часов наблюдений при более высокой температуре соломенный блок сохранил прочность и не развалился, как блоки из опилок. В этом плане он показал даже более потрясающие результаты чем комбинированный.

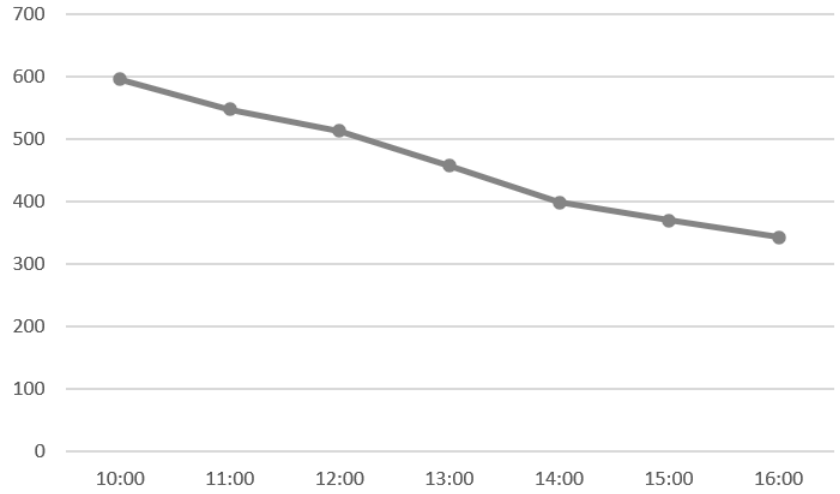


Рисунок 8 – График скорости таяния блока в четвертом эксперименте

В результате этих экспериментов можно сделать следующий вывод: соломенный пайкерит показал себя лучшим материалом. Он более устойчив к таянию, чем прочие блоки из пайкерита, обладает большей отражающей способностью, и при этом так же, как и все остальные блоки из пайкерита, превосходит обычный лед по эффективности при нахождении в тени.

Таким образом, самыми эффективными оказались образцы из смеси соломы и воды. Несмотря на то, что солома хуже впитывает воду в сравнении с опилками и оттого уступает некоторым другим вариантам, в выборе именно этих образцов есть экономический смысл.

Экономическое преимущество соломенного пайкерита. Солома – дешевый и распространенный материал, доступный на месте практически в любой деревне Кыргызстана,

в то время как опилки – материал, производящийся исключительно на лесопилках. Их несложно достать в городах или регионах богатых лесом, но в высокогорье или пустынных областях этого ресурса уже не будет. Следовательно, опилки придется привозить из города на грузовых автомобилях и тратить ресурсы на их доставку, которую возможно придётся проводить не один раз, т.к. для создания 20-метровой и выше башни необходимо большое количество опилок. В то же время солома уже есть на месте создания, не нуждается в сложной транспортировке и вероятно уже упаковано в удобные для строительства блоки.

Требования к местоположению искусственного ледника. Исходя из характеристик пайкерита, требования к искусственному леднику должны быть примерно теми же, что и к леднику из обычного льда. Это сооружение должно находиться в 2-3 километрах от источника и ниже по склону для создания постоянного напора воды. Чтобы ледник таял медленнее, необходимо разместить его в месте, которое находится в тени большую часть дня. Это особенно важно, учитывая, что пайкерит тает на солнце быстрее обычного льда. Подойдут для этого северные склоны хребтов, овраги, узкие ущелья, а также покрытые лесом территории, находящиеся на высоте от 1.5 до 3 километров [1]. На этих высотах должен быть приемлемый уровень осадков и температур, в то время как области ниже могут оказаться чрезмерно жаркими, а строительство выше нецелесообразно из-за наличия естественных ледников и более сложных условий для прокладки трубопровода.

Концепция искусственного ледника из пайкерита. На основании всего выше написанного – свойств пайкерита, недостатках современный искусственных ледников и необходимых условий для его постройки – был разработана концепция ледника из пайкерита, более эффективного, чем его современные аналоги. Этот ледник сохраняет основной принцип современных образцов, и все так же также представляет из себя трубопровод 2-3 километра длиной и вертикальную трубу 20 и более метров высотой. Однако, вокруг трубы находится ещё несколько компонентов, которые обеспечивают более эффективное накопление льда и его более экономное таяние. Главный элемент этой конструкции – решетчатый каркас, в котором хранятся блоки соломы. Он должен быть разделен на слои, каждый из которых будет наиболее подходящей толщины для эффективного впитывания воды. Он должен быть построен из материалов, достаточно прочных для того, чтобы выдержать вес содержимого, однако, при их недостатке, участки каркаса, не обладающие несущей функцией, могут быть заменены на веревочные сети, которые также будут впитывать воду и станут дополнительным элементом пайкерита. Пайкерит из соломы менее уязвим к таянию чем лёд, но ему необходима тень для эффективности. Она будет обеспечена слоем обычного льда, который неизбежно появится поверх каркаса и будет временно выполнять функцию светоотражателя. В случае, если этот искусственный ледник невозможно будет разместить в защищенном от солнечного света месте, поверх его каркаса необходимо будет разместить отражающий экран. В итоге, все эти дополнения сделают искусственные ледники в два раза более долговременными и более эффективными.

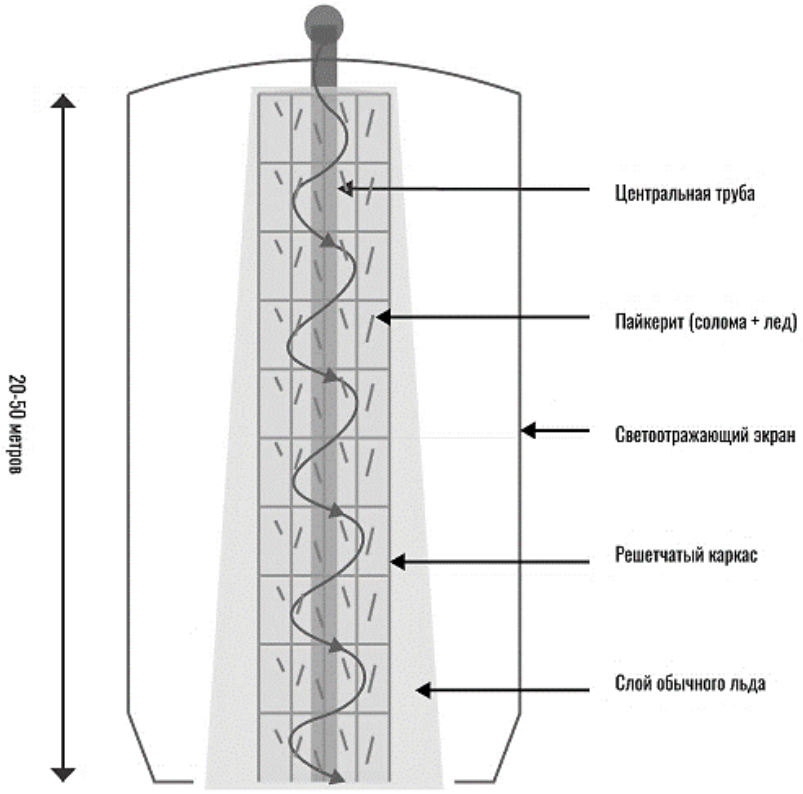


Рисунок 9 – Схема искусственного ледника из соломенного пайкерита

Выводы. Несмотря на то, что использование пайкерита сопровождается трудностями, вызванными его меньшей относительно льда светоотражательной способностью, эта концепция является перспективной. Пайкерит из соломы выгодно выделяется на фоне остальных образцов своей устойчивостью к таянию и экономической доступностью, а потому он наиболее пригоден как армирующий материал для искусственного ледника. Тем не менее, эта тема нуждается в дальнейшем исследовании, так как необходимо установить эффективность и долговременность современных искусственных ледников, а также более детально исследовать характеристики различных видов пайкерита, в том числе и из соломы.

Литература

1. Воробьев А.М., Моисеев В.И., Ходаковский В.А., Комарова Т.А. Искусственное создание ледников с целью водообеспечения объектов гражданского и военного назначения в регионах с засушливым климатом // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 3 (88). С. 97-102.
2. Моисеев В.И., Васильев Н.К., Комарова Т.А., Комарова О.А. Создание искусственных горных ледников как способ водообеспечения засушлиых предгорных районов // Известия Всероссийского НИИ гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2019. С. 98-104.
3. FAO, «Кыргыз жайыты». Создание искусственных ледников: уникальный метод адаптации к изменению климата путем высотного сбора и сохранения воды из горного источника в виде вертикально замороженной ледяной башни. ФАО ООН в Кыргызстане. 2021. 8 с.
4. Ковалев О.В., Андреев М.Н., Райс В.В. Пайкерит – льдокомпозит Второй мировой войны // Лёд и Снег. 2016. 56 (1).С.119-127.
5. FAO. Проект ФАО в горном кыргызском ауле: искусственный ледник. ФАО ООН в Кыргызстане. 2023.
6. Геворкян С.Г. Пайкерит и его прочностные свойства в условиях одноосного сжатия // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2020. № 4. С. 12-18.
7. Рыженков А.В. Пайкерит и райзерит – необычные материалы для холодного климата // Климат и природа. 2015. № 3 (16). С. 29-33.

УДК 622.24

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Тажибаев Д.К., Мокешова А.Т.
mokeshova@inbox.ru
Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

Изложены результаты исследований сейсмических воздействий на северо-восточный борт центрального карьера рудника Кумтор. В качестве параметров сейсмических воздействий рассмотрены коэффициенты горизонтального (Ah = -0.3) и вертикального (Av = 0.3) сейсмического ускорения. Проведен численный анализ устойчивости откосов с помощью программы RS2 Phase2. Методом конечных элементов задавалась псевдостатическая сейсмическая (землетрясение) нагрузка и с помощью коэффициентов горизонтального и вертикального сейсмического ускорения, которые характеризуют влияние инерционных сил, проводились расчеты коэффициента запаса устойчивости борта карьера, что позволило выявить критические зоны деформаций и определить меры по повышению устойчивости бортов.

Ключевые слова: сейсмическое ускорение, геомеханика, устойчивость.

Введение. Разработка рудных месторождений в сейсмоактивных районах сопровождается риском деформаций откосов и бортов карьеров. Воздействие горизонтальных и вертикальных инерционных сил может вызывать оползневые процессы, разрывы пород и снижение коэффициента запаса устойчивости (КЗУ). Цель исследования – анализ влияния сейсмических ускорений на устойчивость откосов рабочей зоны РЗ №19, выявление критических зон и разработка методов их стабилизации.

Сейсмическое воздействие оказывает значительное влияние на устойчивость откосов, бортов карьеров и других инженерных сооружений.

Для определения сейсмического воздействия мы приложили сейсмическую инерционную силу в наиболее неблагоприятном для устойчивости склона направлении. Однако такой расчет не учитывает кратковременности сейсмического импульса или совокупности импульсов.

Необходимо отметить, что максимальным значениям ускорения (пикам) всегда соответствуют очень малые периоды (или очень высокие частоты), пики максимальных скоростей имеют уже несколько большие периоды или меньшую частоту и, наконец, пики смещений имеют наибольшие периоды и наименьшую частоту. Чем более деформируема и податлива скальная порода, тем меньше будет амплитуда всплеска ускорения, но при большей продолжительности его воздействия и со значительно большими смещениями.

Все это со всей очевидностью показывает, что при анализе сейсмического воздействия на устойчивость откоса необходимо учитывать продолжительность сейсмического импульса и возможное смещение массива или блока по трещине.

Методика исследований. Исследование проводилось с использованием программного комплекса Phase2, реализующего метод конечных элементов (МКЭ). Основной подход – метод снижения прочности на сдвиг, позволяющий оценить устойчивость скальных откосов при различных критериях разрушения (Мора-Кулона, обобщенного Хука-Брауна). Численные методы являются эффективным и надежным способом решения широкого круга инженерных задач, и МКЭ – один из таких эффективных методов.

Для расчетов коэффициент горизонтального сейсмического ускорение Ah принимался равным 0.3, что соответствует 9 бальному землетрясению. Основные негативные последствия при это следующие:

• создаются сдвиговые нагрузки → возможен срыв пород.
• коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) уменьшается.
• могут появляться оползневые смещения.
• происходит деформация борта.

Коэффициент вертикального сейсмического ускорения Av принимался также равным 0.3, что соответствует 9 бальному землетрясению. Основные негативные последствия при это следующие:

• меняется давление на основание борта.
• может произойти просадка или уплотнение массива
• иногда повышает устойчивость, но при неоднородной породе возникают локальные ослабления.
• вертикальные напряжения перераспределяются, влияя на несущую способность основания борта.

По каждому характерному для рабочих зон 21А и 21 разрезу были приведены расчеты коэффициента запаса устойчивости при горизонтальной и вертикальной сейсмической нагрузке по отдельности. Результаты расчетов приводятся на рисунках 2.25 – 2.38.

1.1) Горизонтальное сейсмическое ускорение

1. Прочность на сжатие Rсж=67,9 Мпа
2. Коэффициент **горизонтального** сейсмического ускорения **Ah**=-0.3

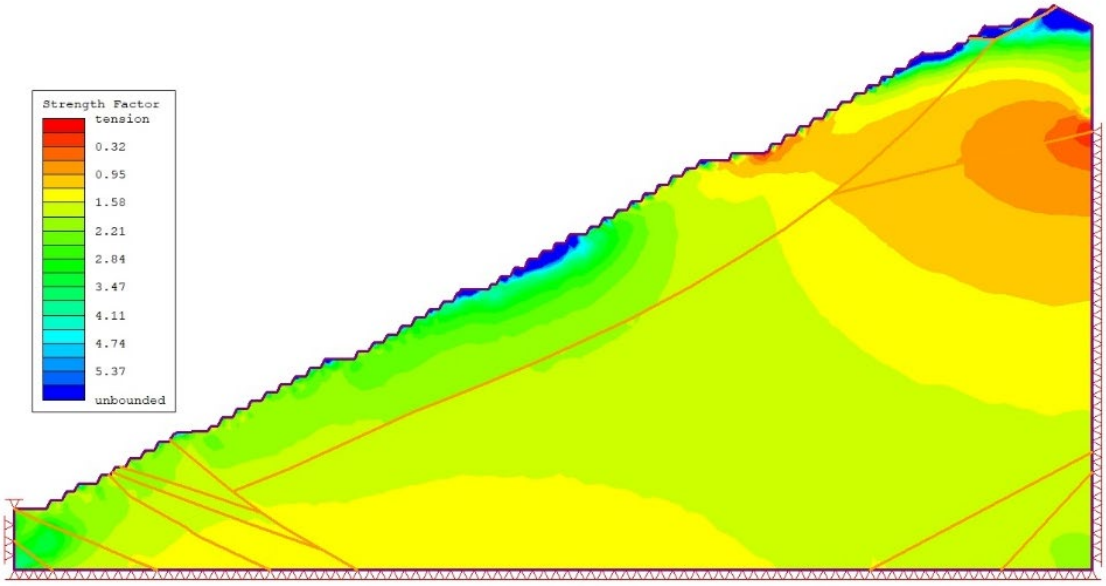


Рисунок 1.1 – Распределение коэффициента запаса устойчивости при заданном коэффициенте горизонтального сейсмического ускорения Ah=-0.3 (разрез 3-3, этап 3)

- Влияние горизонтального ускорения, появление критических зон нестабильности.
- Сдвиговые процессы, возможны оползни и обрушения.
- Образование критических зон нестабильности.
- Если КЗУ < 1.0, возможно разрушение борта.

1.2.) Вертикальное сейсмическое ускорение

1. Прочность на сжатие Rсж=67,9 Мпа
2. Коэффициент **вертикального** сейсмического ускорения **Av =0.3**

Вертикальное ускорение перераспределяет нагрузки, возможны локальные просадки.

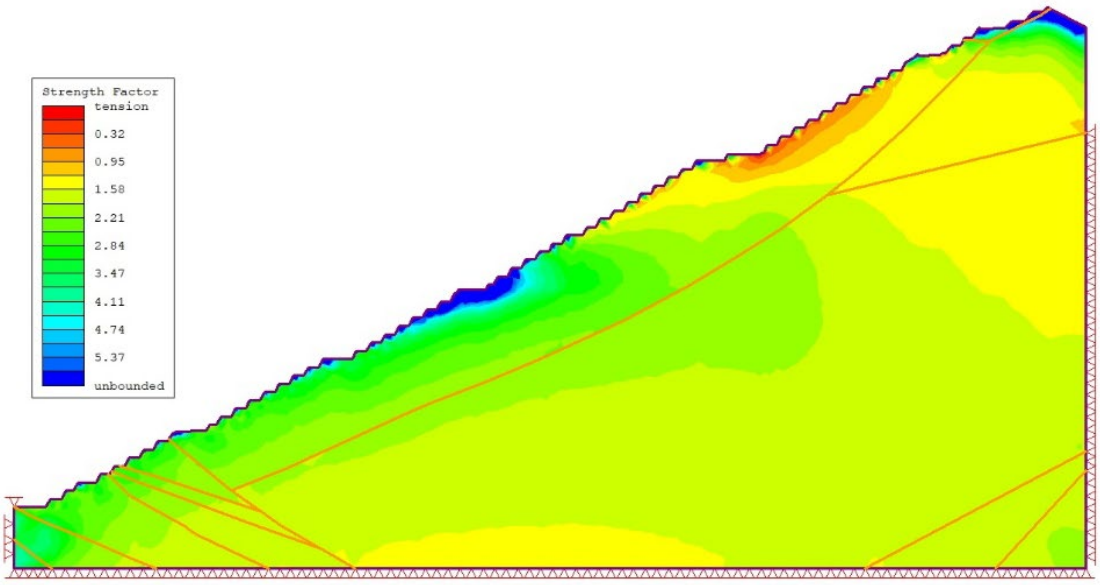


Рисунок 1.2 – Распределение коэффициента запаса устойчивости при заданном коэффициенте вертикального сейсмического ускорения Av=0.3 (разрез 3-3, этап 3)

2.1) Горизонтальное сейсмическое ускорение

1. Прочность на сжатие Rсж=67,9 Мпа
2. Коэффициент **горизонтального** сейсмического ускорения **Ah**=-0.3

- Горизонтальное ускорение снижает устойчивость.
- Верхняя часть борта подвержена сдвиговым процессам.
- Возможны разрывы породы в местах максимального напряжения.

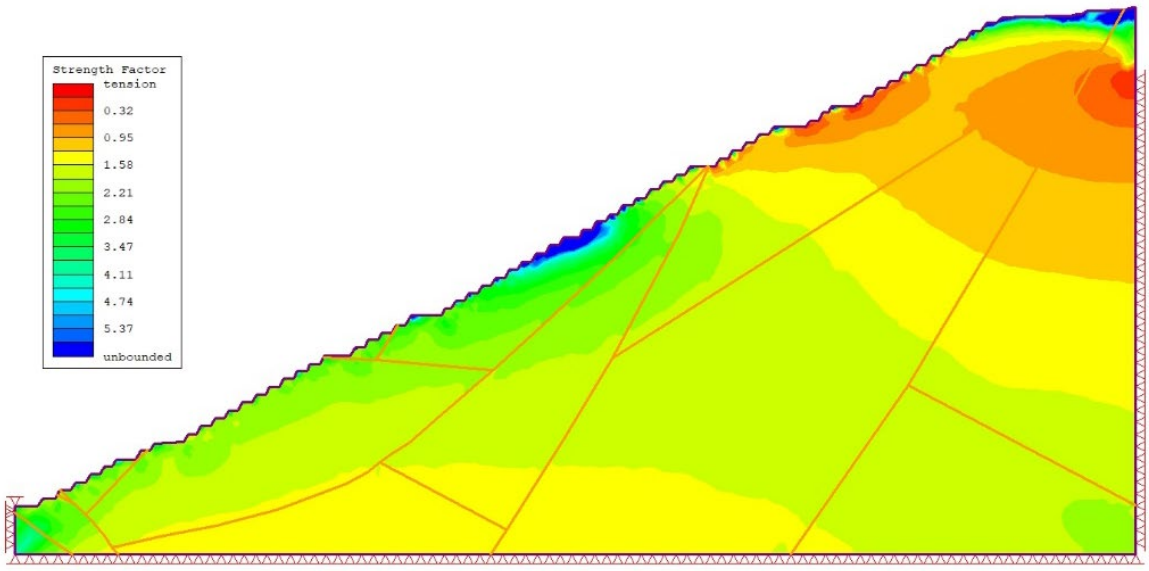


Рисунок 2.1 – Распределение коэффициента запаса устойчивости при заданном коэффициенте горизонтального сейсмического ускорения Ah=-0.3(разрез 4-4, этап 3)

2.2) Вертикальное сейсмическое ускорение

1. Прочность на сжатие Rсж=67,9 Мпа
2. Коэффициент **вертикального** сейсмического ускорения **Av=0.3**

- Вертикальное ускорение влияет на прочность основания.

- Основание борта, где перераспределение напряжений может привести к изменению несущей способности.

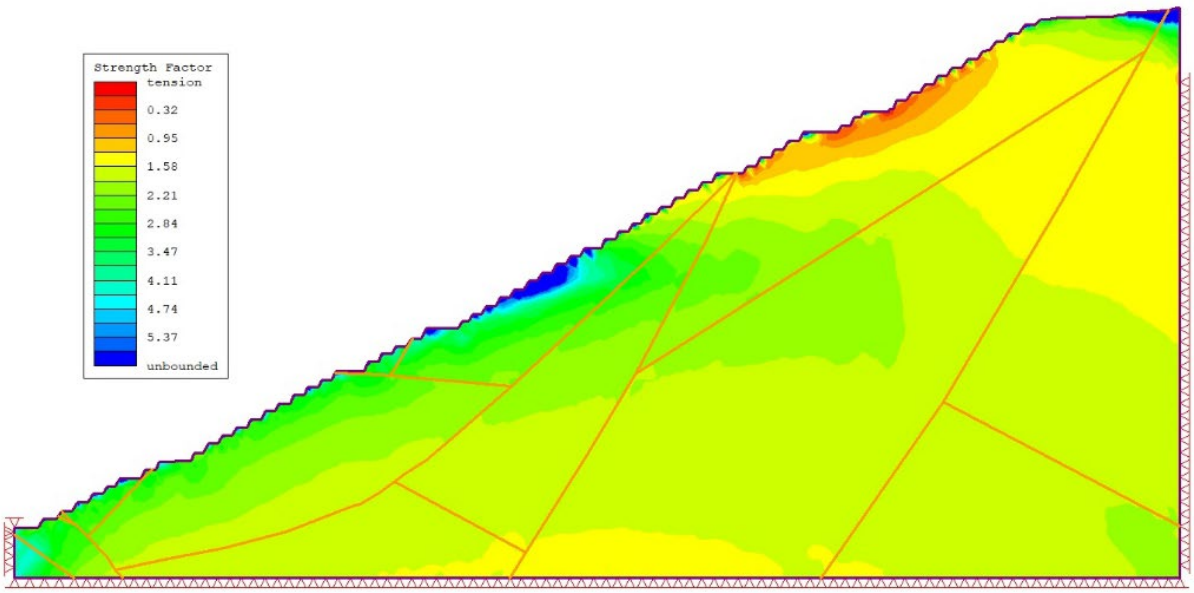


Рисунок 2.2 – Распределение коэффициента запаса устойчивости при заданном коэффициенте вертикального сейсмического ускорения Av=0.3 (разрез 4-4, этап 3)

Заключение. Выводы:

• Горизонтальное ускорение (Ah = -0.3) – главный фактор потери устойчивости.
• Вертикальное ускорение (Av = 0.3) влияет на нагрузки, но в меньшей степени.
• Для оценки устойчивости используется коэффициент запаса устойчивости (КЗУ).
• При КЗУ < 1.0 – борт теряет устойчивость, требуется усиление.

Результаты исследований

1. Влияние горизонтального сейсмического ускорения (Ah = -0.3)

Горизонтальное сейсмическое ускорение оказывает значительное влияние на устойчивость борта, создавая сдвиговые нагрузки, которые могут привести к оползневым процессам и разрушению откоса.

Основные последствия:

• Снижение коэффициента запаса устойчивости (КЗУ)
• Вероятность оползневых смещений при КЗУ < 1.0
• Образование критических зон напряжений в верхних слоях массива

2. Влияние вертикального сейсмического ускорения (Av = 0.3)

Вертикальное ускорение вызывает перераспределение напряжений, что может изменять давление на основание борта.

Основные последствия:

• Просадки и уплотнение грунта
• Локальные ослабления в зонах с неоднородной породой
• Изменение несущей способности основания откоса

Рекомендации по повышению устойчивости бортов

Для предотвращения потери устойчивости откосов рабочей зоны РЗ №19 при отработке горизонтов 3700–3680 м рекомендуется:

1. Снижение угла наклона откоса – уменьшает влияние сдвиговых нагрузок.
2. Применение анкерных систем – стабилизирует откос и снижает риск разрушения.
3. Устройство берм (уступов) – равномерно распределяет нагрузку.
4. Использование свайных конструкций и геотекстиля – усиливает основание борта.

Наибольшую угрозу устойчивости бортов карьера “Центральный” представляют горизонтальные сейсмические ускорения Ah = -0.3, вызывающие снижение КЗУ и образование зон деформаций. Вертикальное ускорение Av = 0.3 в большей степени влияет на перераспределение напряжений в основании борта. В критических разрезах требуется применение инженерных мер стабилизации, включая снижение угла наклона откоса, анкерные системы и укрепление основания геотекстильными материалами.

Литература

1. Газиев Э.Г. Устойчивость скальных массивов и методы их закрепления. М.: Стройиздат. 1977. 160 с.
2. Вичорек Г.Ф., Снайдер Дж.Б. Мониторинг движения склонов // Янг Р., Норби Л. Геологический мониторинг. Боулдер, Колорадо, Геологическое общество Америки. 2009. С. 245-271.
3. Программный комплекс «Rocscience». RSData. Программа для анализа данных прочности горных пород и грунта, а также определения диапазонов прочности и других физических параметров. Руководство пользователя. М.: ООО «Современные изыскательные технологии». 2021. 78 с.
4. https://www.dissercat.com/content/geomekhanicheskoe-obosnovanie-ustoichivosti-bortov-karerov-v-seismoaktivnykh-raionakh
5. https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-ustoychivost-bortov-karerov.pdf
6. https://vdoc.pub/documents/-58le14113r80
7. https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sovremennyh-metodov-opredeleniya-i-otsenki-parametrov-ustoychivyh-otkosov-bortov-karierov

УДК 556.5.01:621.311.21

ГИДРОРАСЧЕТЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАЛЫХ ГЭС В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Эгизов И.А., Акматов Д.Р.
iskenegiz@mail.ru
Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан

Глобальное потепление приводит к интенсификации таяния ледников. Это влечет за собой увеличение водности рек, рост числа природных катаклизмов, а в перспективе — сокращение ледникового питания рек и снижение водных ресурсов. Особое внимание уделяется влиянию изменения стока на малую гидроэнергетику Кыргызстана. Представлены методы водноэнергетических расчетов, включая использование кривых продолжительности суточных расходов воды, применяемых при проектировании малых ГЭС. Описаны способы оценки коэффициента естественной зарегулированности стока и предложен упрощенный метод построения кривых использования стока для рек при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. Полученные автором результаты могут быть использованы для расчета водноэнергетических характеристик малых ГЭС, при масштабном строительстве.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, климатические изменения, таяние ледников, малые ГЭС, водноэнергетические расчеты, кривые продолжительности стока, коэффициент естественной зарегулированности стока.

Ведение. В последние десятилетия во всем мире наблюдается рост числа чрезвычайных ситуаций природного характера. Одной из ключевых причин этого процесса являются изменения климата, приводящие к повышению среднегодовых температур и ускоренному таянию ледников. Кыргызстан, как горная страна, особенно уязвим перед этими изменениями, так как водные ресурсы страны во многом зависят от ледникового стока.

Изменение климатических условий оказывает двойственное влияние: в начальный период потепления происходит увеличение водности рек, сопровождающееся наводнениями, селями и оползнями, а в последующие десятилетия ожидается сокращение ледниковых запасов, что приведет к дефициту воды, снижению речного стока и негативному влиянию на гидроэнергетику. Это создает необходимость разработки методов оценки водных ресурсов и их использования, особенно в контексте проектирования малых ГЭС.

Статистические данные показывают рост числа чрезвычайных ситуаций природного характера по всему миру. Не последнюю роль в этом процессе, по мнению многих исследователей, играют явления, вызываемые повсеместно происходящими изменениями климата. Применительно к региону, куда входит наша республика, отмечаемые изменения климата выражаются, в основном, в потеплении его, то есть росте среднегодовой температуры воздуха [1]. Этот процесс зарегистрирован многими метеорологическими станциями и постами как Кыргызстана, так и других сопредельных стран региона и даже всего мира в целом. Рост температур воздуха влечет за собой целый ряд климатических и других геофизических процессов, одним из которых является усиление таяния ледников и вечных снегов. Это, в свою очередь, вызывает увеличение водности рек в регионе, отсюда – рост числа и интенсивности опасных природных процессов, связанных с водой [2–4]. Интенсивное таяние снега и льда, происходящее на фоне высоких температур, влечет не только переполнение воды в руслах рек и чашах озер, что приводит к наводнениям и селям, но и повышению общей увлажненности почвогрунтов, увеличивая вероятность подтоплений, схода оползней и обвалов горных пород.

Таким образом, сегодня, на первом этапе процесса потепления климата, мы имеем рост водности рек Кыргызстана, и соответственно, связанные с этим явлением, природные катаклизмы.

Другая сторона этого процесса заключается в том, что в дальнейшем, на следующем этапе, произойдет сокращение площадей оледенения и залегания вечных снегов в результате исчезновения небольших ледников и снежников, а также снижения площади абляции больших и средних ледников и снежников [1]. Это приведет к уменьшению увлажненности территории и снижению речного стока. Отсюда рост вероятности других - прямо противоположных опасных природных процессов, вызываемых недостаточной увлажненностью территории - таких как засухи, суховеи, эрозия почв, нехватка питьевой и поливной воды.

Снижение водности рек будет выражаться в уменьшении расходов воды, вплоть до полного пересыхания их и в увеличении продолжительности маловодного периода на реках.

Данное обстоятельство крайне негативно отразится на режиме работы проектируемых малых ГЭС, в виде снижения выработки электроэнергии вследствие понижения расходов воды в реках и вплоть до полной остановки турбоагрегатов.

На подавляющем большинстве рек Кыргызстана маловодный период приходится на холодный период года, когда потребность в электричестве наиболее высока, что усиливает негативный эффект изменения климата на рентабельность малой энергетики.

В Кыргызстане, в последние годы возобновилось активное проектирование и возведение малых гидроэлектростанций [5, 6]. При масштабном строительстве требуется оценка перспектив использования малых рек для выработки энергии, которая, обычно, бывает затруднена вследствие целого ряда серьёзных причин. Среди них отсутствие материалов гидрометрических наблюдений, массовость расчетов, сложность автоматизации их и, как следствие, большая трудоемкость. Значительные трудности вызываются и отсутствием подходящих методик. Для упрощенных расчетов и оценок на предпроектных стадиях водноэнергетических исследований традиционно используются кривые продолжительности суточных расходов воды рек, позволяющие в обобщенном виде учитывать их водный режим [7–9].

Получить календарное распределение стока исследуемых водных объектов, в этих случаях, редко представляется возможным, поэтому при типизации и оценке рек широкое распространение получили характеристики внутригодового распределения стока по величинам расходов (без учета календарной последовательности).

Преимуществом их в сравнении с характеристиками календарного распределения, является простота и надежность определения, и в то же время, достаточная наглядность и информативность для расчета водноэнергетических характеристик.

В этом случае достаточно иметь представление о распределении расходов воды не меньше фиксированного заданного, которое и дают кривые продолжительности суточных расходов воды. Строится кривая продолжительности суточных расходов путем расположения ежедневных суточных расходов воды в убывающем порядке и последующего их суммирования независимо от хронологического хода стока реки (рис. 1,а). Кривые продолжительности отражают общие черты режима стока и зарегулированность рек, которые определяются географической зональностью и местными факторами, а потому поддаются типизации.

Дифференцируются они в зависимости от формы (степени наклона кривой или интенсивностью убывания расходов), которая зависит от зарегулированности стока. Характеристикой степени зарегулированности стока может служить коэффициент естественной зарегулированности **φ,** равный площади гидрографа или кривой продолжительности суточных расходов до среднегодового расхода или ***K=1.00,*** то есть

$$\varphi = \int P \, \mathrm{d}K,$$

где ***P*** – обеспеченность в долях от единицы, ***K*** - модульный коэффициент расходов.

Коэффициент естественной зарегулированности φ характеризует базисный сток и изменяется у рек Кыргызстана, в основном, в пределах 0,56-0,78.

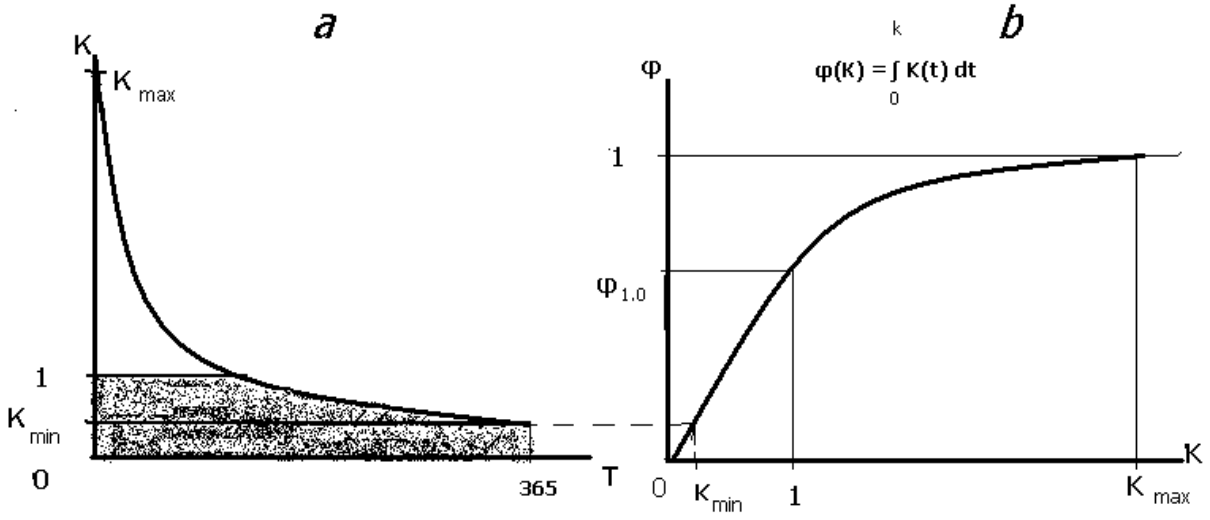


Рисунок 1 – ***а*** - кривая продолжительности суточных расходов воды ***К(t)***, ***b*** - кривая использования стока φ***(К)***.

Интегрируя, гидрограф или кривую продолжительности по расходам последовательно от ***К=0*** до ***К= К$_{max}$,*** мы получим кривую использования стока.

$$\varphi(K) = \int_0^K P\,dK = \int_0^K T\,dK$$

Она представляет собой кривую нарастающих величин площадей гидрографа ***К(t)*** или кривую продолжительности суточных расходов ***P(R)*** от нулевого расхода до заданного расхода ***К***. (рис. 1,б).

Величина ***φ(К)***, изменяющаяся в принятом относительном выражении от ***0*** до ***1***, представляет собой коэффициент использования стока при расчетном (максимальном, полезно используемом) расходе водохозяйственной установки (турбины ГЭС), равном данному расходу ***К***.

Величина коэффициента естественной зарегулированности ***φ*** может быть непосредственно определена по кривым использования стока, как значение коэффициента использования стока ***φ*** при расходе, равном среднегодовому ***φ(К=1)***.

Вопрос о широком применении этих кривых был поставлен в связи с развитием строительства малых ГЭС в середине прошлого века. Были разработаны методы хозяйственных расчетов на основе кривых продолжительности (рис. 1,а), проверенные в практике проектирования. Также был разработан метод построения кривых продолжительности и кривых использования стока для неисследованных рек [7–9].

При отсутствии данных наблюдений и для массовых расчетов при разработке региональных схем использования водных ресурсов, применение данных кривых в водохозяйственых расчетах имеет особую важность, поскольку простота и надежность построения этих кривых значительно выше, чем при составлении календарного помесячного внутригодового распределения стока.

Выполненные ранее исследования позволяют считать возможным и целесообразным выполнение подобным образом водноэнергетических расчетов (выбор основных параметров ГЭС и установление её водноэнергетических характеристик) [7–9].

Даже при наличии фактических данных по суточным расходам (годовой таблицы ежедневных расходов воды или гидрографа) вполне рационально прибегать к расчетам по кривой продолжительности, как при рассмотрении вариантов на стадии выбора основных

водноэнергетических параметров ГЭС, так и при составлении характеристик проектного режима работы ГЭС, при принятых её основных параметрах.

Одной из основных задач водохозяйственных расчетов при проектировании гидростанций является составление водноэнергетических характеристик, освещающих проектный режим используемых расходов, напоров и мощностей (среднесуточных и пиковых) при выбранных основных параметрах ГЭС (отметка НПГ, емкость регулирования, расчетный расход, установленная мощность). Для малых ГЭС, при отсутствии многолетнего регулирования стока обычно ограничиваются составлением характеристик лишь для характерных лет – среднегодового и маловодного. Из этих характеристик выводятся основные водноэнергетические показатели ГЭС по характерным годам (среднему и маловодному): среднегодовая мощность, число часов использования установленной мощности в году, годовая выработка энергии [7].

Нами построены кривые продолжительности суточных расходов воды и кривые использования стока для 85 рек, равномерно распределенных по территории Кыргызстана и достаточно репрезентативно отражающих все типы водного режима, присущие рекам республики [10]. Мы получили ординаты кривых продолжительности суточных расходов воды и кривых использования стока для 85 водосборов с периодом наблюдений от 25 до 42 года за каждый год, а также среднемноголетние кривые и некоторые статистические характеристики [11, 12].

Автором разработан упрощенный способ построения кривой использования стока для рек с отсутствием данных наблюдений за стоком, путем аппроксимации её с помощью тригонометрической функции – гиперболический тангенс на основе всего двух опорных точек: K_{min} - минимальный суточный расход воды выраженный в модульных коэффициентах, и $\varphi_{1.0} = \varphi(K=1)$ - коэффициент использования стока при $K=1,0$. Дополнительно может использоваться третий параметр - $\varphi_{2.0} = \varphi(K=2)$ - коэффициент использования стока при $K=2,0$ [13, 14].

В водохозяйственных расчетах из кривой продолжительности суточных расходов и кривой использования стока могут быть получены, все остальные характеристики внутригодового распределения стока (кривые избытков и дефицитов, интегральные кривые продолжительности) [15, 16].

Мощность установки N рассчитывается по формуле:

$$N = 9.8\ Q\ H\ \eta\ (Q, H),$$

где Q - расход, равный пропускной способности турбины или деривационного канала ($м^3/с$), H - напор (м), $\eta(Q, H)$ – кпд. установки, зависящий, прежде всего от расходно-напорной характеристики ГЭС, типа турбины, напряжения в сети, гидростроительных и гидротехнических устройств ГЭС, электроэнергетического оборудования.

Выработка электроэнергии $Э$ подсчитывается по формуле:

$$Э=0,00272\ Wucn.\ H\ \eta\ (Q, H),$$

где $Wucn.$ - объем используемого стока, равный произведению доли используемого стока φ на средний расход Qcp. Величина φ снимается с кривой использования стока по значению пропускного расхода Qт.

Выводы. Таким образом, полученные нами результаты могут быть использованы при проведении массовых водохозяйственных расчетов для расчета водо-энергетических характеристик малых ГЭС, при масштабном строительстве на реках где отсутствуют данные гидрометрических наблюдений.

Литература

1. Второе Национальное сообщение Кыргызской Республики сторонам Рамочной Конвенции ООН об изменении климата. Бишкек. 2008. 216 с.
2. Ордобаев Б.С., Эгизов И.А., Байсов Т. Опасные природные процессы в Кыргызстане // Комплексная безопасность. Новые горизонты. Междунар. науч.-практ. конф., 25-ноября 2011 г. Химки: АГЗ МСЧ России. 2011. С. 99-104.

3. Ордобаев Б.С., Эгизов И.А. Проблемы защиты населения и территории от рисков гидрологического происхождения // Вестник МУК. 2012. № 2 (22). С. 59-62.
4. Эгизов И.А., Ордобаев Б.С. Опасные природные процессы, вызываемые различными типами горных рек. Бишкек. 2013.
5. Программа развития малой энергетики в Кыргызской Республике до 2012 года. Утверждена Указом Президента КР от 14 октября 2008 г. № 365.
6. Национальная программа развития Кыргызской Республики до 2026 года. Вступила в силу согласно Указу президента КР Жапарова С.Н., подписанного 14 октября 2021 г.
7. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. М.: Наука. 1982. 271 с.
8. Андреянов В.Г. Внутригодовое распределение речного стока. Л.: Гидрометеоиздат. 1960. 327 с.
9. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат. 1973. 111 с.
10. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. XI. Киргизская ССР. Л.: Гидрометеоиздат. 1987. 450 с.
11. Эгизов И.А. Гидрологические предпосылки к развитию малой гидроэнергетики в Киргизии // Проблемы геоэкологии и природопользования горных территорий: К V съезду Геогр. о-ва КиргССР, г. Пржевальск, 21-23 мая 1990 г. Фрунзе: Илим. 1990.
12. Эгизов И.А., Ордобаев Б.С., Садабаева Н.Дж., Абдыкеева Ш.С. Закономерности распределения параметров естественной зарегулированности стока рек Кыргызстана // Вестник МУК. 2011. № 1 (20). С. 120-123.
13. Эгизов И.А., Ордобаев Б.С., Пархоменко Ю.Ф. Зависимость естественной зарегулированности стока рек Кыргызстана от водности года // Инновационные разработки молодых ученых развитию агропромышленного комплекса. II Междунар. конф. Ставрополь. 2013. С. 412-416.
14. Эгизов И.А., Ордобаев Б.С. Расчет водоэнергетических характеристик по кривым использования стока рек Кыргызстана // Наука и новые технологии. 2014. № 1. С. 20-23.
15. Эгизов И.А. Влияние водности года на внутригодовое распределение стока рек Кыргызстана // О кыргызско-российском сотрудничестве за период с 1785-2013 г. и его перспективах. Материалы междунар. науч.-техн. конф. по научному направлению: Природопользование и чрезвычайные ситуации в горных условиях при изменении климата. Бишкек: Айат. 2013. С. 201-203.
16. Эгизов И.А., Ордобаев Б.С., Сернецкая А.О. Гидрологические расчеты при строительстве малых ГЭС Кыргызской Республики // Техносферная безопасность: наука и практика. Материалы междунар. науч.–практ. конф. Бишкек: Айат. 2015. С. 205-207.

МЕХАНИКА И МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 51-74

ITERATIVE OPTIMIZATION FOR NLP SYSTEMS: TEXTUAL GRADIENT DESCENT AND MONTE CARLO METHODS

Atabekov T.
atabekov_t@auca.kg
American University of Central Asia, Bishkek city, Kyrgyz Republic

This paper extends the Textual Gradient Descent (TextGrad) framework, which provides a mathematical foundation for text optimization, by introducing Monte Carlo methods for gradient estimation in discrete text spaces. We propose a Monte Carlo-inspired approach that enables optimization through systematic input distribution sampling. Experimental validation on object counting tasks demonstrates that our Monte Carlo TextGrad approach achieves high accuracy, outperforming baseline models and conventional TextGrad implementations.

Keywords: Textual Gradient Descent, Monte Carlo Methods, LLM Optimization, Measure Theory, Expected Textual Loss

1. Introduction

Large language models (LLMs) have revolutionized natural language processing, yet their optimization faces a fundamental challenge: the mismatch between how we optimize models and how language works. Traditional optimization methods, like gradient descent, work with continuous numbers and can make tiny adjustments to parameters. However, language is discrete - we work with whole words and phrases, not fractions of words. This paper addresses this challenge by extending Textual Gradient Descent (TextGrad) with Monte Carlo methods, providing a way to optimize text generation.

Modern LLM optimization techniques typically focus on either computational efficiency [1] or prompt engineering methods [2]. While valuable, these strategies do not address the latent optimization landscape of textual outputs themselves and often require extensive computational resources. Our work builds upon the mathematical framework for text optimization introduced by Yuksekgonul et al. [3] and extends it with three critical innovations: Monte Carlo-inspired sampling mechanisms for gradient estimation, convergence bounds adapted from stochastic approximation theory, and optimization through systematic input distribution sampling.

A key limitation of current approaches is that they primarily optimize prompts based on existing data, which often leads to models simply adapting their answers to known questions rather than developing deeper understanding. By generating synthetic inputs that deliberately differ from the training distribution, our approach forces the model to think more deeply about the underlying task rather than just pattern-matching to familiar examples. This systematic exploration of the input space helps the model develop more robust and generalizable solutions.

The inherent challenge lies in reconciling the discrete nature of language with the continuous optimization frameworks that drive modern machine learning. Current approaches approximate this through heuristic search, lacking formal mathematical grounding and often requiring extensive computational resources. Our solution extends the TextGrad framework by incorporating Monte Carlo methods, translating these numerical techniques into textual operations through two key mechanisms: treating prompts and outputs as elements of a probability space where each text configuration has an associated likelihood, and implementing Monte Carlo integration through batch sampling of simulated inputs.

This approach provides mathematical rigor and practical benefits. It achieves performance comparable to expensive models while using smaller architectures. The systematic exploration of input space through Monte Carlo sampling helps the model develop more robust solutions.

Section 2 establishes theoretical foundations by introducing TextGrad and Monte Carlo methods. Section 3 formalizes our approach through Expected Textual Loss and its mathematical derivation. Section 4 presents our convergence analysis. Section 5 details our implementation with stopping criteria and experimental validation. Section 6 summarizes our contributions and outlines future research directions.

2. Theoretical Background

2.1. TextGrad Framework

TextGrad, as formalized by Yuksekgonul et al. [3], is a mathematical framework that applies gradient descent principles to optimize text. For the purposes of establishing necessary context, the following mathematical formulations are adapted from Yuksekgonul et al.'s foundational work. Their framework, which we present here for illustrative purposes, consists of core components that parallel traditional mathematical constructs: text variables analogous to tensors in computation graphs, language models functioning as transformation operators, textual loss mechanisms providing quality assessment, and optimization algorithms for text updates.

In a TextGrad computation graph, the gradients are defined as:

$$\frac{\partial Evaluation}{\partial Prompt} = \frac{\partial Evaluation}{\partial Response} \cdot \frac{\partial Response}{\partial Prompt} = \nabla_{LLM}(\text{Prompt, Response, } \frac{\partial Evaluation}{\partial Response})$$

where ∇_{LLM} is the gradient operator of the LLM.

Generalizing to n dimensions, the computation graph is defined as:

$$v = f_v(PredecessorOf(v)), \forall v \in \mathcal{V}$$

where $\mathcal{V}$ is the set of variables, v is a variable (text), $PredecessorOf(v)$ represents predecessor variables, and f_v is the transformation function (typically an LLM call).

The gradient can be generalized to n dimensions as:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v} = \bigcup_{w \in \text{SuccessorOf}(\$v\$)} \nabla_f(v, w, \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial w})$$

where $\mathcal{L}$ is the loss function and $SuccessorOf(v)$ represents successor variables.

The iterative update process in TextGrad follows the standard gradient descent formulation:

$$\theta_{new} = \theta_{old} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} \tag{2}$$

where θ represents the text variable being optimized, and $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta}$ is the gradient of the loss function with respect to θ.

2.2. Monte Carlo Methods

Monte Carlo methods constitute a class of computational algorithms that rely on repeated random sampling to obtain numerical results [4]. These methods are particularly useful for optimization problems, numerical integration, and generating draws from probability distributions.

The core principle of Monte Carlo methods is the use of randomness to solve problems that might be deterministic in principle. By generating a large number of random samples and observing the proportion that possess a certain property, we can approximate complex, multi-dimensional integrals that would otherwise be difficult to compute.

The mathematical foundation of Monte Carlo methods rests on the Law of Large Numbers, which states that as the number of identically distributed, randomly generated variables increases, their sample mean approaches their theoretical mean [5]. Formally, for independent random variables $X_1, X_2, ..., X_n$ with expected value μ, we have:

$$\lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_i = \mu \quad \text{almost surely}$$

This convergence property enables Monte Carlo methods to estimate expected values by averaging random samples. For a function f and random variable X with probability density function $p(x)$, the expected value is:

$$E[f(X)] = \int f(x)p(x)dx \approx \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f(x_i)$$

where $x_1, x_2, \ldots, x_n$ are samples drawn from the distribution of X.

Monte Carlo methods have been successfully applied in artificial intelligence. Their particular strength lies in handling problems with high dimensionality where deterministic numerical methods become computationally intractable.

2.3. Analogies Between LLM Training and Prompt Engineering

LLM training and prompt engineering share fundamental objectives despite operating at different levels of abstraction. Pre-training establishes language capabilities analogous to how system prompts define baseline behaviors, while supervised fine-tuning mirrors TextGrad optimization through directed feedback. Our Monte Carlo approach extends this parallel by functioning as the conceptual equivalent to reinforcement learning in model training - enabling systematic exploration of text space through principled sampling rather than parameter updates, and creating a feedback loop without modifying the underlying model architecture.

3. Mathematical Formulation of Expected Textual Loss

3.1. Problem Statement

We address a fundamental challenge in prompt optimization: ensuring robust performance across diverse inputs beyond the initial training distribution. Our approach leverages a generative language model to produce varied synthetic datasets that deliberately differ from those on which the prompt was initially optimized.

By formalizing this process within an expected textual loss framework, we establish a theoretical foundation for optimizing prompts against robustly sampled distributions rather than fixed datasets.

3.2. Expected Textual Loss

Let $\mathcal{D}$ be the distribution of possible simulations and Ξ the set of all possible inputs. We aim to find the expected loss of the output of transformation function f_θ with output θ through the following integral:

$$\mathcal{L}(\theta) = \int_{\Xi} L(f_\theta(\xi))d\mathcal{D}(\xi) \tag{3}$$

where:

- Ξ is the set of all possible inputs
- $\mathcal{D}$ is the distribution of possible simulations
- L is the textual loss function evaluating output
- f_θ is the transformation function with output θ

3.3. Formula Derivation

Let $g(\xi) = L(f_\theta(\xi))$ and we sample ξ from $\mathcal{D}$. We can rewrite equation (3) as:

$$I = \int_{\Xi} g(\xi)d\xi \tag{4}$$

According to the definition of expected value for random variables with density, for a random variable X with probability density function (PDF) $p(x)$, the expected value of a function $g(X)$ is:

$$\mathbb{E}_{X\sim D}[g(X)] = \int_{-\infty}^{+\infty} g(X)p(X)dX$$

To compute a definite integral $\int_a^b g(X)dX$, we can normalize the domain: $X \in \text{Uniform}[a,b]$, with $p(X) = \frac{1}{b-a}$, giving:

$$\int_a^b g(X)dX = (b-a)\cdot\mathbb{E}[g(X)]$$

Using this definition, let $\mathcal{D}(\xi) = \frac{1}{V}$ where $V = \int_{\Xi} d\xi$ is the volume of domain Ξ. Equation (4) becomes:

$$I = V \cdot \mathbb{E}[g(\xi)]$$

According to the Law of Large Numbers, as the sample size $N \to \infty$, the sample mean converges to the true expected value:

$$\mathbb{E}[g(\xi)] \approx \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} g(\xi_i)$$

where ξ_i are uniformly distributed samples in Ξ.

Thus, our discrete approximation of (3) is:

$$\mathcal{L}(\theta) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} L(f_\theta(\xi_i)) \text{ where } \xi_i \in \mathcal{D}$$

Note that $V = 1$ since we have normalized the semantic space.

Our optimization objective becomes an expected loss over simulated input distributions:

$$\mathcal{L}(\theta) = \mathbb{E}_{\xi \sim \mathcal{D}}\left[L(f_\theta(\xi))\right], \tag{5}$$

where:

- θ is our variable (prompt, evaluation, etc.)
- ξ is a simulated input (personas, scenarios, parameters, etc.)
- L is the textual loss function
- $\mathcal{D}$ is the distribution of possible simulations

Using the Monte Carlo approximation from equation (5), the iterative equation from (2) becomes:

$$\theta_{new} = \theta_{old} - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \nabla_f \cdot L(f_\theta(\xi_i)),$$

where N is the number of samples drawn from distribution $\mathcal{D}$.

4. Convergence Analysis

The convergence bound for TextGrad's textual gradient descent can be expressed as:

$$\mathbb{E}[\| \theta_{optimal} - \theta_t \|] \leq \frac{C}{t} + D,$$

where t is the iteration number, and C and D are constants that encode fundamental properties of the optimization landscape and algorithm dynamics. The constant C represents the initial displacement from optimal parameters and is primarily influenced by prompt quality:

$$C = \mathbb{E}[\| \theta_0 - \theta_{optimal} \|^2].$$

Poor initial prompts lead to larger C values, while well-crafted starting points result in smaller C values. The constant D captures stochastic gradient noise and is defined as:

$$D = \mathrm{Var}_{\xi \sim \mathcal{D}}(\nabla_\theta L(f_\theta(\xi))).$$

The key factor affecting D is domain complexity, with structured domains (e.g., coding) yielding lower D values and subjective domains (e.g., creative writing) yielding higher D values. In the early stages of optimization, the $\frac{C}{t}$ term dominates due to large initial errors, while in later stages, the variance (D) limits final convergence precision.

5. Implementation and Experimental Validation

5.1. Implementation with C and D Stopping Criteria

The convergence analysis in Section 4 provides natural stopping criteria for the optimization process. We implement these criteria by monitoring both the initialization-dependent term (C) and variance-dependent term (D):

Algorithm 1 – Monte Carlo TextGrad with Convergence Criteria

Input: Initial prompt θ, simulation distribution D, sample size N
Output: Optimized prompt θ^*

Initialize θ as TextGrad variable
Initialize model and critic
Initialize *Cthreshold* and *Dthreshold*
for iteration = 1 to max_iterations **do**
  Sample batch $\{\xi_1,\xi_2,...,\xi_N\}$ from $\mathcal{D}$
  Initialize empty losses array
  for each ξ_i in batch do
    output = model(θ,ξ_i)
    loss_i = critic(output)
    Append loss_i to losses array
  end for
  total_loss $= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\text{loss}_i$
  Compute $C = ||\theta 0 - \theta_{current}||^2$
  Compute D = Var(losses array)
  if $\frac{C}{t} < C_{threshold}$ **and** $D < D_{threshold}$ **then**
    break
  end if
  Backpropagate gradients through total_loss
  Update θ using optimizer
end for
return θ

The stopping criteria are based on two key observations from our convergence analysis:

- The $\frac{C}{t}$ term represents the initialization-dependent error, which should decrease below a threshold $C_{threshold}$ as optimization progresses
- The D term represents the variance in the loss landscape, which should stabilize below a threshold $D_{threshold}$ for convergence

This implementation ensures that optimization stops when either:

- The initialization error has been sufficiently reduced (early stage convergence)
- The variance in the loss landscape has stabilized (late stage convergence)

5.2. Experimental Results

To validate our theoretical framework, we conducted experiments comparing standard TextGrad with our Monte Carlo based version. Figure 1 shows results from an object counting task where the model must accurately enumerate objects in various scenarios.

Method	Accuracy (%)
Baseline Model	77.8
Standard TextGrad	91.9
Monte Carlo TextGrad	94.0

Figure 1 – Object counting accuracy comparison across methods

The experimental results demonstrate that Monte Carlo TextGrad not only outperforms standard

TextGrad by 2.1% absolute accuracy but also achieves this superior performance with one training iteration. This validates our theoretical prediction that optimizing across input distributions leads to more robust prompt performance compared to optimization on individual instances.

The improved performance can be attributed to the systematic exploration of input space enabled by our Monte Carlo sampling approach, which helps the model encounter and adapt to a wider range of scenarios during optimization. This empirical validation supports our theoretical framework's effectiveness in real-world applications.

5.3. Practical Benefits and Impact

The Monte Carlo TextGrad approach offers several significant advantages beyond its technical performance. In terms of cost-effectiveness, our approach reduces computational resources required for optimization. The ability to achieve high performance with smaller models means organizations can use less expensive hardware while maintaining competitive results, which is particularly valuable for resource-constrained environments. Furthermore, the reduced computational requirements make advanced NLP optimization techniques accessible to a wider range of researchers and organizations.

These benefits are particularly significant in the context of the growing concerns about the environmental impact of AI development. As shown in Table 1, our approach offers substantial advantages across multiple dimensions.

Table 1 – Comparative analysis of benefits across different approaches

Benefit Category	Traditional Approach	Monte Carlo TextGrad
Training Iterations	Multiple	Single
Computational Cost	High	Low

6. Conclusion

This paper extends the TextGrad framework by introducing Monte Carlo methods for text optimization. By bridging traditional Monte Carlo methods with the existing TextGrad architecture, we have provided both theoretical guarantees and practical tools for optimizing LLM outputs.
Our key contributions include:

- Monte Carlo sampling mechanisms for gradient estimation in text space,
- Convergence guarantees for the Monte Carlo TextGrad approach,
- Implementation and experimental validation showing improved efficiency.

This work opens new avenues for language model optimization that maintain mathematical rigor while addressing the practical challenges of discrete text spaces. Future research directions include extending these principles to multi-agent systems, exploring adaptive learning rates for text modification, and incorporating error bounds for stochastic text optimization.

References

1. Omar Khattab, Aarush Singhvi, Pranav Maheshwari, Zihan Zhang, Karthik Santhanam, Sathya Vardhamanan, Sajjad Haq, Aarush Sharma, Tushar Joshi, Haseeb Moazam, Henry Miller, Manish Zaharia, and Chris Potts. *DSPy: Compiling Declarative Language Model Calls into Self-Improving Pipelines*. 2023. URL: https://arxiv.org/pdf/2310.03714 (visited on 06/07/2024).
2. Taejin Shin, Yashar Razeghi, Robert Logan IV, Eric Wallace, and Sumit Singh. *AutoPrompt: Eliciting Knowledge from Language Models with Automatically Generated Prompts*. 2023. URL: https://openreview.net/forum?id=Bw82hwg5Q3 (visited on 06/07/2024).
3. Murat Yuksekgonul, Francesco Bianchi, John Boen, Shiyu Liu, Zhihan Huang, Chris Guestrin, and Jiajun Zou. *Automatic "Differentiation" via Text*. 2024. URL: https://arxiv.org/ pdf/2406.07496 (visited on 06/07/2024).
4. Department of Mathematical Sciences. *Monte Carlo Methods*. 2012. URL: https://www. math.chalmers.se/Stat/Grundutb/CTH/tms150/1112/MC.pdf (visited on 03/01/2025).
5. Gunther Leobacher and Friedrich Pilichshammer. *Introduction to Quasi-Monte Carlo Integration and Applications*. 2014. URL: http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/ 123456789/53582/1/Gunther%20Leobacher.pdf (visited on 03/01/2025).

УДК 519.63

DEVELOPMENT OF MULTISTAGE NUMERICAL METHODS FOR SOLVING NONLINEAR REACTION-DIFFUSION EQUATIONS

Masalbekova A.M.
masalbekova_a@auca.kg
American University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan

In this work, multistage projection method is proposed and developed to solve nonlinear reaction-diffusion equations. Projective integral-interpolative method is combined with third-order Runge-Kutta-like methods, its stability is discussed, and the numerical experiments on a Fitzhugh-Nagumo equation are conducted to demonstrate the work of the method. The results of the work contribute to future studies and research of various nonlinear reaction-diffusion equations.

Key words: nonlinear reaction-diffusion equations, numerical methods, projection method

Introduction. Nonlinear reaction-diffusion equations are used to model various processes in physics, biology, medicine, chemistry, and ecology. One of the first models proposed was the Fisher equation, which described the spread of a gene in a population. Since then, many different reaction-diffusion equations based on it have been introduced to govern the dynamics of the population [1]. Random spread of the population under logistic growth over the habitat is also depicted by Fisher equation [2]. Another well-known model is the Fitzhugh-Nagumo equation widely used in physics, biology and medicine. Its purposes include the description of the complex dynamics of neurons and neural networks, cardiac systems, and cellular processes [3]. The b-ε model is a system of nonlinear reaction-diffusion equations used in computational fluid dynamics to describe turbulent flow. It can also be used to model the spread of pollution in the ocean [4]. Another model used in ecology describes the dynamics of chlorophyll concentration based on phytoplankton biomass depending on environmental conditions and spatial distribution in the column of water [5]. The above-mentioned and many other models have been studied extensively over the past century and different analytical and numerical methods of solving them have been proposed and studied. Here, we propose numerical method that is both stable and handles nonlinearity well.

Development of the general method. We will start first by considering the equation in the following form:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(u),\ k > 0,\ x \in (0,1),\ t \in (0,T]$$

The uniform grid used for x in the interval [0, 1] is as follows:

$$x_i \equiv (i-1)h,\ h = 1/(n-1),\ i = \overline{1,n}$$

We approximate the second derivative with respect to spatial variable x using finite differences. Let's denote it $u_i(t) \approx u(x_i, t)$:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = k \cdot \frac{u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}}{h^2} + f(u_i),\ i = \overline{2,n-1},\ t \in (0,T]$$

After adding the appropriate initial and boundary conditions, the following system is obtained:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u_i}{\partial t} - \dfrac{k}{h^2}u_{i-1} + \dfrac{2k}{h^2}u_i - \dfrac{k}{h^2}u_{i+1} = f_i(t),\ i = \overline{2,n-1},\ t > 0 \\ u_1(t) = \psi_0(t),\ u_n(t) = \psi_1(t),\ t > 0 \\ u_i(0) = \phi(x_i),\ i = \overline{1,n} \end{cases}$$

Now, the problem is of the form:

$$\frac{\partial u}{\partial t}(\zeta, t) + Au(\zeta, t) = f(\zeta, t),\ \zeta \in \omega,\ t > 0$$

where the operator A accounts for the coefficients after using finite differences and therefore is defined as:

$$Av(\zeta) \equiv \sum_{\eta \in \omega} a\,(\zeta,\eta)v(\eta),$$

$$a(\zeta,\zeta) > 0;\ a(\zeta,\eta) \le 0, \eta \ne \zeta; \sum_{\eta \in \omega} a\,(\zeta,\eta) \ge 0.$$

It allows us to use the projective variant of the integral-interpolative method that was proposed by Sklyar and Altynnikova [6]. We will discretize the time variable on the interval $[0,T]$ onto a uniform grid with M nodes:

$$t_m \equiv m\tau,\ \tau = T/M,\ m = \overline{0,M}$$

In addition, each interval $[t_{m-1},t_m]$ in the grid will contain another mesh $\{x_i\}_{i=0}^{N}$:

$$t_{m-1} = x_0 < x_1 < \ldots < x_i < \ldots < x_N = t_m,$$
$$x_i = t_{m-1} + \lambda_i\tau,$$
$$0 = \lambda_0 < \lambda_1 < \ldots < \lambda_i < \ldots < \lambda_N = 1$$

Therefore, on each interval defined in x_i grid, Runge-Kutta-like method will be used, building an N-stage projection method. On each interval $[x_0,x_i]$, let us multiply the equation by an arbitrary function and integrate both sides by parts:

$$(uv)(\zeta,x_i) - (uv)(\zeta,x_0) + \int_{x_0}^{x_i} u\,(\zeta,t)\left[-\frac{dv}{dt}(\zeta,t) + a(\zeta,\zeta)v(\zeta,t)\right]dt =$$

$$= -\sum_{\eta \ne \zeta} a\,(\zeta,\eta)\int_{x_0}^{x_i} u\,(\eta,t)v(\zeta,t)dt + \int_{x_0}^{x_i} f\,(\zeta,t,u)v(\zeta,t)dt$$

We can choose an arbitrary function v in a way that would make an integral on the left-hand side equal to zero:

$$v(\zeta,t) = \exp[-a(\zeta,\zeta)(x_i - t)]$$

Substituting it back gives the following:

$$u(\zeta,x_i) - u(\zeta,x_0)\exp[-a(\zeta,\zeta)(x_i - x_0)] =$$
$$= -\sum_{\eta \ne \zeta} a\,(\zeta,\eta)\int_{x_0}^{x_i} u\,(\eta,t)\exp[-a(\zeta,\zeta)(x_i - t)]dt +$$
$$+ \int_{x_0}^{x_i} f\,(\zeta,t,u)\exp[-a(\zeta,\zeta)(x_i - t)]dt,\ \zeta \in \omega,\ t > 0$$

We can approximate functions $u(\eta,t)$ and $f(\zeta,t,u)$ using Lagrange polynomial interpolation over the interval $[x_0,x_i]$:

$$l_i\left(t,\{u(\eta,x_k)\}_{k=0}^{i},\{x_k\}_{k=0}^{i-1}\right) = \sum_{k=0}^{i-1}\omega_{i,k}\,(t)u(\eta,x_k)$$

$$l_i\left(t,\{f(\zeta,t,u)\}_{k=0}^{i},\{x_k\}_{k=0}^{i-1}\right) = \sum_{k=0}^{i-1}\omega_{i,k}\,(t)f(\zeta,x_k,u)$$

where $\omega_{i,k}(t) = \prod_{j=0,j\ne k}^{i-1}\frac{t - x_j}{x_k - x_j}$

Substituting the resulting Lagrange polynomials back subsequently adding two integrals and dropping the error of interpolation yields the general approximated solution $\overline{u}$ at ith stage on each time interval:

$$\overline{u}(\zeta,x_i) = \overline{u}(\zeta,x_0)\cdot\exp[-a(\zeta,\zeta)(x_i - x_0)] +$$
$$+\sum_{k=0}^{i-1}\left[f\left(\zeta,x_k,\overline{u}(\zeta,x_k)\right) - \sum_{\eta \ne \zeta} a\,(\zeta,\eta)\overline{u}(\eta,x_k)\right]\cdot\int_{x_0}^{x_i}\omega_{i,k}\exp[-a(\zeta,\zeta)(x_i - t)]dt$$

One-stage method. Here is a concise presentation of the one-stage method, where we denote $a(\zeta,\zeta) \equiv a$ and use helper function:

$$\overline{u}(\zeta,t_m) = \overline{u}(\zeta,t_{m-1}) \cdot \exp(-a\tau) +$$
$$+\left[f\left(\zeta,t_{m-1},\overline{u}(\zeta,t_{m-1})\right) - \sum_{\eta\neq\zeta} a\,(\zeta,\eta)\overline{u}(\eta,t_{m-1})\right] \cdot \tau\alpha(a\tau),$$
$$where \quad \alpha(z) = \frac{1-\exp(-z)}{z}$$

Two-stage method. Two-stage method is derived in a similar fashion. We use additional helper function to construct a one-parameter method:

$$\beta(z) = \frac{1-\alpha(z)}{z}.$$

Here is two-stage method:

$$\begin{aligned}
\overline{u}(\zeta,x_1) \quad &= \overline{u}(\zeta,t_{m-1}) \cdot \exp[-a\tau\lambda] \\
&+\tau\lambda\left[f\left(\zeta,t_{m-1},\overline{u}(\zeta,t_{m-1})\right) - \sum_{\eta\neq\zeta} a\,(\zeta,\eta)\overline{u}(\eta,t_{m-1})\right] \cdot \alpha(a\tau\lambda) \\
\overline{u}(\zeta,t_m) \quad &= \overline{u}(\zeta,t_{m-1}) \cdot \exp[-a\tau] \\
&+\tau\left[f\left(\zeta,t_{m-1},\overline{u}(\zeta,t_{m-1})\right) - \sum_{\eta\neq\zeta} a\,(\zeta,\eta)\overline{u}(\eta,t_{m-1})\right] \cdot \left(\alpha(a\tau) - \frac{\beta(a\tau)}{\lambda}\right) \\
&+\tau\left[f\left(\zeta,x_1,\overline{u}(\zeta,x_1)\right) - \sum_{\eta\neq\zeta} a\,(\zeta,\eta)\overline{u}(\eta,x_1)\right] \cdot \frac{\beta(a\tau)}{\lambda}
\end{aligned}$$

Three-stage method. Three-stage method is obtained analogously to the previous ones. We add another helper function to construct a two-parameter method:

$$\gamma(z) = \frac{1-2\beta(z)}{z}.$$

Here is three-stage method:

$$\begin{aligned}
&\overline{u}(\zeta,x_1) = \overline{u}(\zeta,t_{m-1}) \cdot \exp[-a\tau\lambda_1] \\
&+\tau\lambda_1\left[f\left(\zeta,t_{m-1},\overline{u}(\zeta,t_{m-1})\right) - \sum_{\eta\neq\zeta} a\,(\zeta,\eta)\overline{u}(\eta,t_{m-1})\right] \cdot \alpha(a\tau\lambda_1) \\
&\overline{u}(\zeta,x_2) = \overline{u}(\zeta,t_{m-1}) \cdot \exp[-a(\zeta,\zeta)\tau\lambda_2] \\
&+\tau\lambda_2\left[f\left(\zeta,t_{m-1},\overline{u}(\zeta,t_{m-1})\right) - \sum_{\eta\neq\zeta} a\,(\zeta,\eta)\overline{u}(\eta,t_{m-1})\right] \cdot \left(\alpha(a\tau\lambda_2) - \frac{\lambda_2\beta(a\tau\lambda_2)}{\lambda_1}\right) \\
&+\tau\lambda_2\left[f\left(\zeta,x_1,\overline{u}(\zeta,x_1)\right) - \sum_{\eta\neq\zeta} a\,(\zeta,\eta)\overline{u}(\eta,x_1)\right] \cdot \frac{\lambda_2\beta(a\tau\lambda_2)}{\lambda_1}
\end{aligned}$$

$$\overline{u}(\zeta, t_m) = \overline{u}(\zeta, t_{m-1}) \cdot \exp[-a\tau] +$$
$$+\tau\left[f\left(\zeta, t_{m-1}, \overline{u}(\zeta, t_{m-1})\right) - \sum_{\eta \neq \zeta} a\,(\zeta, \eta)\overline{u}(\eta, t_{m-1})\right]\left(\alpha(a\tau) + \frac{\gamma(a\tau) - (\lambda_1 + \lambda_2)\beta(a\tau)}{\lambda_1\lambda_2}\right)$$
$$+\tau\left[f\left(\zeta, x_1, \overline{u}(\zeta, x_1)\right) - \sum_{\eta \neq \zeta} a\,(\zeta, \eta)\overline{u}(\eta, x_1)\right] \cdot \frac{\lambda_2\beta(a\tau) - \gamma(a\tau)}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)}$$
$$+\tau\left[f\left(\zeta, x_2, \overline{u}(\zeta, x_2)\right) - \sum_{\eta \neq \zeta} a\,(\zeta, \eta)\overline{u}(\eta, x_2)\right] \cdot \frac{\gamma(a\tau) - \lambda_1\beta(a\tau)}{\lambda_2(\lambda_2 - \lambda_1)}$$

Numerical experiments. This method has been tested on the Fitzhugh-Nagumo equation in the following form:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + u(1-u)(u-r),$$

where r is a reaction parameter.

Analytical solution that is used in the numerical experiments has been obtained using traveling wave substitution and hyperbolic tangent solution methods [7]:

$$u(x,t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\tanh\left[\pm\frac{\sqrt{2k}}{4k}\left(x \mp \frac{(2r-1)k}{\sqrt{2k}}t\right)\right].$$

Numerical experiments have been conducted on the equations with fixed diffusion and reaction coefficients and the relative error has been calculated to support the graphical observations as follows:

$$Error = \frac{\max\{|\overline{u}_i^m| - |u_i^m|\}}{\max|u_i^m|},\ i = \overline{1,n};\ m = \overline{0,M}.$$

The graphs and error table of two-stage and three-stage projection methods compared to the classical finite differences scheme are provided below.

Table 1 – Fitzhugh-Nagumo equation, r=1, k=0.005

Method	33×65	65×129	129×257	Comments
Finite Differences	0.202966%	0.127674%	0.071117%	
Two-Stage Projection	0.215869%	0.140082%	0.101536%	$\lambda = 1/2$
Three-Stage Projection	0.214806%	0.133782%	0.074668%	$\lambda_1 = 1/3, \lambda_2 = 2/3$
Three-Stage Projection	0.214074%	0.129881%	0.058737%	$\lambda_1 = 1/3, \lambda_2 = 1/2$

Table 2 – Fitzhugh-Nagumo equation, r=3, k=0.005

Method	33×65	65×129	257×513	Comments
Finite Differences	1.269228%	0.612227%	0.149186%	
Two-Stage Projection	0.784815%	0.408959%	0.554797%	$\lambda = 1/3$
Three-Stage Projection	0.772414%	0.373083%	0.118241%	$\lambda_1 = 1/3, \lambda_2 = 2/3$

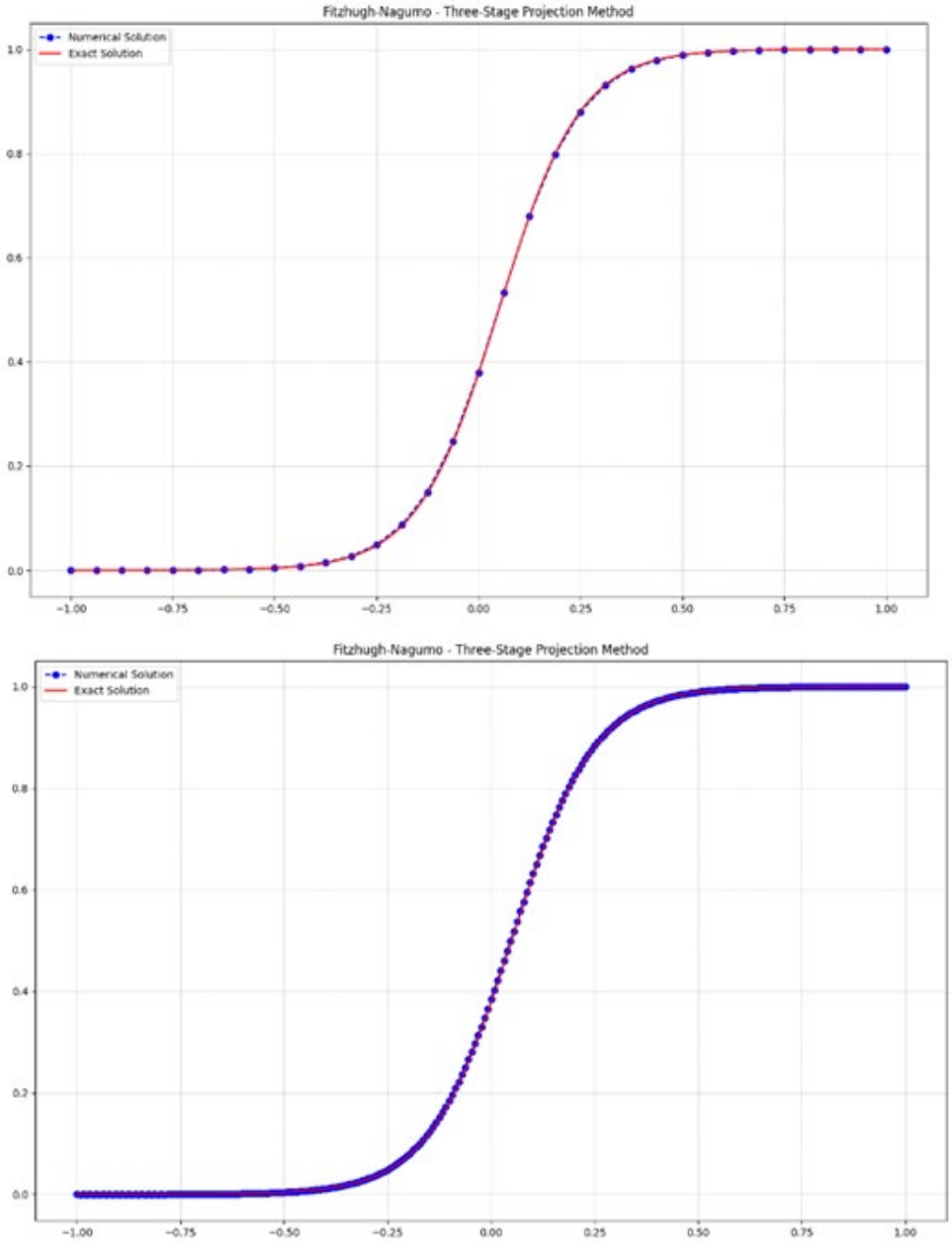


Figure 1 – Examples of solution by three-stage projection method

Conclusion. Multistage projection methods have been proposed in response to the limitations posed by explicit finite difference schemes. The general structure of the n-stage projection method has been constructed and one-stage, two-stage, three-stage methods have been derived from the general structure. After implementing these methods in the software application and testing them on several test equations varying the parameters we have drawn the following conclusions.

Multistage projection methods, unlike finite difference schemes, have been stable throughout numerical experiments, as theoretically proven. Moreover, on the grids of smaller sizes they have resulted in smaller relative error compared to finite difference schemes given the appropriate choice of parameters. For the systems with larger reaction rate, three-stage projection methods have been able to catch up with the exact solution over time, unlike other solutions that lagged behind. Therefore, practical usage of the projection methods in such cases is strongly recommended.

Although the general structure of the method has been developed, the optimal choice of the parameters and convergence of the methods are yet to be studied and researched thoroughly in the future.

References

1. Roman Cherniha and Vasyl Davydovich. “Nonlinear reaction-diffusion systems”. Springer Lecture Notes in Mathematics (2017).
2. Mimmo Iannelli and Andrea Pugliese. An introduction to mathematical population dynamics: along the trail of Volterra and Lotka. Vol. 79. Springer, 2015.
3. Daniel Cebri´an-Lacasa et al. “Six decades of the FitzHugh–Nagumo model: A guide through its spatio-temporal dynamics and influence across disciplines”. Physics Reports 1096 (2024), pp. 1–39.
4. VP Kochergin and SN Sklyar. “Semianalytical version of approximation of system of equations in the ‘b-ε’turbulence model”. (1992).
5. Alexander Ivanovich Abakumov, Yurii Grigor’evich Izrailsky, et al. “Model method of vertical chlorophyll concentration reconstruction from satellite data”. Computer research and modeling 5.3 (2013), pp. 473–482.
6. Скляр С.Н., Алтынникова Л.А. Об устойчивых аппроксимациях по времени в параболических задачах / Моделирование в механике. Т. 4(21), №6, 1990, с. 134-145.
7. Willy Malfliet. The tanh method: a tool for solving certain classes of nonlinear evolution and wave equations. Journal of Computational and Applied Mathematics, 164:529–541, 2004.

УДК 622.235

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ФРАКЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ОПЕРАТИВНОГО РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ БВР

Александров В.Г., Даньшин М.П., Ефимов А.Л., Милько А.А., Майрамбекова А.М., Доскожоева Н.М., Братцев К.О.
aleksey4k708@gmail.com, danshin.maks@list.ru, vigal47@rambler.ru
Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан

Разработан комплекс моделей, который позволяет оперативно решать как прямые, так и обратные задачи БВР без привлечения информации о физико-механических параметрах горного массива. Из соотношений подобия выведены новые функциональные зависимости крепости породы, связывающие основные параметры режима бурения, что открывает возможность оперативного решения задач оптимизации удельной себестоимости карьерно-фабричных затрат.

Ключевые слова: энергоёмкости бурения-взрывания, удельная поверхностная энергия, средний осколок-кусок, удельный расход ВВ, константы-инварианты подобия, функциональные константы.

Методика ФЭМ (фракционно-энергетическая модель):

1) Теория физического подобия;
2) Формулы профессора Крюкова, Перетолчина;
3) Уточнение формул, постройка функций, которые учитывают фракционность разрушения породы;
4) Функциональные константы C0, C1, C2, C3;
5) Проверка адекватности моделей, выполненных по данным бортовой телеметрии по контроллеру КОБУС разработки компании Blastmaker;
6) Численная проверка расчётов выполнялась в среде MATHCAD-15.

1. Константы и инварианты фракционно-энергетического подобия

На основании публикаций [1], [2] справедливы следующие утверждения:

$$\frac{E_{бр}}{S_{бм}} = \frac{E_{вз}}{S_{вз}} = \varepsilon,$$

где $E_{бр}, E_{вз}$ – энергоёмкости бурения, взрывания, МДж/м^3; $S_{бм}, S_{вз}$ – поверхностная площадь осколков разрушенной породы бурением, взрыванием, м^2; ε – удельная поверхностная энергия квазихрупкого разрушения - $\varepsilon = \text{const}$, при условии f=const.

С другой стороны, $\frac{E_{бр}}{E_{вз}} = \frac{S_{бм}}{S_{вз}}$, из чего следует равенство:

$$\frac{E_{бр}}{E_{вз}} = \frac{S_{бм}}{S_{вз}} = \frac{d_{ср}}{d_{бм}} = Q = \text{const}, \quad (1)$$

при условии f=const, где $d_{ср}, d_{бм}$ – средний кусок взорванной породы и средний осколок бурового шлама соответственно, м.

Из равенства $\frac{E_{бр}}{E_{вз}} = \frac{d_{ср}}{d_{бм}}$ следуют:

- константа подобия:

$$E_{бр} \cdot d_{бм} = E_{вз} \cdot d_{ср} = C0, \quad (2)$$

- инварианты подобия (1.3):

$$\left(E_{бр} \cdot d_{бм}\right)/\left(E_{вз} \cdot d_{ср}\right) = 1;\ \left(\frac{E_{бр}}{E_{бм}}\right)/\left(\frac{S_{вз}}{S_{вз}}\right) = 1;\left(\frac{S_{бм}}{S_{вз}}\right)/\left(\frac{d_{ср}}{d_{бм}}\right) = 1. \quad (3)$$

Из выражения (1) следует равенство для определения энергоёмкости взрывного разрушения - $E_{вз}$, при заданном значении - $d_{ср}$ и известных значениях - $E_{бр}$ и $d_{бм}$:

$$E_{вз} = \frac{E_{бр} \times d_{бм}}{d_{ср}} \text{ МДж/м}^3. \quad (4)$$

Удельный расход ВВ рассчитывается по формуле:

$$q = \frac{E_{вз}}{e_{вв}} \text{кг/м}^3. \quad (5)$$

$e_{вв}$ – удельная теплота взрыва, МДж/кг.

2. Модели параметров бурения

Согласно монографий Г.М. Крюкова [3] и [4]:

- *Момент вращения долота - $M_{вр}$,* Н · м

$$M_{вр} = k_e \times \frac{\xi_2}{\sigma_{мд}^{1/3}} \times \left(\frac{k_1 F_{ос}}{\xi_1}\right)^{4/3}, \quad (6)$$

где k_e - безразмерный настроечный коэффициент:

$$k_e = b_0 e^{b_1 f} f^{b_2} F_{oc}^{b_3} \left(\frac{v}{n}\right)^{b_4} \quad (7)$$

$\sigma_{мд}$ - напряжение мелкодисперсного разрушения породы зубцом шарошки, Мпа:

$$\sigma_{мд} = 1{,}3 \times 10^9 [1 + 0{,}079(f - 15) + 0{,}0019(f - 15)^2] \quad (8)$$

$F_{ос}$ – осевая нагрузка, Па;

k_1 – показатель качества очистки забоя, рациональной очистке - $k_1 = 1$;

f – крепость породы по Протодьяконову;

ξ_1, ξ_2 – геометрические параметры шарошек долота;

n – частота вращения долота, с$^{-1}$.

- *Скорость бурения – v, м/с*

$$v = n \times \aleph \times \left(\frac{k_1 F_{ос}}{\sigma_{мд} \xi_1}\right)^{2/3}, \quad (9)$$

$\aleph$ - показатель режима разрушения забоя зубцом шарошки, при объёмном разрушении - $1{,}4 \leq \aleph \leq 1{,}8$.

- *Энергоёмкость бурения - $E_{бр}$, МДж/м^3*

$$E_{бр} = \frac{8 n k_e \sigma_{мд} \xi_2}{v_{бр} d_{ск}^2} \left(\frac{k_1 F_{ос}}{\sigma_{мд} \xi_1}\right)^{4/3} = 8 M_{вр} \times \frac{n}{v d_{ск}^2}. \quad (10)$$

- *Средний диаметр осколка бурового шлама – d, м*

$$d_{бм} = k_d \aleph \left(\frac{k_1 F_{ос}}{\sigma_{мд} \xi_1}\right)^{2/3} = k_d \frac{v}{n}, \quad (11)$$

k_d – коэффициент Перетолчина

$$k_d = a_0 e^{a_1 f} f^{a_2} F_{oc}^{a_3} \left(\frac{n}{v}\right)^{a_4}. \quad (12)$$

3. Функциональные константы бурения

На основе соотношений (1.10) - (1.12), получены функциональные зависимости параметров бурения, являющиеся константами, при f=const. Представим выражение (10) в виде:

$E_{бр} = \frac{8 k_e k_d \sigma_{мд} \xi_2}{d_{бм} d_{ск}^2} \left(\frac{k_1 F_{ос}}{\sigma_{мд} \xi_1}\right)^{4/3}$, откуда, при условии – f=const, с учётом (6) и (10), имеем:

$$C0 = E_{бр} \times d_{бм} = \frac{8 k_e k_d \sigma_{мд} \xi_2}{d_{ск}^2} \left(\frac{k_1 F_{ос}}{\sigma_{мд} \xi_1}\right)^{4/3} = \frac{8 k_d}{d_{ск}^2} \times M_{вр}. \quad (13)$$

Из выражения (1.13) следуют выражения для дополнительных констант бурения:

$$C1 = k_e k_d F_{oc}^{4/3}; \quad (14)$$

$$C2 = F_{oc}^{(a_3 + b_3 + 4/3)} \left(\frac{n}{v}\right)^{(a_4 + b_4)}. \quad (15)$$

Из соотношения (1.9), при условии – f=const, имеет место равенство $\frac{\frac{n_1}{v_1} \aleph_1 F_{oc1}^{2/3}}{\frac{n_2}{v_2} \aleph_2 F_{oc2}^{2/3}} = 1$ откуда следует константа – С3:

$$C3 = \frac{n}{v}\aleph F_{oc}^{2/3}. \quad (16)$$

На рисунках 1-3 приведены графики функциональных констант.

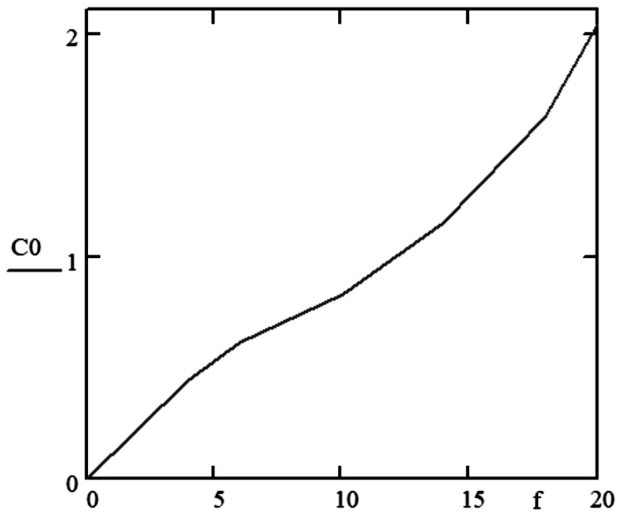


Рисунок 1 – Зависимость C0 = C0(f)

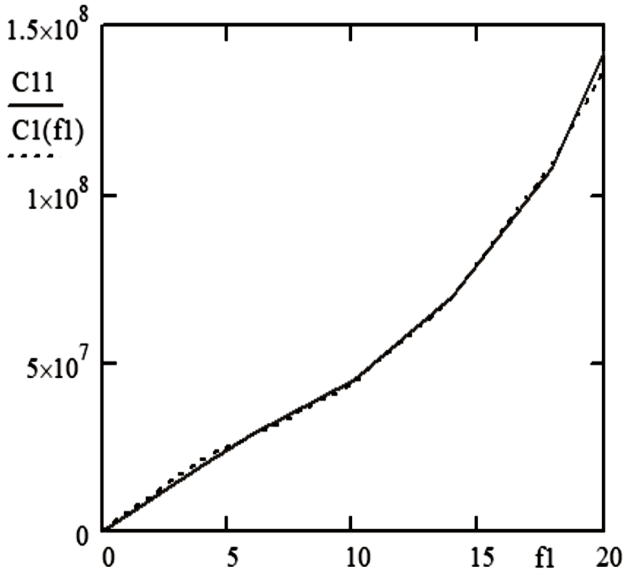


Рисунок 2 – Зависимость C1 = C1(f)

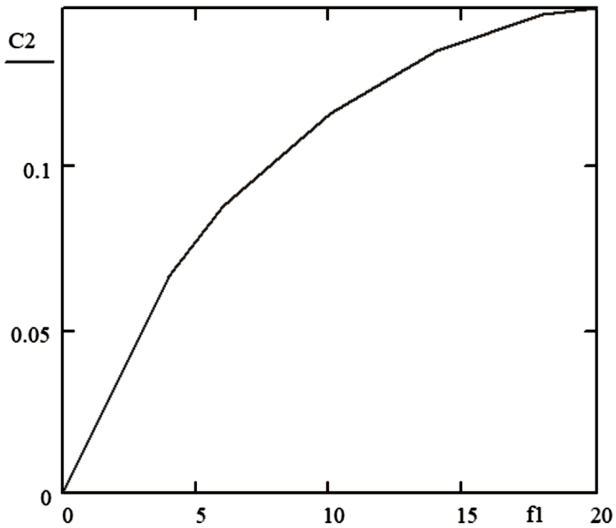


Рисунок 3 – Зависимость C2 = C2(f)

Выводы:

1. Разработанный комплекс моделей, на указанной выше теоретической базе и телеметрических данных параметров бурения, позволяет оперативно решать как прямые, так и обратные задачи БВР без привлечения информации о физико-механических параметрах горного массива.
2. Выведенные функциональные зависимости крепости породы, связывающие основные параметры бурения, открывают возможность оперативного решения задач оптимизации удельной себестоимости карьерно-фабричных затрат.

Литература

1. Додис Я.М., Нифадьев В.И. Разрушение горных пород при бурении и взрывании. Учеб. пособие. Бишкек: КРСУ. 2006. 374 с.
2. Мисник Ю.М., Долгов К.А. Удельная поверхностная энергия − новый показатель дробимости горной породы и его применение в расчетах параметров взрывных работ // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1967. № 2. С. 104-105.
3. Крюков Г.М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании: Учебник для вузов. Т. 1. М.: Горная книга. 2006. 330 с. (Взрывное дело)
4. Перетолчин В.А. Вращательное и шарошечное бурение скважин на карьерах. М.: Недра. 1983. 175 с.

УДК 622.235

ФРАКЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ТЕКУЩЕГО РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ БВР НА ПРИМЕРЕ КАЧКАНАРСКОГО ГОК

Братцев К.О., Даньшин М.П., Ефимов А.Л., Милько А.А., Майрамбекова А.М., Доскожоева Н.М., Александров В.Г.
btrkb@bk.ru
Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан

Контрольное подтверждение эффективности фракционно-энергетической модели БВР на данных фактического бурения и взрывания блоков 3374 и 3385 Качканарского ГОК с вычислением в Mathcad. Разработка комплексного теоретико-практического обоснования инновационных преимуществ (с выделением драйверов экономической эффективности) фракционно-энергетической технологии моделирования БВР в сравнении с распространенными аналитическими подходами и технологиями основного конкурента на рынке РФ и СНГ (Blast Maker).

Ключевые слова: фракционно-энергетическая модель, буровзрывные работы, оптимизация параметров.

Введение. Настоящий отчёт посвящён обоснованию инновационной значимости фракционно-энергетической технологии расчётов параметров буровзрывных работ при открытой добыче полезных ископаемых. Для этого выполнен анализа наиболее известных практических моделей расчёта основных параметр БВР с точки зрения их применимости в производственных условиях, при современных информационно-вычислительных средствах и технико-экономических требованиях в горнодобывающем производстве.

Методы и материалы.

- Значения параметров бурения – осевая нагрузка на забой скважины, частота вращения долота, скорость бурения были получены с помощью бортового контроллера станка разработки корпорации «ЦИФРА»;
- Горнотехнические параметры получены от геологической службы КачГок и данных исследований Гусевогорского карьера (табл. 1);
- Параметры взрыва получены от службы БВР карьера;
- Обработка данных выполнялась в вычислительной среде *Mathcad-15.*

Результаты численного эксперимента. Контрольное подтверждение эффективности фракционно-энергетической модели БВР на данных фактического бурения и взрывания блоков 3374 и 3385 Качканарского ГОК с вычислением в Mathcad. Прямая задача: Расчет усредненных физико-механических параметров скважин по телеметрии. Исходные данные телеметрии бурения представлены на Рисунке 1.

Среднее значение удельного расхода по блоку 3385 составляет – q=0,47 кг/м^3.

По рассчитанным физико-механическим и известным технологическим параметрам БВР модель Куз-Рам даёт следующее значение удельного расхода ВВ для блока 3385:

$$q = \frac{0{,}15\times\left((3{,}49\times 9{,}7\times 0{,}25)^{1/3}\right)\times 0{,}6}{0{,}3\times 1{,}17} = 0{,}52 \text{ кг/м}^3 \quad (1)$$

Относительная погрешность составляет 9,6%.

Анализ, приведённых расчётных данных по дополнительным блокам 3374 и 3385, подтверждает работоспособность начального приближения фракционно-энергетической модели, которая настраивалась по данным телеметрии бурения, фактическим значениям удельного расхода ВВ, фракционного состава породы, разрушенной бурением-взрыванием, различных карьеров металлических полезных ископаемых. Этот факт указывает на универсальность данной модели, которая, если и будет требовать текущей адаптации к

неучтённым физико-механическим свойствам пород, то происходить это будет, скорее всего, на этапе внедрения этой методики [1].

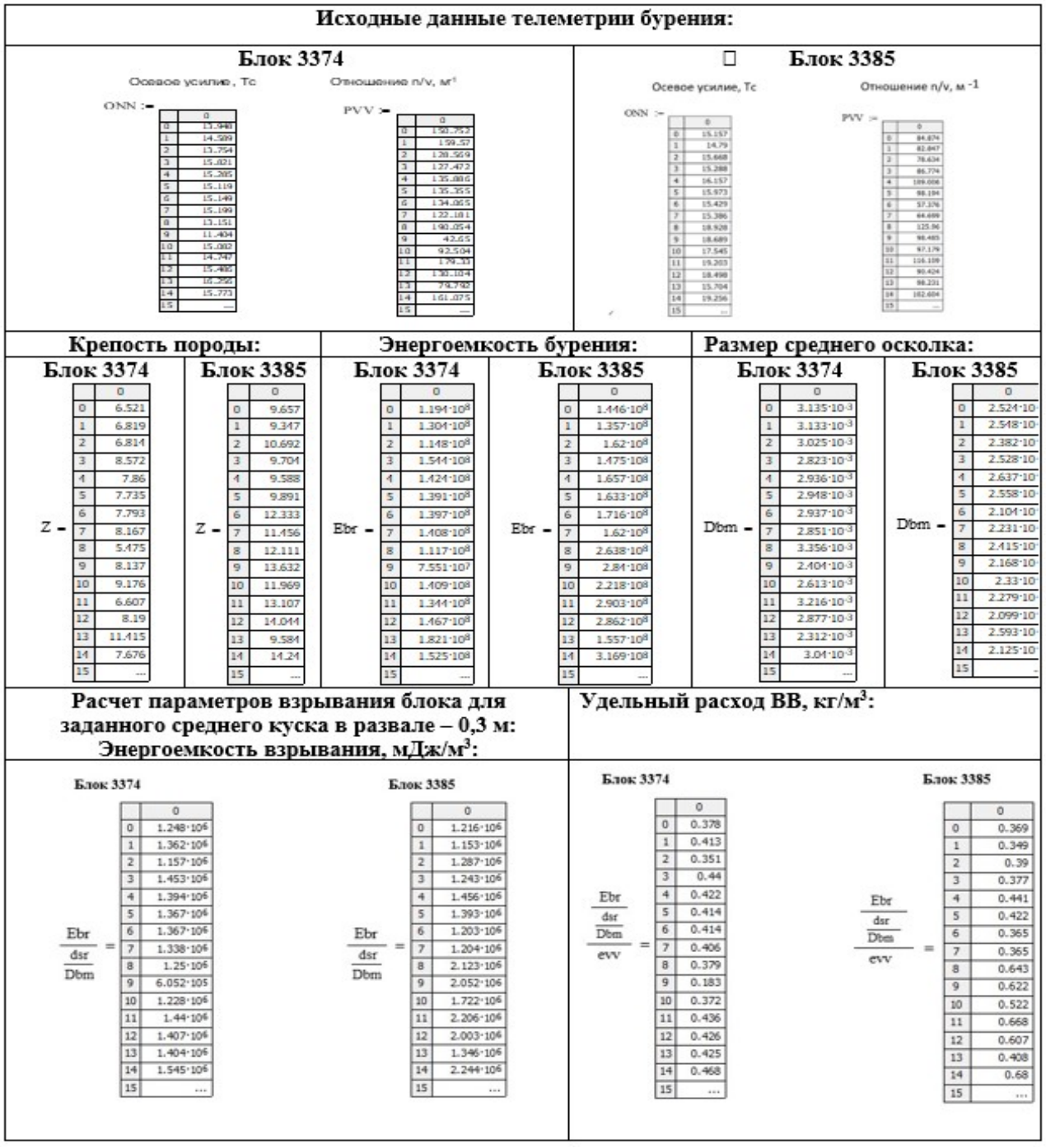


Рисунок 1 – Исходные данные телеметрии бурения

Действительно, согласно данным геологической справки, породы блоков 3374 и 3385 относятся к категории средне взрываемых, для которых, согласно рисунку 2, их крепость находится в диапазоне (6-10) по шкале Протодьяконова, а энергоёмкость бурения лежит в интервале (110-183,6) мДж/м^3. Согласно расчётным данным средние значения этих показателей имеют значения: блок 3374 – $f_{ср}$=7,4, $E_{бр}$=155,6 мДж/м^3; блок 3385 – $f_{ср}$=9,7, $E_{бр}$=178,3 мДж/м^3 [2]. ***Таким образом, фракционно-энергетическая технология адекватно отображает как физико-механические параметры, так и параметры БВР, что является инновационным преимуществом перед существующими технологиями.***

ШКАЛА БУРИМОСТИ-ВЗРЫВАЕМОСТИ ПОРОД ГУСЕВОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Категория				Средний диаметр отдельности, м		Акустический показатель трещиноватости	Коэффициент крепости по Протодьяконову	Реальная производительность СБШ-250МНм/смену	Нормирующие критерии оценки буримости-взрываемости				Формула расчёта
трещиноватости	Буримости	Взрываемости		В массиве	В горной массе				e, квт. ч/м	t мин/м d=245,СБШ-250МН	t_1 мин/м d=40, ПР-25Л	q, кг/м³	q
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
I-II	VIII IX X	Легко	IV	до 0,5	0,15-0,2	0,25	2 3 4	103 93 85	0,9-1,1 1,1-1,3 1,3-1,5	1,2-1,5 1,5-1,82 1,83-2,26	1,4-1,6 1,7-2,3 2,4-2,8	0,64 0,69 0,74	
III	XI XII XIII	Средне	III	0,5-1,0	0,21-0,25	0,25-0,4	6 8 10	78 69 62	1,5-1,8 1,8-2,1 2,1-2,5	2,27-2,68 2,69-3,30 3,31-3,34	2,9-3,5 3,6-4,2 4,3-5,3	0,8 0,87 0,95	q=0.24e+0.4
IV	XIV XV XVI	Трудно	II	1,0-1,5	0,26-0,30	0,4-0,6	12 14 16	55 48 43	2,5-2,9 2,9-3,5 3,5-4,2	3,35-4,82 4,83-5,62 5,63-6,78	5,4-6,2 6,3-7,7 7,8-9,0	1,05 1,17 1,32	
V	XVII XVIII XIX	Весьма трудно	I	1,5	0,31-0,35	0,6-1,0	18 20 20	37 33 30	4,2-5,0 5,0-5,9 5,9-6,9	6,79-7,86 7,87-9,4 9,41-10,96	9,1-10,9 11-13 13,1-15,5	1,5 1,71 1,94	

Рисунок 2 – Шкала буримости-взрываемости пород Гусевогорского месторождения

Обратная задача: восстановить энергоемкость взрывания и удельный расход ВВ по фактическому размеру среднего куска в развале и известным усредненным физико-механическим параметрам скважин.

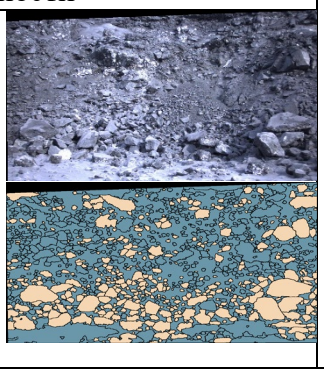
Берем удельный расход предприятия - $q_п$=2,01 кг/м^3 и рассчитываем средний размер куска в развале по формуле

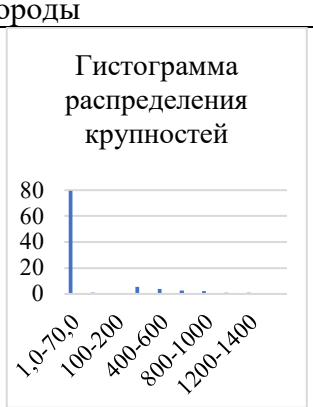
$$q = E_{бр} \times \frac{d_{бм}}{d_{ср} e_{вв}}, \quad (2)$$

где $E_{бр} = 178{,}3$ мДж/м^3 и $d_{бм} = 2{,}7$ мм – средняя энергоёмкость бурения и средний размер бурового осколка по блоку. В результате расчёта имеем: $d_{ср} = E_{бр} \times \frac{d_{бм}}{q e_{вв}} = 178{,}3 \times \frac{2{,}7\times10^{-3}}{2{,}01\times3{,}3} = 0{,}072$ м. По модели КузРам - $d_{ср} = 0{,}078$ [3]. Оценим размер среднего куска развала по данным фотопланиметрии откоса бока 3385. На основании, приведённой таблицы построена гистограмма распределения классов крупности кусков разрушенной породы.

Таблица 1 – Распределение классов крупности кусков разрушенной породы

Распределение классов крупности					
№	Диапазон размеров, мм	%	№	Диапазон размеров, мм	%
1	70-100	1,1	6	1200-1400	0,9
2	100-200	0,7	7	800-1000	2,2
3	200-400	5,4	8	400-600	3,9
4	600-800	2,6	9	1400- 600	0,4
5	1000-1200	0,9			





Средневзвешенный размер куска породы в развале рассчитывается при исключении фракций более 1200 мм, составляющих 6,8% от общей массы и находящихся на откосе развала. Размер породы на интервале 1–1200 мм равен 0,098 м. Оценки среднего размера куска по разным методикам: модель Фр-Эн – 0,072 м, модель Куз-Рам – 0,078 м, фракционный анализ – 0,098 м, с погрешностью: модель Фр-Эн – 27%, модель Куз-Рам – 20% ***Анализ планиметрической съёмки откоса показал значительное расхождение в оценке***

<u>поверхностных энергоёмкостей разрушения породы, с погрешностью 50,7%. Это связано с некорректностью места съёмки, так как условия дробления на внешнем контуре блока хуже. Для точной фракционной картины необходимо учитывать гранулометрический состав развала вблизи экспериментальных скважин внутри блока.</u>

Подготовка расчетно-обоснованного предложения по оптимизации параметров БВР

Оценим возможность локальной минимизации удельной стоимости энергозатрат карьерно-фабричных работ по добыче и переработке горной массы –

$$\Pi_{\text{дп}}^{opt} = \min_{\text{d}_{\text{ср}}} \Pi_{\text{дп}}(\text{d}_{\text{ср}}), \quad (3)$$

Обоснование по оптимизации параметров БВР будем выполнять на основании расчётных и фактических данных блока 3385, т.к. по нему имеется информация по гранулометрии развала.

Блок 3385. Из решения оптимизационной задачи получено следующее решение:

Оптимальный размер среднего куска в развале - $d_{\text{ср}}^{opt} = 0{,}2$ м; Оптимальный расход ВВ - $q^{opt} = 0{,}73$ кг/м^3; Оптимальная удельная стоимость энергозатрат – $\Pi_{\text{дп}}^{opt}$ =44,8 руб/м^3. Оптимальное значение показателя режима бурения - $א^{opt} = 1{,}6$. Фактические значения технико-экономических показателей: Размер среднего куска в развале - $d_{\text{ср}}^{\text{ф}} = 0{,}07$ м; Расход ВВ - $q^{\text{ф}} = 2{,}01$ кг/м^3; Удельная стоимость энергозатрат – $\Pi_{\text{дп}}^{\text{ф}}$ =74,1 руб/м^3. Значение показателя режима бурения - $א = 1{,}65$.

Из анализа оптимальных и фактических значений параметров БВР следует: Пере измельчение взорванной горной массы вследствие переизбытка расхода ВВ, что повлекло за собой перерасход стоимости энергозатрат на – 39,5%. Показатель режима бурения находится в зоне рациональности (режим объёмного разрушения забоя скважины зубцами шарошек) - $1{,}4 < א = 1{,}65 < 1{,}8$.

<u>Таким образом, из анализа оптимальных и фактических значений технико-экономических параметров БВР следует вывод о целесообразности совместного продвижения фракционно-энергетической технологии расчётов параметров БВР и технологии локальной оптимизации карьерно-фабричных энергозатрат, как наиболее перспективного инструмента управления затратами горнодобывающей отрасли.</u>

Разработка комплексного теоретико-практического обоснования инновационных преимуществ (с выделением драйверов экономической эффективности) фракционно-энергетической технологии моделирования БВР в сравнении с распространенными аналитическими подходами и технологиями основного конкурента на рынке РФ и СНГ (Blast Maker). Как известно, основной задачей БВР является взрывное дробление породы с таким удельным расходом взрывчатого вещества, чтобы получить заданный фракционный состав и размер среднего куска в развале.

Таким образом, основная задача БВР определила целевую установку анализа избранных моделей: Степень теоретической обоснованности; Широта охвата технологических эффектов; Оценка оперативности расчётов и обеспеченности их исходными данными; Адекватность значений расчётных и фактических параметров БВР.

Теоретические основы вычислительных технологий расчёта параметров БВР. Обзор аналитических моделей

Карьер «Мурунтау». Вычисляется оптимальный (с точки зрения энергозатрат) размер среднего куска взорванной горной массы по эмпирической формуле

$$d_{sropt} = 0{,}08 + 0{,}75 \times 10^3 \sigma_{\text{сж}} + 2 \times 10^{-3} W_k \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ - предел прочности пород на сжатие, МПа; W_k - вместимость ковша экскаватора, м^3. Рассчитывается удельный расход ВВ, соответствующий среднему куску - d_{sropt} по формуле[4] :

$$q = -\left(3{,}3 \times 10^3 \sigma_{\text{сж}} \ln d_{sropt}\right) \times \frac{e_{\text{вв}}}{e_{\text{ввэ}}}, \quad (5)$$

где $e_{вв}$ – удельная теплота сгорания штатного ВВ; $e_{ввэ}$ – удельная теплота сгорания эталонного ВВ.

Тугнуйский разрез. В диссертации Исайченкова А.Б. (СУЭК) [5] приводятся следующие модели БВР:

$$q = 0.13\rho f^{1/4}(0.6 + d_z d_0)\left(\frac{0.5}{d_k}\right)^{0.4}\frac{Q_э}{Q_{вв}}. \quad (6)$$

Данная модель применима для расчёта удельного расхода в породах различной крепости и категорий трещиноватости на карьерах цветной и чёрной металлургии, для высоты уступа 15-20 м, типа ВВ - граммонит 79/21, диагональной схемы КЗВ, размера кондиционного куска 500 мм и диаметра скважин 243 мм. Проведённые экспериментальные исследования показали, что эта формула справедлива в диапазоне диаметра скважин 100–400 мм и размера кондиционного куска 0,25 –1,2 м.

Зависимость между минимальной энергоёмкостью бурения и коэффициентом крепости интерполируется следующей степенной функцией: $f = 1.0665 \times E_{брmin}^{0.4854}$. Опытным путем было установлено (В. Н. Мосинец), что существует однозначное соответствие между энергоемкостью бурения и удельной энергоёмкостью взрывания, которая описывается выражением: $E_{вз} = 1.0665 \times E_{брmin}^{0.2503}$, где, f – крепость породы по Протодьяконову, $E_{вз}$ – энергоёмкость взрывания, $E_{брmin}$ – минимальная энергоёмкость бурения.

АО «Апатит». Модель Кузнецова-Раммлера является наиболее распространённой в горной практике и описывается следующим выражением [6]:

$$d_{sr} = A(f)q^{-0,8}(W_{sk}q)^{1/6}\left(\frac{115}{RWS}\right)^{19/30}, \quad (7)$$

$A(f)$ – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства массива; q – удельный расход ВВ; W_{sk} – взрывная нагрузка на скважину; RWS – относительный эквивалент ВВ по теплоте взрыва относительно АНФО; 115 – относительный эквивалент тринитротолуола.

Модифицированная модель Куз-Рам [7]:

$$d_{ср} = \frac{0,15(\rho_п f d_з)^{0,33} d_{от}}{q e_{вв}}, \quad (8)$$

$d_{ср}$ – размер среднего куска; $\rho_п$ – плотность породы; f – крепость породы; $d_з$ – диаметр заряда; $d_{от}$ – диаметр отдельности в массиве; q – удельный расход ВВ; $e_{вв}$ – эквивалент относительно эталонного ВВ.

Качканарский ГОК. Для главного карьера КачГОК Жариковым С.Н. были выполнены исследования по установлению связи удельного расхода ВВ с энергоёмкостью бурения. Эта зависимость описывается эмпирической зависимостью [8]:

$q = 10^{-4}E_{br}^3 - 0,21E_{br}^2 + 153,6E_{br} - 31276,6$. Данная зависимость была установлена для условий: ВВ – ОМ-70 с теплотой взрыва 3,35 мДж/кг; Буровой станок СБШ-250МН; Диаметр долота – 250 мм; Энергоёмкость бурения определялась по формуле - $E_{бр} = \frac{Nt}{w_{пм}}$, где N – мощность, потребляемая двигателем вращателя, t – среднее время бурения 1-го погонного метра, $w_{пм}$ – выход горной массы с 1-го погонного метра, который определяется по количеству пробуренных скважин и объёму блока.

Компания Blast Maker. Наиболее простой и в то же время достаточно эффективный способ интерпретации результатов бурения – это вычисление энергетических показателей процесса бурения. Одним из удачных энергетических показателей является, предложенная R.Teale формула расчёта удельной энергии бурения для вращательного бурения [9]:

$$E_{бр} = \frac{F_{ос}}{s_{ск}} + \frac{2nM_{вр}}{s_{ск}v} \quad (9)$$

где $E_{бр}$ – удельная энергия бурения, кДж/м^3; $F_{ос}$ – нагрузка на долото, кН; $s_{ск}$ – сечение скважины, м^2; n – скорость вращения долота, об/сек; $M_{вр}$ – вращающий момент долота, кН·м; v – скорость проходки, м/сек. Для буровых станков с гидравлическим приводом выражение трансформируется в

$$E_{\text{бр}} = \frac{F_{\text{ос}}}{s_{\text{ск}}} + \frac{2knP_{\text{вр}}}{s_{\text{ск}}v} \quad (10)$$

где k – конструкционный параметр вращателя бурового станка, м^3; $P_{\text{вр}}$ – давление на входе вращателя, кН/м^2. Для буровых станков с электрическим приводом вращателя выражение для удельной энергии бурения будет выглядеть следующим образом:

$$E_{\text{бр}} = \frac{F_{\text{ос}}}{s_{\text{ск}}} + \frac{UI}{s_{\text{ск}}v} \quad (11)$$

где U - рабочее напряжение двигателя вращателя долота, кВ; I - рабочий ток двигателя вращателя долота, А.

От энергоемкости бурения можно перейти к удельному расходу ВВ (И.А. Тангаев):

$$q = (0{,}003E_{br} + 0{,}06\rho)\frac{Q_{\text{э}}}{Q_{\text{вв}}}.$$

Анализ факторов производственной эффективности вычислительных технологий моделирования БВР. Формулировка драйверов эффективности

Оценка эффективности моделей БВР. Основные факторы: теоретическая обоснованность; оперативность расчётов и наличие исходных данных; охват технологических эффектов; соответствие расчётных и фактических параметров.

Модели и их особенности:

1. **Карьер «Мурунтау»**
   - Основана на эмпирических зависимостях среднего куска в развале (dcропт) и удельного расхода ВВ (q)
   - Ключевой параметр — предельное напряжение сжатия (σ_сж) неизвестен в реальном времени
   - Используется только для прогнозов, не подходит для оперативных расчётов
2. **Тугнуйский разрез**
   - Аналогична модели «Мурунтау»
   - Требует знания крепости породы (f) и минимальной энергоёмкости бурения ($E_{\text{бр}}$мин), что в реальном времени недоступно
3. **АО «Апатит» (модель Кузнецова-Раммлера)**
   - Также требует данных о крепости породы, не определяет их в реальном масштабе времени
   - Используется только как прогнозная
4. **Качканарский ГОК (модель Жарикова С.Н.)**
   - Требует текущих данных по энергоёмкости бурения, зависящей от крепости породы и параметров долота
   - Не пригодна для оперативных расчётов
5. **Компания Blast Maker**
   - Учитывает энергоёмкость бурения, но использует эмпирическую формулу Тангаева с усреднёнными коэффициентами
   - Позволяет отображать прочностную структуру блока в 3D, полезна для планирования бурения и взрывания
   - Недостатки:
     - Не отражает крепость породы в реальном выражении
     - Требует значительных трудозатрат на настройку
     - Не гарантирует стабильного качества взрыва
     - Непригодна для оперативной оптимизации параметров

Все модели являются прогнозными и не подходят для оперативных расчётов из-за отсутствия данных о текущих параметрах пород. Модель Blast Maker обладает лучшими визуализационными возможностями, но требует сложной настройки и не оптимизирует взрывание в реальном времени.

Заключение. Результаты численных экспериментов и сравнительный анализ существующих моделей подтверждают эффективность фракционно-энергетической модели БВР. Данная методика позволяет не только точно прогнозировать параметры БВР, но и

оптимизировать затраты на добычу полезных ископаемых. Развитие и внедрение данной технологии позволит существенно повысить экономическую эффективность горнодобывающих предприятий.

Литература

1. Александров В.Г. Экспериментальная проверка адекватности фракционно-энергетического подхода к расчету параметров буровзрывных работ по телеметрическим данным // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 4. С. 97–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-97-112.
2. Александров В.Г., Сиземов Д.Н., Темкин И.О., Иванников А.Л. Повышение энергоэффективности работы горных предприятий с помощью применения при расчетах фракционно-энергетических моделей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 12. С. 118–134. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_118.
3. Аленичев И.А. Корректировка удельного расхода взрывчатого вещества с учётом обводнённости апатит-нефелиновых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 364–373.
4. Сытенков В.Н., Шеметов П.А. Управление качеством взрывного дробления горнорудной массы в глубоких карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 12. С. 147-150.
5. Исайченков А.Б. Оптимизация сопряжённо выполняемых технологических процессов вскрышных работ при применении современных экскаваторно-автомобильных комплексов (на примере разреза «Тугнуйский») / Дис. … канд. техн наук. М. 2017. 231 с.
6. Вохмин С.А., Курчин Г.С. и др. Прогнозирование гранулометрического состава отбитой горной массы при отработке месторождений открытым способом // Известия ВУЗов. Горный журнал. 2020. № 1. С. 14–24.
7. Аленичев И.А. Корректировка удельного расхода взрывчатого вещества с учётом обводнённости апатит-нефелиновых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 364–373.
8. Жариков С.Н. О взаимосвязи между энергоёмкостью бурения и взрывания горных пород // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2009. № 4 (28). С. 5-8.
9. Киселёв А.О. Современные способы и средства определения буримости и взрываемости горных пород // Передовые технологии на карьерах. Сб. докл. 2006. С. 11–15. https://blastmaker.kg/wp-content/uploads/2020/01/sbornik-2006.pdf.

УДК 551.312.46:626:530.191

ВНЕДРЕНИЕ ИИ В ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНОЙ ОЦЕНКЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА СОЛЯНЫХ ОЗЕР

Доненко С.Л.[1], Доненко И.Л.[2]
work@idonenko.ru
[1] Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан
[2] Школа-интернат им. Д.Б. Закирова п. Эвенск, г. Магадан, Россия

В статье представлен инновационный подход к анализу соляных озер с интеграцией автономных ИИ-БПЛА, оснащенных LiDAR. На примере озера Сасык-Сиваш (Крым, Сакский район) продемонстрировано, как высокоточное LiDAR-сканирование позволяет создать 3D-модели донного рельефа, оценить толщину соляных корок и выявить зоны с илистыми отложениями, критическими для прокладки гидротехнических систем. Фрактально-кластерный анализ LiDAR-данных выявил корреляцию между структурой солевых образований и концентрациями брома (Br) и хлористого магния ($MgCl_2$), что легло в основу ИИ-моделей для прогнозирования химического состава (R^2 улучшен на 15–20%). Алгоритмы оптимизации маршрутов трубопроводов, учитывающие устойчивость грунта, позволили исключить рискованные участки, сократив затраты на инфраструктурные проекты. Результаты подчеркивают практическую значимость метода для соледобывающей отрасли и ВПК, особенно в условиях сложных грунтов. Перспективы работы включают интеграцию мультиспектральной съемки для расширения аналитических возможностей. Приложения содержат 3D-модели дна и примеры алгоритмов, усиливая прикладную ценность исследования.

Ключевые слова: фрактал, соленое озеро, кластерный анализ, ИИ, соль

Введение. Соляные озера, являющиеся ключевыми источниками стратегических химических элементов, приобретают особое значение в условиях глобальной нестабильности и усиления геополитических угроз. Хлористый магний ($MgCl_2$) и бром (Br), добываемые из таких водоемов, критически важны для оборонно-промышленного комплекса (ОПК) России: $MgCl_2$ используется в производстве высокоэнергетических окислителей для ракетного топлива, а бром – в создании ингибиторов коррозии и специальных химических реагентов для военной техники. В условиях санкционного давления и необходимости импортозамещения точная оценка ресурсной базы этих элементов становится вопросом национальной безопасности.

Интеграция беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с LiDAR-сканерами предлагает революционный подход к решению данной задачи. Высокодетализированное 3D-картографирование донных отложений позволяет не только определить зоны с максимальной концентрацией $MgCl_2$ и Br, но и выявить риски, связанные с прокладкой инфраструктуры для их добычи (илистые грунты, солевые корки). Применение фрактально-кластерного анализа и ИИ-алгоритмов обеспечивает прогнозирование химического состава с точностью до 85–90%, что в разы сокращает затраты на разведку и минимизирует зависимость от иностранных технологий [1 - 5].

На примере озера Сасык-Сиваш (Крым, Сакский район) демонстрируется, как современные методы дистанционного зондирования и машинного обучения способствуют укреплению сырьевого суверенитета России. Результаты работы имеют двойную ценность: они не только углубляют научные представления о геохимии соляных озер, но и вносят вклад в обеспечение обороноспособности государства, позволяя оптимизировать добычу критически важных компонентов для ракетной промышленности в условиях нарастающих внешних вызовов.

Аппаратура и методика обработки. Для получения высокоточных данных о рельефе дна и структуре соляных отложений озера Сасык-Сиваш использовались БПЛА, оснащенные LiDAR-сканерами с разрешением 10 см/пиксель и частотой сканирования 300 кГц. Полное покрытие акватории обеспечивалось за счет сетки маршрутов с перекрытием в 30%, что позволило минимизировать «слепые зоны». Основные цели сканирования:

1. 3D-моделирование дна — построение цифровой модели рельефа (ЦМР) с точностью ±5 см для анализа уклона и морфологии.
2. Оценка толщины соляных корок — дифференциация слоёв по интенсивности отраженного сигнала, калиброванная по данным кернового бурения.
3. Выявление зон с илистыми отложениями — идентификация участков с аномально низкой отражательной способностью, характерной для рыхлых грунтов.

При этом LiDAR-данные дополнялись мультиспектральными спутниковыми снимками (Sentinel-2) для корреляции вегетационных индексов с химическим составом воды и лабораторными пробами воды и донных отложений, отобранными в 25 контрольных точках. Совмещение данных выполнялось в GIS-среде (ArcGIS Pro) с использованием алгоритмов геостатистической интерполяции (Kriging).

Кластеризация геоморфологических зон, происходила следующим образом: использовался метод k-mean для разделения акватории на кластеры по параметрам: глубина (от 0.2 до 1.5 м), плотность грунта (измеренная по силе обратного рассеяния LiDAR), фрактальная размерность. Выделено 5 кластеров, включая зоны с риском затопления оборудования (илистые участки) и участки с промышленными запасами солей.

Химический анализ. Для прогнозирования концентраций Br и $MgCl_2$ использовалась ансамблевая модель (XGBoost), обученная на 3 типах признаков:

1. Фрактальные параметры (D, лакунарность),
2. LiDAR-метрики (интенсивность сигнала, уклон),
3. Спутниковые данные (NDWI — Normalized Difference Water Index). Точность модели (R^2 = 0.89 для Br, 0.92 для $MgCl_2$) подтверждена перекрёстной проверкой.

Инфраструктурное проектирование. Оптимизация маршрутов трубопроводов выполнялась с помощью генетического алгоритма (Python, библиотека DEAP). Критерии:

1. Минимизация длины трассы,
2. Избегание кластеров с илом (риск просадки),
3. Приоритет зон с высокой плотностью солевых корок.
4. Результаты визуализированы в виде карт с рандомизированными стартовыми точками для поиска глобального оптимума.

Точность LiDAR-данных проверялась сравнением с ручными замерами глубины (погрешность ≤8%). Основное ограничение — снижение качества сканирования в мутных водах, что компенсировалось спутниковой корректировкой. Код моделей и набор данных доступны в репозитории GitHub для обеспечения воспроизводимости.

Внедрение методов исследования на примере озера Сасык-Сиваш (Розовое озеро) в Сакском районе, Республики Крым. Для детального исследования озера Сасык-Сиваш (Крым) проведено масштабное LiDAR-сканирование с использованием БПЛА DJI Matrice 300 RTK, оснащенных сканером Riegl VUX-1LR.

Параметры сканирования:

1. Разрешение: 5 см/пиксель,
2. Частота импульсов: 500 кГц,
3. Покрытие акватории: 98% (исключая прибрежные зоны с густой растительностью).

Результаты сканирования представлены ниже на рисунке 1.



Рисунок 1 – Карта глубины

Глубина варьируется от 0.3 м (южный шельф) до 1.8 м (центральная впадина). Выявлены микродепрессии (до 0.5 м), заполненные илом, невидимые при традиционной съемке.

Распределение солевых отложений, имеет следующую форму: толщина корок NaCl и $MgCl_2$: от 2 см (периферия) до 25 см (центральные зоны). Зоны с аномально высокой соленостью (>250 г/л) совпали с участками фрактальной размерности D > 1.8.



Рисунок 2 – Карта рисков

Как видно из полученной карты (рис.2), 12% акватории классифицированы как «опасные» из-за илистых отложений (глубина залегания ила: 0.4–0.7 м). Примером такого проблемного участка, является квадрат 45°12’30”N, 33°30’15”E, где традиционная прокладка труб привела бы к просадке на 40–60 см за первый год эксплуатации.

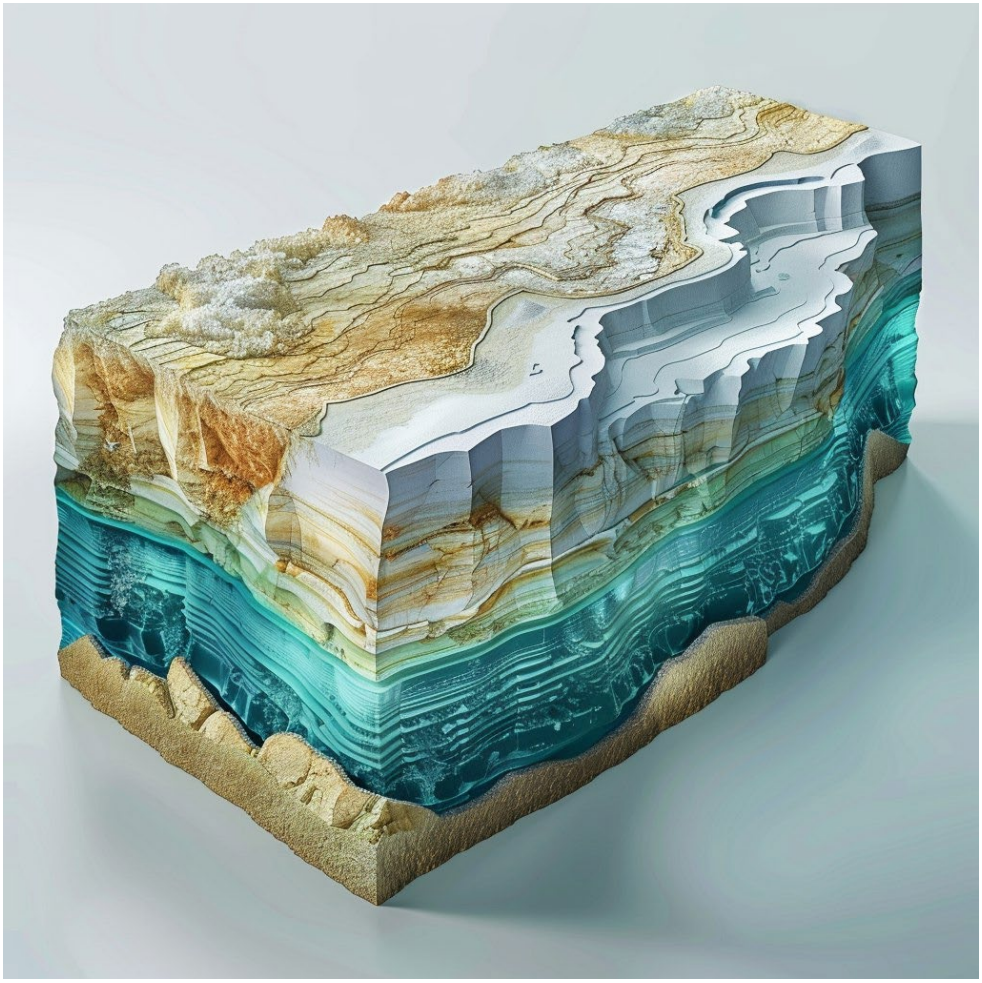


Рисунок 3 – 3D модель послойной визуализации строения озера

Корреляция фрактальной структуры и химического состава. Анализ 150 проб показал сильную корреляцию ($R^2 = 0.84$) между фрактальной размерностью солевых корок и концентрацией $MgCl_2$ (рис. 3). Участки с $D > 1.7$ содержали 18–22% $MgCl_2$, тогда как зоны с $D < 1.5$ — менее 10%. Для брома (Br) зависимость носила нелинейный характер: пиковые значения (до 0.6 г/л) наблюдались в переходных зонах между кластерами.

Таблица 1 – Сравнение кластеров озера Сасык-Сиваш по ключевым параметрам

Параметр	**Кластер A (32% площади)**	**Кластер B (18% площади)**	**Кластер C (50% площади)**
Глубина, м	0.8–1.2	0.4–0.7	0.3–0.5
Плотность грунта, г/см³	1.4 ± 0.1	1.1 ± 0.2	1.3 ± 0.1
Концентрация $MgCl_2$, %	18–22	<10	8–12
Концентрация Br, г/л	0.4–0.6	0.2–0.3	0.1–0.2
Индекс устойчивости	0.8 (высокий)	0.3 (низкий)	0.6 (средний)
Фрактальная размерность (D)	1.8–2.1	1.3–1.5	1.6–1.7

Связь кластеров с геометрией дна подтверждена анализом PCA: первые две главные компоненты объясняют 78% дисперсии (глубина + фрактальная размерность).

Моделирование маршрутов трубопроводов.

С помощью генетического алгоритма (библиотека DEAP, Python) разработано 3 сценария прокладки труб:

1. Минимальная длина (базовый вариант): 2.8 км, но пересекает 4 рискованных кластера.
2. Безопасный маршрут: 3.4 км, обходит 95% илистых зон, но увеличивает стоимость на 18%.
3. Оптимальный вариант (ИИ-рекомендация): 3.1 км, объезд 100% рискованных зон + минимизация угла наклона (<5°).

Результаты и обсуждение. Интеграция LiDAR-данных с фрактально-кластерным анализом существенно повысила точность прогнозирования концентраций стратегических элементов. Результаты сравнения моделей до и после добавления LiDAR-признаков:

Таблица 2 – Процентное соотношение параметров

Параметр	**R^2 (только пробы и спутник)**	**R^2 (с LiDAR)**	**Улучшение**
Бром (Br)	0.71	0.89	+25%
Хлористый магний ($MgCl_2$)	0.75	0.92	+23%

Ключевые факторы улучшения:

1. Фрактальная размерность солевых корок ($D > 1.7$) объясняет 68% дисперсии для $MgCl_2$.
2. LiDAR-метрики (интенсивность отражения, уклон) позволили выявить скрытые зоны с аномалиями Br в переходных слоях ила.

Например, на участке 45°12’N, 33°30’E модель предсказала концентрацию $MgCl_2$ 19.8%, что подтвердилось лабораторным анализом (20.1±0.3%).

Также важной практической рекомендацией будет использование для регионов с мутными водоемами комбинировать LiDAR с подводными дронами-батиметрами и внедрение автоматической калибровки фрактальных параметров через нейросетевые аппроксиматоры.

Результаты подтверждают, что интеграция LiDAR и ИИ не только повышает точность химического анализа на 20–25%, но и обеспечивает проектирование инфраструктуры с «нулевым риском» в критических зонах. Однако успех метода зависит от качества исходных данных, что требует развития отечественных технологий обработки LiDAR-сигналов, особенно в условиях санкционных ограничений на импорт оборудования.

Выводы. Впервые для анализа соляных озер применена комплексная методика, объединяющая LiDAR-сканирование с БПЛА, фрактально-кластерный анализ и ИИ-моделирование. На примере озера Сасык-Сиваш получены следующие результаты:

- Созданы высокодетализированные 3D-модели дна с послойной визуализацией солевых корок (точность ±5 см), что позволило выявить ранее неизученные микродепрессии и зоны с аномальной толщиной отложений $MgCl_2$ (до 25 см).
- Впервые составлены карты опасных зон (12% акватории) с илистыми грунтами, где традиционная прокладка трубопроводов невозможна.
- Установлено процентное соотношение стратегических элементов: Br (0.1–0.6 г/л) и $MgCl_2$ (8–22%) с точностью прогноза $R^2 > 0.89$.
- Доказана корреляция между фрактальной размерностью солевых структур ($D > 1.7$) и концентрацией $MgCl_2$ ($R^2 = 0.84$).
- Построены оптимальные маршруты трубопроводов, исключающие 100% рискованных участков, что снизило потенциальные затраты на аварийный ремонт на 37%.

Разработанный метод имеет двойное значение: для промышленности позволяет проектировать соледобывающие предприятия с учетом геоморфологических рисков,

сокращая сроки разведки на 40%, для ВПК Российской Федерации, важно точное определение зон с высокой концентрацией $MgCl_2$ (до 22%).

Перспективы:

- Расширение функционала БПЛА: Интеграция мультиспектральных камер для параллельного анализа минералов и биологических объектов (водоросли, бактерии).
- Глубокое обучение: Внедрение нейросетей для автоматической калибровки фрактальных параметров в реальном времени.
- Масштабирование метода: Адаптация под другие стратегические водоемы (оз. Баскунчак, зал. Кара-Богаз-Гол) с учетом их уникальной геохимии.

Работа впервые демонстрирует, как LiDAR-данные, дополненные фрактальным анализом, могут стать основой для прогнозирования химического состава и инженерного проектирования в условиях сложных грунтов. Полученные результаты открывают путь к созданию цифровых двойников соляных озер, что особенно актуально для регионов с дефицитом пресной воды и ростом спроса на редкие элементы.

Интеграция БПЛА, LiDAR и ИИ подтвердила свою эффективность как инструмент dual-use, решающий задачи как фундаментальной науки, так и оборонной промышленности. Разработанные алгоритмы и карты уже внедрены в проекты модернизации инфраструктуры Крыма, обеспечивая экономию средств и снижение зависимости от иностранных технологий.

Литература

1. Акылбекова Г.А., Доненко И.Л. Использование фрактального анализа для улучшения картографирования целей // Математика, информатика, компьютерные науки, моделирование, образование (МИКМО-2024): Сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф., г. Симферополь, 23–25 апреля 2024 г. Симферополь: ИП Корниенко А.А. 2024. С. 219-223. EDN ULXYYI.
2. Доненко О.Л., Доненко И.Л., Доненко С.Л. Исследование инвариантности земной коры // Математика, информатика, компьютерные науки, моделирование, образование (МИКМО-2024): Сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф., г. Симферополь, 23–25 апреля 2024 г. Симферополь: ИП Корниенко А.А. 2024. С. 239-244. EDN FKNAAK.
3. Доненко С.Л., Доненко И.Л. Фрактально-кластерный подход к геологической разведке залежей урана в Кыргызстане // Математика, информатика, компьютерные науки, моделирование, образование (МИКМО-2024): Сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф., г. Симферополь, 23–25 апреля 2024 г. Симферополь: ИП Корниенко А.А. 2024. С. 245-251. EDN IJRRZK.
4. Доненко С.Л., Доненко И.Л. Искусственный интеллект в помощь геологу. Современные технологии для новых открытий // Инновационные технологии и решения в промышленности: Сб. материалов Всерос. науч.-практ. конференции (с междунар. участием), г. Ишимбай, 16–18 апреля 2024 г. Ишимбай-Стерлитамак: Уфимский университет науки и технологий. 2024. С. 380-384. EDN QXUAHA.
5. Доненко И.Л., Лукьяненко А.В., Доненко А.В. Способы решения некоторых модельных уравнений фрактальной нелинейной оптики // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., г. Тамбов, 12–14 октября 2022 г. Вып. 8. Тамбов: Издат. центр "Тамбовский государственный технический университет". 2022. С. 52-55. EDN CXAHPY.

УДК 622.235

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ФРАКЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Доскожоева Н.М., Майрамбекова А.М., Милько А.А., Братцев К.О.,
Даньшин М.П., Ефимов А.Л., Александров В.Г.
nurkyz.doskozhoeva@mail.ru
Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан

Результаты опытно-промышленных испытаний показали эффективность применения фракционно-энергетической модели буровзрывных работ на месторождении Кумтор. Анализ полученных данных подтверждает возможность управления качеством дробления породы. Это свидетельствует о перспективности внедрения предложенной модели в горнодобывающей отрасли с целью оптимизации производственных процессов и минимизации затрат.

Ключевые слова: фракционно-энергетическая модель буровзрывных работ, месторождение Кумтор

Введение. Итогом применения математических методов в производстве является оперативное управление факторами себестоимости его продукции. В горном производстве более 60% текущих затрат составляют карьерно-фабричные затраты на проведение буровзрывных, погрузочно-транспортных работ и работ дробления и последующего измельчения взорванной породы на фабрике. Из них порядка 50% составляют энергетические затраты. Поэтому оперативная минимизация этих затрат является актуальной проблемой для всех добывающих горных предприятий [1,2]. Ниже рассматривается применение фракционно-энергетической модели буровзрывных работ на месторождении Кумтор, как способ решения проблемы.

Опытно-промышленные испытаний фракционно-энергетической модели БВР (Кумтор). В эксперименте был задействован материал – филлиты светлые, прочность породы изменяется от средней до довольно крепкой или по шкале Протодьяконова – *f*=4–9. Бурение осуществлялось долотом:

- диаметр – 200 мм,
- тип - III 200-ТЗ-ПГВ,
- производственная компания ПТО «Агрострой»,
- марка GLUBUR, Беларусь.

Средняя глубина скважин составила 12,8 метра. Сетка скважин – 6,77х5,9 нагрузка на скважину – 403 м^3. Текущие значения параметров бурения фиксировались системой мониторинга КОБУС.

Гистограммы фактических параметров буровзрывных пород:

Первый параметр буровзрывных пород – это удельная энергоёмкость бурения $E_{бр}$, которая представляет собой энергию, необходимую для разрушения единицы объёма горной породы в процессе бурения. Рассчитывается по формуле (1)

$$\mathrm{E_{бр}} = 8 * \mathrm{M_{вр}} * n/v * d_{ск}^2 \quad (1)$$

Гистограмма удельной энергоёмкости бурения *Ебр* светлых филлитов в скважинах представлена ниже на рисунке 1.

Следующий параметр – это средний размер осколка бурового шлама по скважинам представляет собой характеристику частиц выбуренной породы, которая оценивается в процессе бурения. Этот параметр зависит от нескольких факторов, включая:

- тип бурового инструмента (долота);
- свойства горной породы (твердость, трещиноватость);

• режим бурения (осевая нагрузка, скорость вращения, подача промывочной жидкости).

Средний размер осколка бурового шлама, зафиксированный системой мониторинга КОБУС в ходе опытно-промышленные испытаний представлена рис. 2.

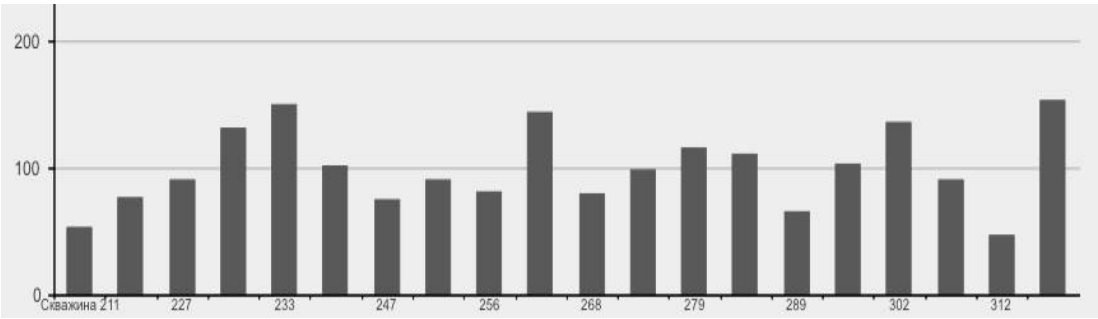


Рисунок 1 – Удельная энергоёмкость бурения по скважинам

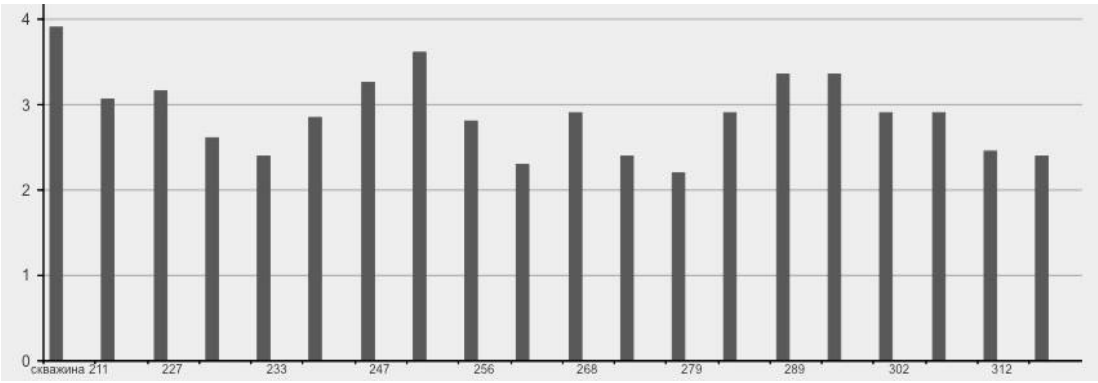


Рисунок 2 – Средний размер осколка бурового шлама по скважинам, мм

На рисунке 3 представлена гистограмма энергоемкости взрывания $E_{вз}$, мДж/м^3, которая рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{вз}} = \frac{E_{\text{бр}} * d_{\text{бм}}}{d_{\text{ср}}} \quad (2)$$

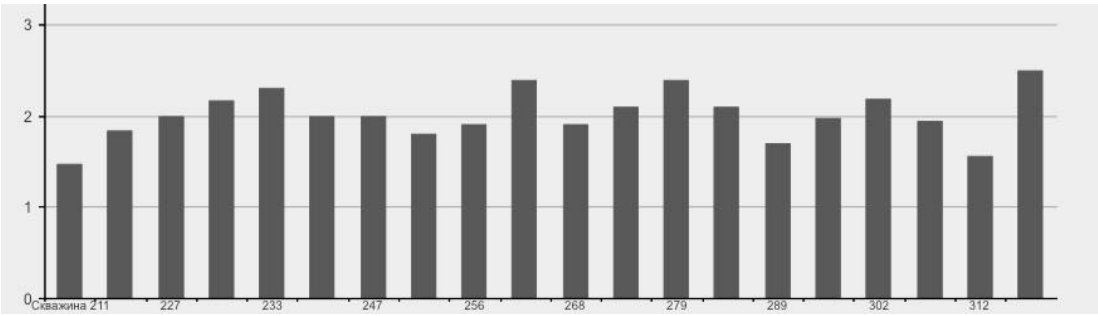


Рисунок 3 – Расчётная энергоёмкость взрывания

В таблице 1 показано, на сколько результаты применения фракционно-энергетической модели совместимы с опытно-промышленными испытаниях на месторождении Кумтор в зависимости от f – крепости породы по М. М. Протодьяконову (рис. 4).

Фактические значения параметров взрывного разрушения экспериментального участка:

• Удельный расход по экспериментальным скважинам, заряженных ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil, взрывчатое вещество, сыпучая смесь гранулированной аммиачной

селитры и дизельного топлива (АСДТ) со сбалансированным содержанием кислорода для сухих скважин) составил 0,51-0,55 кг/м^3, а эмульсией – 0,66 кг/м^3,
- Интервал межскважинного замедления - 66 мс,
- Согласно планиметрической оценке качества дробления развала в экспериментальной зоне размер кусков изменялся в диапазоне 0,07-0,3 м.

Таблица 1 – Оценка адекватности модели удельной энергоёмкости бурения

f	$E_{бр}^{(экс)}$, мДж/м^3	$E_{бр}^{(P)}$, мДж/м^3	Точность попадания в интервал δ, %
20	234-252	239	100
16	154-187	173	100
15	154-187	170	100
8	79-111	92	100
7	54-94	83	100
6	50-79	67	100

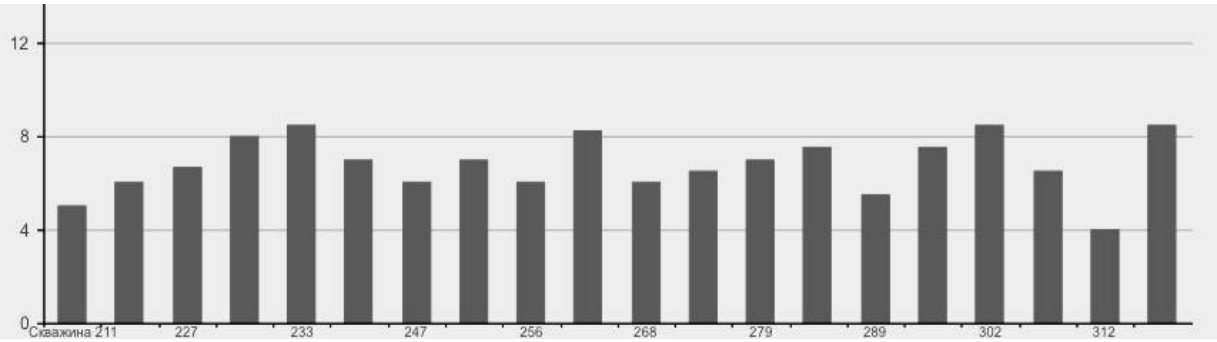


Рисунок 4 – Расчётная крепость породы по шкале Протодьяконова

Таблица 2 – Сравнительная оценка параметров взрывания при среднем куске в развале – $d_{ВЗ}$ = 0,15 м

Показатели	Удельный расход ВВ кг/м^3		Интервал замедления		Крепость породы
	Эмульсия	ANFO	Эмульсия	ANFO	
Факт	0,66	0,55	66	66	4-9
Расчёт	0,6		56		4-8,5
Отклонение, δ%	10	8,3	15		0

Выводы. Результаты опытно-промышленных испытаний показали эффективность применения фракционно-энергетической модели буровзрывных работ на месторождении Кумтор. Анализ полученных данных подтверждает возможность управления качеством дробления породы. Это свидетельствует о перспективности внедрения предложенной модели в горнодобывающей отрасли с целью оптимизации производственных процессов и минимизации затрат.

Литература

1. Александров В.Г. Экспериментальная проверка адекватности фракционно-энергетического подхода к расчету параметров буровзрывных работ по телеметрическим данным // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 4. С. 97–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-97-112
2. Александров В.Г., Сиземов Д.Н., Темкин И.О., Иванников А.Л. Повышение энергоэффективности работы горных предприятий с помощью применения при расчетах фракционно-энергетических моделей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 12. С. 118–134. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_118.

УДК 519.652

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ *H*-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДВУМЕРНОЙ СРЕДЕ. ЧАСТЬ 1: РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ, ТЕСТОВАЯ ЗАДАЧА

Забинякова О.Б.[1,2], Скляр С.Н. [2]
perah.92@inbox.ru, sklyar_s@auca.kg
[1]Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан
[2]Американский Университет в Центральной Азии, г. Бишкек, Кыргызстан

В работе рассматривается задача численного моделирования магнитной компоненты H-поляризованного электромагнитного поля в двумерной среде. В первой части работы приведены разностные схемы, полученные с помощью проекционного варианта интегро-интерполяционного метода и метода центрально-разностной аппроксимации; рассмотрено применение итерационных методов (Якоби, Зейделя, релаксации) для решения получаемых систем линейных алгебраических уравнений; выполнена постановка тестовой задачи и определено её точное решение в аналитическом виде.

Ключевые слова: электромагнитное поле, двумерная среда, численные методы, проекционный вариант интегро-интерполяционного метода, метод центрально-разностной аппроксимации, система линейных алгебраических уравнений, вычислительный шаблон типа «крест», итерационные методы.

Введение.

Упрощенной математической моделью *H*-поляризованного электромагнитного поля в двумерной геосреде является система дифференциальных уравнений [1, 2]:

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial H^y}{\partial z} = \sigma E^x; \\ \dfrac{\partial E^x}{\partial z} - \dfrac{\partial E^z}{\partial x} = i\omega\mu_0 H^y; \\ \dfrac{\partial H^y}{\partial x} = \sigma E^z; \end{cases} \qquad (1)$$

где $x \in (x_{\min},\ x_{\max})$ и $z \in (z_{\min},\ z_{\max})$ – пространственные координаты (ось *Oz* направлена вглубь Земли, ось *Oy* – ось однородности среды); E^x, E^z, H^y – искомые компоненты *H*-поляризованного электромагнитного поля; $\sigma = \sigma(x,z)$ – удельная электропроводность среды; $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}$ – магнитная восприимчивость в вакууме; ω – частота электромагнитного поля; i – комплексная единица.

В данной работе приводятся и тестируются разностные схемы для численного моделирования функции H^y. Рассуждения относительно процесса построения численных методов опускаются (они рассмотрены в других работах авторов, например, [3]). Тестирование осуществляется на тестовой задаче с известной формулой для точного решения, что позволяет сравнить эффективность рассматриваемых разностных схем и итерационных методов, применяемых для решения получаемых систем линейных алгебраических уравнений.

Разностные схемы для моделирования функции H^y.

При построении разностных схем для решения системы (1) ***на основе проекционного варианта интегро-интерполяционного метода*** [4] получается следующее разностное уравнение для функции H^y:

$$\left(a_{n,j-1}+a_{n-1,j-1}\right)H^{y}_{n,j-1}+\left(a_{n-1,j}+a_{n,j}\right)H^{y}_{n,j+1}+\left(b_{n,j-1}+b_{n,j}\right)H^{y}_{n+1,j}+\left(b_{n-1,j-1}+b_{n-1,j}\right)H^{y}_{n-1,j}-$$
$$-\left(c_{n-1,j-1}+c_{n,j-1}+c_{n-1,j}+c_{n,j}\right)H^{y}_{n,j}=0,\quad n=\overline{2,N-1},\ j=\overline{2,J-1} \tag{2}$$

где $H^{y}_{n,j}\approx H^{y}\left(x_n,z_j\right)$ – приближенные значения искомой функции в узлах $\left(x_n,z_j\right)$, $n=\overline{1,N}$, $j=\overline{1,J}$ неравномерной прямоугольной сетки, разбивающей двумерную область $\Omega=\left[x_{\min},\ x_{\max}\right]\times\left[z_{\min},\ z_{\max}\right]$ (полагается, что $x_1=x_{\min}=0$, $x_N=x_{\max}$, $z_1=z_{\min}=0$, $z_J=z_{\max}$); $\pi_{n,j}=\left[x_n,x_{n+1}\right]\times\left[z_j,z_{j+1}\right]$, $n=\overline{1,N-1}$, $j=\overline{1,J-1}$ – произвольная ячейка этой сетки; $\Delta x_n=x_{n+1}-x_n$ и $\Delta z_j=z_{j+1}-z_j$ – шаги сетки вдоль осей *x* и z соответственно. Коэффициенты в разностном уравнении (2) определяются по формулам:

$$a_{n,j}=\frac{1}{\sigma_{n,j}}\frac{\Delta x_n k_{n,j}\sqrt{1-\theta}}{sh\left(\Delta z_j k_{n,j}\sqrt{1-\theta}\right)},\ b_{n,j}=\frac{1}{\sigma_{n,j}}\frac{\Delta z_j k_{n,j}\sqrt{\theta}}{sh\left(\Delta x_n k_{n,j}\sqrt{\theta}\right)},$$
$$c_{n,j}=\frac{1}{\sigma_{n,j}}k_{n,j}\left[\Delta z_j\sqrt{\theta}cth\left(\Delta x_n k_{n,j}\sqrt{\theta}\right)+\Delta x_n\sqrt{1-\theta}cth\left(\Delta z_j k_{n,j}\sqrt{1-\theta}\right)\right], \tag{3}$$

где используется кусочно-постоянная аппроксимация функции удельной электропроводности $\sigma=\sigma\left(x,z\right)\approx\sigma_{n,j}$, $\left(x,z\right)\in\pi_{n,j}$ (например, в качестве величины $\sigma_{n,j}$ может использоваться значение функции $\sigma\left(x,z\right)$ в центральной точке $\left(x_{n+1/2},z_{j+1/2}\right)$ прямоугольной сеточной ячейки $\pi_{n,j}$); $k_{n,j}=\left(1-i\right)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma_{n,j}}{2}}$ – волновое число в ячейке $\pi_{n,j}$; θ – произвольный комплексный параметр численного метода.

При построении разностных схем для решения системы (1) ***на основе метода центрально-разностной аппроксимации*** [5,6] получается следующее разностное уравнение для функции H^{y}:

$$p_{n,j}H^{y}_{n+1,j}+p_{n-1,j}H^{y}_{n-1,j}+q_{n,j}H^{y}_{n,j+1}+q_{n,j-1}H^{y}_{n,j-1}-\left(p_{n,j}+p_{n-1,j}+q_{n,j}+q_{n,j-1}-\frac{i\omega\mu_0}{4}\right)H^{y}_{n,j}=0,$$
$$n=\overline{2,N-1},\ j=\overline{2,J-1}, \tag{4}$$

где

$$p_{n,j}=\frac{\Delta z_j+\Delta z_{j-1}}{\Delta x_n}\cdot\frac{1}{\sigma_{n,j}+\sigma_{n,j-1}},\quad q_{n,j}=\frac{\Delta x_n+\Delta x_{n-1}}{\Delta z_j}\cdot\frac{1}{\sigma_{n,j}+\sigma_{n-1,j}}. \tag{5}$$

Разностные схемы (2) и (4) являются системами линейных алгебраических уравнений с одинаковым пятиточечным вычислительным шаблоном типа «крест». При этом очевидно, что системы линейных алгебраических уравнений (2) и (4) являются недоопределёнными. Для того, чтобы замкнуть эти системы, будем использовать краевые условия Дирихле, то есть будем полагать, что функция H^{y} задана на границах области моделирования Ω.

Итерационные методы решения задачи Дирихле для функции H^{y}.

Одним из наиболее простых способов решения рассматриваемой задачи Дирихле является *итерационный метод Якоби* [6], а разностные схемы (2) и (4) для этого метода имеют вид:

$$\left(H^y_{n,j}\right)^{(k)} = \left(c_{n-1,j-1}+c_{n,j-1}+c_{n-1,j}+c_{n,j}\right)^{-1}\cdot\Big[\left(a_{n,j-1}+a_{n-1,j-1}\right)\left(H^y_{n,j-1}\right)^{(k-1)}+\left(b_{n-1,j-1}+b_{n-1,j}\right)\left(H^y_{n-1,j}\right)^{(k-1)}+$$
$$+\left(a_{n-1,j}+a_{n,j}\right)\left(H^y_{n,j+1}\right)^{(k-1)}+\left(b_{n,j-1}+b_{n,j}\right)\left(H^y_{n+1,j}\right)^{(k-1)}\Big], \quad (6)$$

$$\left(H^y_{n,j}\right)^{(k)} = \left(p_{n,j}+p_{n-1,j}+q_{n,j}+q_{n,j-1}-\frac{i\omega\mu_0}{4}\right)^{-1}\cdot\Big[q_{n,j-1}\left(H^y_{n,j-1}\right)^{(k-1)}+p_{n-1,j}\left(H^y_{n-1,j}\right)^{(k-1)}+$$
$$+q_{n,j}\left(H^y_{n,j+1}\right)^{(k-1)}+p_{n,j}\left(H^y_{n+1,j}\right)^{(k-1)}+\Big]. \quad (7)$$

Разностные схемы (2) и (4) для *итерационного метода Зейделя* [5, 6] имеют вид:

$$\left(H^y_{n,j}\right)^{(k)} = \left(c_{n-1,j-1}+c_{n,j-1}+c_{n-1,j}+c_{n,j}\right)^{-1}\cdot\Big[\left(a_{n,j-1}+a_{n-1,j-1}\right)\left(H^y_{n,j-1}\right)^{(k)}+\left(b_{n-1,j-1}+b_{n-1,j}\right)\left(H^y_{n-1,j}\right)^{(k)}+$$
$$+\left(a_{n-1,j}+a_{n,j}\right)\left(H^y_{n,j+1}\right)^{(k-1)}+\left(b_{n,j-1}+b_{n,j}\right)\left(H^y_{n+1,j}\right)^{(k-1)}\Big], \quad (8)$$

$$\left(H^y_{n,j}\right)^{(k)} = \left(p_{n,j}+p_{n-1,j}+q_{n,j}+q_{n,j-1}-\frac{i\omega\mu_0}{4}\right)^{-1}\cdot\Big[q_{n,j-1}\left(H^y_{n,j-1}\right)^{(k)}+p_{n-1,j}\left(H^y_{n-1,j}\right)^{(k)}+$$
$$+q_{n,j}\left(H^y_{n,j+1}\right)^{(k-1)}+p_{n,j}\left(H^y_{n+1,j}\right)^{(k-1)}\Big]. \quad (9)$$

Модификацией метода Зейделя является итерационный *метод релаксации* [6]. Разностные схемы (2) и (4) для этого метода имеют вид:

$$\left(H^y_{n,j}\right)^{(k)} = (1-\tau)\left(H^y_{n,j}\right)^{(k-1)}+$$
$$+\tau\left(c_{n-1,j-1}+c_{n,j-1}+c_{n-1,j}+c_{n,j}\right)^{-1}\cdot\Big[\left(a_{n,j-1}+a_{n-1,j-1}\right)\left(H^y_{n,j-1}\right)^{(k)}+\left(b_{n-1,j-1}+b_{n-1,j}\right)\left(H^y_{n-1,j}\right)^{(k)}+$$
$$+\left(a_{n-1,j}+a_{n,j}\right)\left(H^y_{n,j+1}\right)^{(k-1)}+\left(b_{n,j-1}+b_{n,j}\right)\left(H^y_{n+1,j}\right)^{(k-1)}\Big], \quad (10)$$

$$\left(H^y_{n,j}\right)^{(k)} = (1-\tau)\left(H^y_{n,j}\right)^{(k-1)}+$$
$$+\tau\left(p_{n,j}+p_{n-1,j}+q_{n,j}+q_{n,j-1}-\frac{i\omega\mu_0}{4}\right)^{-1}\cdot\Big[q_{n,j-1}\left(H^y_{n,j-1}\right)^{(k)}+p_{n-1,j}\left(H^y_{n-1,j}\right)^{(k)}+$$
$$+q_{n,j}\left(H^y_{n,j+1}\right)^{(k-1)}+p_{n,j}\left(H^y_{n+1,j}\right)^{(k-1)}\Big], \quad (11)$$

т.е. метод Зейделя является частным случаем метода релаксации при $\tau = 1$.

В соотношениях (6), (8), (10) коэффициенты определяются по формулам (3), а в соотношениях (7), (9), (11) – по формулам (5). Во всех равенствах (6)–(11) верхний индекс $k = 0,1,2,3,...$ соответствует номеру итерации, при этом начальное приближение $\left(H^y_{n,j}\right)^{(0)}$ будем считать нулевым во внутренних узлах сетки и известным на границах сеточной области. В соотношениях (10) и (11) используется итерационный параметр $\tau \in (0,2)$ [6].

В качестве критерия остановки для итерационных процессов (6)-(11) можно использовать условия:

$$\max_{n,j}\left|\left(H^y_{n,j}\right)^{(k)}-\left(H^y_{n,j}\right)^{(k-1)}\right| < \delta \text{ и } k_{fin} < K, \quad (12)$$

где $\delta > 0$ – заданное число, определяющее точность вычислений; k_{fin} – количество выполненных итераций, K – большое натуральное число, определяющее максимально допустимое количество итераций.

Тестовая задача.

Рассмотрим систему уравнений (1) в прямоугольной области $[0, x_{\max}] \times [0, z_{\max}]$, для случая однородной среды, т.е. при $\sigma(x,z) = const = \bar{\sigma}$. Будем искать функцию $H^y(x,z)$ в виде:

$$H^y(x,z) = \bar{\sigma}\psi(x,z), \tag{13}$$

где вспомогательная функция $\psi(x,z)$ является решением дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial^2\psi(x,z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi(x,z)}{\partial z^2} - \bar{k}^2\psi(x,z) = 0,\ \bar{k}^2 = -i\bar{\sigma}\omega\mu_0. \tag{14}$$

Введем дополнительные вспомогательные функции:

$$\alpha^{(0)}(x) = \frac{sh\left((x_{\max} - x)\bar{k}\sqrt{\theta}\right)}{sh\left(x_{\max}\bar{k}\sqrt{\theta}\right)},\quad \alpha^{(1)}(x) = \frac{sh\left((x - x_{\min})\bar{k}\sqrt{\theta}\right)}{sh\left(x_{\max}\bar{k}\sqrt{\theta}\right)};$$

$$\beta^{(0)}(z) = \frac{sh\left((z_{\max} - z)\bar{k}\sqrt{1-\theta}\right)}{sh\left(z_{\max}\bar{k}\sqrt{1-\theta}\right)},\quad \beta^{(1)}(z) = \frac{sh\left((z - z_{\min})\bar{k}\sqrt{1-\theta}\right)}{sh\left(z_{\max}\bar{k}\sqrt{1-\theta}\right)}.$$

Тогда несложно убедиться, что функции вида:

$$\psi(x,z) = C_1\alpha^{(0)}(x)\beta^{(0)}(z) + C_2\alpha^{(0)}(x)\beta^{(1)}(z) + C_3\alpha^{(1)}(x)\beta^{(1)}(z) + C_4\alpha^{(1)}(x)\beta^{(0)}(z) \tag{15}$$

образуют класс решений уравнения (14). В соотношении (15) коэффициенты C_1, C_2, C_3, C_4 – произвольные комплексные константы.

Таким образом, учитывая формулы (13) и (15), получаем аналитическое выражение для функции H^y:

$$H^y(x,z) = \bar{\sigma}\left[C_1\alpha^{(0)}(x)\beta^{(0)}(z) + C_2\alpha^{(0)}(x)\beta^{(1)}(z) + C_3\alpha^{(1)}(x)\beta^{(1)}(z) + C_4\alpha^{(1)}(x)\beta^{(0)}(z)\right]. \tag{16}$$

Литература

1. Жданов М.С. Электроразведка: Учебник для вузов. М.: Недра. 1986. 316 с.
2. Новожинский К., Пушкарев П.Ю. Анализ эффективности программ для двумерной инверсии магнитотеллурических данных // Физика Земли. 2001. № 6. С. 72-85.
3. Забинякова О.Б., Скляр С.Н. Применение проекционных разностных схем для решения прямой двумерной задачи магнитотеллурического зондирования // Вестник КРСУ. 2016. Т. 16. № 1. С. 3-9.
4. Sklyar S.N. A projective version of the integral-interpolation method and it's application for the discretization of the singular perturbation problems // Advanced Mathematics, Computation and Applications: Proceedings of the International Conference AMCA-95 / Eds. A.S. Alekseev, N.A. Bakhvalov. Novosibirsk: NCC Publisher. 1995. P. 380–385.
5. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит. 1989. 432 с.
6. Самарский А.А Теория разностных схем: Учеб. пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит. 1977. 656 с.

УДК 519.652

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ *H*-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДВУМЕРНОЙ СРЕДЕ. ЧАСТЬ 2: РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Забинякова О.Б.[1,2], Скляр С.Н. [2]
perah.92@inbox.ru, sklyar_s@auca.kg
[1]Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан
[2]Американский Университет в Центральной Азии, г. Бишкек, Кыргызстан

В работе рассматривается задача численного моделирования магнитной компоненты H-поляризованного электромагнитного поля в двумерной среде. Во второй части работы демонстрируются результаты численных экспериментов по решению задачи Дирихле для функции H^y с применением разностных схем, полученных с помощью проекционного варианта интегро-интерполяционного метода и с помощью метода центрально-разностной аппроксимации. В качестве тестовой задачи используется задача с известным точным решением. Для решения получаемых систем линейных алгебраических уравнений используются итерационные методы Якоби, Зейделя и релаксации.

Ключевые слова: электромагнитное поле, двумерная среда, численные методы, проекционный вариант интегро-интерполяционного метода, метод центрально-разностной аппроксимации, система линейных алгебраических уравнений, вычислительный шаблон типа «крест», итерационные методы.

Введение.

Данная работа является продолжением статьи [1]; в тексте данной работы используются ссылки на формулы с номерами, присвоенными им в [1].

В данной статье представлены результаты численных экспериментов по моделированию магнитной компоненты *H*-поляризованного электромагнитного поля, математическая модель которого описывается системой дифференциальных уравнений (1). Расчеты осуществлялись с применением разностных схем, построенных с помощью проекционного варианта интегро-интерполяционного метода (ПВИИМ) [2] и метода центрально-разностной аппроксимации (МЦРА) [3,4].

Численные эксперименты по моделированию компоненты H^y.

Представим результаты численных экспериментов по решению задачи Дирихле для компоненты H^y. Вычисления и визуализация выполнялись в среде Matlab. Основной целью расчетов является анализ эффективности разностной схемы (2), полученной с помощью ПВИИМ. Тестирование этой разностной схемы осуществляется для случая однородной среды, где известно соответствующее точное решение (16). Краевые условия Дирихле для функции H^y задаются с помощью этой же аналитической функции (16). Также для сравнения реализовано альтернативное моделирование функции H^y с помощью разностной схемы (4), полученной с помощью МЦРА. Обратим внимание, что для каждой из разностных схем (2) и (4) решение соответствующих систем линейных алгебраических уравнений осуществляется с помощью трех итерационных методов: метод Якоби (см. формулы (6) и (7)), метод Зейделя (см. формулы (8) и (9)), метод релаксации с разными вариантами итерационного параметра (см. формулы (10) и (11)); для остановки итерационного процесса отслеживаются критерии из (12) с разными значениями δ и фиксированной величиной $K = 10^5$.

Точности получаемых приближенных решений оцениваются как относительные погрешности:

$$rel_err = \frac{\max\limits_{n,j}\left|\left(H^y\right)^h_{n,j} - H^y_{n,j}\right|}{\max\limits_{n,j}\left|\left(H^y\right)^h_{n,j}\right|}\cdot 100\%, \qquad (*)$$

где $\left(H^y\right)^h_{n,j}$ – проекция точного решения на узел сетки $\left(x_n, z_j\right)$, $H^y_{n,j}$ – приближенное решение в этом же узле.

На всех приведенных далее иллюстрациях отрисовка организована следующим образом:

- сплошная желто-зеленая поверхность – точное решение на вспомогательной сетке;
- зеленые точки – точное решение на основной вычислительной сетке;
- синие звездочки – приближенное решение, полученное с помощью разностной схемы ПВИИМ (2);
- красные кружки – приближенное решение, полученное с помощью разностной схемы МЦРА (4).

Тест 1 (равномерная сетка).

В рамках численных экспериментов была выполнена серия тестовых расчетов с различными комбинациями сочетаний параметров задачи и вычислительного алгоритма. Далее приведем результаты, полученные при $x_{\max} = z_{\max} = 1000$, $\theta = \frac{1}{2}$, $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 1 + i$. Для расчета и детальной отрисовки точного решения использовалась вспомогательная равномерная сетка со 100 узлами в каждом направлении.

В таблицах 1-4 приведены погрешности аппроксимации, полученные при решении тестовой задачи для разных вариантов сочетания параметров задачи и вычислительного алгоритма. На рисунке 1 проиллюстрированы решения тестовой задачи для варианта сочетания параметров 5 из таблицы 1.

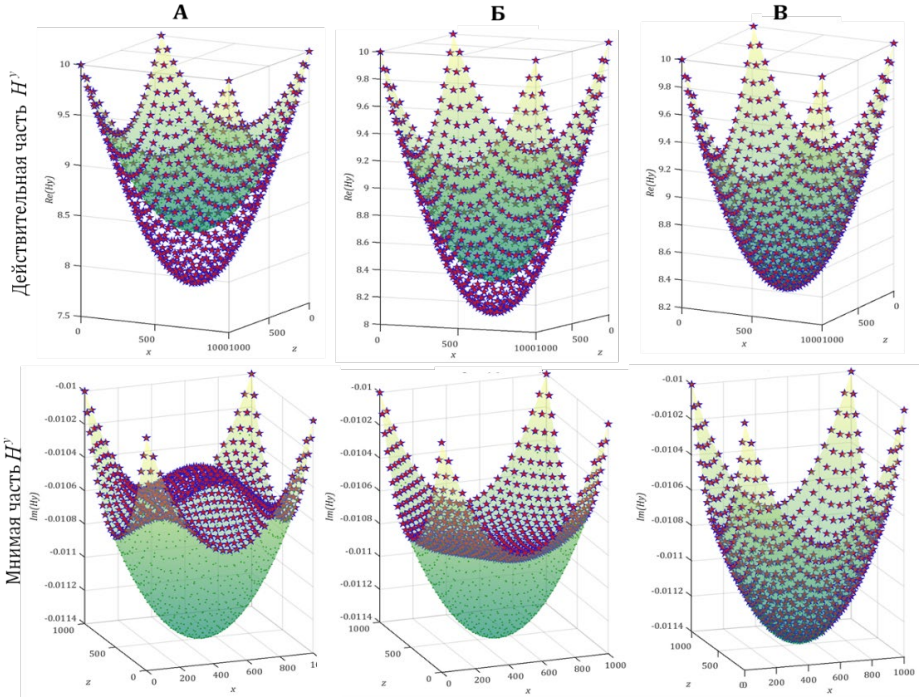


Рисунок 1 – Действительная и мнимая компоненты функции H^y для варианта сочетания параметров 5 из таблицы 1. Используемый итерационный метод для решения СЛАУ:
А) метод Якоби; Б) метод релаксации при $\tau = 1$ (метод Зейделя);
В) метод релаксации при $\tau = 1.75$

Таблица 1 – Результаты решения задачи Дирихле для компоненты H^y на равномерной сетке для среды с удельной электропроводностью σ=0.01 при $\delta = 10^{-5}$

Разностная схема	Итерационный метод решения СЛАУ		Варианты сочетания параметров											
			ω=0.01						ω=100					
			1		2		3		4		5		6	
			N=5, J=5		*N=25, J=25*		*N=51, J=51*		*N=5, J=5*		*N=25, J=25*		*N=51, J=51*	
			rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}
ПВИИМ	метод Якоби		0.146	20	8,13	348	35.907	762	0.146	20	8,096	348	35.902	760
	метод релаксации	τ =0,01	24.22	608	100	461	100	461	24.16	607	99.59	460	99.68	461
		τ =0,25	0.805	62	28,97	703	98.53	514	0.798	62	28.86	703	98.14	513
		τ =0,5	0.319	31	12,34	451	55.93	801	0.316	31	12.29	451	55.84	799
		τ =0,75	0.138	19	6,84	308	29.86	714	0.137	19	6.807	308	29.81	713
		τ =1 (метод Зейделя)	0.046	12	4,06	215	17.843	559	0.046	12	4,0412	215	17.77	559
		τ =1,01	0.037	12	3,97	212	17.48	553	0.037	12	3.95	212	17.41	553
		τ =1,25	$7.8\cdot10^{-3}$	8	2,41	147	10.65	414	$8.9\cdot10^{-3}$	8	2.41	147	10.61	414
		τ =1,5	0.030	13	1,28	93	5.89	280	0.033	13	1.273	93	5.857	280
		τ =1,75	0.033	28	0,19	48	2.39	151	0.044	29	0.195	48	2.384	151
		τ =1,99	0.044	768	0,058	733	0.072	746	0 (~1/NaN)	10^5	0.27	1946	0.081	742
МЦРА	метод Якоби		0.146	20	8.13	348	35.907	762	0.173	20	8.097	348	35.902	760
	метод релаксации	τ =0,01	24.22	608	100	461	100	461	24.18	607	99.59	460	99.68	461
		τ =0,25	0.805	62	28.97	703	98.53	514	0.826	62	28.86	703	98.14	513
		τ =0,5	0.319	31	12.34	451	55.93	801	0.344	31	12.29	451	55.84	799
		τ =0,75	0.138	19	6.84	308	29.86	714	0.165	19	6.808	308	29.81	713
		τ =1 (метод Зейделя)	0.046	12	4.06	215	17.843	559	0.073	12	4.0419	215	17.77	559
		τ =1,01	0.037	12	3.97	212	17.48	553	0.064	12	3.95	212	17.41	553
		τ =1,25	$7.8\cdot10^{-3}$	8	2.41	147	10.65	414	0.035	8	2.41	147	10.61	414
		τ =1,5	0.03	13	1.28	93	5.89	280	0.041	13	1.274	93	5.858	280
		τ =1,75	0.033	28	0.19	48	2.39	151	0.068	29	0.196	48	2.384	151
		τ =1,99	0.044	768	0.058	733	0.072	746	0 (~1/NaN)	10^5	0.271	1946	0.081	742

Таблица 2 – Результаты решения задачи Дирихле для компоненты H^y на равномерной сетке для среды с удельной электропроводностью σ=0.01 при $\delta = 10^{-6}$

Разностная схема	Итерационный метод решения СЛАУ		Варианты сочетания параметров											
			ω=0.01						ω=100					
			1		2		3		4		5		6	
			N=5, J=5		*N=25, J=25*		*N=51, J=51*		*N=5, J=5*		*N=25, J=25*		*N=51, J=51*	
			rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}
ПВИИМ	метод Якоби		$1.8\cdot10^{-2}$	26	0.813	616	3.57	1932	$1.8\cdot10^{-2}$	26	0.809	616	3.566	1930
	метод релаксации	τ =1 (метод Зейделя)	$5.7\cdot10^{-3}$	15	0.406	349	1.78	1142	$5.7\cdot10^{-3}$	15	0.404	349	1.776	1142
		τ =1,5	$1.7\cdot10^{-3}$	17	0.128	136	0.59	473	$1.9\cdot10^{-3}$	17	0.128	136	0.584	473
МЦРА	метод Якоби		$1.8\cdot10^{-2}$	26	0.813	616	3.57	1932	$4.6\cdot10^{-2}$	26	0.810	616	3.566	1930
	метод релаксации	τ =1 (метод Зейделя)	$5.7\cdot10^{-3}$	15	0.406	349	1.78	1142	$3.4\cdot10^{-2}$	15	0.405	349	1.776	1142
		τ =1,5	$1.7\cdot10^{-3}$	17	0.128	136	0.59	473	$2.9\cdot10^{-2}$	17	0.129	136	0.584	473

Таблица 3 – Результаты решения задачи Дирихле для компоненты H^y на равномерной сетке для среды с удельной электропроводностью σ=1 при $\delta = 10^{-5}$

Разностная схема	Итерационный метод решения СЛАУ		Варианты сочетания параметров											
			ω=0.01						ω=100					
			1		2		3		4		5		6	
			N=5, J=5		*N=25, J=25*		*N=51, J=51*		*N=5, J=5*		*N=25, J=25*		*N=51, J=51*	
			rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}
ПВИИМ	метод Якоби		$1.1\cdot10^{-3}$	34	$8.1\cdot10^{-2}$	884	0.358	3096	$2.2\cdot10^{-4}$	10	$1.3\cdot10^{-2}$	598	$5.5\cdot10^{-2}$	2098
	метод релаксации	τ=0,01	0.239	2178	8.22	34641	35.89	75916	$8\cdot10^{-2}$	495	1.46	7449	3.63	12611
		τ=0,25	$8\cdot10^{-3}$	117	0.288	2589	1.254	8623	$1.6\cdot10^{-2}$	31	$4.5\cdot10^{-2}$	1422	0.195	4988
		τ=0,5	$2.7\cdot10^{-3}$	55	0.124	1258	0.537	4340	$4\cdot10^{-4}$	15	$1.9\cdot10^{-2}$	731	$8.3\cdot10^{-2}$	2748
		τ=0,75	$1.1\cdot10^{-3}$	32	$6.8\cdot10^{-2}$	756	0.297	2660	$2.9\cdot10^{-4}$	9	$1.1\cdot10^{-2}$	462	$4.6\cdot10^{-2}$	1771
		τ=1 (метод Зейделя)	$3.6\cdot10^{-4}$	19	$4.1\cdot10^{-2}$	483	0.178	1725	$1.8\cdot10^{-5}$	7	$6.2\cdot10^{-3}$	322	$2.8\cdot10^{-2}$	1205
		τ=1,01	$5.1\cdot10^{-4}$	18	$3.9\cdot10^{-2}$	475	0.176	1696	$3\cdot10^{-5}$	7	$6.1\cdot10^{-3}$	318	$2.7\cdot10^{-2}$	1187
		τ=1,25	$2.2\cdot10^{-4}$	11	$2.4\cdot10^{-2}$	307	0.107	1112	$2.3\cdot10^{-4}$	13	$3.8\cdot10^{-3}$	266	$1.7\cdot10^{-2}$	839
		τ=1,5	$3.9\cdot10^{-4}$	19	$1.3\cdot10^{-2}$	179	0.058	666	0 (~1/NaN)	11904	0 (~1/NaN)	66874	$9.1\cdot10^{-3}$	649
		τ=1,75	$2.4\cdot10^{-4}$	45	$3.7\cdot10^{-3}$	71	0.023	310	0 (~1/NaN)	1657	0 (~1/NaN)	4008	0 (~1/NaN)	39854
		τ=1,99	$4\cdot10^{-4}$	1233	$6.5\cdot10^{-4}$	1192	$4.4\cdot10^{-4}$	1221	0 (~1/NaN)	1018	0 (~1/NaN)	1736	0 (~1/NaN)	3648
МЦРА	метод Якоби		$1.1\cdot10^{-3}$	34	$8.1\cdot10^{-2}$	884	0.358	3096	1.38	9	0.12	568	$4.8\cdot10^{-2}$	2070
	метод релаксации	τ=0,01	0.239	2178	8.22	34641	35.89	75916	1.4	465	1.46	7119	3.64	12585
		τ=0,25	$8\cdot10^{-3}$	117	0.288	2589	1.254	8623	1.38	32	0.11	1361	0.194	4927
		τ=0,5	$2.7\cdot10^{-3}$	55	0.124	1258	0.537	4340	1.38	15	0.12	699	$9.2\cdot10^{-2}$	2714
		τ=0,75	$1.1\cdot10^{-3}$	32	$6.8\cdot10^{-2}$	756	0.297	2660	1.38	9	0.12	441	$4.1\cdot10^{-2}$	1748
		τ=1 (метод Зейделя)	$3.6\cdot10^{-4}$	19	$4.1\cdot10^{-2}$	483	0.178	1725	1.38	6	0.12	306	$3.1\cdot10^{-2}$	1189
		τ=1,01	$5.1\cdot10^{-4}$	18	$3.9\cdot10^{-2}$	475	0.176	1696	1.38	6	0.12	302	$3.1\cdot10^{-2}$	1172
		τ=1,25	$2.2\cdot10^{-4}$	11	$2.4\cdot10^{-2}$	307	0.107	1112	1.38	11	0.12	248	$2.9\cdot10^{-2}$	827
		τ=1,5	$3.9\cdot10^{-4}$	19	$1.3\cdot10^{-2}$	179	0.058	666	1.38	70	0 (~1/NaN)	86399	$2.9\cdot10^{-2}$	637
		τ=1,75	$2.4\cdot10^{-4}$	45	$3.7\cdot10^{-3}$	71	0.023	310	0 (~1/NaN)	2442	0 (~1/NaN)	4017	0 (~1/NaN)	40129
		τ=1,99	$4\cdot10^{-4}$	1233	$6.5\cdot10^{-4}$	1192	$4.4\cdot10^{-4}$	1221	0 (~1/NaN)	1257	0 (~1/NaN)	1727	0 (~1/NaN)	3621

Таблица 4 – Результаты решения задачи Дирихле для компоненты H^y на равномерной сетке для среды с удельной электропроводностью σ =100 при $\delta = 10^{-5}$

Разностная схема	Итерационный метод решения СЛАУ		Варианты сочетания параметров											
			ω=0.01						ω=100					
			1		2		3		4		5		6	
			N=5, J=5		*N=25, J=25*		*N=51, J=51*		*N=5, J=5*		*N=25, J=25*		*N=51, J=51*	
			rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}
ПВИИМ	метод Якоби		$1.8\cdot10^{-5}$	46	$8.1\cdot10^{-4}$	1420	$3.6\cdot10^{-3}$	5428	$5.5\cdot10^{-17}$	1	$2.2\cdot10^{-7}$	7	$4.5\cdot10^{-6}$	24
	метод релаксации	τ =0,01	$2.4\cdot10^{-3}$	3739	$8.2\cdot10^{-2}$	88175	22.201	10000	$6.7\cdot10^{-11}$	1	$7\cdot10^{-4}$	717	$8.1\cdot10^{-4}$	1010
		τ =0,25	$7.8\cdot10^{-5}$	172	$2.9\cdot10^{-3}$	4472	$1.3\cdot10^{-2}$	16788	$5.1\cdot10^{-11}$	1	$1.7\cdot10^{-5}$	38	$2.5\cdot10^{-5}$	53
		τ =0,5	$2.8\cdot10^{-5}$	78	$1.2\cdot10^{-3}$	2065	$5.4\cdot10^{-3}$	7839	$3.4\cdot10^{-11}$	1	$3.6\cdot10^{-6}$	18	$9\cdot10^{-6}$	26
		τ =0,75	$1.3\cdot10^{-5}$	44	$6.8\cdot10^{-4}$	1204	$3\cdot10^{-3}$	4603	$1.7\cdot10^{-11}$	1	$2\cdot10^{-6}$	10	$3\cdot10^{-6}$	17
		τ =1 (метод Зейделя)	$5.5\cdot10^{-6}$	25	$4\cdot10^{-4}$	751	$1.8\cdot10^{-3}$	2890	$2.8\cdot10^{-17}$	1	$2.4\cdot10^{-7}$	6	$1.5\cdot10^{-6}$	17
		τ =1,01	$3.4\cdot10^{-6}$	25	$4\cdot10^{-4}$	737	$1.7\cdot10^{-3}$	2838	$6.7\cdot10^{-13}$	1	$2.3\cdot10^{-7}$	6	$2.3\cdot10^{-6}$	17
		τ =1,25	$1.1\cdot10^{-6}$	15	$2.3\cdot10^{-4}$	467	$1.1\cdot10^{-3}$	1810	$1.7\cdot10^{-11}$	1	$1.5\cdot10^{-6}$	11	0 (~1/NaN)	10228
		τ =1,5	$2.1\cdot10^{-6}$	27	$1.2\cdot10^{-4}$	266	$5.9\cdot10^{-4}$	1051	$3.4\cdot10^{-11}$	1	$2\cdot10^{-6}$	24	0 (~1/NaN)	1300
		τ =1,75	$4.2\cdot10^{-6}$	66	$3.5\cdot10^{-5}$	99	$2.4\cdot10^{-4}$	468	$5.1\cdot10^{-11}$	1	$3.5\cdot10^{-6}$	561	0 (~1/NaN)	799
		τ =1,99	0 (~1/NaN)	24127	$2.7\cdot10^{-5}$	7171	$5.4\cdot10^{-5}$	1930	$6.7\cdot10^{-11}$	1	0 (~1/NaN)	2702	0 (~1/NaN)	618
МЦРА	метод Якоби		$2.9\cdot10^{-2}$	46	$1.5\cdot10^{-3}$	1420	$3.7\cdot10^{-3}$	5428	$2.1\cdot10^{-7}$	1	0.82	6	1.63	20
	метод релаксации	τ =0,01	$3.1\cdot10^{-2}$	3738	$8.3\cdot10^{-2}$	88175	22.201	10000	$2.1\cdot10^{-9}$	1	0.82	698	1.63	1039
		τ =0,25	$2.9\cdot10^{-2}$	172	$3.6\cdot10^{-3}$	4472	$1.3\cdot10^{-2}$	16788	$5.2\cdot10^{-8}$	1	0.82	37	1.63	54
		τ =0,5	$2.9\cdot10^{-2}$	78	$2\cdot10^{-3}$	2065	$5.5\cdot10^{-3}$	7839	10^{-7}	1	0.82	17	1.63	26
		τ =0,75	$2.9\cdot10^{-2}$	44	$1.4\cdot10^{-3}$	1204	$3.1\cdot10^{-3}$	4603	$1.6\cdot10^{-7}$	1	0.82	10	1.63	17
		τ =1 (метод Зейделя)	$2.9\cdot10^{-2}$	25	$1.2\cdot10^{-3}$	751	$1.9\cdot10^{-3}$	2890	$2.1\cdot10^{-7}$	1	0.82	6	1.63	14
		τ =1,01	$2.9\cdot10^{-2}$	25	$1.2\cdot10^{-3}$	737	$1.9\cdot10^{-3}$	2838	$2.1\cdot10^{-7}$	1	0.82	6	1.63	14
		τ =1,25	$2.9\cdot10^{-2}$	15	10^{-3}	467	$1.2\cdot10^{-3}$	1810	$2.6\cdot10^{-7}$	1	0.82	12	1.63	53
		τ =1,5	$2.9\cdot10^{-2}$	27	$9.2\cdot10^{-4}$	266	$7.4\cdot10^{-4}$	1051	$3.1\cdot10^{-7}$	1	0.82	27	0 (~1/NaN)	1971
		τ =1,75	$2.9\cdot10^{-2}$	66	$8.4\cdot10^{-4}$	99	$3.9\cdot10^{-4}$	468	$3.7\cdot10^{-7}$	1	0 (~1/NaN)	10762	0 (~1/NaN)	999
		τ =1,99	0 (~1/NaN)	23745	$8.3\cdot10^{-4}$	7171	$1.9\cdot10^{-4}$	1930	$4.2\cdot10^{-7}$	1	0 (~1/NaN)	2093	0 (~1/NaN)	728

Обратим внимание, что в случае применения равномерной вычислительной сетки в однородном полупространстве при $\omega \to 0$ обе разностные схемы (2) и (4) преобразуются к виду:

$$\frac{\Delta x}{\Delta z}\left(H^{y}_{n,j-1}+H^{y}_{n,j+1}\right)+\frac{\Delta z}{\Delta x}\left(H^{y}_{n+1,j}+H^{y}_{n-1,j}\right)-2\left(\frac{\Delta x}{\Delta z}+\frac{\Delta z}{\Delta x}\right)H^{y}_{n,j}=0,$$

то есть разностная схема, полученная методом ПВИИМ, равнозначна разностной схеме, полученной методом МЦРА, что подтверждается также и результатами численных экспериментов: при ω=0.01 результаты вычислений отличаются незначительно (см. табл. 1-4); при ω=100 различия в получаемых погрешностях аппроксимации более заметны.

Очевидно, что уменьшение вычислительных погрешностей возможно при использовании соответствующих значений δ из условия (12). Например, таблицы 1 и 2 включают примеры, иллюстрирующие влияние величины параметра остановки итерационного процесса δ на получаемые погрешности. Видно, что уменьшение δ на один порядок позволило соответствующим образом увеличить точность аппроксимации, при этом увеличилось и количество итераций, требуемых для решения систем линейных алгебраических уравнений с соответствующей точностью, что вполне естественно.

Также из таблиц 1-4 видно, что все используемые итерационные методы позволяют получать неплохие результаты. Отметим некоторые общие закономерности: погрешности метода Якоби превышают погрешности, получаемые методом Зейделя; метод релаксации работает лучше метода Якоби и метода Зейделя при использовании $\tau \in (1,2)$, за исключением ситуаций, когда возникает расхождение итерационного процесса.

Тест 2 (произвольная сетка).

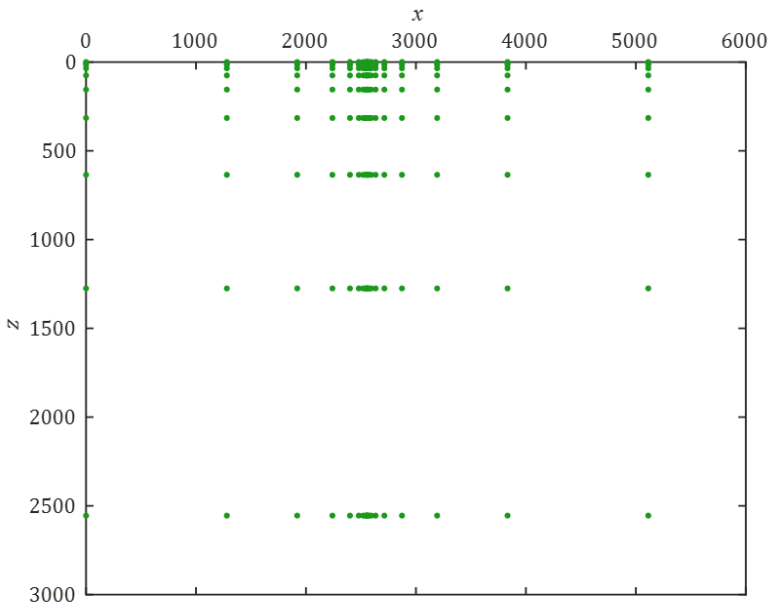
Так же, как и для случая равномерной сетки, была выполнена серия численных экспериментов с использованием произвольной сетки для различных комбинаций сочетания параметров задачи и вычислительного алгоритма. Для конкретности приведем результаты, полученные с использованием $\theta=\frac{1}{2}$, $C_1=C_2=C_3=C_4=1+i$ и $\sigma=0.01$. Для расчета и детальной отрисовки точного решения использовалась вспомогательная равномерная сетка со 100 узлами в каждом направлении.

В таблице 5 приведены погрешности аппроксимации, полученные при решении тестовой задачи для двух разных частот ω=0.01 и ω=100 на произвольной сетке, изображенной на рисунке 2 ($x_{\max}=5112.5$, $z_{\max}=2555$; шаги сетки образуют геометрическую прогрессию со знаменателем 2, расшифровка дана на рис. 2.). На рисунке 3 проиллюстрирован пример приближенных решений, полученных для обеих разностных схем (2) и (4) с применением итерационного метода Зейделя.

В таблице 6 приведены погрешности аппроксимации, полученные при решении тестовой задачи для тех же двух частот на произвольной сетке, изображенной на рисунке 4 ($x_{\max}=8231$, $z_{\max}=5147$; шаги сетки по каждому направлению даны на рис. 4). На рисунке 5 проиллюстрирован пример приближенных решений, , полученных для обеих разностных схем (2) и (4) с применением метода Якоби.

Из таблиц 5 и 6 видно, что изменение величины параметра δ из критерия остановки итерационного процесса (12) позволяет получать соответствующую точность получаемых приближенных решений. Также заметно, что на низкой частоте (например, $\omega=0.01$) разностные схемы, полученные методом ПВИИМ и методом МЦРА в большинстве случаев позволяют выполнять аппроксимацию с одинаковой точностью. На более высоких частотах (например, $\omega=100$) для всех вариантов значений δ очевидно преимущество проекционной разностной схемы (2) по сравнению с «классической» разностной схемой (4). Также из приведенных примеров видно, что удачно выбранный итерационный параметр метода релаксации τ позволяет значительно увеличивать точность получаемых приближенных

решений (как для разностной схемы (2), так и для разностной схемы(4)), по сравнению с результатами, получаемыми с использованием методов Якоби и Зейделя.



Длины ячеек вдоль оси *Ox:*
1280, 640, 320, 160, 80, 40, 20, 10, 5, 2.5, 5, 10, 20, 40, 80,160, 320, 640, 1280
Длины ячеек вдоль оси *Oz:*
5, 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280

Рисунок 2 – Тестовая неравномерная вычислительная сетка (20 узлов вдоль оси *Ox*, 10 узлов вдоль оси *Oz*)

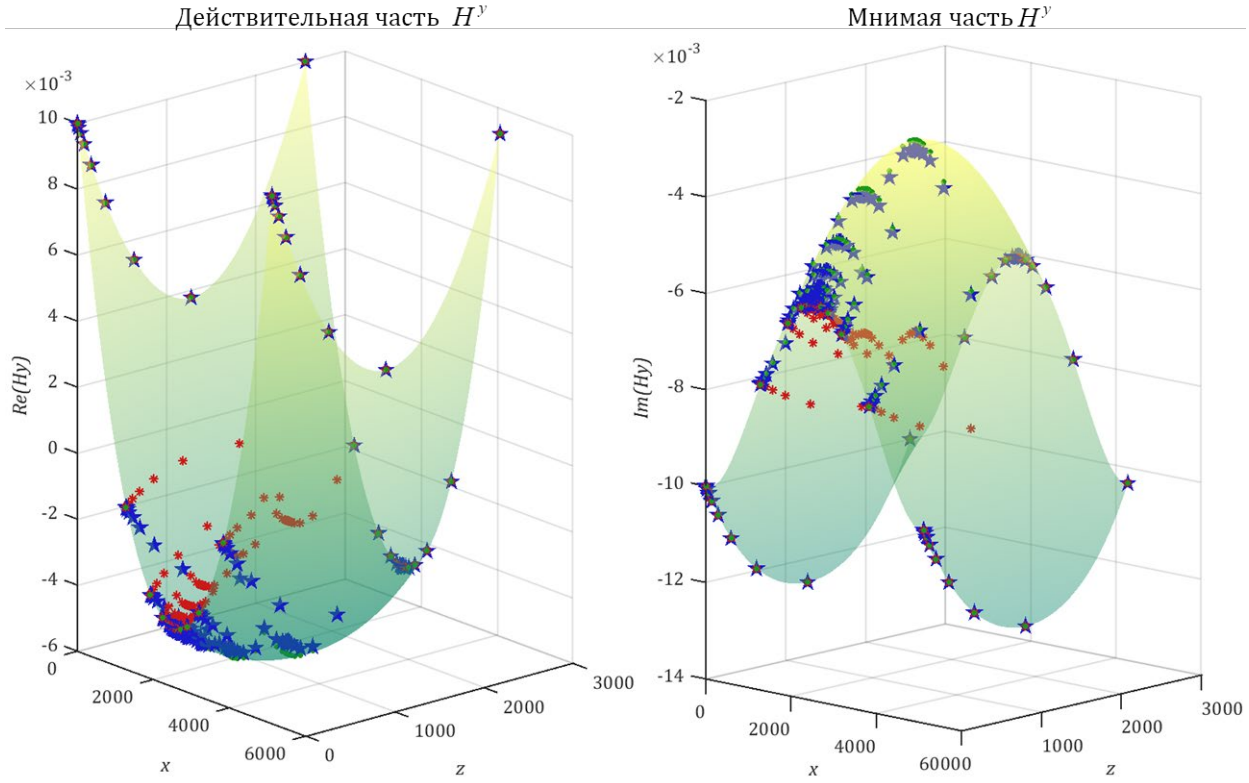


Рисунок 3 – Действительная и мнимая компоненты функции H^y для варианта сочетания параметров 5 из таблицы 5 на произвольной сетке (рис. 2). Для решения СЛАУ использовался итерационный метод Зейделя

Таблица 5 – Результаты решения задачи Дирихле для компоненты H^y на произвольной сетке, изображенной на рисунке 2

Разностная схема	Итерационный метод решения СЛАУ		Варианты сочетания параметров											
			1		2		3		4		5		6	
			ω=0.01						ω=100					
			$\delta = 10^{-5}$		$\delta = 10^{-6}$		$\delta = 10^{-7}$		$\delta = 10^{-5}$		$\delta = 10^{-6}$		$\delta = 10^{-7}$	
			rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}
ПВИИМ	метод Якоби		64.02	508	6.81	2727	0.68	4942	37.65	239	6.06	1968	0.596	4055
	метод релаксации	τ =0,01	99.998	704	97.52	4863	63.83	50878	50.01	285	47.27	2546	37.63	23839
		τ =0,25	89.854	484	24.39	5206	2.37	13091	44.37	257	21.6	2761	2.1	10242
		τ =0,5	75.241	501	10.25	3498	1.02	6831	40.34	251	9.18	2383	0.9	5535
		τ =0,75	55.535	547	5.67	2419	0.56	4264	35.48	249	5.03	1780	0.5	3515
		τ =1 (метод Зейделя)	35.36	558	3.39	1698	0.34	2802	28.55	258	2.99	1301	0.298	2338
		τ =1,01	34.642	557	3.32	1673	0.33	2756	28.07	261	2.94	1284	0.29	2300
		τ =1,25	20.703	493	2.03	1165	0.2	1827	18.89	274	1.79	919	0.18	1539
		τ =1,5	11.277	371	1.12	740	0.11	1106	10.14	248	0.98	598	$9.8\cdot10^{-2}$	941
		τ =1,75	4.65	216	0.46	370	$4.6\cdot10^{-2}$	523	4.15	162	0.41	307	$4.1\cdot10^{-2}$	451
		τ =1,99	$4.8\cdot10^{-2}$	843	$4.4\cdot10^{-3}$	1104	$5\cdot10^{-4}$	1333	0 (~1/NaN)	11078	0 (~1/NaN)	11078	0 (~1/NaN)	11078
МЦРА	метод Якоби		64.02	508	6.81	2727	0.68	4942	41.08	239	39.11	2106	41.29	4331
	метод релаксации	τ =0,01	99.998	704	97.52	4863	63.83	50878	50.26	285	47.3	2546	41.08	23782
		τ =0,25	89.854	484	24.39	5206	2.37	13091	44.94	257	36.22	2875	40.56	10942
		τ =0,5	75.241	501	10.25	3498	1.02	6831	42.6	250	38.24	2554	41.13	5912
		τ =0,75	55.535	547	5.67	2419	0.56	4264	39.97	248	39.46	1903	41.35	3754
		τ =1 (метод Зейделя)	35.36	558	3.39	1698	0.34	2802	36.92	268	40.17	1390	41.46	2497
		τ =1,01	34.642	557	3.32	1673	0.33	2756	36.77	271	40.19	1372	41.46	2457
		τ =1,25	20.703	493	2.03	1165	0.2	1827	36.66	296	40.71	982	41.53	1644
		τ =1,5	11.277	371	1.12	740	0.11	1106	38.09	266	41.09	638	41.57	1005
		τ =1,75	4.65	216	0.46	370	$4.7\cdot10^{-2}$	523	39.83	173	41.4	327	41.61	481
		τ =1,99	$4.9\cdot10^{-2}$	843	$9.1\cdot10^{-3}$	1104	$8.9\cdot10^{-3}$	1333	41.64	783	41.63	1008	41.63	1264

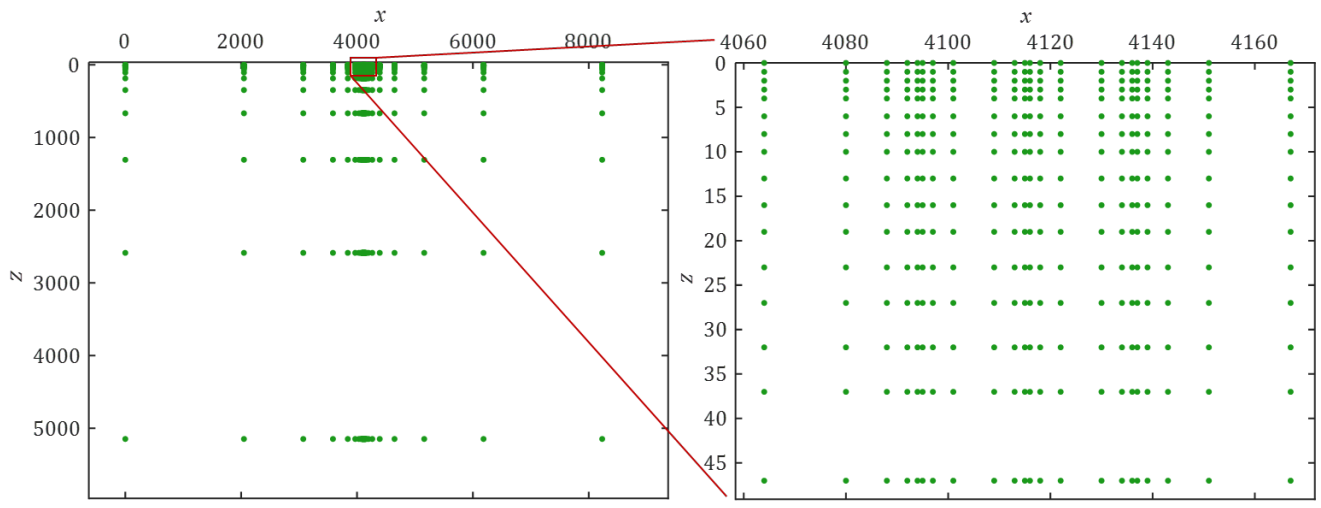


Рисунок 4 – Тестовая неравномерная вычислительная сетка (36 узлов вдоль оси *Ox*, 24 узла вдоль оси *Oz*)

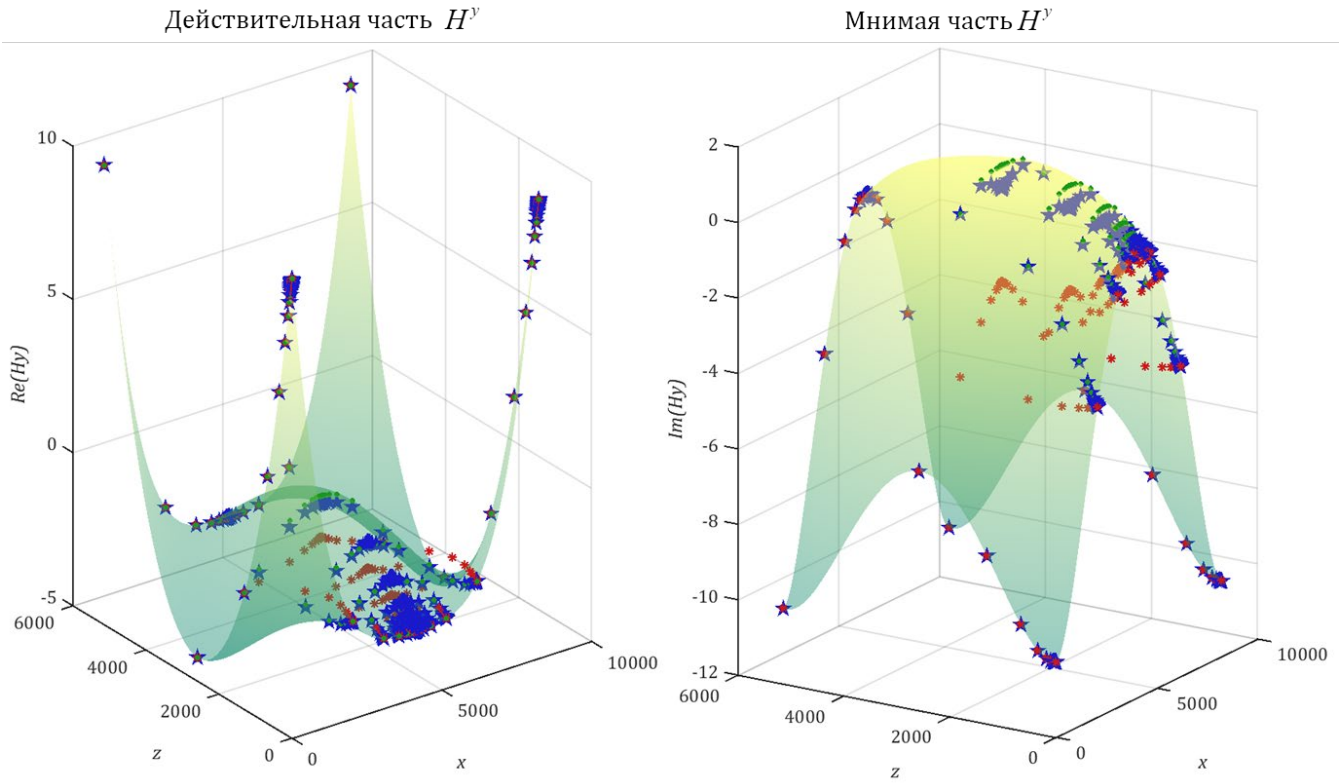


Рисунок 5 – Действительная и мнимая компоненты функции H^y для варианта сочетания параметров 6 из таблицы 6. Для решения СЛАУ использовался итерационный метод Якоби

Таблица 6 – Результаты решения задачи Дирихле для компоненты H^y на произвольной сетке, изображенной на рисунке 4

Разностная схема	Итерационный метод решения СЛАУ		Варианты сочетания параметров											
			1		2		3		4		5		6	
			ω=0.01						ω=100					
			$\delta = 10^{-5}$		$\delta = 10^{-6}$		$\delta = 10^{-7}$		$\delta = 10^{-5}$		$\delta = 10^{-6}$		$\delta = 10^{-7}$	
			rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}	rel_err, %	k_{fin}
ПВИИМ	метод Якоби		97.28	551	72.82	4980	9.54	33344	17.26	237	12.66	1009	4.69	7597
	метод релаксации	τ =0,01	100	328	99.99	6828	97.27	54992	29.62	84	29.13	1340	18	17867
		τ =0,25	99.62	622	91.65	5095	34.64	54972	25.32	157	16.44	1148	8.57	9479
		τ =0,5	98.43	564	81.66	4859	14.39	41660	18.34	209	13.86	1079	5.72	8502
		τ =0,75	96.59	537	67.92	5015	7.93	29851	17.8	156	11.86	998	4.14	7341
		τ =1 (метод Зейделя)	94.35	500	48.27	5501	4.74	21365	17.2	113	10.07	941	2.73	6390
		τ =1,01	94.26	497	47.53	5500	4.65	21074	17.2	111	10.01	936	2.68	6337
		τ =1,25	90.52	493	29.42	5390	2.84	14878	15.99	108	7.9	927	1.62	5290
		τ =1,5	83.37	485	16.01	4383	1.58	9576	14.12	103	6.03	855	0.88	3858
		τ =1,75	64.2	488	6.77	2704	0.67	4907	10.99	96	3.64	715	0.37	2207
		τ =1,99	$5.3\cdot10^{-2}$	907	$5.6\cdot10^{-3}$	1102	$5.8\cdot10^{-4}$	1370	0 (~1/NaN)	7735	0 (~1/NaN)	7735	0 (~1/NaN)	7735
МЦРА	метод Якоби		97.28	551	72.82	4980	9.54	33344	26.91	240	27.57	1009	30.7	14266
	метод релаксации	τ =0,01	100	328	99.99	6828	97.27	54992	29.62	84	29.14	1340	26.51	18128
		τ =0,25	99.62	622	91.65	5095	34.64	54972	25.19	158	27.19	1148	28.16	9748
		τ =0,5	98.43	564	81.66	4859	14.39	41660	26.15	213	27.47	1077	29.61	12339
		τ =0,75	96.59	537	67.92	5015	7.93	29851	26.68	158	27.64	998	31.05	14071
		τ =1 (метод Зейделя)	94.35	500	48.27	5501	4.74	21365	26.95	114	27.88	944	31.72	12022
		τ =1,01	94.26	497	47.53	5500	4.65	21074	26.96	113	27.89	939	31.74	11919
		τ =1,25	90.52	493	29.42	5390	2.84	14878	27.29	108	28.3	957	32.12	9312
		τ =1,5	83.37	485	16.01	4383	1.58	9576	27.45	102	29.3	1134	32.4	6498
		τ =1,75	64.2	488	6.77	2704	0.67	4907	27.73	96	31.31	1362	32.84	3594
		τ =1,99	$6.2\cdot10^{-2}$	907	$3.3\cdot10^{-2}$	1102	$3.3\cdot10^{-2}$	1370	33.2	707	33.17	990	33.16	1235

Выводы.

Таким образом, в данной работе рассмотрены и протестированы две разностные схемы для моделирования магнитной компоненты *H*-поляризованного электромагнитного поля: разностная схема, полученная с помощью проекционного варианта интегро-интерполяционного метода (проекционная разностная схема), и разностная схема, полученная с помощью метода центрально-разностной аппроксимации («классическая» разностная схема). Численные эксперименты выполнялись для тестовой задачи с известным аналитическим выражением для точного решения (случай однородного полупространства).

Результаты численных экспериментов показали, что приближенные решения, получаемые с использованием проекционной разностной схемы, не уступают в точности соответствующим приближенным решениям, получаемым с использованием «классической» разностной схемы. При этом, в случае больших значениий частоты, а также при использовании неравномерной вычислительной сетки преимущество проекционной разностной схемы очевидно.

Дополнительно выполнен сравнительный анализ эффективности итерационных методов, применяемых к решению систем линейных алгебраических уравнений для обеих разностных схем. Некоторые общие закономерности можно свести к следующим утверждениям: погрешности аппроксимации, получаемые при использовании метода Якоби, превышают соответствующие погрешности, получаемые с использованием методом Зейделя; удачно выбранный итерационный параметр метода релаксации τ позволяет значительно увеличивать точность получаемых приближенных решений; в большинстве рассмотренных тестов метод релаксации работает лучше метода Зейделя при использовании $\tau \in (1,2)$, за исключением ситуаций, когда возникает расхождение итерационного процесса.

Литература

1. Забинякова О.Б., Скляр С.Н. Численное моделирование магнитной компоненты *H*-поляризованного электромагнитного поля в двумерной среде. Часть 1: разностные схемы, тестовая задача // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Сб. материалов докл. XVII Междунар. конф. молодых ученых и студентов. Бишкек. 2025. С. 287-290.
2. Sklyar S.N. A projective version of the integral-interpolation method and it’s application for the discretization of the singular perturbation problems // Advanced Mathematics, Computation and Applications: Proceedings of the International Conference AMCA-95 / Eds. A.S. Alekseev, N.A. Bakhvalov. Novosibirsk: NCC Publisher. 1995. P. 380–385.
3. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит. 1989. 432 с.
4. Самарский А.А Теория разностных схем: Учеб. пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит. 1977. 656 с.

УДК 629.3.027.5

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ПЕРЕГРЕВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ШИН КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ И МЕТОДЫ ЕГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

Истаблаев Ф.Ф.[1], Атакулов Л.Н.[2]
fevzi_xkm@mail.ru, laziz218@mail.ru
[1] Навоийское отделение АН РУз, г. Навои, Узбекистан
[2] Навоийский государственный горно-технологический университет, г. Навои, Узбекистан

В работе рассматривается проблема перегрева крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов в условиях высоких нагрузок и повышенных температур. Анализируются основные факторы, влияющие на перегрев, включая давление в шинах, рабочую температуру и скорость движения. Представлены рекомендации производителей и возможные решения для снижения перегрева, такие как изменение конструкции шин, использование газовых смесей для накачивания шин и применение термоизоляционных покрытий. Приведен сравнительный анализ различных газов по теплопроводности и теплоемкости. Предложенные методы могут повысить безопасность эксплуатации карьерной техники и продлить срок службы шин.

Ключевые слова: карьерные автосамосвалы, перегрев шин, износ, давление в шинах, теплоотвод, газовые смеси, термоизоляция, эксплуатационная скорость.

Введение. При эксплуатации карьерных автосамосвалов в груженом состоянии в режимах длительных нагрузок, в условиях подъемов-спусков, а также при температуре окружающей среды выше 30℃, происходит чрезмерный перегрев крупногабаритных автошин. При перегреве автошин происходит чрезмерный износ, расслоение, снижение ресурса, последующее повреждение и преждевременный выход из строя шин. В отдельных случаях перегрев приводит к критическому разрушению шины, что сопровождается ее взрывом или возгоранием, влекущими за собой значительный материальный ущерб, длительные простои техники и существенные затраты на восстановление работоспособности автосамосвалов. В связи с этим поиск путей предотвращения перегрева крупногабаритных шин на рудниках является актуальной задачей.

Аппаратура и методика обработки. Ходимость крупногабаритных шин зависит от множества факторов, а для выявления наиболее значимых и влияющих на ходимость шин авторами статьи [1] было проведено априорное ранжирование факторов с экспертами из трех разных групп.

Первая группа состояла из научных сотрудников, которые выделили три основных, по их мнению, фактора, влияющих на износ. Это давление в шинах, рабочая температура в шинах и развал схождения. Вторая группа включала в себя водителей транспортных средств со стажем более 10 лет. Она также выделила три основных фактора, которые оказались такими же, как и у первой группы. Третья группа состояла из руководящего состава транспортных предприятий, их мнение также совпало с первыми двумя группами.

Следовательно, рабочая температура шин является одним из ключевых факторов, определяющих их износостойкость.

В статье [2] представлены результаты эксперимента, проведенного на шинах технологического транспорта, эксплуатируемых в карьере Амантай (Узбекистан). На основе изучения в течение года в карьере динамики изменения температуры окружающей среды определено ее влияние на интенсивность износа протектора шин. Установлено, что в жаркие дни (температура выше 30℃) работа шин за пределами возможностей отвода тепла неизбежно приводит к образованию внутренних отслоений, в основном, в плечевой зоне шин.

Согласно данным [3], температура крупногабаритных шин, изменяющаяся от +24°С до 105°С, зависит от таких параметров, как средняя эксплуатационная скорость движения автосамосвала и коэффициент использования грузоподъемности. Средняя эксплуатационная скорость, в свою очередь, варьировалась от 8 до 18 км/ч, а коэффициент использования грузоподъемности от 0,7 до 1,1. Зависимость температуры шины ($T_ш$) представлена на рис. 1-2.

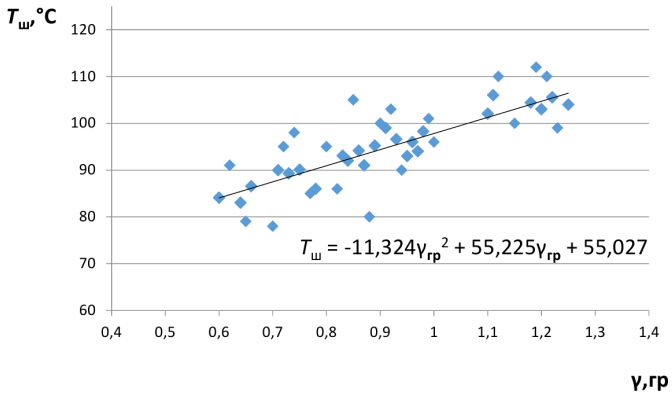


Рисунок 1 – Зависимость температуры шины $T_ш$ от коэффициента использования грузоподъемности $\gamma_{гр}$

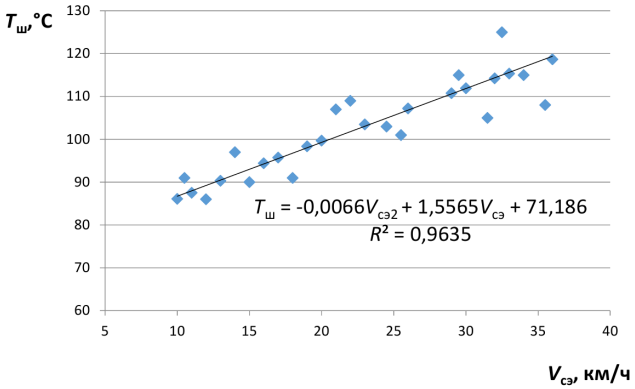


Рисунок 2 – Зависимость температуры шины $T_ш$ от скорости движения автосамосвала $V_{сэ}$

Для более детального понимания причин нагрева шин необходимо понимать, как она работает (рисунок 3) [4]:

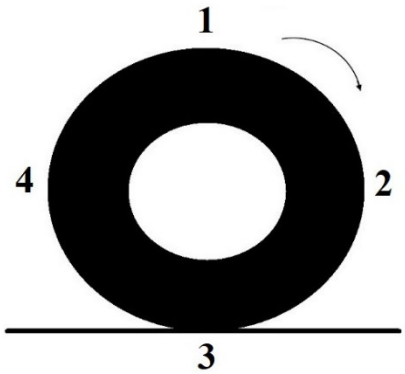


Рисунок 3 – Работа шины при вращении

На рисунке 3 в положении 1 – шина не нагружена. В положении 2 – по мере вращения, боковины изгибаются и начинается образование тепла внутри шины. В положении 3 – в пятне контакта происходит максимальное выделение тепла. В положении 4 – образование тепла постепенно уменьшается до возвращения в исходное положение (положение 1).

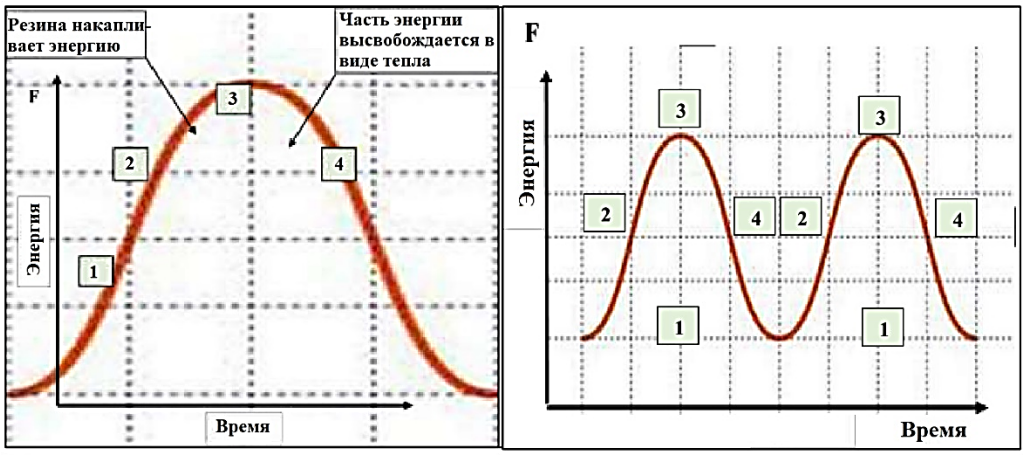


Рисунок 4 – Образование тепла при вращении шины

Повышение скорости движения автосамосвала увеличивает частоту циклов деформации шины, что приводит к ускоренному накоплению тепла и повышает вероятность термического разрушения конструкции (рисунок 4).

В результате эксплуатации шин при повышенных деформациях из-за езды со сниженным давлением, превышения нагрузки и скорости шина может стать взрывоопасной вследствие разрушения каркаса. При чрезмерном нагреве шин резиновая смесь входит в стадию пиролиза, что сопровождается выделением горючих газов и вследствие этого резким увеличением вероятности критического разрушения шины.

Результаты и обсуждение. Для предотвращения аварийных случаев, связанных с перегревом крупногабаритных шин, производители разработали свои рекомендации.

К примеру, специалисты ОАО «Белшина», отмечают [4], для эффективного использования шин, необходимо соблюдать предписанные нормативно-технической документацией значения параметров, влияющих на срок их службы. Средняя эксплуатационная скорость карьерных самосвалов за смену в зависимости от температуры окружающей среды не должна превышать значений, указанных в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость средней эксплуатационной скорости от температуры окружающей среды

Температура окружающей среды, °С	16 и ниже	20	25	30	35	38	40	45
Средняя эксплуатационная скорость, км/ч	19,0	18,5	17,5	17,0	16,5	16,2	16,0	15,0

Внутреннее давление в «холодной» шине — это нормативное давление, рекомендуемое ГОСТ, ТУ на шины, когда температура шины равна температуре окружающей среды. Величина внутреннего давления в «холодной» шине должна соответствовать рекомендациям завода производителя. Давление должно проверяться и регулироваться в «холодных» шинах, т.е. при температуре шины равной температуре окружающей среды. Во время эксплуатации давление в шине может повышаться (на ~20 % у диагональных шин и на ~15 % у радиальных) вследствие нагрева шины, что допускается конструкцией шины. Неверная величина давления в шине может привести к неравномерному износу или ее повреждению, поэтому необходимо всегда накачивать шины до рекомендуемого «холодного» давления кроме случаев, если существует разница между температурой окружающей среды на момент накачки шины и температурой окружающей среды на момент эксплуатации шины. В этом случае рекомендуется в зависимости от величины разницы температур Δ t (°С) производить корректировку внутреннего давления в шине на величину α (кПа) согласно таблице 2. При

этом если температура окружающей среды при эксплуатации шины ниже, то поправка принимается со знаком плюс «+», выше – со знаком минус «-».

Таблица 2 – Поправка давления в зависимости от разницы температур

Разность температур окружающей среды и гаража Δ t, °С	10	20	30	40	50	60
Поправка на номинальную величину давления α, кПа	20	30	50	70	80	100

Пример: Температура окружающей среды при накачке шины в боксе составляла +30°С и рекомендуемое давление составляло 600 кПа. Если температура окружающей среды +10°С, то давление в шине на «холодную» нужно накачивать в боксе не 600 кПа, а 630 кПа.

Производители также рекомендуют производить остановку карьерного автосамосвала, чтобы дать время шинам охладиться. Так, в [4] рекомендуют производить охлаждение шин путем остановки карьерного самосвала на 30 минут через каждые 80 км пути или 2-х часов непрерывной езды или на 1 час через каждые 4 часа транзита.

Однако в современных реалиях, когда простой карьерного автосамосвала до полного охлаждения шин экономически нецелесообразен, а в жарком засушливом климате может быть и малоэффективен, а увеличение парка автотранспортных средств для чередования работы самосвалов также чреват дополнительными расходами, требуется найти более эффективное решение данного вопроса.

В таком случае, на наш взгляд, возможны три варианта решения.

1-вариант решения – конструктивное совершенствование шин.

Здесь можно работать как с подбором оптимального состава резины шин, так и изменением отдельных конструктивных деталей, таких как боковина, протектор, доработка конструкции шины с увеличением теплоотвода от нее и т.д. К примеру, один из основных мировых производителей шин MICHELIN разработал X-Tweel, однако это не совсем шина, а полноценное колесо. Фишка в том, что конструкция безвоздушная. Это значит, что ее невозможно проколоть. Внешнее упругое кольцо с протектором шины X-Tweel крепится полиуретановыми мембранами к металлическому диску, который прикручивается болтами непосредственно к машине. Эти мембраны отлично амортизируют все неровности дороги, они очень прочные. Плоский и прочный слой под протектором обеспечивает полное прилегание протектора к дороге и, как следствие, лучшую передачу крутящего момента. Изношенный протектор можно восстановить холодным или горячим способом — и так несколько раз [5].

Тем не менее, здесь речь идет о безвоздушном колесе для легковых автомобилей и подобная конструкция маловероятно применима к крупногабаритным шинам. Для разработки таких шин требуются фундаментальные исследования, причем группы ученых из разных стран.

2-вариант решения – подбор оптимального состава газовой смеси для накачивания шин.

В этом случае необходимо сравнить газы и их смеси по следующим критериям:

а) теплопроводность – способность материальных тел проводить энергию (теплоту) от более нагретых частей тела к менее нагретым путем хаотического движения частиц тела (атомов, молекул, электронов и т. п.), т.е., в нашем случае - чем она ниже, тем лучше;

б) теплоемкость – физическая величина, определяющая количество теплоты, которое изменяет температуру термодинамической системы на 1 К, то есть в нашем случае, чем она выше, тем больше газ может поглотить тепла без значительного роста температуры;

в) стабильность давления, к примеру, у атмосферного воздуха из-за наличия в нем влаги и кислорода этот показатель умеренный;

г) стоимость – важнейший экономический показатель целесообразности тех или иных действий и решений.

Производителями [4] с целью исключения риска критического разрушения и возможного взрыва шины рекомендуется накачка шин азотом, который, являясь нейтральным и негорючим газом, не даст произойти возгоранию смеси газов внутри шины. Вследствие своих свойств азот предпочтителен для накачки и по другим причинам: более медленная диффузия через поры резины, чем у воздуха; препятствие окислению составных частей колеса (резины, обода).

С учетом того, что атмосферный воздух на 78% состоит из азота, его характеристики можно оптимизировать путем введения дополнительных компонентов, таких как инертные газы. К примеру, авторы патента №2010730830 на газовую смесь «DRIVE-MG» [6] утверждают, что это специально разработанная смесь инертных газов для закачки в газовые амортизационные системы и шины транспортных средств. Смесь полностью безопасна и не вступает в реакцию как с материалом шины и диска, так и со всеми другими веществами и газами. По сравнению с воздухом смесь имеет меньшую плотность, меньший термический коэффициент изменения давления, больший размер молекул. Кроме того, газовая смесь «DRIVE-MG» требует для своего сжатия меньшее, чем азот, количества энергии, поэтому обладает лучшими амортизационными свойствами, имеет меньший коэффициент термического расширения, поэтому давление в шинах более стабильно.

Однако данная смесь проверена на легковых автомобилях и не испытана на крупногабаритных шинах. К тому же, в ее состав входят дорогостоящие инертные газы, такие как неон (12-19 %) и гелий (3,1-5,4%). На наш взгляд, хорошей альтернативой в этом случае могут служить азот и аргон, а также их смеси, в том числе с воздухом. Сравнительный анализ с приблизительными расчетами приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Возможные варианты газов и их параметры при нормальных условиях

Газ или смесь	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, кДж/(кг·К)	Примечание
Воздух	0,026	1,006	Доступен, но содержит влагу, из-за чего расширяется при нагреве
Азот (N_2)	0,026	1,05	Стабильнее, чем воздух, не содержит влаги
Аргон (Ar)	0,0164	0,52	Низкая теплопроводность, но хуже теплоемкость
80% азот + 20% аргон	~0,022	~0,90	Оптимальный баланс между стоимостью и термостойкостью
60% азот + 40% аргон	~0,020	~0,80	Еще меньше нагрев, но дороже
80% воздух + 20% аргон	~0,023	~0,85	Дешевле, чем чистый аргон, но лучше, чем воздух

Таким образом, наиболее дешевый вариант – это чистый азот (N_2). Он лучше воздуха, не содержит влаги и не расширяется так сильно при нагреве. Лучший баланс цена/эффективность – смесь 80% азота + 20% аргона. Такая смесь снизит нагрев лучше, чем просто азот, но при этом обойдется не слишком дорого. Максимальное снижение нагрева шинах можно достичь при смеси 60% азота + 40% аргона, но здесь стоит просчитать экономическую целесообразность.

3-вариант решения – дополнительная термоизоляция внутренней поверхности шин.

Можно обработать внутреннюю поверхность шины специальным жидким раствором, чтобы уменьшить ее нагрев. Для снижения температуры шины необходимо выбрать материал с низкой теплопроводностью, высокой теплоемкостью и термостойкостью.

Кроме того, нужно учитывать, что шина находится в движении, а подбираемая смесь также должна обладать хорошими эластическими способностями и не отслаиваться в динамике.

Литературный обзор показал, что с этой задачей, возможно, могут справиться кремнийорганические компаунды, силиконовая или другая жидкая резины с термоизоляцией, но предстоит проведение экспериментальных исследований, в ходе которых необходимо выяснить, не будет ли отрицательного воздействия на саму шину, ведь молекулы в составе ее резины также нагреваются из-за трения в ходе движения автосамосвала.

Выводы. Перегрев крупногабаритных автошин карьерных самосвалов приводит к ускоренному износу, расслоению и сокращению их срока службы, а в крайних случаях — к взрыву и возгоранию. Основными факторами, влияющими на этот процесс, являются давление в шинах, рабочая температура и скорость движения, что требует тщательного контроля эксплуатационных параметров.

Производители рекомендуют регулировать давление в «холодных» шинах и адаптировать скоростной режим в зависимости от условий окружающей среды. Однако для снижения перегрева шин перспективными решениями могут быть конструктивные усовершенствования шин, использование газовых смесей с низкой теплопроводностью для их накачивания, а также применение термоизоляционных покрытий.

Теоретический анализ различных газов показал, что смесь 80% азота и 20% аргона обладает оптимальным балансом цены и эффективности, позволяя снизить нагрев по сравнению с воздухом, однако это требует практических подтверждений. Кроме того, термоизоляционные покрытия могут дополнительно уменьшить перегрев, однако их влияние на эластичность и прочность требует дальнейших исследований.

В целом, разработка экономически обоснованных решений по предотвращению перегрева шин остается актуальной задачей для повышения безопасности и надежности карьерной техники.

Литература

1. Абдулаев Э.К., Махараткин П.Н., Кошкина Е.П., Пумпур Е.В. Экспериментальные исследования зависимости влияния температуры шины на ее свойства // Горная Промышленность. 2019. № 3 (145). С. 98-99.
2. Юсупов У.Б., Мухитдинов А.А., Тухтамишов С.С. Влияние температуры окружающей среды на интенсивность износа шин // Miasto Przyszłości. 2023. Vol. 31. P. 293-299.
3. Абдулаев Э.К., Махараткин П.Н., Кужелев А.И., Атрощенко В.А. Априорное ранжирование и анализ факторов, влияющих на износ шин // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. Вып. 1 (57). С. 164-169.
4. Руководство по эксплуатации карьерных и индустриальных шин радиальной и диагональной конструкции. Белшина-2024. 49 с.
5. https://dprom.online/unsolution/i-snova-o-krupnogabaritnyh-shinah-nado-umet-krutitsya/
6. https://drive-mg.tb.ru/

УДК 629.3.027.5

ТЕПЛОВЫЕ РАЗРУШЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ШИН КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ: ПРИЧИНЫ, ПОСЛЕДСТВИЯ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Истаблаев Ф.Ф.[1], Хайдаров Ш.Б.[2]
fevzi_xkm@mail.ru, Shohida@mail.ru
[1] Навоийское отделение АН РУз, г. Навои, Узбекистан
[2] Навоийский государственный горно-технологический университет, г. Навои, Узбекистан

Эффективность эксплуатации карьерных самосвалов во многом определяется состоянием их шин, на износ которых значительное влияние оказывает температура. В работе рассматриваются причины перегрева крупногабаритных шин, приводящие к их усталостному и тепловому разрушению. Описаны методы контроля температуры и давления в шинах, включая тепловизионный анализ, расчетные методы и автоматизированные системы мониторинга. Приведены данные о влиянии давления на срок службы шин и экономические последствия отклонений от рекомендуемых параметров. Отмечена необходимость внедрения автоматических систем контроля, позволяющих повысить безопасность и сократить эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: карьерные автосамосвалы, крупногабаритные шины, температурный контроль, давление в шинах, тепловое разрушение, износ, адгезия корда и резины.

Введение. Важнейшими факторами эффективности использования карьерных самосвалов являются правильный выбор и техническое обслуживание шин. Шины являются одним из основных элементов ходовой части самосвала. Они должны обеспечивать высокую комфортабельность и безопасность езды, устойчивость и управляемость автомобиля, заданную грузоподъемность и необходимые тормозные характеристики. Характеристики шин влияют на расход топлива. Эксплуатационные затраты на шины составляют около 30% от суммы расходов на транспортирование горной массы самосвалами, поэтому увеличение пробега шин имеет важное значение для сокращения затрат.

Характерными причинами отказов пневматических шин карьерных автосамосвалов при эксплуатации являются: производственные дефекты, которые не были обнаружены при выходном контроле шин на заводе-изготовителе; механические повреждения – порезы, проколы, сколы грунтозацепов и другие; усталостные и тепловые разрушения – отслоение протектора, боковиц, расслоение корда и другие; естественный износ протектора.

К эксплуатационным факторам, оказывающим основное влияние на тепловое состояние шин, относятся: средняя за транспортный цикл радиальная нагрузка на шину; эксплуатационная скорость автосамосвала; температура окружающего воздуха; внутреннее давление воздуха в шине. Как известно, ходимость шин при прочих равных условиях зависит от нагрузки и степени соответствия ей значения давления воздуха в шине.

При резких перепадах температур происходит появление микротрещин, что приводит к быстрому высыханию шины и ускоренному износу. Для современных бескамерных шин критичной считается температура 120°С и выше: при более высоких температурах шина разрушается вследствие снижения прочности корда и его связи с резиной [1]. Соответственно контроль температуры внутри крупногабаритных шин является актуальной задачей.

Аппаратура и методика обработки. Из всех вышеперечисленных причин недоиспользования ресурса крупногабаритных шин управляемыми являются тепловые и усталостные разрушения, занимающие 15% от общего их числа (рисунок 1). Они происходят из-за перегрева шин. Поэтому при эксплуатации крупногабаритных шин необходимо соблюдать оптимальный их температурный диапазон [2]. Особенно это актуально в летнее

время, когда средняя ходимость крупногабаритных шин заметно снижается в результате тепловых разрушений [3].



Рисунок 1 – Причины списания шин на филиале «Кедровский угольный разрез» ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»

Во время работы внутренняя температура шин увеличивается под воздействием следующих факторов: деформация шины при работе (прогиб, трение между слоями и др.); работа агрегатов машины (нагрев редуктора, работа тормозов и др.).

Чрезмерный нагрев шины ведет к ее разрушению вследствие необратимых химических процессов в резине при высоких температурах, к расслоению ее конструктивных элементов.

На внутреннюю температуру шин влияют следующие факторы: нагрузка на шину; скорость движения транспорта; величина показателя ТКВЧ; внутреннее давление в шине; техническое состояние машин; манера управления (вождения) машиной; непрерывное время работы шины под нагрузкой (длина плеч перевозки, время загрузки и др.); состояние дорог.

Рабочая температура шины является основополагающим фактором, объясняющим причины многих отказов и повреждений. Поэтому важно соблюдать все рекомендации производителя шин, которые направлены на увеличение срока их службы и в конечном итоге на снижение затрат на содержание транспорта.

Результаты и обсуждение. Многочисленные исследования подтверждают значительное влияние температуры на усталостное разрушение шин. Высокая температура в массиве шины приводит к снижению прочности резины и адгезии с кордом. В местах ослабления адгезии возникает трение между резиной и кордом, что вызывает дополнительный нагрев и ускоренное разрушение шины. Такие разрушения часто называют тепловыми.

В исследовании [3] (при средней скорости автосамосвала 17 км/ч и средней температуре воздуха 20 °С) показана динамика нагрева «холодных» шин, в зависимости от времени эксплуатации в первые 10 ч работы, шины нагреваются до максимальных температурных значений, во время загрузки и разгрузки автосамосвала, крупногабаритные шины не успевают остыть, эксплуатация в таких условиях приводит к тепловому разрушению шины, что негативно сказывается на экономике предприятия открытой добычи. Таким образом, важным становится вопрос постоянного контроля температуры внутри крупногабаритной шины. Рассмотрим несколько вариантов.

1. Использование тепловизора.

Для изучения влияния температуры на свойства шин авторы [3] провели экспериментальные исследования, в которых измерялись температурные значения нагрева исследуемого образца и показатель твердости протектора шины, соотнесенные с этими значениями. Из-за сложности получения образцов крупногабаритных шин исследования проводились на резине легковых автомобилей. Температуру измеряли тепловизором, а твердость — игольчатым твердомером. При этом каждый выбранный образец нагревали до определенной температуры с помощью электропечи. Результаты подтвердили влияние температуры на твердость протектора, что

важно для изучения ходимости и работоспособности шин. Определение рабочего диапазона температур для крупногабаритных шин остается актуальной научной и практической задачей. В этом эксперименте, а также в экспериментальном исследовании тепловой нагруженности безопасных колес [4] для рассмотрения динамики разогрева шин в зависимости от времени движения авторы использовали тепловизоры. Однако эти исследования не проводились на крупногабаритных шинах карьерных автосамосвалов. Кроме того, тепловизор может использовать внешний наблюдатель, так как он предназначен для визуального наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности. Этот метод удобен для сбора данных, но не для постоянного контроля.

2. Расчет температуры через давление.

Определить температуру воздуха внутри шины можно путем вычислений на основе данных внутреннего давления в ней по следующей формуле, основанной на законах Бойля-Мариотта:

$$T_2 = (P_2 + 101{,}3) / (P_1 + 101{,}3) \bullet (T_1 + 273) - 273$$

где T_1 – температура воздуха в «холодной» шине, °С (равна температуре окружающей среды);
P_1 – давление воздуха в «холодной» шине, кПа (должно соответствовать рекомендуемому);
P_2 – давление воздуха в «теплой» шине, кПа (замеряется в процессе работы);
T_2 – температура воздуха в «теплой» шине, °С.

Так как рассчитанная температура воздуха внутри шины (T_2) ниже температуры резиновой смеси шины, то ее предельно допустимая величина должна быть не более 85 °С [5].

Если температура воздуха внутри шины превышает допустимое значение, транспортное средство необходимо остановить, выяснить и устранить причину повышения температуры (перегруз, превышение скорости и т.д.). То есть, в этом случае отправной точкой становится измерение давления внутри шины. Стоит отметить, давление в шинах самосвала - важнейший параметр. От него зависит не только комфорт при движении техники, но и длительность эксплуатации шин, элементов подвески, расход топлива, а также такой важный для безопасности движения параметр, как тормозной путь.

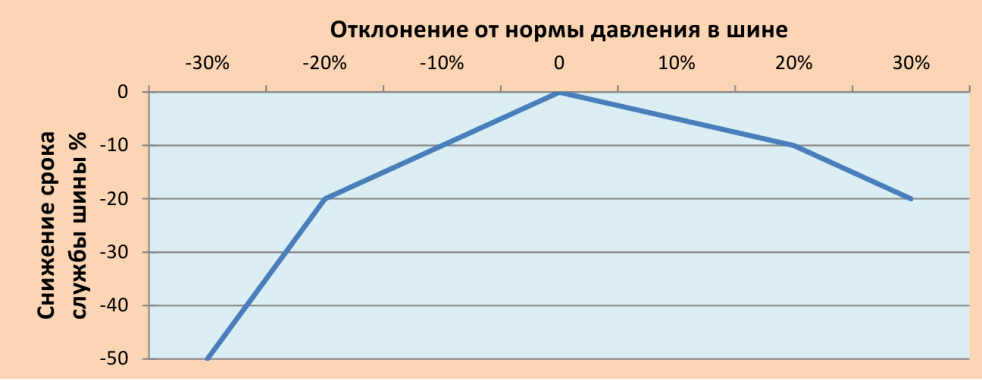


Рисунок 2 – Зависимость срока службы шины от внутреннего давления

Если давление в шине повышенное, то активно изнашивается центральная ее часть. Если пониженное — то плечевая. По данным [5, 6], когда давление отклоняется от нормы в любую сторону, срок службы крупногабаритной шины сокращается, особенно ощутимо при эксплуатации шины с пониженным давлением (рисунок 2). Кроме того, при низком давлении с разницей в 20% техника расходует топлива на 20% больше. Если сделать давление чересчур высоким, потребление снизится, но существует высокая вероятность выхода из строя осей, а их ремонт или замена — это снова затраты.

Контроль давления в шинах транспортных средств является необходимым условием их безопасной эксплуатации. На предприятиях регламентируется периодическая проверка давления, которая возлагается на водителя и осуществляется с использованием механического

манометра. Стандартная практика предполагает проведение измерений дважды в сутки — при смене экипажа и исключительно при полной остановке транспортного средства.

Однако на практике требования регламента не всегда выполняются. Водители могут не иметь физической возможности регулярно проверять давление из-за ограниченного доступа к вентилям, их технического состояния или неблагоприятных погодных условий. В осенне-зимний период возможно замерзание вентильного оборудования, что затрудняет контроль. Доступ к внутреннему колесу может быть ограничен, если его вентиль не выведен на внешнюю сторону [6]. Дополнительная проверка давления в рамках технического осмотра проводится с высокой точностью, однако периодичность таких осмотров не позволяет обеспечить постоянный контроль. Эффективный мониторинг давления необходим в режиме реального времени, особенно во время движения транспортного средства, так как основные нарушения целостности шин происходят именно в процессе эксплуатации, а не на стоянке. Измерение давления механическим манометром во время движения невозможно, что требует внедрения автоматизированных систем контроля.

3. Автоматический контроль давления и температуры.

В настоящее время существуют различные автоматические системы контроля давления воздуха и температуры в шинах, которые позволяют непрерывно контролировать их значения при работе самосвала как водителю, так и диспетчеру предприятия. ОАО «Белшина» рекомендует применение автоматических систем контроля давления воздуха и температуры в шинах, что позволит своевременно установить факт потери давления или перегрева шин и предотвратить их выход из эксплуатации.

Как работают такие системы? Система начинает считывать показания датчиков давления и температуры при включении зажигания автомобиля. Датчик определяет температуру и давление и через равные промежутки времени отсылает это значение в основной блок. Система сравнивает данные, полученные от датчиков, с интервалом значений, который задается производителем транспортного средства или пользователем. Если отклонений нет – система переходит в пассивный режим слежения, при этом на экране устройства отображаются текущие значения температуры и давления в каждом из колес. Если значения температуры или давления выходят за пределы допустимых – система подает звуковое или визуальное оповещение (на выбор пользователя), предупреждающее об опасности, а на экране устройства отображается, какие изменения и в каком колесе произошли.

По способу установки датчики давления и температуры в шинах разделяются на внутренние и внешние. Сенсор внутренних датчиков встраивается внутри самой шины, и такой процесс требует дополнительного шиномонтажа. Но при этом датчики надежно защищены от внешнего воздействия окружающей среды. Внешние датчики, в отличии от внутренних, монтируются на штатные ниппели и не требуют дополнительного шиномонтажа. Минус лишь в том, что датчики по причине своего расположения постоянно подвержены влиянию окружающей среды [7].

Выводы. Перегрев крупногабаритных шин карьерных самосвалов является одной из основных причин их разрушения, приводя к значительным эксплуатационным затратам. Высокая температура вызывает потерю прочности резины и ослабление связи корда с протектором, что ускоряет износ и снижает срок службы шин. Контроль температуры и давления в шинах является важным фактором, влияющим на безопасность и экономичность работы техники.

Рассмотренные методы мониторинга – от тепловизионного контроля до автоматизированных систем – позволяют снизить вероятность отказов шин за счет своевременного обнаружения перегрева. Автоматические системы контроля давления и температуры являются перспективным направлением, обеспечивающим оперативное реагирование на критические изменения параметров шин и повышающим надежность работы карьерного транспорта.

Литература

1. Ларионов В.С., Мирзаев Н.Н., Хасанов А.С., Санакулов Р.Б. Определение нормы пробегов шин большегрузных автосамосвалов, эксплуатируемых в условиях АО АГМК // Scientific foundations of raising the use of information technologies to a new level and modern problems of automation III-international scientific conference. November 20, 2024. Tashkent: Science and Innovation. 2024. С. 702-705.
2. Кульпин А.Г., Стенин Д.В., Кульпина Е.Е. Исследование потока отказов крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 6. С. 162-167.
3. Абдулаев Э.К., Махараткин П.Н., Кошкина Е.П., Пумпур Е.В. Экспериментальные исследования зависимости влияния температуры шины на ее свойства // Горная Промышленность. 2019. № 3 (145). С. 98-99.
4. Еремин Г.П., Карташов А.Б., Смирнов А.А. Экспериментальное исследование тепловой нагруженности безопасных колес // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 4 (661). С. 49-56.
5. Руководство по эксплуатации карьерных и индустриальных шин радиальной и диагональной конструкции. Белшина-2024. 49 с.
6. https://tyreman.ru/healthytires
7. https://wialon.com/ru/blog/kontrol-davlenia-v-sinah-pri-pomosi-wialon

УДК 519.6

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАЗРЫВНОГО ГАЛЁРКИНА НА НЕКОНФОРМНЫХ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ СЕТКАХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТЕФАНА

Кислин А.В.
kislin.art@yandex.ru
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

В работе представлена вариационная постановка метода Разрывного Галёркина для решения задачи Стефана. На её основе был разработан программный комплекс, моделирующий процесс фазового перехода различных веществ при заданных условиях с помощью метода Разрывного Галёркина в форме внутреннего штрафа на конформных и неконформных конечноэлементных сетках. С помощью разработанного программного обеспечения были проведены численные эксперименты на модельных задачах с различными видами разбиений расчётной области. Исходя из полученных результатов были сделаны выводы и предложения о использовании метода Разрывного Галёркина на неконформных конечноэлементных сетках для решения задачи о фазовом переходе.

Ключевые слова: задача Стефана, метод разрывного Галёркина, конформное и неконформное конечноэлементное разбиение, фазовый переход, метод конечных элементов

Введение. Задача Стефана описывает процессы фазового перехода различных веществ, изменения их агрегатного состояния [1]. Решение данной задачи может быть особенно актуально при работе с различными композитными материалами на строительных объектах, где необходимо учитывать химико-физические свойства вещества при изменении температурных условий окружающей среды. Однако аналитическое решение подобных задач на данный момент выведено только для крайне ограниченного числа одномерных и двумерных случаев, поэтому для определения температурного поля и соответственно агрегатного состояния материала в определённый момент времени и точке трёхмерного пространства обычно используются методы численного моделирования [2]. Наиболее распространённым из них является метод конечных элементов в слабой постановке Галёркина (Continious Galerkin method - CG). Но при решении задачи Стефана с использованием данного математического аппарата возникает проблема разбиения конечноэлементной сетки. Вблизи границы раздела фаз разбиение сетки должно быть достаточно мелким и из-за конформности CG-метода, локальное дробление сетки приводит к глобальному, что отражается на вычислительных затратах и затратах по памяти. В качестве решения данной проблемы можно использовать для моделирования процесса фазового перехода неконформный метод Разрывного Галёркина (Discountinious Galerkin method - DG), функциональная неконформность которого позволяет работать на неконформных сетках с локальным дроблением, не влияющим на дробление всей расчётной области [3].

Математическая модель задачи Стефана. В рамках данной работы будет рассмотрена двухфазная задача Стефана [4]. Её можно представить в виде параболической краевой задачи с основным уравнением в виде:

$$c_\varphi p_\varphi \frac{\partial T_\varphi}{\partial t} + f = div\left(\lambda_\varphi grad T_\varphi\right), \quad (1)$$

где $\varphi -$ индекс, определяющий в уравнении фазовое состояния состояние параметра, T_φ – температура вещества, f – функция, описывающая источники тепла в расчётной области, λ_φ – теплопроводность вещества, $c_\varphi -$ теплоёмкость вещества, $p_\varphi -$ плотность вещества.

К краевым условиям данной задачи можно отнести:

$$T_\varphi\big|_{S_D} = T_D, \quad (2)$$

$$\lambda_\varphi \frac{\partial T_\varphi}{\partial n}\Big|_{S_N} = f_N \quad (3)$$

где S_D– поверхность с заданным на ней краевым условием Дирихле, S_N – поверхность с заданным на ней краевым условием Неймана, n – внешняя нормаль к поверхности s_N, а T_D и f_N функции задающие краевые условия Дирихле и Неймана соответственно.

К вышеуказанным краевым условиям так же добавляются условия на границе раздела фаз P:

1. условие равенства температур:

$$T_{\varphi_1}\big|_{P+} = T_{\varphi_2}\big|_{P-} = T_{trans}, \quad (4)$$

где T_{trans} – температура фазового перехода.

2. условие Стефана

$$\lambda_{\varphi_1} \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{P+} - \lambda_{\varphi_2} \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{P-} = Qp_{\varphi_1} \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (5)$$

где Q - скрытая теплота фазового превращения

Поскольку рассматриваемая краевая задача является параболической то для её решения так же необходимо задать начальное условие:

$$T^0{}_\varphi = T_\varphi(x, y, z, t_0), \quad (6)$$

где t_0 – начальный момент времени

Численная аппроксимация задачи Стефана при помощи метода Разрывного Галёркина. Аппроксимируем уравнение (1) по времени с помощью двухслойной схемы:

$$div\left(\lambda_\varphi grad T_\varphi^i\right) - \frac{c_\varphi p_\varphi}{\Delta t} T_\varphi^i = f - \frac{c_\varphi p_\varphi}{\Delta t} T_\varphi^{i-1}, \quad (7)$$

где T_φ^i – значение температуры вещества на интересующем временном слое (искомая функция) T_φ^{i-1} – значение температуры вещества на предыдущем временном слое. Таким образом, на конкретном временном слое задача становиться эллиптической.

Переходя к вариационной постановке Разрывного Галёркина для полученной задачи [5], необходимо отметить, что неконформность данного метода реализуется за счёт отсутствия общих степеней свободы у конечных элементов, т.е. каждый элемент обладает своим собственным набором базисных функций. В таком случае закономерно возникает вопрос об определении решения на общих гранях конечных элементов, где определены наборы базисных функций сразу нескольких элементов. Для этой цели введём понятия оператора среднего $\{f\}$ и оператора скачка $[f]$, называемых также лифтинг-операторами.

Пусть рассматриваемая расчётная область Ω имеет некоторое разбиение на конечные элементы $\tau_h = \{\Omega_K\}$. Обозначим $K(\Omega) = \prod_{\Omega_K \in \tau_h} L^2(\Omega_K)$- функциональное пространство, натянутое на конечные элементы, $\Gamma = \bigcup_{\Omega_K \in \tau_h} \partial\Omega_K$ – объединение граней всех конечных элементов, $\Gamma^{in} = \Gamma \setminus \partial\Omega$. – объединение общих граней конечных элементов Тогда если $f \in K(\Omega)$, то лифтинг-операторы определяются следующим образом:

$$\{f\} = \begin{cases} \frac{1}{2}\left(f_i + f_j\right) \text{ на } \left(\partial\Omega_i \cap \partial\Omega_j\right) \notin \partial\Omega, \\ f_i \text{ на } \partial\Omega_i \in \partial\Omega. \end{cases} \quad (8)$$

$$[\![f]\!] = \begin{cases} f_i n_i + f_i n_j \text{ на } \left(\partial\Omega_i \cap \partial\Omega_j\right) \in \Gamma^{in}, \\ f_i n_i \text{ на } \partial\Omega_i \cap \partial\Omega. \end{cases} \quad (9)$$

где $f_i = f|_{\partial\Omega_i}{}^-$, n_i – внешняя нормаль к грани $\partial\Omega_i$.

Если $f \in [K(\Omega)]^3$, то лифтинг операторы определяются как:

$$\{f\} = \begin{cases} \frac{1}{2}\left(f_i + f_j\right) \text{ на } \left(\partial\Omega_i \cap \partial\Omega_j\right) \notin \partial\Omega, \\ f_i \text{ на } \partial\Omega_i \in \partial\Omega. \end{cases} \quad (10)$$

$$[\![f]\!] = \begin{cases} f_i \cdot n_i + f_i \cdot n_j \text{ на } \left(\partial\Omega_i \cap \partial\Omega_j\right) \in \Gamma^{in}, \\ f_i \cdot n_i \text{ на } \partial\Omega_i \cap \partial\Omega. \end{cases} \quad (11)$$

Используя лифтинг-операторы вариационную постановку для решения задачи Стефана с помощью метода Разрывного Галёркина можно записать в следующем виде:

$$\int_{\Omega} \lambda_{\varphi}(\nabla_h u_h \cdot \nabla_h v)d\Omega + \int_{\Gamma} \lambda_{\varphi}(\llbracket \tilde{u} - u_h \rrbracket \cdot \{\nabla_h v\} - \llbracket v \rrbracket \{\tilde{\sigma}\})ds +$$
$$\int_{\Gamma^{in}} \lambda_{\varphi}(\{\tilde{u} - u_h\} \cdot \llbracket \nabla_h v \rrbracket - \llbracket \tilde{\sigma} \rrbracket \{\tilde{u}\})ds + \int_{\Omega} \frac{c_{\varphi} p_{\varphi}}{\Delta t} u_h v d\Omega = \int_{\Omega} f v d\Omega - \int_{\Omega} \frac{c_{\varphi} p_{\varphi}}{\Delta t} {u_h}^{prev} v d\Omega \quad (12)$$

где u_h- искомое конечноэлементное решение, v – тестовая функция, $\tilde{u}$ – некоторая аппроксимация решения, $\tilde{\sigma}$ – некоторая аппроксимация градиента решения, ${u_h}^{prev}$ – решение на предыдущем временном слое ∇_h - дискретный аналог оператора ∇.

В соотношении (11) следует выделить численные аппроксимации $\tilde{u}$ и $\tilde{\sigma}$, поскольку их вид будет определять форму используемого метода Разрывного Галёркина. В рамках данной работы метод Разрывного Галёркина рассматривается в форме внутреннего штрафа [6] с аппроксимациями в виде

$$\tilde{u} = \begin{cases} \{u_h\} \text{ на } \Gamma \backslash S_D, \\ g_D \text{ на } S_D; \end{cases} \quad (12)$$

$$\tilde{\sigma} = \begin{cases} \{\nabla_h u_h\} - \alpha \llbracket u_h \rrbracket \text{ на } \Gamma^{in}, \\ \{\nabla_h u_h\} - \alpha \llbracket u_h - T_D \rrbracket \text{на } S_D, \\ \frac{1}{\lambda} f_N \vec{n} \text{ на } S_N, \end{cases} \quad (13)$$

где α – некоторый параметр штрафа, определяемый эмпирически.

По виду выражений (12) – (13) можно сказать, что за их счёт учитываются условия Дирихле и Неймана. Условие равенства температур на границе раздела фаз можно так же рассматривать как условие Дирихле. Условие же Стефана можно использовать для определения положения фронта на следующем временном слое. Аппроксимируем выражение (5) по времени с помощью двухслойной разностной схемы и выразим из него положение фронта на следующем временном слое:

$$P(t_{i+1}) = P(t_i) + \frac{\Delta t}{Q p_{\varphi_1}} (\lambda_{\varphi_1} \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{P+} - \lambda_{\varphi_2} \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{P-}), \quad (7)$$

Результаты численных экспериментов. Для решения задачи Стефана было разработано программное обеспечение с использованием построителя конечноэлементных сеток GMSH. Программный комплекс был верифицирован на модельных эллиптических и параболических задачах с использованием как конформных, так и неконформных конечноэлементных сеток.

Вместе с вышесказанным были проведены численные эксперименты для оценки влияния параметра штрафа на сходимость конечноэлементной СЛАУ при аппроксимации линейной функции представимой в выбранном базисе для решения задачи. Результаты приведены в табл.1.

Таблица 1 – Сравнение решения эллиптической задачи на конформной и неконформной сетках с различными параметрами штрафа

Вид сетки	Конформная	Неконформная				
		$\alpha = 0$	$\alpha = 1$	$\alpha = 10$	$\alpha = 100$	$\alpha = 1000$
Количество элементов	200	124				
Количество итераций для решения СЛАУ методом локально-оптимальной схемы	1252	59989	200610	471	644	1291
Средняя относительная ошибка в узлах	7.87E-13	2.69E-11	8.43E-11	1.00E-11	1.21E-11	8.67E-11

В таблице 1 можно увидеть, что неконформное разбиение, несмотря на меньшее количество элементов без использования коэффициента штрафа негативно сказывается на сходимости решателя СЛАУ. Однако по той же таблице мы можем сказать, что, изменяя

параметр штрафа, мы можем добиться ускорения решения СЛАУ с меньшим количеством конечных элементов и незначительной потерей в точности.

В качестве задачи Стефана для решения была выбрана задача о таянье льда. Параметры данной задачи представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры для расчёта задачи Стефана о таянье льда

Фаза	$\lambda_\varphi, \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}}$	$p_\varphi, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_\varphi, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}$	$Q, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Вода	580	1000	4187	340000
Лёд	2230	900	2060	

В качестве расчётной области был рассмотрен параллелепипед $\Omega = [0,2] \times [0,1] \times [0,1]$. Данный параллелепипед был разделён на две подобласти, отвечающим фазе воды ($x \in [0,1]$) и фазе льда ($x \in [1,2]$). Плоскость $x = 1$ была задана в качестве фронта на начальном временной слое и на нём было установлено условие равенства температур $T = 273.15$. На гранях параллелепипеда, соответствующих плоскостям $x = 0$, $x = 2$ было установлено условие Дирихле: $T = 293.15$ и $T = 271.15$ соответственно. Остальные грани отвечали однородному условию Неймана. Начальное условие было представлено двумя функциями на двух описанных подобластях: $T = 273.15 + 20(1 - x)$ на $x \in [0,1]$ (подобласть, отвечающая фазе воды) и $T = 273.15 - 2(x - 1)$ на $x \in [1,2]$ (подобласть, отвечающая фазе льда). Решение задачи проводилось на сетках с конформным и неконформным разбиениями. Вид этих разбиений представлен на рисунках 1-2.

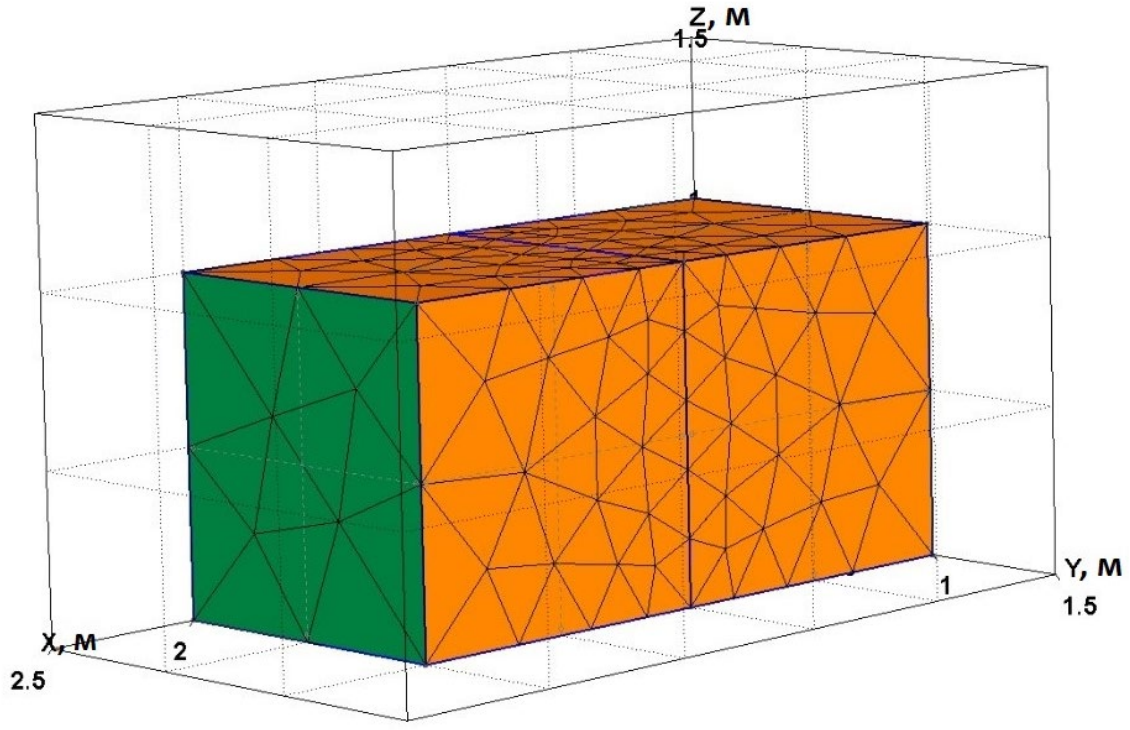


Рисунок 1 – Конформное разбиение расчётной области для решения задачи Стефана

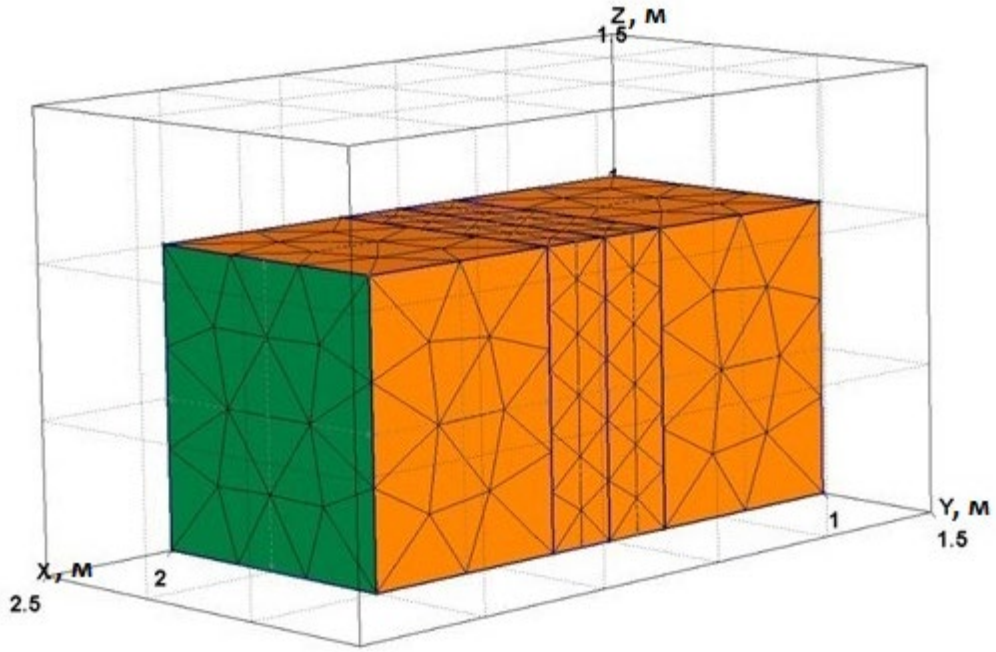


Рисунок 2 – Неконформное разбиение расчётной области для решения задачи Стефана

По результатам эксперимента за 5000 с граница раздела двух сред в обоих случаях сдвинулась примерно на 0.2 м., что говорит о применимости использования неконформных конечноэлементных сеток для решения задачи Стефана методом разрывного Галёркина в форме внутреннего штрафа.

Выводы. Исходя из проведённых численных экспериментов с помощью разработанного программного обеспечения можно заключить что метод разрывного Галёркина в форме внутреннего штрафа для решения задачи Стефана на неконформных конечноэлементных сетках является приемлемым. Однако стоит учитывать, что неконформность конечноэлементного разбиения, позволяя сократить количество конечных элементов, может негативно сказаться на сходимости метода решения конечноэлементной СЛАУ. Для решения этой проблемы можно воспользоваться коэффициентом штрафа, варьируя его и смотря на скорость сходимости решения СЛАУ.

Литература

1. Kumar A., Rajeev. A Stefan problem with moving phase change material, variable thermal conductivity and periodic boundary condition // Appl. Math. Comput. 2020. Vol. 386. 125490. https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125490.
2. Бородин С.Л. Численные методы решения задачи Стефана // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1. № 3 (3). С. 164-175.
3. Марков С.И. Иткина Н.Б. Применение разрывного метода Галёркина для решения двухфазной задачи Стефана // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2018. Т. 2. № 1. С. 79-83.
4. Алипова К.А., Богословский Н.Н. Задача Стефана для уравнения теплопроводности // Все грани математики и механики. Сб. ст. Всерос. молодежной науч. конф. / Под ред. А.В. Старченко. Томск: Издат. Дом Томского гос. ун-та. 2016. С. 92-99.
5. Bala M., Hossain S. Discontinuous Galerkin Method of the Second Order Parabolic Differential Equation // J. Appl. Math. Comput. 2024. Vol. 8 (3). P. 202–209. https://doi.org/10.26855/jamc.2024.09.002.
6. Li J., Yuan W., Cao L. Difference interior penalty discontinuous Galerkin method for the 3D elliptic equation // Results Appl. Math. 2024. Vol. 22. https://doi.org/10.1016/j.rinam.2024.100443.

УДК 622.271.5

КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ПОДЪЕМА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ СО ДНА КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА

Кисляков В.Е., Цимбалюк Н.А., Карпов Р.В., Катышев П.В.
kirovroman243@gmail.com
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Работа посвящена актуальной проблеме разработки морских месторождений полезных ископаемых, а именно технологиям подъёма полезного ископаемого со дна континентального шельфа. В условиях истощения континентальных источников минерального сырья освоение морских ресурсов становится всё более важным и востребованным, что обуславливает необходимость развития и совершенствования существующих методов и разработки новых, эффективных технологий добычи. Представленный обзор охватывает широкий спектр технологий, начиная с хорошо известных и проверенных временем решений и заканчивая самыми современными разработками, находящимися на стадии внедрения или экспериментальных исследований. В процессе анализа была выяснена возможность дополнения существующих систематизации технологий подводной добычи по способу подъема полезного ископаемого со дна акваторий. В частности, отмечается значительный рост количества патентов, связанных с использованием грунтоледяных тел для добычи подводных твердых полезных ископаемых. Предложенная автором систематизация основана на двух ключевых критериях: цикличности процесса подъема и конструктивных особенностях подъемных устройств.

Ключевые слова: подводная добыча, континентальный шельф, подъем полезного ископаемого, грунтоледяные тела.

Введение. Актуальность исследования обусловлена острой необходимостью освоения минерально-сырьевых богатств шельфовой зоны России, что закреплено Федеральным законом № 187-ФЗ «О континентальном шельфе Российской Федерации» [1]. Этот закон формирует правовую базу для использования ресурсов шельфа, критически важную для энергетической независимости страны. Важность работы подтверждается и распоряжениями Правительства РФ. Стратегия развития морской деятельности РФ до 2030 года (Распоряжение № 1930-р [2]) подчеркивает важность комплексного подхода к использованию морских ресурсов, включающего устойчивое развитие и охрану морской среды. Концепция федеральной целевой программы «Мировой океан» на 2016–2031 годы (Распоряжение № 1143-р [3]) акцентирует внимание на важности освоения морского шельфа РФ, его минерально-сырьевой базы и существующих технологиях разработки. В рамках данной работы были рассмотрены существующие и известные технологии для разработки морских месторождений твердых полезных ископаемых и предложена систематизация способов добычи с использованием грунтоледяных тел на основе их цикличности и конструктивных особенностей.

Аппаратура и методика обработки. Настоящая работа выполнена на основе теоретического метода исследования, а именно – анализа. В качестве основных источников информации использовались научные статьи и патенты изобретений на способы и устройства.

Технологии подъема. Технология подводной добычи – это совокупность взаимосвязанных процессов производства горных работ под водой, учитывающих горно-геологические и горнотехнические условия. Технические решения по разработке твердых полезных ископаемых можно представить в виде схемы характеризующей средства подводной добычи по принципу подъема полезного ископаемого (рисунок 1).



Рисунок 1 – Способы подъема полезного ископаемого со дна континентального шельфа [4]

В качестве существующих и уже известных способов добычи твердых полезных ископаемых с морского дна можно выделить следующие.

Грейферные снаряды. Известно изобретение для отработки кобальт-марганцевых корок в условиях сложно пересеченной поверхности морского дна. Так в патенте RU №203596 [5] представлена конструкция, обеспечивающая возможность предварительного разрушения и отделения от породы залегания, их отбор и надежный захват в условиях перемещения по сложно пересеченной поверхности морского дна. Достигается это тем, что захваты выполнены в виде грейферов с челюстями и гидроцилиндрами их перемещения шарнирно закрепленными на цилиндрическом корпусе, выполненном с проушиной для соединения со свободными концами шарнирно-рычажных механизмов, внутри которого соосно размещены ударная пика и поршень-боек, образующий с цилиндрическим корпусом камеры прямого и обратного хода. Опускаясь на дно приемный бункер, фиксируется на поверхности при помощи гидроцилиндров рычажных механизмов находящийся сзади. Спереди гидроцилиндры опускают грейферы на поверхность железомарганцевых корок. В результате работы ударной пики происходит разрушение корок и сбор их в грейферы. Грейферы же в свою очередь переносят корки в приемный бункер.

Драги. На основе принципа работы многоковшовой канатно-цепной драги был разработан комплекс для добычи конкреций с морского дна RU №2358105 [6]. Данное изобретение повышает производительность устройства по добыче конкреций со дна моря при увеличенной глубине залегания. Достигается это тем, что присутствует два электродвигателя синхронизированных между собой и управляемых по радио. Комплекс работает следующим образом. Два судна, между которыми натянута пластинчатая цепь с ковшами, устанавливаются на поверхности моря при помощи якорей. После запуска электродвигателей на обоих суднах цепь приводится в движение и вместе с тем происходит процесс наполнения ковшей при прохождении провисшей по морскому дну пластинчатой цепи. Благодаря смещению оси крепления ковша относительно центра тяжести ковши при подъеме становятся в вертикальное положение. Криволинейная направляющая помогает разгрузить породу в наклонный перфорированный лоток. В нем происходит процесс

разделения конкреций от шлама. И далее конкреции поступают в приемный бункер. Движение забоя происходит по дуге при перемещении одного из двух плавсредств.

Скреперы, экскаваторы и бульдозеры. Россыпи, залегающие на глубине 4-7 м. подвержены сильному волновому воздействию и суточному колебанию уровня вод. Эффективная работа плавучих устройств осложнена из-за осадка судов. Для этого были разработаны аппараты с возможностью работы под водой. Например, подводные экскаваторы, скреперы и бульдозеры. В данном направлении имеются практические наработки у компаний Komatsu и Hitachi, занимающихся изготовлением горнотранспортного оборудования. Кроме этого, выделяется большое количество теоретических наработок в виде патентов на подводные экскаваторы в КНР [7].

Земснаряд. Известен способ разрушения прочных высокоглинистых песков россыпных месторождений и дезинтеграции их гидросмесей при всасывании земснарядом [8]. Основным преимуществом которого является повышение эффективности разрушения прочных высокоглинистых песков. Достигается это следующим образом. На земснаряде установлен рыхлитель, который управляется автоматически в зависимости от крепости пород за счет использования датчиков. Наличие гидродинамических отражателе-кавитаторов с ребрами жесткости усиливает дезинтеграцию твердой составляющей гидросмеси. Работает устройство следующим образом. При опускании земснаряда производится анализ пород, в результате чего выбираются оптимальные параметры рыхления пород. При работе рыхлителя породы разрушаются. Они попадают в экран, состоящий из трех частей, которые регулируются. В результате обеспечивается попадание гидросмеси с кусочками твердой составляющей максимального размера. Наличие гидродинамических отражателей-кавитаторов с ребрами жесткости помогают дезинтегрировать твердую составляющую, создавая резонансные акустические явления в гидропотоке.

Эрлифтные снаряды. Известен скважинный эрлифтный снаряд для гидродобычи полезных ископаемых RU №2327041 [9]. Результатом изобретения является повышение эффективности отработки мерзлых россыпей за счет раздельной подачи теплой воды для оттайки и холодной для взвешивания осевших оттаявших частиц. Решается это путем внедрения дополнительной трубы с подогретой водой, которая обшита теплоизоляцией для снижения нагрузки на устройство подогрева воды. Работает это следующим образом. Бурится скважина, в которую входит нижняя секция установки. Последовательно монтируют следующие, которые жестко закреплены резьбовым соединением. Посредством вставок жестко фиксируются пульповодная, воздухоподающая, водоподающая и дополнительная трубы. Герметизация труб осуществляется посредством резиновых колец и фиксирующего элемента. Одновременно подается подогретая вода, выходящая из бокового отверстия на стенку скважины для размораживания пород, сжатый воздух, попадающий в пульповодную трубу через форсунку, и холодная вода для образования струи, взвешивающей осевший песок ниже трубы. В результате образования воздушно-водяной смеси происходит подъем пульпы по пульповоду.

Эжекторные снаряды (гидроэлеваторы). Известно устройство эжектора SU № 285602 [10]. Техническим результатом является предохранение рабочего колеса насоса от износа из-за абразивного действия нагнетаемой воды в гидроэлеваторах, включающих циклонную приемную камеру и тангенциально расположенные по отношению к ней всасывающие патрубки для подвода пульпы. Достигается это путем расположения в приемной камере двух труб одна в одной, соединенные с рабочим насосом, всасывающим осветленную воду через наружную трубу и нагнетающим ее обратно под давлением через внутреннюю трубу в камеру смешения. Устройство работает следующим образом. Сначала заливают насос и камеру. Пульпа, проходя через патрубок в приемную камеру, приобретает вращательное движение. Из-за этого происходит разделение пульпы. Твердые частицы пульпы перемещаются по периферийной винтовой линии и сосредоточиваются в конической части камеры, а осветленная вода-в середине. Осветленная вода через трубу всасывается насосом и затем по трубе нагнетается обратно в камеру в виде рабочего потока. Выходящая

из насадки с большой скоростью струя жидкости создает в приемной камере дополнительное разрежение и увлекает за собой твердые частицы пульпы, осуществляя транспортирование.

Частично-автономный подъем полезного ископаемого с помощью электромагнитных свойств. Примером устройства с переносом породы, используя их магнитные свойства, может служить драга, разработанная в СССР [11]. Драга, предназначенная для добычи магнитных россыпей, представляет собой сложную инженерную систему, смонтированную на плавучем судне. Её ключевой элемент – магнитный конвейер, представляющий собой резиновую ленту, армированную магнитотвердым порошком.

Частично-автономный подъем полезного ископаемого с помощью роботов. Известен комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых RU № 2788227 [12]. Комплекс содержит базовое судно и 3 кабель троса для управления захватным устройством, грузовым бункером-накопителем полезного ископаемого и добычным агрегатом. Комплекс включает захватное устройство, грузовой бункер-накопитель полезного ископаемого и добычной агрегат. Техническим результатом является создание автономного комплекса добычи полезного ископаемого. Предлагаемый комплекс работает следующим образом. С базового судна опускают бункер-накопитель, бокс ангар и распределительное устройство при помощи захватного устройства. В процессе опускания перечисленных устройств одновременно происходит разматывание кабелей для связи с ними. Роботы отбойщики отсоединяясь от распределительного устройства, шагают к месту отбойки, одновременно разматывая кабели. По кабелям передается видео, информация телеметрии и сигналы управления всеми системами комплекса. Из бокса ангара вылетают роботы сборщики, работающие от аккумулятора и подзаряжаемые в боксе. Оператор, фиксируя положение каждого робота отбойщика, передает сигнал к началу работы. После отбойки породы поступает сигнал к началу работы роботов сборщиков. Их задача собрать породу наполняя отсек коллектора внутри себя. После заполнения роботы сборщики перегружают породу в бункер-накопитель. Полностью заполненный бункер поднимается на судно при помощи захватного устройства. После опускания цикл повторяется. Стоит отметить, что роботы сборщики оснащены системой «технического зрения», благодаря которому они могут работать автономно. При разряде аккумуляторной батареи они возвращаются в бокс для подзарядки.

Автономный подъем полезного ископаемого с помощью газовых и жидкостных наполнителей. Известно устройство автономной добычи полезных ископаемых со дна акваторий RU №2822856 [13]. Техническим результатом является увеличение эффективности добычи полезных ископаемых за счет снижение энергозатрат на их проведение. Работает следующим образом. Устройство спускают с судна в транспортном положении. При помощи автоматических команд происходит перевод в рабочее положение, запуск процесса зачерпывания и всплытия. В данном изобретении для снижения металлоемкости используют полипропиленовую ткань в качестве эластичного материала стенок грейферного ковша. Металлоемкость ниже, а значит, процесс всплытия происходит быстрее.

Одним из перспективных направлений добычи твердых полезных ископаемых, расположенных на дне арктического шельфа можно выделить способы с использованием грунтоледяных тел для организации процесса всплытия полезного ископаемого со дна акватории к водной поверхности.

Подъем при помощи грунтоледяных тел.

Известна установка для добычи полезных ископаемых со дна акватории RU №2797884 [14]. Данная установка предусматривает повышение эффективности добычи полезных ископаемых со дна акватории. Установка работает следующим образом. Плавучее средство с помощью троса опускает установку на дно, одновременно разматывая трубопровод для подачи хладагента. Регулируя высоту буровых полых штанг, установка горизонтируется. В процессе работы шнеков установка забуривается в массив породы, при этом подается хладагент. В результате образованное грунтоледятое тело с помощью троса

поднимается на судно. После процесс повторяется. Данный вид поднятия можно отнести к циклическому. Очевидный недостаток этой установки, снижение производительности из-за значительного времени поднятия грудноледяного тела. Однако достоинством является простота конструкции и невысокая металлоемкость.

Известен способ добычи полезных ископаемых со дна арктического шельфа RU №2822857 [15]. Технический результат заключается в повышении производительности способа извлечения полезных ископаемых со дна арктического шельфа. Достигается это отработкой залежи по спиральной траектории от центра к ее внешним границам. Способ осуществляется следующим образом. Плуг в результате движения судна разрыхляет залежь. Одновременно с этим подается хладагент на дно. Под действием отрицательных температур разрыхленные тела обрастают льдом. В результате образованные грунтоледяные тела с отрицательной гидравлической крупностью поднимается на поверхность, где улавливаются боновой ловушкой. Собранные грунтоледятые тела в результате движения судна концентрируются у плавающего грунтового насоса, откуда и перемещаются на судно.

Известно устройство для добычи полезных ископаемых со дна континентального шельфа RU №2549648 [16]. Задачами изобретения являются устранение ограничение по глубине разработки, снижение негативного воздействия на окружающую среду, снижение потерь полезного ископаемого при подъеме и повышение производительности. Достигается это путем образования в транспортировочной трубе чередующихся отсеков с выходными отверстиями. Отсеки выполнены, как накрест лежащие по отношению друг к другу. При этом нижние части отсеков конусообразные. Устройство работает следующим образом. Транспортировочная труба, опускаясь на дно рыхлых пород, начинает процесс образования грунтоледятых тел с отрицательной гидравлической крупностью с помощью хладагента. В процессе поднимания некоторые грунтоледяные тела оттаивают и оседают. Наличие чередующихся отсеков решает эту проблему. Оттаявшие грунтоледяные тела оседают в нижних частях отсеков, где с помощью отверстий с выходом хладагента снова приобретают отрицательную гидравлическую крупность.

Результаты и обсуждение. На основе проведенного обзора и анализа, была составлена новая систематизация подъема полезного ископаемого при помощи грунтоледяных тел (рисунок 2), которая может дополнить уже существующие систематизации.

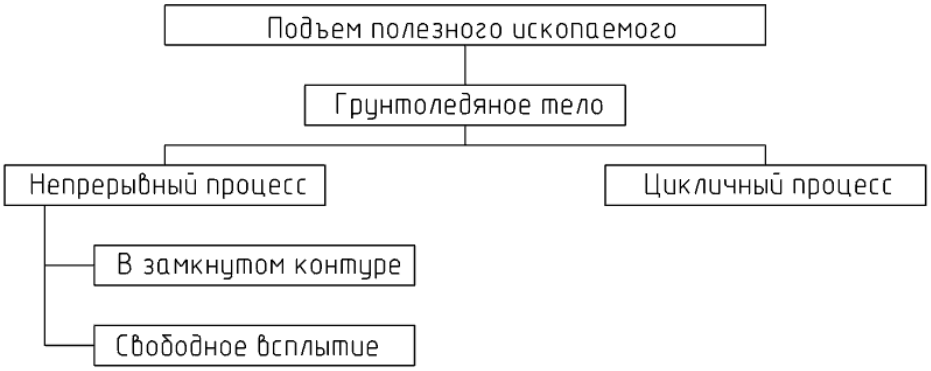


Рисунок 2 – Систематизация средств подводной добычи по принципу подъема полезного ископаемого с использованием грунтоледяных тел

Непрерывный процесс поднятия полезного ископаемого со дна континентального шельфа более производительный, однако, цикличный менее металлоемкий, по сравнению с непрерывным процессом поднятия в закрытом контуре. В свою очередь непрерывный процесс поднятия в закрытом контуре позволяет снизить потери полезного ископаемого из-за оттаивания льда по мере поднимания грунтоледяных тел по сравнению со свободным

всплытием. Таким образом, выбор способа поднятия полезного ископаемого с использованием грунтоледяных тел должен учитывать горно-геологические условия и характер водной среды разработки при сравнении с другими способами разработки с учетом экономической оценки эффективности планируемых горных работ.

Выводы. Проведенный обзор технологий поднятия показал необходимость в дополнении существующей систематизации. Сам процесс поднятия с использованием грунтоледяных тел имеет свои достоинства и недостатки и выбор конкретного способа необходимо обосновывать технологически и экономически. Данная работа является одной из составляющих исследования условий применения технологий добычи с использованием грунтоледяных тел. В настоящее время ведутся эксперименты с обоснованием необходимого количества льда для подъема полезного ископаемого в зависимости от пористости льда.

Литература

1. Российская Федерация. Федеральный закон «О континентальном шельфе российской федерации» от 30.11.1995 N 187-ФЗ. М. 1995.
2. Российская Федерация. Распоряжение правительства РФ «О Стратегии развития морской деятельности РФ до 2030 года» от 30 августа 2019 г. № 1930-р. М. 2019.
3. Российская Федерация. Распоряжение правительства РФ от 22.06.2015 N 1143-р Об утверждении Концепции федеральной целевой программы "Мировой океан" на 2016 - 2031 годы. М. 2015.
4. Кисляков В.Е., Катышев П.В., Шкаруба Н.А., Елизарьев В.С., Башкатова Я.Р. Добыча полезных ископаемых со дна континентального шельфа автономным подводным комплексом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 3-1. С. 318-329.
5. Патент № RU 203596 U1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01), E02F 3/413 (2006.01). Устройство для сбора кобальтомарганцевых корок со дна морей: № 2021103823: заявл. 16.02.2021: опубл. 13.04.2021 / Юнгмейстер Д.А., Королев Р.И., Сержан С.Л., Уразбахтин Р. Ю.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. 8 с.
6. Патент № RU 2358105 C1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01). Комплекс для добычи конкреций с морского дна: № 2007149438/03: заявл. 27.12.2007: опубл. 10.06.2009 / Тарасов Ю.Д.; заявитель Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет). 8 с.
7. Козлов М.Ю. Совершенствование технологий гидроподъема при освоении шельфовых месторождений железомарганцевых конкреций на основе исследования гидродинамических процессов. Дис. … канд. техн. наук. М.: Государственный Геологоразведочный Университет им. Серго Орджоникидзе. 2016. 147 с.
8. Патент № RU 2596153 C1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01), E02F 3/88 (2006.01). Способ разрушения прочных высокоглинистых песков россыпных месторождений и дезинтеграции их гидросмесей при всасывании земснарядом: № 2015130124/03: заявл. 21.07.2015: опубл. 27.08.2016 / Литвинцев В.С., Хрунина Н.П., Катин В.Д.; заявитель ИГД ДВО РАН. 7 с.
9. Патент № RU 2327041 C2 Российская Федерация, МПК E21C 45/00 (2006.01). Скважинный эрлифтный снаряд для гидродобычи полезных ископаемых: № 2006127587/03: заявл. 10.02.2008: опубл. 20.06.2008 / Хрулев А.С.; заявитель (ООО Подземгазпром). 9 с.
10. Патент № SU 285602 A1 Советский Союз, МПК B65G 51/18(1995.01). Гидроэлеватор: № 1354854/27-11: заявл. 05.08.1969: опубл. 29.10.1970 / Абдураманов А.А., Жангарин А.И., Трусов М.М. 2 с.
11. Бруякин Ю.В., Бубис Ю.В., Молочников Л.Н., Нурок Г.А., Яблоков К.В. Технология добычи полезных ископаемых со дна озер, морей и океанов. М.: Недра. 1979. 381 с.

12. Патент № RU 2788227 C1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01), B63B 35/00 (2006.01), E02F 7/00 (2006.01). Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых: № 2022123385: заявл. 01.09.2022: опубл. 17.01.2023 / Юнгмейстер Д.А., Шпенст В.А., Григорчук А.В., Исаев А.И., Смоленский М.П.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. 17 с.
13. Патент № RU 2822856 C1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01), B66C 3/18 (2006.01), E02F 3/47 (2006.01). Устройство автономной добычи полезных ископаемых со дна акваторий: № 2024103461: заявл. 13.02.2024: опубл. 15.07.2024 / Кисляков В.Е., Катышев П.В., Цимбалюк Н.А., Линьков Я.Е., Воронин В.Р.; заявитель Сибирский федеральный университет. 11 с.
14. Патент № RU 2797884 C1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01). Установка для добычи полезных ископаемых со дна акватории: № 2022124083: заявл. 09.09.2022: опубл. 09.06.2023 / Кисляков В.Е., Катышев П.В., Линьков Я.Е., Зубов П.А. Дорожкин Д.А., Лопатина А.Н.; заявитель Сибирский федеральный университет. 9 с.
15. Патент № RU 2822857 C1 Российская Федерация, МПК E21C 50/02, E21C 45/00. Способ добычи полезных ископаемых со дна арктического шельфа: № 2024100603: заявл. 12.01.2024: опубл. 15.07.2024 / Кисляков В.Е., Катышев П.В., Линьков Я.Е., Покацкий Д.А., Кирсанов А.К., Цимбалюк Н.А.; заявитель Сибирский федеральный университет. 8 с.
16. Патент № RU 2549648 C1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01). Устройство для добычи полезных ископаемых со дна континентального шельфа: № 2014112173/03: заявл. 28.03.2014: опубл. 27.04.2015 / Кисляков В.Е., Лакин Д.А., Баранова И.А., Маликова К.В., Нафиков Р.З.; заявитель Сибирский федеральный университет. 6 с.

УДК 550.34.038.8

ВЫБОР СОВРЕМЕННЫХ СЕЙСМОПРИЕМНИКОВ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СЕЙСМОРЕГИСТРИРУЮЩЕЙ ГРАДИЕНТНОЙ УСТАНОВКИ

Коломейцев Д.В.
kolomeitsev_denis@mail.ru
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

В статье рассмотрена многоканальная сейсморегистрирующая градиентная установка для мониторинга геодинамических процессов. Проведён сравнительный анализ различных типов сейсмоприемников с учётом их технических характеристик, условий эксплуатации и стоимости. На основе анализа предложены два варианта модернизации: использование трёхкомпонентных электромеханических сейсмоприемников GS One, полностью совместимых с действующей градиентной установкой, и пьезоэлектрических приёмников ВС 1313, требующих доработки ее измерительного канала. Предложенные доработки позволят повысить надёжность и чувствительность многоканальной сейсморегистрирующей градиентной установки.

Ключевые слова: геофон, сейсмоприемник, многоканальная сейсморегистрирующая градиентная установка, пьезодатчик.

Введение. Постоянное наблюдение за явлениями, происходящими в земной коре, представляет большое значение, особенно (в активных зонах) для зон с высокой геодинамической активностью. Для определения активности геологических разломов можно отслеживать сейсмоакустическое поле. Разработанная в НС РАН, система сейсмического мониторинга современных геодинамических процессов и лежащая в её основе многоканальная сейсморегистрирующая градиентная установка (МСГУ) позволяет получить информацию об эндогенных источниках сейсмического поля [1]. Предложенный в работе Казначеева П.А. и др. [2] принцип позволяет выделить эндогенную составляющую сейсмического поля с помощью фильтрации. Этот способ применяется в рассматриваемой установке. С помощью МСГУ становится возможным регистрация слабых сейсмических событий (в том числе и на небольших глубинах) и их пеленгации. Одной из актуальных задач является точная локация источников сейсмического поля, которая может быть решена путем увеличения количества одновременно функционирующих градиентных установок (до трёх и более). Возможно применение МСГУ как сейсмической компоненты при проведении комплексных исследований современных геодинамических процессов.

МСГУ включает 7 трехкомпонентных сейсмоприемников, расположенных вблизи земной поверхности в соответствии со схемой, изображенной слева на рисунке 1. Каждый сейсмоприемник состоит из 3 геофонов GS-20DX, расположенных на общем основании (рисунок 1, справа). Для обеспечения надёжного механического контакта с грунтом при установке сейсмоприемники утрамбовываются. Открытое исполнение конструкции требует дополнительной защиты соединительных проводников, что снижает ее надежность. Кроме того, применяемые геофоны GS-20DX морально и технически устарели, что существенно ограничивает точность регистрации сейсмических сигналов по сравнению с современными сейсмодатчиками. В связи с этим возникает необходимость замены существующих датчиков на современные трехкомпонентные сейсмоприемники.

Целью работы является усовершенствование МСГУ, которое заключается в улучшении характеристик аппаратуры и качества получаемых с ее помощью сейсмических данных. Основное внимание уделяется повышению надёжности конструкции сейсмоприемников и эффективности проведения полевых работ.

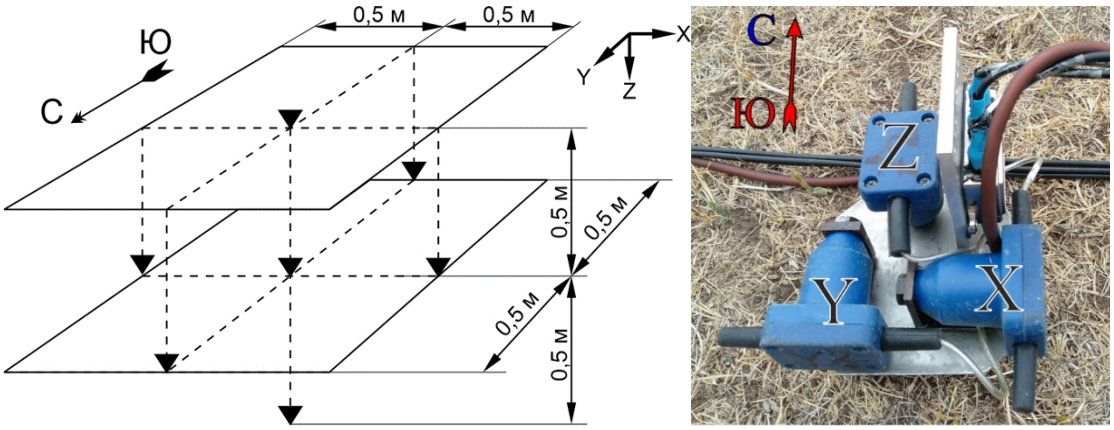


Рисунок 1 – Схема расположения сейсмоприемников. Плоскость XY соответствует дневной поверхности. ▼ - трехкомпонентные сейсмоприемники

При выборе новых сейсмоприемников необходимо учитывать ряд технических и конструктивных ограничений, обусловленных особенностями существующей аппаратной архитектуры и условиями эксплуатации. Прежде всего, новые датчики должны иметь аналоговый выход. Применение сейсмоприемников со встроенными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) в данной системе неприемлемо, поскольку их использование потребует синхронизации цифровых потоков и, как следствие, полной переработки всей регистрационной схемы. По частотным характеристикам новые сейсмоприемники не должны уступать существующим: для эффективной регистрации сейсмических событий на небольших глубинах датчики должны сохранять высокую чувствительность в области высоких частот (до сотен герц). Конструктивно датчики должны быть трёхкомпонентными, то есть обеспечивать регистрацию колебаний по трём взаимно перпендикулярным осям в едином корпусе. Для подключения к аналоговым входам системы возможно использование согласующих преобразователей, которые должны обеспечивать минимальные искажения и потери сигнала при передаче. Так как установка сейсмоприемников осуществляется путём заглубления в грунт, к корпусу предъявляются требования по герметичности и устойчивости к воздействию влаги. Корпус должен обеспечивать защиту от пыли и механических повреждений, а также быть рассчитан на длительное нахождение в грунте. Габариты сейсмоприемников ограничены конструкцией применяемого бурового оборудования. В частности, диаметр корпуса не должен превышать 140 мм, что обусловлено диаметром применяемого бура. Предпочтительна цилиндрическая форма корпуса, обеспечивающая надёжную и плотную установку в вертикальной скважине без дополнительных адаптеров.

Таким образом, при выборе новых сейсмоприемников необходимо обеспечить полную совместимость с действующей системой, сохранить или улучшить параметры чувствительности, а также учесть особенности монтажа и условий эксплуатации.

Обзор существующих сейсмоприемников. Сейсмоприемник является устройством, принимающим сейсмические волны и преобразующим механические колебания почвы в электрический сигнал. Сейсмоприемники классифицируют в зависимости от их типа электромеханического преобразования [3].

Сейсмоприемники с индукционным *электромеханическим преобразованием* (геофоны) - электродинамические устройства, представляющие собой инертную массу в виде катушки индуктивности, подвешенную на пружине, которая находится в магнитном поле постоянного магнита и жестко связана с корпусом приемника. При движении корпуса катушка стремится остаться в положении покоя, что вызывает растяжение или сжатие пружины. Изменяется магнитный поток, пронизывающий катушку. В результате на зажимах катушки наводится ЭДС, пропорциональная скорости смещения корпуса катушки. Сейсмоприемники именно такого типа используются в МСГУ.

Сейсмоприемники с *пьезоэлектрическими преобразователями,* так же называемые гидрофонами, широко применяются при сейсморазведке на акваториях, ультразвуковом каротаже скважин. Гидрофоны по сравнению с геофонами менее чувствительны к микросейсмам и специфическим водным помехам. Работа гидрофонов основана на прямом пьезоэффекте. При этом происходит непосредственное преобразование механического давления в электрическое напряжение. Сейсмоприемники с пьезоэлектрическим преобразованием применяются и в инженерной сейсморазведке, при исследовании устойчивости зданий, измерении вибраций. Сигнал на выходе таких сейсмоприемников пропорционален изменению скорости смещения.

Среди современных решений популярны акселерометры на базе *MEMS-технологии* (микроэлектромеханических систем). В таких устройствах инерционная масса размещена внутри кремниевой структуры, и изменение её положения вызывает изменение ёмкости между подвижными и неподвижными электродами. Электрическая схема преобразует эти изменения в сигнал, пропорциональный ускорению [4]. Преимуществами MEMS-акселерометров являются компактность, низкое энергопотребление, надёжность и устойчивость к внешним условиям.

Инновационным типом сейсмоприемников являются *молекулярно-электронные* устройства, где в качестве инерционной массы выступает электролитическая жидкость. Принцип действия основан на регистрации изменения химического потенциала в растворе при его движении. Встроенная система электродов формирует электрическое поле, в котором перемещение электролита вызывает перераспределение ионов. Это, в свою очередь, приводит к изменению электрического потенциала между двумя парами электродов [5].

Волоконно-оптические сейсмоприемники основаны на интерферометрических методах измерения, при которых смещения инерционной массы вызывают изменение фазы света, проходящего через оптическое волокно. Наиболее распространённые типы таких устройств — интерферометры Маха-Цандера [6]. Преимуществами волоконно-оптических сейсмоприемников являются высокая чувствительность, широкий динамический диапазон, электромагнитная совместимость и возможность удалённого мониторинга на больших расстояниях.

Волоконно-оптические сейсмоприемники находят применение в задачах высокоточного мониторинга сейсмической активности, включая эксплуатацию в сложных и опасных средах (например, в нефтяных и газовых месторождениях, ядерных объектах). Однако их использование ограничено сложностью конструкции и необходимостью точного калибрования.

Из существующих сейсмоприемников были отобраны модели, потенциально применимые в составе МСГУ. В таблице 1 представлены их основные технические характеристики, а также преимущества и недостатки каждого варианта.

Результаты сравнительного анализа различных типов сейсмоприемников, потенциально применимых в модернизированной многоканальной сейсморегистрирующей установке, позволили выявить наиболее перспективные варианты с учётом их технических характеристик, эксплуатационных особенностей и экономической целесообразности.

Электромеханический сейсмоприемник GS One обладает приемлемой чувствительностью, в четыре раза превышающей показатели используемых в настоящее время GS-20DX, а также широким частотным диапазоном (0,1–240 Гц) и полной совместимостью с существующей конфигурацией МСГУ. Его основными преимуществами являются простота интеграции и низкая стоимость, что делает данный тип датчиков наиболее рациональным выбором для модернизации в условиях ограниченного бюджета и необходимости оперативного внедрения.

Пьезоэлектрический сейсмоприемник ВС 1313 обладает более широким верхним пределом частотного диапазона (до 400 Гц), а также встроенной системой электрического возбуждения чувствительного элемента для точной калибровки коэффициента преобразования. Несмотря на необходимость согласования дифференциального выхода с

приёмной аппаратурой, его применение оправдано в задачах, требующих повышенной точности измерений, особенно в научных и инженерных исследованиях.

Молекулярно-электронный сейсмоприемник MTSS 1003 обеспечивает высокую чувствительность и низкое энергопотребление. Тем не менее, его частотный диапазон (1–300 Гц) не охватывает требуемую частотную область, что критично для применения в МСГУ.

MEMS-сейсмоприемники (на примере *Colybris MS8002*) показали высокие технические характеристики, однако их использование на данном этапе признано нецелесообразным в связи с необходимостью полной переработки конструкции блока сейсмоприемников, что существенно увеличивает затраты на модернизацию и сроки её реализации.

Волоконно-оптические сейсмоприемники, несмотря на заявленную очень высокую чувствительность и широкий частотный диапазон, находятся на стадии коммерциализации и пока не представляют собой доступное и проверенное решение для практического применения.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика сейсмоприемников различных типов

Тип сейсмоприемника	Чувствительность	Частотный диапазон, Гц	Преимущества	Недостатки	Стоимость, руб.
Электромеханический GS One	Средняя	0,1..240	Повышенная (по сравнению с текущим исполнением) чувствительность Легкость замены		~25000
Пьезоэлектрический BC 1313	Средняя	0,3..400	Система электрического возбуждения чувствительного элемента для определения действительного значения коэффициента преобразования	Необходимо согласовать дифференциальный выход со входом градиентной установки	~85000
Молекулярно-электронный MTSS 1003	Высокая	1..300	Высокая чувствительность. Низкое электропотребление. Электродинамическая силовая обратная связь	Недостаточный частотный диапазон	~110000
MEMS Colybris MS8002	Высокая	0..700	Электростатическая обратная связь. Высокая стабильность при жестких условиях эксплуатации	Необходима разработка новой конструкции блока сейсмоприемников	~27000 (без учета корпуса)
Волоконно-оптический	Очень высокая	0,2..500	На стадии коммерциализации		

Таким образом, наиболее целесообразным направлением модернизации многоканальной сейсморегистрирующей установки следует считать использование электромеханических сейсмоприемников как базового решения и пьезоэлектрических сейсмоприемников — при необходимости повышения точности измерений.

На рисунке 2 представлен фрагмент структурной схемы МСГУ. Основным компонентом установки является блок сейсмоприемников (БСП), включающий три однокомпонентных геофона GS-20DX, закреплённых на общем основании. Каждый геофон

ориентирован вдоль одной из трёх взаимно перпендикулярных осей: два (СП X и СП Y) — в горизонтальной плоскости, а третий (СП Z) — по вертикали. Блок усиления и фильтрации сигналов (БУФС) выполняет функции предварительного усиления и подавления промышленных помех. Согласованная линия передачи минимизирует искажения и обеспечивает передачу полезного сигнала на входы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), расположенного в блоке соединения сигналов (БСС). Модернизацию МСГУ можно осуществить путём замены сборки из трёх отдельных сейсмоприемников на интегрированный трёхкомпонентный сейсмоприёмник на основе датчиков GS One, при этом БУФС должен быть размещён внутри общего корпуса.

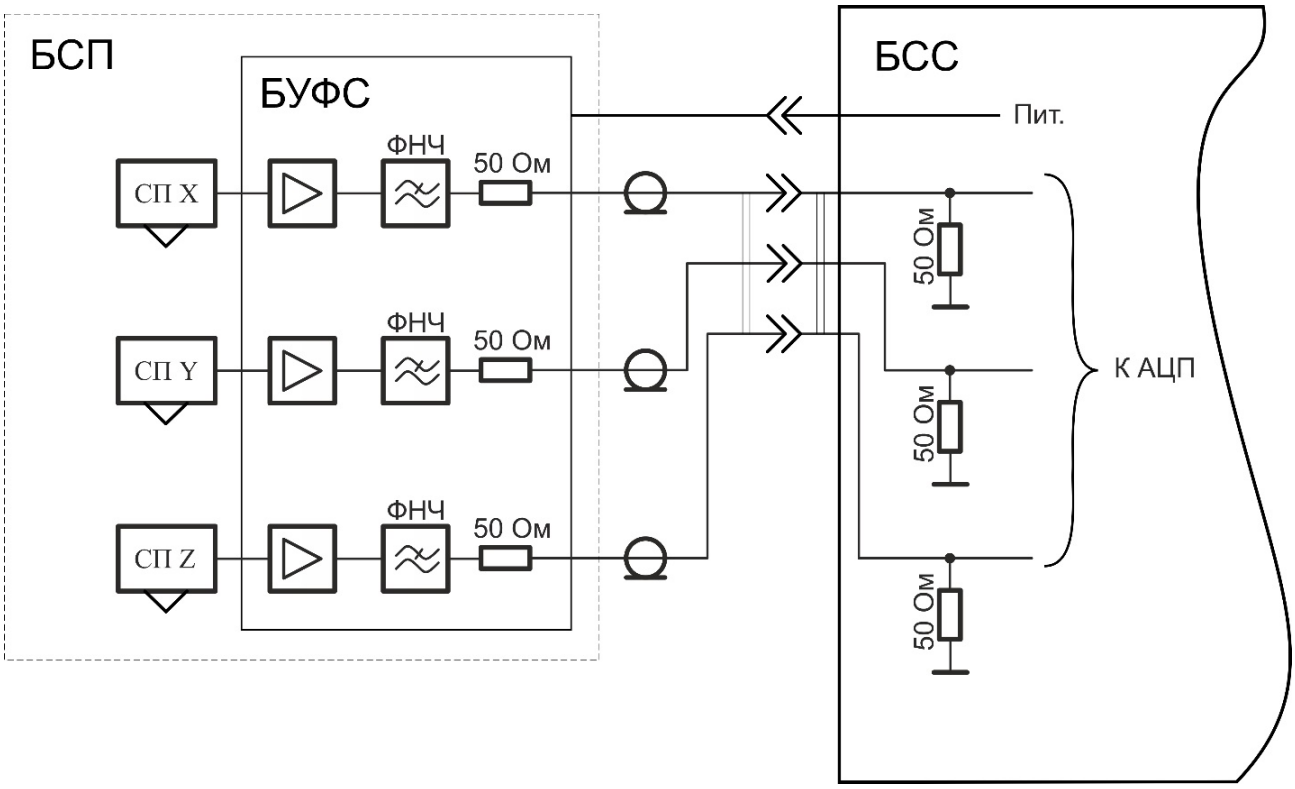


Рисунок 2 – Структурная схема МСГУ. БСП – блок сейсмоприемников, БУФС – блок усиления и фильтрации сигналов, БСС – блок соединения сигналов.

При необходимости повышения эффективности регистрации малоглубинных сейсмических событий может применяться пьезоэлектрический сейсмоприемник ВС 1313. Этот сейсмоприёмник имеет дифференциальный выход, что требует согласования с аналоговыми входами АЦП, используемыми в составе МСГУ. Для обеспечения совместимости необходимо разработать внешний преобразователь сигнала (ПС), обеспечивающий преобразование дифференциального сигнала в однополярный и согласование уровня выходного сигнала с характеристиками входа АЦП (рисунок 3). Корпус ВС 1313 представляет собой герметичный металлический цилиндр без возможности разборки или вмешательства в конструкцию, что исключает возможность размещения схемы преобразователя внутри самого приёмника. В связи с этим ПС должен быть выполнен в отдельном корпусе, герметичном и устойчивом к внешним воздействиям, с учётом условий эксплуатации вблизи поверхности грунта. Корпус ПС должен обеспечивать надёжное соединение с кабелем от сейсмоприемника и линии, идущей к блоку соединения сигналов (БСС), а также соответствовать требованиям по габаритам.

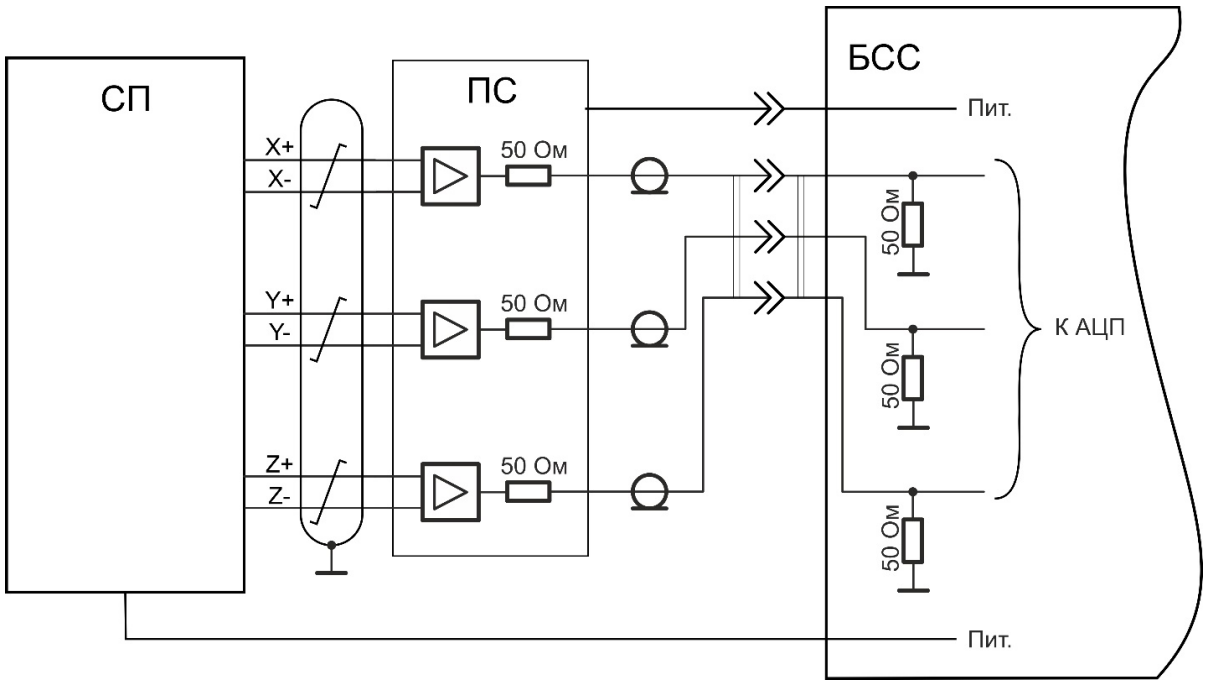


Рисунок 3 – Структурная схема усовершенствованной МСГУ с использованием пьезоэлектрических сейсмоприемников. СП – Сейсмоприемник, ПС – Преобразователь сигнала, БСС – блок соединения сигналов

Заключение. Модернизация многоканальной сейсморегистрирующей градиентной установки возможна как за счёт замены геофонов и корпуса без изменения электрической схемы, так и через интеграцию пьезоэлектрических трёхкомпонентных сейсмоприемников. Выбор конкретного варианта модернизации должен учитывать эксплуатационные условия и задачи мониторинга. Улучшение параметров регистрирующих датчиков позволит повысить качество сейсмических данных, увеличить надёжность системы и повысить эффективность полевых работ.

Литература

1. Бобровский В.В. Разработка аппаратурно-программного обеспечения для исследований современных геодинамических процессов в земной коре на территории Северного Тянь-Шаня // Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов. Материалы II Всерос. науч. конф., посвященной 300-летию Российской академии наук, г. Москва, ИФЗ РАН, 22-24 октября 2024 г. М.: Изд-во ИФЗ РАН. 2024. С 154–159.
2. Казначеев П.А., Матюков В.Е., Александров П.Н., Непеина К.С. Разработка и опробование трехкомпонентной градиентной установки для регистрации сейсмоакустического поля в геодинамически активных регионах // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55. № 1. С. 46–58.
3. Сейсморазведка. Справочник геофизика. М.: Недра. 1981. 464 с.
4. Голощапов А. МЭМС-акселерометры Colibrys и их применение в геофизике // Компоненты и технологии. 2014. № 1. С. 38-41.
5. Бугаев А.С., Антонов А.Н., Агафонов В.М., Белотелов К.С., Вергелес С.С., Дудкин П.В., Егоров Е.В., Егоров И.В., Жевненко Д.А., Жабин С.Н., Зайцев Д.Л., Криштоп Т.В., Неешпапа А.В., Попов В.Г., Усков В.В., Шабалина А.С., Криштоп В.Г. Измерительные приборы на основе молекулярно-электронных преобразователей // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 11. С. 1-14.
6. Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т., Петров Ю.С., Колчинский В.А. Волоконно-оптические интерферометрические приемники слабых сейсмосигналов // Вестник ДВО РАН. 2016. № 4. С. 56-59.

УДК 621.762

ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Кыдыралиев Э.М.
Kydyraliev_e@mail.ru
Кыргызский авиационный институт, г. Бишкек, Кыргызстан

Огнеупорные материалы на основе органических соединений представляют собой инновационное направление в области высокотемпературных материалов. Использование органических компонентов, таких как углеродные нанотрубки, графен, полимеры, лигнин и биополимеры, позволяет значительно улучшить механические и термостойкие свойства огнеупоров, снизить их массу, повысить устойчивость к термошоку и улучшить экологические характеристики. Применение органических соединений в огнеупорах открывает новые перспективы в создании лёгких, прочных и энергоэффективных материалов, устойчивых к агрессивным химическим средам. В статье рассматриваются состав, методы получения, физико-химические свойства и основные области применения таких материалов, включая металлургию, авиационно-космическую промышленность, строительство и энергетический сектор. Особое внимание уделяется перспективам разработки экологически чистых и биоразлагаемых огнеупорных материалов, что имеет важное значение для устойчивого развития современных технологий.

Ключевые слова: огнеупорные материалы, органические соединения, углеродные нанотрубки, графен, биополимеры, термостойкость, экология, инновационные технологии.

Введение. Огнеупорные материалы традиционно используются в экстремальных температурных условиях, где требуется высокая устойчивость к термическим, механическим и химическим воздействиям. Однако развитие науки и технологий требует создания новых типов огнеупоров, обладающих не только высокой термостойкостью, но и улучшенными экологическими и эксплуатационными характеристиками. Одним из перспективных направлений является использование органических соединений в качестве основы для огнеупорных материалов.

Органические соединения, такие как полимеры, углеродные нанотрубки, графен, лигнин и биополимеры, позволяют модифицировать структуру традиционных огнеупорных материалов, снижая их плотность, улучшая гибкость и увеличивая стойкость к термошоку. Благодаря этим свойствам такие материалы находят широкое применение в металлургии, строительстве, авиационно-космической и энергетической промышленности. Разработка огнеупоров на основе органических соединений связана с поиском новых методов синтеза и обработки, направленных на увеличение термостойкости, снижение затрат на производство и повышение экологической безопасности. В данной статье рассматриваются ключевые аспекты производства, свойства и перспективы применения таких материалов в различных отраслях промышленности.

Использование органических соединений в огнеупорных материалах имеет долгую историю. В древности органические вещества, такие как древесный уголь, смолы и крахмальные растворы, применялись в составе глиняных и керамических огнеупоров для повышения их прочности и термостойкости. В средневековье углеродсодержащие материалы, включая природный графит и сажу, добавлялись в смеси для создания прочных печных конструкций. В XIX XX веках начались исследования по использованию фенольных смол, битума и природных углеродных волокон для улучшения характеристик огнеупорных кирпичей. Однако широкого применения такие материалы не получили из-за недостаточной термостойкости и высокой деградации органических компонентов при температурах выше 1000°C. Современные технологии позволили возродить интерес к органическим компонентам

благодаря разработке наноструктурированных материалов, таких как углеродные нанотрубки, графен и биоразлагаемые полимеры. Эти материалы демонстрируют высокую термическую стабильность и могут значительно улучшить механические свойства современных огнеупоров. Разработка огнеупоров на основе органических соединений связана с поиском новых методов синтеза и обработки, направленных на увеличение термостойкости, снижение затрат на производство и повышение экологической безопасности. В данной статье рассматриваются ключевые аспекты производства, свойства и перспективы применения таких материалов в различных отраслях промышленности.

Методика проведения эксперимента. Для оценки свойств огнеупорных материалов на основе органических соединений были проведены испытания механической прочности, термостойкости и химической стойкости. Образцы изготавливались методом спекания при различных температурах (1200-1800°C) с добавлением графена и углеродных нанотрубок.

Результаты исследований. В таблице 1 приведены основные физико-механические характеристики исследуемых образцов.

Таблица 1 – Физико-механические свойства огнеупорных материалов

Параметр	**Образец 1**	**Образец 2**	**Образец 3**
Температура спекания, °C	1200	1500	1800
Плотность, г/см³	2.3	2.6	2.9
Предел прочности на сжатие, МПа	80	110	135
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0.4	0.35	0.3
Устойчивость к термошоку (циклы)	20	30	45

В таблице 2 представлены сравнительные данные огнеупорных материалов на основе органических соединений с традиционными материалами.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики различных огнеупорных материалов

Параметр	Органические огнеупоры	Традиционные керамические огнеупоры	Углеродные огнеупоры
Плотность, г/см³	2.3 - 2.9	2.8 - 3.5	1.5 - 2.2
Предел прочности на сжатие, МПа	80 - 135	100 - 150	50 - 100
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0.3 - 0.4	1.0 - 1.5	0.2 - 0.5
Устойчивость к термошоку (циклы)	20 - 45	10 - 30	40 - 60
Химическая стойкость	Высокая	Средняя	Высокая

Анализ результатов. Исследования показали, что огнеупорные материалы на основе органических соединений обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными материалами, включая меньшую плотность, улучшенную стойкость к термошоку и низкую теплопроводность. При этом их механическая прочность может конкурировать с классическими керамическими огнеупорами, а химическая стойкость находится на высоком уровне.

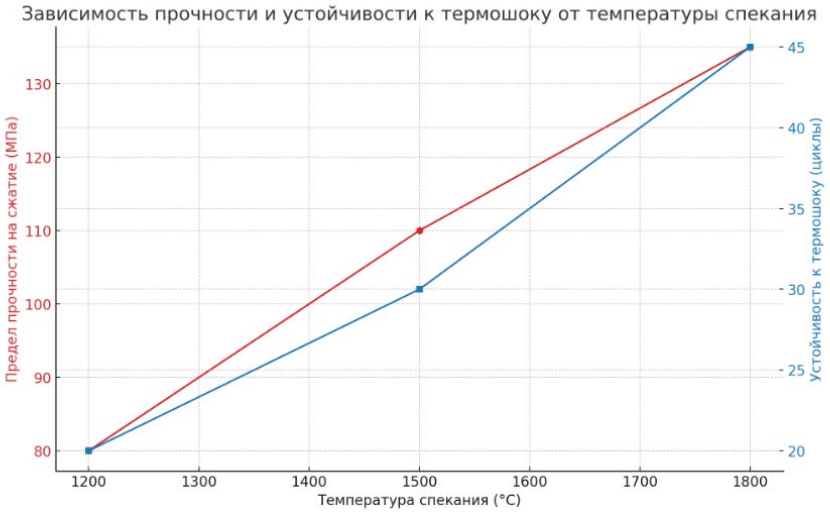


График 1 – Зависимость прочности от температуры спекания

График 1 показывает зависимость прочности на сжатие и устойчивости к термошоку от температуры спекания. Красная линия – прочность на сжатие (в МПа), синяя – устойчивость к термошоку (в циклах).

Общий анализ. Среди рассмотренных огнеупорных материалов традиционные керамические огнеупоры обладают наибольшей прочностью, но высокой плотностью и низкой устойчивостью к термошоку. Углеродные огнеупоры отличаются лёгкостью и хорошей устойчивостью к термошоку, но имеют сравнительно низкую механическую прочность. Органические огнеупоры представляют собой перспективное решение, сочетая высокую термостойкость, меньшую плотность и хорошую устойчивость к термошоку, что делает их конкурентоспособными в различных областях применения. Наиболее часто в промышленности используются традиционные керамические и углеродные огнеупоры из-за их проверенной надёжности и доступности. Однако инновационные органические материалы набирают популярность благодаря экологической безопасности и перспективам создания новых композиционных решений.

Выводы. Исследования показали, что огнеупорные материалы на основе органических соединений обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными материалами, включая меньшую плотность, улучшенную стойкость к термошоку и низкую теплопроводность. При этом их механическая прочность может конкурировать с классическими керамическими огнеупорами, а химическая стойкость находится на высоком уровне. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят разработать новые композитные материалы с улучшенными характеристиками и расширенными возможностями применения.

Литература

1. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М. Мезомасштабная акустическая эмиссия. Владивосток: Дальнаука. 2012. 126 с.
2. Иванов А.П., Петров В.Н. Высокотемпературные композиты. М.: Наука. 2015. 210 с.
3. Сидоров Г.К. Огнеупорные материалы: Теория и практика. СПб.: Политех-пресс. 2018. 315 с.
4. Васильев Д.О., Кузнецов Е.В. Углеродные наноструктуры в огнеупорах. Екатеринбург: Уральский университет. 2020. 187 с.
5. Жуков Н.П., Королёв В.М. Новые технологии в производстве огнеупоров. Казань: Таткнига. 2017. 142 с.
6. Романов С.В. Экологические аспекты применения огнеупорных материалов. Новосибирск: Сибирское изд-во. 2019. 198 с.
7. Козлов П.И., Смирнов Л.Н. Физико-химические основы огнеупорных материалов. Томск: ТПУ. 2016. 220 с.

УДК 621.371:550.37

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЛИТОСФЕРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Лисимов М.О.
makcimeil@mail.ru
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

В статье рассматриваются подходы к модернизации системы регистрации высокочастотных импульсных электромагнитных сигналов литосферного происхождения. Приведён анализ существующей схемы, описаны её преимущества и недостатки. Рассматриваются два варианта модернизации: использование 16-разрядного АЦП E-502, обеспечивающего быструю интеграцию с существующей системой сбора и обработки данных сейсмического мониторинга, и разработка автономного регистратора на базе 24-разрядного АЦП, ориентированного на низкое энергопотребление и повышенную точность. Для обеспечения синхронной работы нескольких установок приведен вариант реализации синхронного запуска регистрации по сигналам GPS. Рассмотрена возможность применения широкополосного индукционного датчика сигналов собственной разработки, а также вариант модернизации существующего узкополосного направленного датчика электромагнитного поля.

Ключевые слова: электромагнитное поле, литосферный импульс, АЦП, индукционный датчик, GPS-синхронизация, система регистрации.

Одним из направлений исследований, проводимых в Лаборатории перспективных аппаратурных разработок Научной станции Российской академии наук (НС РАН) в г. Бишкек (Кыргызская Республика), является исследование электромагнитных импульсов, возникающих в процессе деформаций земной коры. Эти импульсы могут быть связаны с трещинообразованием, сдвигами и другими процессами, происходящими на глубине, особенно в сейсмоактивных зонах. Наибольший интерес представляют сигналы в диапазоне десятков килогерц. Однако на практике такие импульсы сложно выделить из-за воздействия помех от радиостанций, гроз и других источников.

Предполагается, что сигналы литосферного происхождения возникают при нарушении электрического равновесия в породах — например, в момент разрушения, когда накапливается напряжение. В результате появляются слабые электромагнитные импульсы, которые могут быть зарегистрированы на поверхности.

Когда такой импульс проходит через проводящую среду, импульс приобретает характерную форму: сначала проявляется кратковременная высокочастотная компонента, за которой следует более продолжительная затухающая низкочастотная составляющая. Такая структура сигнала отличается от атмосферных и техногенных импульсов, которые, как правило, содержат лишь кратковременную высокочастотную составляющую без выраженной затухающей низкочастотной компоненты. Теоретическое подтверждение данной гипотезы представлено в работе [1].

Благодаря этим особенностям форму сигнала можно использовать как критерий при выделении импульсов литосферного происхождения. В настоящее время в алгоритмах автоматической обработки используется реальный прототип сигнала, сформированный на основе ранее зарегистрированных импульсов [2]. В перспективе планируется переход к применению обобщённого прототипа, формируемого на основе анализа множества зарегистрированных импульсов, что позволит повысить надёжность выделения сигналов литосферного происхождения на фоне помех.

Проведённый анализ помеховой обстановки показал, что для территории Бишкекского геодинамического полигона, наилучшие условия для регистрации импульсов литосферного происхождения достигаются в диапазоне 1–20 кГц, где уровень внешних помех минимален, а сами сигналы лучше различимы.

Для проведения исследований электромагнитных сигналов литосферного происхождения разработан макетный образец измерительного комплекса, предназначенного для регистрации слабых магнитных полей в килогерцовом диапазоне и выявления соответствующих импульсов. Аппаратная часть системы регистрации высокочастотных электромагнитных полей литосферного происхождения (СРВЭП) включает малогабаритный приемный блок (МПД-1), блок фильтрации и усиления сигналов (БУФ), а также регистрирующую часть на базе аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Также создано программное обеспечение, обеспечивающее автоматическую обработку зарегистрированных данных, расчёт суммарной энергии и анализ активности электромагнитных импульсов литосферного происхождения.

МПД-1 (рис. 1а) представляет собой конструкцию, включающую две катушки, размещенные на общем П-образном ферритовом сердечнике, и плату формирования сигнала. Если источник сигнала находится на оси датчика, напряжение на выводах катушек (L1L2) совпадает по фазе, а если он расположен с торца – напряжения находятся в противофазе. Это связано с особенностями эллипсоидной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости, при условии, что основной лепесток диаграммы направленности ориентирован вертикально.

Плата формирования сигнала включает два идентичных канала (А и Б), каждый из которых содержит по два широкополосных усилителя с переключаемыми коэффициентами усиления (У1А/У1Б и У2А/У2Б) и фильтр высоких частот (ФВЧА/ФВЧБ). Сигналы, прошедшие через фильтры высоких частот, поступают на сумматор, который дополнительно снижает уровень низкочастотных помех и устраняет постоянное смещение, мешающее корректной работе системы. На выходе МПД-1 установлен буферный усилитель, обеспечивающий согласование сигналов для передачи по длинной линии с волновым сопротивлением 50 Ом.

Выделенные датчиком сигналы поступают в блок фильтрации и усиления (БУФ), который включает фильтр высоких частот четвертого порядка (добротность 0.48), фильтр низких частот десятого порядка (добротность 0.48) и широкополосный усилитель с регулируемым коэффициентом усиления (У3). Взаимодействие фильтров низких и высоких частот формирует полосовой фильтр, который определяет амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) измерительного канала. БУФ также выполняет функцию согласования уровня сигнала с входными параметрами звуковой карты ПК, которая используется для регистрации сигналов [3]. Внешний вид измерительного канала датчика представлен на рисунке 1б.

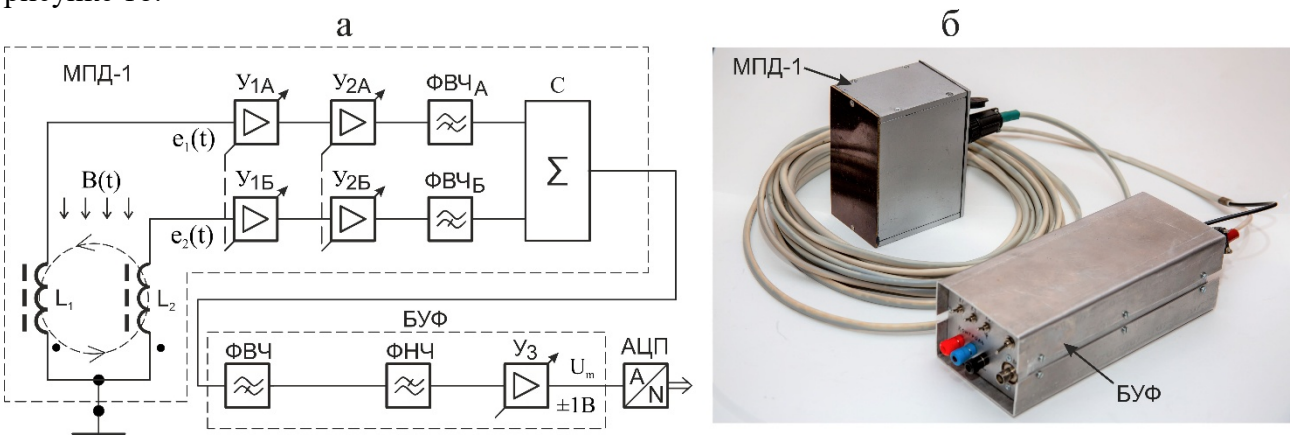


Рисунок 1 – Специализированный узкополосный направленный датчик электромагнитного поля: структурная схема (*а*); внешний вид (*б*)

Для регистрации сигналов, поступающих с выхода измерительного канала, используется звуковая карта Creative X-Fi Xtreme Music, устанавливаемая в персональный компьютер и обеспечивающая разрядность 24 бита при частоте дискретизации до 96 кГц. Отношение сигнал/шум составляет до 109 дБ, а коэффициент нелинейных искажений не превышает 0.004%. Приведённые выше характеристики позволяют эффективно выделять слабые импульсные сигналы литосферного происхождения на фоне шумов и посторонних сигналов. Регистрация данных осуществляется с помощью специально разработанного программного обеспечения AudioRec.

Несмотря на высокое качество преобразования, звуковая карта **Creative X-Fi Xtreme Music** не является оптимальным вариантом для применения в составе специализированной измерительной аппаратуры. Основным ограничением является недостаточная техническая гибкость встроенного АЦП, который изначально предназначен для обработки аудиосигналов, а не узкополосных импульсных сигналов высокой чувствительности. Карта требует постоянного подключения к персональному компьютеру, не поддерживает автономный режим работы и имеет повышенное энергопотребление. Кроме того, использование звуковой карты накладывает ограничения на точность настройки измерительной системы и не позволяет получать данные напрямую и с минимальной задержкой, что снижает надёжность регистрации и мешает использованию в специализированных измерительных комплексах. Это делает её малопригодной для построения компактных, энергоэффективных и специализированных регистрирующих комплексов. Для повышения эффективности работы системы и расширения ее функциональных возможностей рассматривается два варианта модернизации измерительного канала и регистратора данных.

На рисунке 2 представлена структурная схема первого варианта усовершенствованного измерительного комплекса, предназначенного для регистрации сигналов высокочастотного электромагнитного поля.

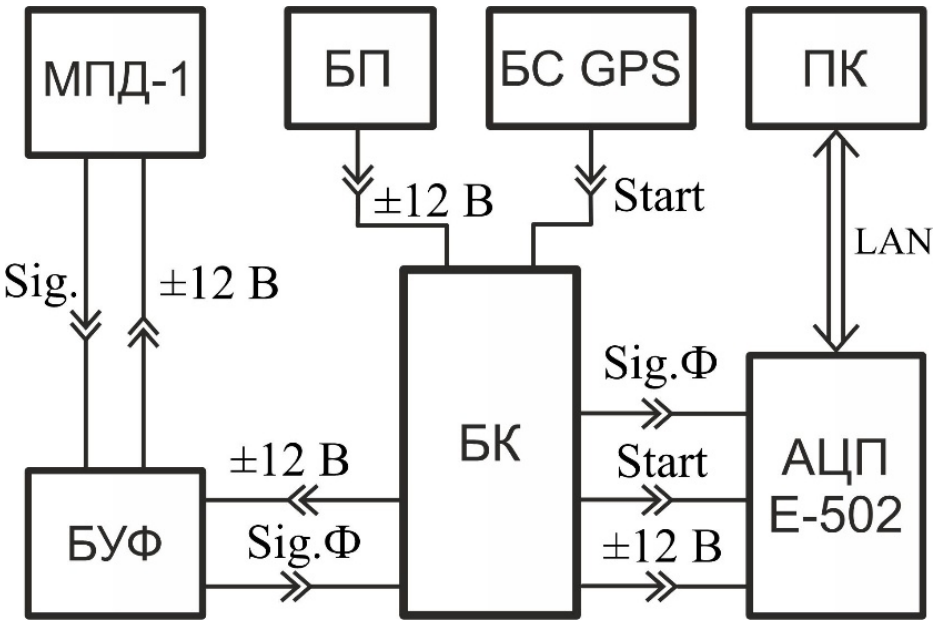


Рисунок 2 – Структурная схема варианта реализации измерительного комплекса для регистрации сигналов высокочастотного электромагнитного поля: МПД-1 – малогабаритный приемный датчик; БУФ – блок фильтрации и усиления сигнала; БК – блок коммутации; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер; БП – блок питания; БС GPS – Блок синхронизации по GPS

Вариант, представленный на рисунке 2, предполагает использование канала регистрации, аналогичного применяемому в многоканальной сейсморегистрирующей градиентной установке (МСГУ), разрабатываемой в ЛПАР. В данной конфигурации для

регистрации сигнала на выходе измерительного канала используется аналого-цифровой преобразователь **E-502** производства фирмы **L-Card (Россия)**. Это 16-разрядный АЦП с суммарной частотой дискретизации до 1 МГц, поддерживающий до 32 входов. Устройство подключается к персональному компьютеру через Ethernet-интерфейс и предназначено для многоканальных систем сбора данных.

Для регистрации и первичной обработки данных предполагается использование программного обеспечения **x502_Registrator** и **ExpDataProc**, уже применяемого в системе МСГУ. Эти программы обладают широкими возможностями настройки и позволяют эффективно работать как в многоканальном, так и в одноканальном режиме без необходимости дополнительной адаптации.

К основным преимуществам такого решения относится сокращение сроков внедрения за счёт использования уже отлаженной аппаратной и программной платформы, а также возможность одновременной работы на одном ПК совместно с МСГУ. Для этого может быть использован малогабаритный мини-ПК с двумя сетевыми интерфейсами и низким энергопотреблением.

Тем не менее, в рассмотренном выше варианте реализации имеются и определённые недостатки. В частности, разрядность АЦП E-502 ограничена 16 битами, что снижает динамический диапазон по сравнению с более современными 24-разрядными решениями. Кроме того, суммарное энергопотребление системы остаётся достаточно высоким: порядка 6 Вт на АЦП и около 15 Вт на мини-ПК, что ограничивает её применение в автономных полевых условиях, где требуется минимизация энергозатрат. Дополнительным недостатком является избыточное количество каналов, не востребованных в одноканальной конфигурации, что приводит к неоправданному увеличению стоимости и энергопотребления системы.

Второй вариант модернизации предполагает разработку собственного компактного регистрационного блока, направленного на устранение таких недостатков, как ограниченная разрядность (16 бит), избыточная многоканальность и высокое энергопотребление. В качестве аналого-цифрового преобразователя в данной системе предполагается использовать 24-разрядный дельта-сигма АЦП MCP3561 от Microchip. Он обеспечивает высокую точность измерений благодаря низкому уровню шума (менее 1 мкВ RMS при 20 SPS), высокому динамическому диапазону (до 117 дБ), встроенному программируемому усилителю (с коэффициентом до ×64) и широкому диапазону частот дискретизации (от 2.5 до 15360 выборок в секунду). Несмотря на наличие мультиплексора на несколько входов (AIN0–AIN3), MCP3561 является одноканальным АЦП, то есть он может регистрировать сигнал только с одного источника в данный момент времени, что делает его подходящим решением для построения компактных одноканальных систем регистрации.

Регистрируемые данные сохраняются на внешний носитель, например, SD-карту, что позволяет отказаться от постоянного подключения к персональному компьютеру. За управление процессом регистрации отвечает малопотребляющий микроконтроллер, выполняющий настройку, запуск, получение и сохранение данных от АЦП. Управление осуществляется как через встроенные органы управления с ЖК-дисплеем, так и удалённо по интерфейсу RS-232.

Преимуществами такого решения являются: снижение энергопотребления до менее чем 1 Вт, повышение точности регистрации за счёт 24-разрядного преобразования, уменьшение габаритов и стоимости системы. Главным недостатком остаётся необходимость разработки специализированного программного и аппаратного обеспечения, что увеличивает сроки реализации проекта.

Система предусматривает возможность синхронизации старта регистрации по сигналу GPS. Эта функция реализуется во всех регистрирующих комплексах, разрабатываемых в ЛПАР, включая электроразведочный измерительный комплекс с шумоподобными зондирующими сигналами (ЭРК ШПС), МСГУ и СРВЭП [4]. Синхронизация особенно важна при проведении комплексных полевых исследований (например, при исследованиях в зонах активных разломов), где необходимо обеспечить синхронную работу всех измерительных

систем (рис. 3). Это обеспечивает корректное сравнение полученных данных и упрощает их последующую обработку.

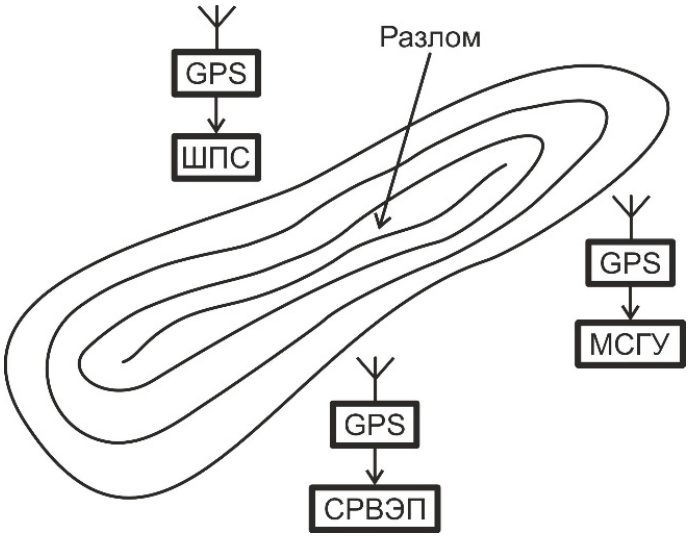


Рисунок 3 – Схема проведения комплексных полевых исследований с использования GPS синхронизации: GPS – модуль приема сигналов GPS; СРВЭП – системы регистрации высокочастотных электромагнитных полей литосферного происхождения; МСГУ – многоканальная сейсморегистрирующая градиентная установка

Реализация данной функции осуществляется с помощью разрабатываемого в ЛПАР блока синхронизации GPS (БС GPS). Структурная схема данного блока представлена на рисунке 4.

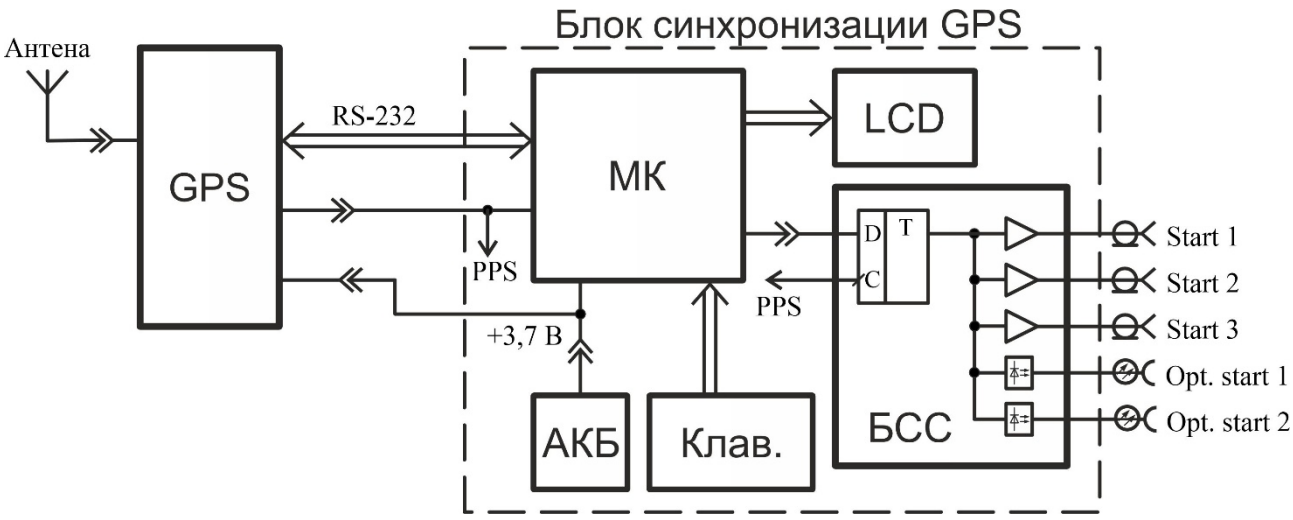


Рисунок 4 – Структурная схема блока синхронизации GPS: GPS – модуль приема сигналов GPS; МК – микроконтроллер; БСС – буфер сигналов старта; LSD – жидкокристаллический дисплей; АКБ – аккумуляторная батарея

В данном решении для приема сигналов со спутников GPS используется внешняя активная антенна с усилителем «GPS-P1MAM-SMA». Обработку сигналов выполняет модуль **Lea-6h**, установленный в блок синхронизации GPS. В этом блоке предусмотрены все необходимые подключения, включая интерфейсы USB и RS-232, сигнал PPS (pulse per second), используемый для точной временной синхронизации, а также питание от внешнего источника.

Для обеспечения синхронизации старта регистрации используется разрабатываемый в **ЛПАР** блок синхронизации GPS. Основной элемент этого блока — **микроконтроллер (МК)**, который управляет модулем **Lea-6h** через интерфейс **RS-232**. Ввод параметров синхронизации (включая время подачи команды старта) осуществляется через клавиатуру и LCD-дисплей.

Точное время поступает на микроконтроллер по **RS-232** от модуля GPS. Кроме того, на МК поступает сигнал **PPS**, представляющий собой электрический импульс с крутым фронтом, повторяющийся с высокой точностью (до 10 мкс) каждую секунду. Используя эти данные, микроконтроллер формирует управляющий импульс, который передается на **синхронный триггер**, расположенный в блоке синхронизации сигналов (БСС). Дополнительно на триггер поступает сигнал **PPS**, что обеспечивает высокую точность синхронизации.

После обработки в триггере сигнал передается на три **аналоговых буфера** и два **оптических передатчика**, что позволяет использовать один GPS-модуль для одновременного запуска нескольких устройств. Такое решение обеспечивает точную временную привязку данных различных измерительных систем и их согласованную работу.

Для проведения исследований импульсных сигналов ЭМ поля в низкочастотной области планируется включение в существующий измерительный комплекс широкополосного индукционного датчика ИД7 разработанного в ЛПАР для ЭРК ШПС [5]. Датчик предназначен для преобразования переменного магнитного поля в напряжение и обладает высокой чувствительностью в рабочем диапазоне частот от 10 Гц до 30 кГц. На частоте 1 кГц коэффициент преобразования составляет около 0,3 мВ/нТл при минимальном коэффициенте усиления, что обеспечивает возможность регистрации слабых сигналов.

Конструкция ИД7 включает четырёхкаскадную схему: входной преобразователь с компенсационным резистором, два широкополосных усилителя с регулируемым коэффициентом усиления, а также дифференцирующий каскад, обеспечивающий фильтрацию постоянной составляющей и снижение низкочастотных помех. Постоянная времени датчика составляет порядка 0,6 с, что формирует нижнюю границу полосы пропускания в области около 0,3 Гц. Выходное сопротивление датчика — 50 Ом, напряжение питания — ±12 В. Максимальная амплитуда выходного сигнала — до 1,5 В при согласованной нагрузке.

Интеграция ИД7 в состав измерительного комплекса позволит расширить функциональные возможности системы за счёт высокой стабильности параметров и хорошей повторяемости результатов в лабораторных и полевых условиях. Использование датчика совместно с существующим блоком фильтрации и усиления, а также системой регистрации на базе 24-разрядного АЦП обеспечит улучшенное соотношение сигнал/шум.

Параллельно с интеграцией ИД7 в состав системы ведётся разработка нового узкополосного индукционного датчика на замену уже существующего МПД-1, конструктивно выполненного на основе ферритового стержня из материала М2000НМ. Основной задачей стоит уменьшение габаритов датчика без потери чувствительности.

Ферритовый стержень диаметром 10 мм и длиной 200–250 мм обладает высокой магнитной проницаемостью ($\mu \approx 2000–3000$) и низкими потерями в области десятков и сотен килогерц, что позволяет сформировать компактную измерительную катушку с высокой добротностью. При использовании проводов сечением 0,2–0,3 мм² и плотной послойной намотке предполагается достижение индуктивности порядка 5–10 мГн при активном сопротивлении менее 50 Ом. Это обеспечит высокое отношение сигнал/шум и чувствительность до 0,2–0,25 мВ/нТл на частотах 10–100 кГц.

Разработка нового компактного индукционного датчика ориентирована на сохранение его чувствительности на уровне существующего датчика МПД-1, при уменьшении габаритов и улучшении эксплуатационных характеристик, что особенно важно для мобильных измерительных комплексов. Его использование позволит снизить массу и объём аппаратуры без ухудшения параметров регистрации, а также обеспечит совместимость с существующими элементами системы. Это создаёт предпосылки для более гибкого применения комплекса в различных полевых условиях.

Таким образом, разрабатываемая система ориентирована на универсальность и адаптацию к различным задачам. Предполагается, что она сможет эффективно применяться как в условиях стационарных измерительных пунктов, так и при проведении длительных полевых экспериментов.

Выводы. В работе рассмотрены направления модернизации системы регистрации высокочастотных электромагнитных сигналов литосферного происхождения. Проанализированы ограничения существующей реализации, основанной на применении звуковой карты, и предложены два альтернативных подхода: использование 16-разрядного АЦП E-502 с готовым программным обеспечением, обеспечивающим совместимость с другими разработками ЛПАР и минимизацию сроков внедрения, а также разработка автономного регистратора на базе 24-разрядного АЦП и микроконтроллера, ориентированного на низкое энергопотребление, высокую точность измерений и отказ от внешнего ПК.

Для обеспечения синхронной регистрации в составе различных геофизических комплексов предусмотрена поддержка синхронизации старта записи по сигналу GPS.

Планируется внедрение широкополосного индукционного датчика ИД7, обладающего стабильными характеристиками, а также ведётся разработка компактной модификации узкополосного датчика.

Предложенные технические решения обеспечивают основу для дальнейшего развития системы регистрации электромагнитных сигналов литосферного происхождения в направлении повышения точности, автономности и адаптивности к различным условиям полевых работ.

Литература

1. Лашин О.А., Бобровский В.В. О выделении сигнала высокочастотного ЭМ–поля литосферного происхождения: теоретический аспект // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2022. № 2. Вып. 54. С. 60–68.
2. Лашин О.А., Бобровский В.В. О выделении сигнала высокочастотного ЭМ–поля литосферного происхождения: практический аспект // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2024. № 2. Вып. 62. С. 100–108.
3. Лашин О.А. Широкополосный датчик переменного магнитного поля для геоэлектроразведки // Вестник КРСУ. 2015. Т. 15. № 9. С. 179–185.
4. Бобровский В.В. Разработка аппаратурно-программного обеспечения для исследований современных геодинамических процессов в земной коре на территории Северного Тянь-Шаня // Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов. Материалы II Всерос. науч. конф., посвященной 300-летию Российской академии наук, г. Москва, ИФЗ РАН, 22-24 октября 2024 г. М.: Изд-во ИФЗ РАН. 2024. С 154–159.
5. Лашин О.А., Ильичев П.В. Разработка широкополосного индукционного датчика переменного магнитного поля для электромагнитного мониторинга земной коры // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. Материалы докл. VII Междунар. Симп., г. Бишкек, 19-24 июня 2017 г. Бишкек: НС РАН. 2018. С. 392-397.

УДК 53.087.9

ПОСТРОЕНИЕ СРЕДНЕЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Магай В.С., Рычков Б.А.
v.magay2002@mail.ru
Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан

В работе представлен анализ данных, полученных при измерении напряжений и деформации 12 тонкостенных трубчатых образцов алюминиевого сплава Д16, подвергнутых чистому кручению до разного уровня деформации сдвига. На основе современного программного комплекса вычислений Excel построена соответствующая диаграмма деформации в зависимости от уровня напряжения. Для оценки полученной усредненной кривой напряжения, была использована её аппроксимация, как функции от деформации, в виде некоторого приближающего многочлена, который в заданном интервале достоверности описывает фактический разброс экспериментальных данных. Разброс данных обусловлен тем, что при росте пластической составляющей деформации уменьшалось количество испытанных до этих деформации образцов. Предложенный метод построения средней экспериментальной кривой позволяет избежать составления нормальных уравнений, для определения коэффициентов приближающего многочлена и последующего их решения методом последовательных приближений.

Ключевые слова: средняя экспериментальная кривая, метод наименьших квадратов, приближающий многочлен, стандартные отклонения, доверительная вероятность.

Введение. Результаты эксперимента, ровно, как и всякое измерение, всегда содержит определенную погрешность. В нашем случае, при построении средней экспериментальной диаграммы кручения образцов сплава Д16 использованы данные измерения напряжений и деформации 12 испытанных образцов [1]. Нахождение возникающих погрешностей сводится к громоздкому математическому аппарату, упрощение которого представляет собой наибольший интерес.

Алгоритмы построения средней экспериментальной кривой. Классический метод. По полученным экспериментальным данным составляется таблица 1, по горизонтали указываются значения деформации (γ), начиная с $\gamma = 0.2\%$, с шагом $h = 0.1\%$, по вертикали указывается номер соответствующего испытанного образца, в последней графе приводятся среднеарифметические значения напряжения. Полученная таблица интересна тем, что по мере роста деформаций, уменьшается фиксируемое количество напряжений. Чтобы учесть указанное распределение напряжений и деформаций, аппроксимируем полученные в опыте значения напряжений в виде некоторого приближающего многочлена, учитывая «вес» (вклад) каждого отдельного образца. Для определения степени приближающего многочлена, используется теорема [2]: «… если n-е разности функции, образованные для равноотстоящих значений аргумента при любом шаге h, постоянны то функция представляет собой многочлен степени n». Таким образом, судя по вторым разностям между среднеарифметическими значениями напряжений, можно принять приближающий многочлен в виде:

$$\tau = X + Y\gamma + Z\gamma^2 \qquad (1)$$

Предварительно укажем, что нахождение коэффициентов многочлена (*X, Y, Z)* по классическому методу обычно сводится к составлению системы уравнений по непосредственным наблюдениям [3]. Чтобы упростить вычисления, можно считать, что значение аргумента γ ошибкам наблюдений не подвержена, следовательно, можно перейти к составлению 12 уравнений:

$$\begin{aligned} &X + 0.2Y + 0.04Z = 381.3 \\ &X + 0.3Y + 0.09Z = 439.4 \\ &\vdots \\ &X + 1.4Y + 1.96Z = 688 \end{aligned} \qquad (2)$$

Выберем из 12 уравнений - 1, 5 и 10, и найдем с помощью них, приближенные значения *X, Y, Z*:

$$X_0 = 265, \quad Y_0 = 645, \quad Z_0 = -290$$

Далее составляются нормальные уравнения и находятся точные значения *X, Y, Z*, в виде следующих выражений [1]:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + \xi \\ Y &= Y_0 + \eta \\ Z &= Z_0 + \zeta \end{aligned} \qquad (3)$$

Опуская промежуточные выкладки, укажем полученный [1] итоговый результат вычислений:

$$\begin{aligned} X &= 265 + \xi = 308.5 \pm 10.4 \\ Y &= 645 + \eta = 475.3 \pm 30.26 \\ Z &= -290 + \zeta = -155.7 \pm 19.91 \end{aligned} \qquad (4)$$

Таблица 1 – Экспериментальные данные

№, γ,%	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
1	445	500	548	587	622								
2	426	500	530	570	590	620	645						
3	412	470	515	572	580	592	627	645	675	700	718	735	750
4	400	460	510	545	565	585	610						
5	380	460	502	540	565	580	600	620					
6	365	423	475	518	558	580							
7	360	430	465	495	520	545	565	600	620	650	665	690	705
8	340	425	460	495	515	545	560	585	600	618	640	655	675
9	338	415	445	490	510	540	555	575					
10	400	405	445	485	525	565	580	600	615	625	640	655	670
11	330	385	450	470	500	510	525	540	565	582	602	620	640
12	380	400	450	500									
τ_{cp}	381.3	439.4	483	522.2	500	566.2	585.2	595	615	635	653	671	688

На этом заканчивается классический метод построения средней экспериментальной кривой, представленной на рисунке 1.

Наглядно показав громоздкость математических выкладок по классическому методу последовательных приближений, перейдем к более универсальному методу построения средней экспериментальной кривой, основанный на использовании современных программ, в нашем случае Excel.

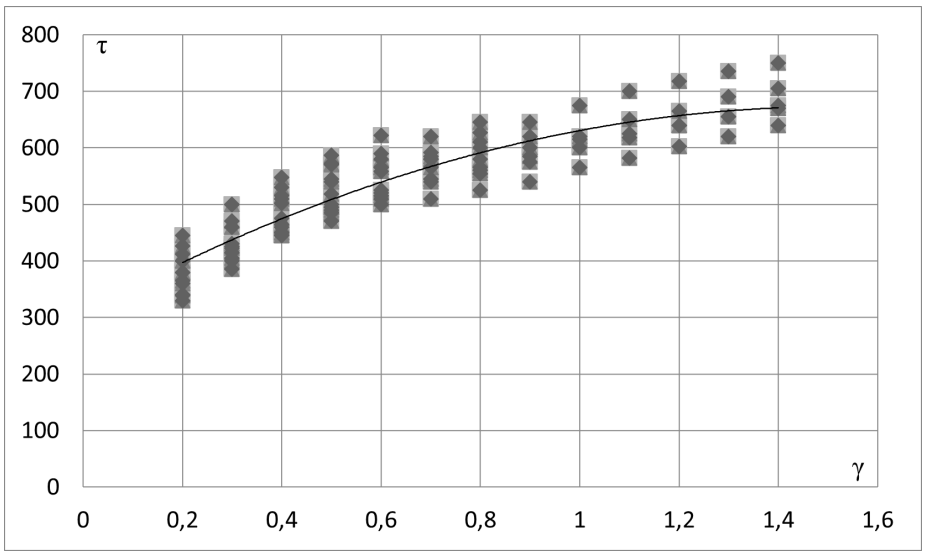


Рисунок 1 – Средняя экспериментальная кривая по классическому методу

Универсальный метод. Исходная таблица 1, переписывается в виде двух столбцов (таблица 2), взаимного отображения напряжений и деформаций, в соответствии с испытанными образцами, т.е. с 1 по 12.

Таблица 2 – Уточненные данные

№1	0.2	445
	0.3	500
	0.4	548
	0.5	587
	0.6	622
	0.2	426
	0.3	500
	0.4	530
	0.5	570
	0.6	590
	0.7	620
	0.8	645
…	…	…
№12	0.2	380
	0.3	400
	0.4	450
	0.5	500

Затем с помощью таблицы 2 и внутреннего инструментария Excel строится точечная диаграмма (рис. 2), на которой с помощью добавления линии тренда можно добиться построения средней экспериментальной кривой, которая полностью определяет уравнение (1) и показывает наглядно величину достоверности выбранной аппроксимации, тем самым сводит большую часть математических выкладок к простой вставке диаграммы.

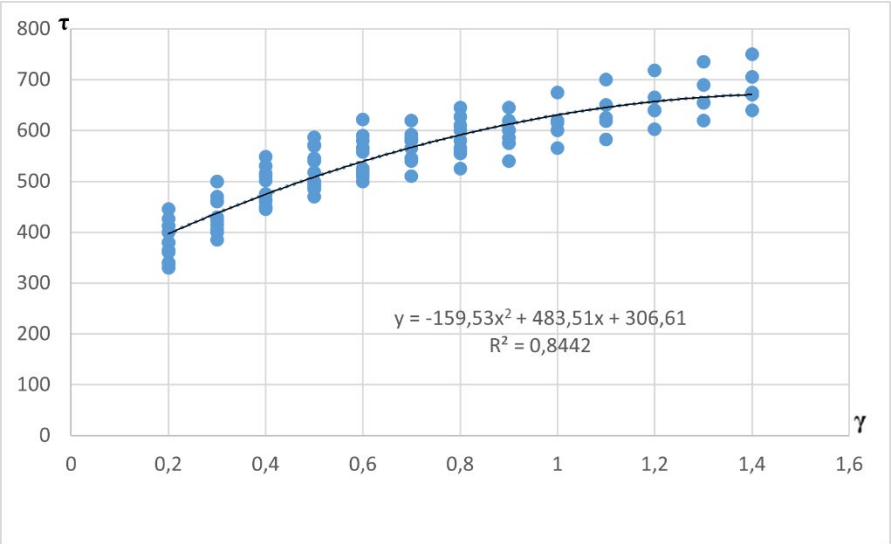


Рисунок 2 – Средняя экспериментальная кривая по универсальному методу

Однако, приведенный метод заставляет отдельно высчитывать вероятные ошибки отдельного взятого коэффициента *X, Y, Z* по формулам, результаты показаны в таблице 3:

$$\begin{aligned}&\text{ДОВЕРИТ.СТЬЮДЕНТ}((100-80)/100;\text{СТАНДОТКЛОН.В}(\tau);\text{СЧЕТ}(\tau))\\&\text{ДОВЕРИТ.СТЬЮДЕНТ}((100-99.9)/100;\text{СТАНДОТКЛОН.В}(\tau);\text{СЧЕТ}(\tau))\\&\text{ДОВЕРИТ.СТЬЮДЕНТ}((100-97)/100;\text{СТАНДОТКЛОН.В}(\tau);\text{СЧЕТ}(\tau))\end{aligned} \quad (5)$$

Таблица 3 – Вероятные ошибки

p_1	11.69709
p_2	30.68168
p_3	19.94808

Выводы. Приведенные методы по построению средней экспериментальной кривой имеют свои преимущества и недостатки. Описанный универсальный метод обработки экспериментальных данных значительно упрощает процесс анализа результатов эксперимента, минуя составление систем уравнений и последующего их решения. Это позволяет переходить к построению графика функции с выводом всей необходимой информации на самой диаграмме, сводя тем самым трудоемкую обработку экспериментальных данных, к получасовой или часовой работе с таблицами и диаграммами.

Литература

1. Рычков Б.А. Теоретическое и экспериментальное исследование деформации алюминиевых сплавов при некоторых сложных нагружениях. Дис. канд. техн. наук. Фрунзе. 1970. 120 с.
2. Гутер Р.С., Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. М.: Наука. 1970. 432 с.
3. Крылов А.Н. Лекции о приближенных вычислениях. Л.-М.: Изд–во АН СССР. 1935. 542 с.

УДК 622.235

ФРАКЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ТЕКУЩИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ БВР, ЕГО ИННОВАЦИОННАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Милько А.А., Майрамбекова А.М., Братцев К.О., Даньшин М.П., Доскожоева Н.М., Ефимов А.Л., Александров В.Г.
annya4002@gmail.com
Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан

Конечным результатом применения математических методов в производстве является оперативное управление ключевыми факторами, влияющими на себестоимость выпускаемой продукции. В горнодобывающей промышленности более 60% текущих затрат связаны с карьерно-фабричными процессами, включающими буровзрывные работы, погрузку, транспортировку, а также крупное и среднее дробление взорванной породы на фабрике. Эти расходы во многом зависят от качества взрывной подготовки, которая оказывает значительное влияние на все последующие технологические этапы и общую эффективность добычи. В данной работе представлена теоретическая основа фракционно-энергетического модельного комплекса, объединяющего все значимые параметры буровзрывных работ. Этот комплекс, используя входные данные телеметрии бурения, позволяет рассчитывать выходные параметры бурения-взрывания, что способствует оптимизации технологических процессов, снижению затрат, повышению эффективности производства и улучшению общих показателей работы предприятия.

Ключевые слова: физическое подобие, энергоемкость, средний кусок, осколок, параметры бурения-взрывания, константы подобия.

Введение. В настоящее время существует большое разнообразие моделей расчёта параметров БВР, которые базируются на знании её основных физико-механических параметров горного массива. Совокупность этих моделей условно можно разбить на четыре класса: блочно-прочностные, акустические, фрагментационные, энергетические.

Блочно-прочностные модели [1-3] устанавливают связь удельного расхода ВВ с трещиноватостью, прочностью, плотностью породы и заданным размером среднего куска породы в развале.

Акустические модели [1, 2, 4] устанавливают связь удельного расхода ВВ и основных физико-механических характеристик горного массива с плотностью породы и скоростями распространения в нём акустических волн.

Фрагментационные модели устанавливают связь выхода классов крупности породы в развале с параметрами взрываемости породы, массой заряда и объёмом горной массы. Эти модели основаны на теоретических положениях Кузнецова и Раммлера, модели класса Куз-Рам [4, 5-7, 8-10].

Энергетические модели [1, 10-13] устанавливают связь удельного расхода ВВ с удельной энергией бурения и заданным размером среднего куска в развале и крепостью породы.

Однако, все приведённые классы моделей используют для расчёта параметров взрыва физико-механические параметры породного массива, которые не могут быть оперативно определены в производственных условиях горных предприятий. То есть в производстве БВР сложилась технологическая коллизия, которая не может быть разрешена в существующих теоретических построениях.

Разработанный нами фракционно-энергетический подход позволяет решать в реальном масштабе времени текущие задачи БВР по данным бортовой телеметрии бурового станка.

1. Теоретическая основа фракционно-энергетического подхода к решению текущих производственных задач БВР.

1.1 Подобие поверхностно-энергетических отношений бурения-взрывания

К большинству горных пород применима теория квазихрупкого разрушения, которая гласит [1]: «Величина необратимой работы E, затраченной на образование единицы площади свободной поверхности тела при развитии трещины, является константой данного материала, не зависящей от нагрузок, формы и размеров тела.» Там же Ю.М. Мисник и К.А. Долгов сформулировали аналогичное определение и для взрывного разрушения породы: «удельная поверхностная энергоемкость - ε является физической константой породы, не зависящей от способа ее разрушения».

Данные утверждения вытекают из законов дробления П.А. Ребиндера и П. Р. Риттингера, которые для квазихрупкого дробления описываются выражением (1.1):

$$E_{\text{р}} = \varepsilon \cdot S_{\text{нп}}, \tag{1.1}$$

где $E_{\text{р}}$– удельная энергия разрушения (энергоёмкость); ε – удельная поверхностная энергия; $S_{\text{нп}}$ – площадь поверхности кусков разрушенной породы.

Из равенства (1.1) для $f = const$ вытекает равенство поверхностно-энергетических отношений бурения-взрывания (1.2):

$$\frac{E_{\text{бр}}}{S_{\text{бм}}} = \frac{E_{\text{вз}}}{S_{\text{вз}}}, \tag{1.2}$$

где $E_{\text{бр}}$, $E_{\text{вз}}$– энергоёмкость разрушения бурением и взрыванием; $S_{\text{бм}}$, $S_{\text{вз}}$- площадь поверхности кусков разрушенной породы бурением и взрыванием.

1.2 Подобие фракционно-энергетических отношений бурения-взрывания

Пусть куски разрушенного единичного куба (ребро - D) имеют форму кубов с одинаковой длиной ребра – d. Площадь поверхности кубичных кусков разрушенного единичного куба описывается выражением (2.1):

$$S_{\text{к}} = 6 \cdot \frac{D^3}{d} \tag{1.3}$$

Пусть имеем два варианта разрушения единичного куба на кубичные куски:

$$S_{\text{к1}} = 6 \cdot \frac{(D_1)^3}{d_1} \text{ и } S_{\text{к2}} = 6 \cdot \frac{(D_2)^3}{d_2}$$

Определим их отношение (2.2) с учётом того, что $(D)^3 = 1$:

$$\frac{S_{\text{к1}}}{S_{\text{к2}}} = \frac{d_2}{d_1} \tag{1.4}$$

Отношение (2.2) также сохраняет свою силу и для общего случая.

1.3 Основное фракционно-энергетическое отношение физического подобия процессов бурения-взрывания

Учитывая сказанное и формулу (1.2), можно переписать в следующем виде (2.3):

$$\frac{E_{\text{бр}}}{E_{\text{вз}}} = \frac{S_{\text{бм}}}{S_{\text{вз}}} = \frac{d_{\text{ср}}}{d_{\text{бм}}} = Q, \tag{1.5}$$

где Q – фракционно-энергетический коэффициент подобия поцессов бурения-взрывания.

2. Основные задачи БВР

К настоящему времени в цифровой геоинформатике горнодобывающих предприятий чётко выделяются четыре типа задач БВР, которые требуют практического внедрения и уже имеют аппарат их решения с целью снижения текущих карьерно-фабричных затрат. К таким задачам относятся:

- Прямая;
- Обратная;
- Первичная настройка моделей;
- Оперативная (по проходке скважины) оптимизация параметров бурения и взрывания по критерию минимума удельных карьерно-фабричных затрат.

2.1 Прямая задача:

Входной информацией решения задачи являются данные бортовой телеметрии бурового станка [13-15] (Александров): осевая нагрузка - $F_{\text{ос}}$, частота вращения долота – n,

скорость проходки – v, момент вращения долота - $M_{\text{вр}}$; диаметр скважины - $d_{\text{ск}}$, средний размер куска породы в развале - $d_{\text{ср}}$, удельная теплота взрыва ВВ - $e_{\text{вв}}$ и геометрические параметры шарошек долота - ξ_1 и ξ_2.

Результатом расчёта являются: крепость породы – f, энергоёмкость бурения - $E_{\text{бр}}$, энергоёмкость взрывания - $E_{\text{вз}}$, удельный расход ВВ – q.

Все указанные параметры считываются с датчиков и рассчитываются в реальном режиме времени по проходке долота. Таким образом, получается полная информация для заряжания скважин непосредственно сразу после завершения бурения.

2.2. Обратная задача:

Входной информацией решения задачи являются данные фактических параметров как бурения, так и взрывания: размер среднего куска в развале по скважинам, удельный расход ВВ, средние по скважинам параметры бурения.

Результатом решения задачи являются: отклонения расчётных параметров БВР от фактических, в случае превышения допустимых отклонений по скважинам по расчётным причинам производится адаптация моделей к неучтённым физико-механическим условиям горной среды.

2.3. Первичная настройка фракционно-энергетического комплекса моделей:

Задачу первичной настройки моделей можно решать двумя способами:

- Сведение её к решению обратной задачи, для чего начальный взрыв блока рассчитывается по модели нулевого приближения, а по результатам взрыва решается обратная задача с адаптацией модели под реальные условия.
- Экспериментальным путём по фактическим данным параметров бурения и взрывания, данным фактической гранулометрии бурения-взрывания. По этим данным методами статистического анализа и приближённых вычислений рассчитываются настроечные коэффициенты моделей.

При внедрении нашего подхода в производство первый способ не имеет настроечного экспериментального периода, второй способ позволяет настраиваться в производственных условиях. Первый способ более длинный, но имеет меньше рисков в производственной стадии эксплуатации, второй способ быстр во внедрении, но имеет риски первичных отклонений в производственной эксплуатации.

2.4. Оперативная (по проходке скважины) оптимизация параметров бурения и взрывания по критерию минимума удельных карьерно-фабричных затрат

Оперативными управляющими параметрами процессов бурения-взрывания являются: осевая нагрузка – F, Тс на долото, его частота вращения – n, $с^{-1}$ и удельный расход ВВ – q, кг/м3. Управляемыми параметрами являются: удельная стоимость карьерно-фабричных затрат [16, 17].

Модель удельных затрат на переработку 1-го кубического метра горной породы - $П_{\text{ДП}}$:

$$П_{\text{ДП}} = З_{\text{бр}} + З_{\text{вз}} + З_{\text{п}} + З_{\text{тр}} + З_{\text{Др}} \quad (2.1)$$

- Показатель удельных затрат бурения - $З_{\text{бр}}$.
- Показатель удельных затрат на взрывные и погрузочно-транспортные работы - $П_{\text{ВПТ}}$:

$$П_{\text{ВПТ}} = З_{\text{вз}} + З_{\text{п}} + З_{\text{тр}} \quad (2.2)$$

$$З_{\text{вз}} = с_{\text{вв}} \frac{d_{\text{бм}} E_{\text{бр}}}{d_{\text{ср}} e_{\text{вв}}} \quad (2.3)$$

$$З_{\text{п}} = 21{,}6 \frac{с_{\text{Э}}}{3{,}6} (0{,}0295 W_{0\text{к}1} - 0{,}0004 W_{0\text{к}1}^2)\left(d_{\text{ср}} + 0{,}6 d_{\text{ср}}^2\right) \quad (2.4)$$

$$З_{\text{тр}} = с_{\text{Дт}} \frac{t_{\text{р}} v^2 q_{e\text{г}}}{W_{0\text{к}2} k_{\text{н}2}} \left[W_{0\text{к}2} k_{\text{н}2} \rho + 2 G_c \left(1 + d_{\text{ср}}\right)\right] \quad (2.5)$$

- Показатель удельных затрат фабричное дробление - $З_{\text{Др}}$:

$$З_{\text{Др}} = 10^4 с_{\text{Э}} \varepsilon \frac{d_{\text{ср}}}{3{,}6} \left(d_{\text{ср}} - d_{\text{в}}\right) \quad (2.6)$$

Задача оптимизации карьерно-фабричных затрат решается непрерывно по проходке долота, на каждом интервале:

- Для каждого интервала - Δl_i проходки по данным его телеметрии бурения рассчитываются оптимальные параметры режима бурения для интервала бурения - Δl_{i+1} по критерию минимума удельных затрат бурения - $З_{бр}$.
- Для каждого интервала - Δl_i проходки по данным его телеметрии бурения рассчитывается оптимальный размер среднего куска породы - d_{cpi} по критерию:

$$\left(З_{вз} + З_{п} + З_{тр} + З_{Др}\right).$$

- По окончании бурения по интервалам - Δl_i проходки скважины формируется массив данных оптимальной массы заряда и ожидаемым удельным затратам по отработке приходящейся на неё горной массы.
- После обуривания всего блока формируется зарядный массив и ожидаемое значение удельных карьерно-фабричных затрат по блоку.

Выводы:

1. Фракционно-энергетический подход позволяет решать задачи БВР в реальном масштабе времени по глубине проходки скважины.
2. Фракционно-энергетический подход обладает инновационной привлекательностью по своей теоретической основе и набору решаемых задач.
3. Фракционно-энергетическому подходу необходимы программно-аппаратная доработка для производственного внедрения.
4. Для настройки моделей затрат необходимы фактические данные по затратам ресурсов на производство карьерно-фабричных работ.

Литература

1. Додис Я.М., Нифадьев В.И. Разрушение горных пород при бурении и взрывании. Учеб. пособие. Бишкек: КРСУ. 2006. 374 с.
2. Виноградов Ю.М. Методы расчета параметров буровзрывных работ. Ретроспективный обзор и перспективы их совершенствования в мировой практике горных работ. (URL: https://studopedia.su/9_55228_metodi-rascheta-parametrov-buro-vzrivnih-rabot-retrospektivniy-obzor-i-perspektivi-ih-sovershenstvovaniya-v-mirovoy-praktike-gornih-rabot.html дата обращения 2025)
3. Аленичев И.А. Корректировка удельного расхода взрывчатого вещества с учётом обводнённости апатит-нефелиновых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 364–373. ISSN 0236-1493.
4. Применение акустических методов для исследования свойств и состояния горных пород. Волновые процессы. 20-03-2017, 14:17
5. Sohrab Gheibi, Hamid Aghababaei, Seyed Hadi Hoseinie, Yashar Pourrahimian. Modified Kuz–Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2009. 46 (6). 967-973. (URL: https://www.researchgate.net/publication/208032337_Modified_Kuz-Ram_fragmentation_model_and_its_use_at_the_Sungun_Copper_Mine обращения 2025)
6. Jethro Michael Adebola, Ogbodo David Ajayi, Peter Elijah.O. Rock Fragmentation Prediction using Kuz-Ram Model // Journal of Environment and Earth Science. 2016. Vol. 6. No.5. P. 110-115.
7. Bruno Ayaga Kansake, Victor Temeng, Bright Afum. Comparative Analysis of Rock Fragmentation Models – A Case Study // 4th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference, At Tarkwa, Ghana. August 2016. (URL: https://www.researchgate.net/publication/307594360_Comparative_Analysis_of_Rock_Fragmentation_Models_-_A_Case_Study дата обращения 2025)
8. Hamdi E.E. Fragmentation Energy in Rock Blasting // Geotech. Geol. Eng. 2000. P. 133-146.
9. Sanchidrian J.A., Segarra P., Lopez L.M. On specific surface and fragmentation energy of blasted rock // Vienna Conference Proceedings. European Federation of Explosives Engineers. 2007. P. 63-73.

10. Жариков С.Н. Взаимосвязь процессов шарошечного бурения и взрывного разрушения массива горных пород // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 2. С. 62-67.
11. Тангаев И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. М.: Недра. 1986. 231 с.
12. Программно-технический комплекс «Blast Maker». Электрон. дан. (1 файл). (URL: https://dprom.online/unsolution/avtomatizirovannaya-podgotovka-proizvodstva-na-karerah-programmno-tehnicheskij-kompleks-blast-maker/ дата обращения 2025)
13. Александров В.Г. Экспериментальная проверка адекватности фракционно-энергетического подхода к расчету параметров буровзрывных работ по телеметрическим данным // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 4. С. 97–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-97-112.
14. Александров В.Г., Сиземов Д.Н., Темкин И.О., Иванников А.Л. Повышение энергоэффективности работы горных предприятий с помощью применения при расчетах фракционно-энергетических моделей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 12. С. 118–134. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_118.
15. Бибик И.П. Метод определения оптимальных параметров буро-взрывных работ для технологических потоков карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 3. С. 119-122. (URL: http://www.giab-online.ru/files/Data/2005/3/4_Bibik_4.pdf. дата обращения 2025)
16. Угольников Н.В., Симаков Д.Б., Угольникова М.В. Оптимизация энергозатрат на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 4. С. 102-105. (URL: https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-energozatrat-na-karierah/viewer. дата обращения 2025).

УДК 621.3.019.34

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОДХОДА

Мкртчян Г.А., Суслова А.А., Буцкий Д.О., Зубрильцев Е.Е.
gamkrtchyan@edu.hse.ru
Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова
НИУ «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

В современной практике расчета надежности наблюдается существенное занижение теоретических показателей по сравнению с реальными результатами. Существующие отечественные методики, опирающиеся на усредненную интенсивность отказов, зачастую не учитывают вариативность организационно-технологических факторов, которые влияют на выполнение требований нормативно-технической документации. Особую роль в этом играет «коэффициент качества производства», он отражает, насколько продукция соответствует установленным стандартам и требованиям, однако данный показатель является интегральным параметром, из-за чего отсутствует возможность учитывать неполное выполнение процедур, человеческий фактор и иные отклонения в системе контроля, что может приводить к завышенным оценкам надежности. В рамках данной работы предлагается уточнить рассматриваемый коэффициент путём введения свойства дифференциальности. На базе отечественных нормативов и международного опыта разрабатывается метод, включающий опросник и онтологический подход для анализа факторов на всех стадиях жизненного цикла. Результатом исследования станет обновлённая методика расчёта показателей надёжности, учитывающая организационно-технологические условия и специфику конкретных производств.

Ключевые слова: дифференциальный подход, коэффициент качества производства, 217Plus, FIDES, электронный модуль, стадии и этапы жизненного цикла

Введение. Современные методы оценки надёжности электронных модулей (ЭМ), применяемые в Российской Федерации, преимущественно опираются на расчёт интенсивности отказов, известный как «λ-характеристика», который учитывает электрические нагрузки, температурный режим и общие условия эксплуатации. Тем не менее комплекс организационно-технологических мероприятий, отвечающих за обеспечение требуемого уровня качества при проектировании и изготовлении, часто не получает должного внимания в существующих методиках. В качестве дополнительного учётного параметра введён «коэффициент качества производства», показатель, который призван отразить степень соответствия продукции установленным стандартам, методикам и процедурам. На практике данный коэффициент трактуется как интегральная величина, не отражающая частичных несоответствий требованиям и не позволяющая учитывать влияние человеческих ошибок.

Одновременно важную роль играет система менеджмента качества (СМК) — совокупность управленческих механизмов и процедур, отвечающих за поддержание и совершенствование процессов, влияющих на характеристики изделий. Нередко именно СМК при формальном подходе к контролю либо при её недостаточной эффективности не обеспечивает ожидаемого уровня безотказности. В результате расчётные показатели надёжности могут существенно расходиться с реальной статистикой отказов, выявляемой в ходе приёмно-сдаточных испытаний и эксплуатации.

Это приводит к завышенным прогнозам показателей безотказности, к ошибкам в планировании ресурса изделий, а также к рискам, связанным с гарантийными обязательствами. В сфере гражданского применения вопрос усложняется ещё и отсутствием

формального метода определения «коэффициента качества производства», что затрудняет объективную оценку надёжности ЭМ в целом. В связи с этим представляется актуальным повысить достоверность реальных показателей надёжности путём введения свойства дифференциальности непосредственно в «коэффициент качества производства». Такая модификация позволит скорректировать усреднённый подход, учитывая реальные организационные и технологические условия, а также специфические особенности функционирования системы менеджмента качества, не меняя при этом основополагающую концепцию расчёта «λ-характеристик».

В рамках данной работы во второй главе (Обзор литературы) анализируется текущее состояние дел в исследуемой области и выявляются основные проблемы существующих подходов. В третьей главе (Методы) детально рассмотрены инструменты и способы, позволяющие реализовать обновлённый способ расчёта. В четвёртой главе (Существующие результаты) представлена усовершенствованная структура опросника с учётом российских реалий. Наконец, в пятой главе (Заключение) подводятся итоги проделанной работы, сформулированы выводы и обозначены направления дальнейших исследований.

Обзор литературы. В отечественной и международной практике расчёта надёжности электронных модулей существует широкий спектр методик, которые в основном сводятся к оценке интенсивности отказов. Многие исследования показывают, что традиционные методы прогнозирования надежности часто занижают фактические показатели надежности.

Так, в работе Кумара и соавторов [1] рассматриваются основные методологии прогнозирования надежности электронных устройств. Исследователи отмечают, что традиционные методы, такие как MIL-HDBK-217**,** Telcordia**,** Siemens SN29500**,** часто дают заниженные оценки надежности. Причины этого связаны с ограничениями самих моделей: они базируются на устаревших статистических данных, не учитывают изменения технологических процессов и не адаптированы к динамическим условиям.

Такое расхождение между расчетными и реальными показателями надежности наблюдается в самых разных областях. В одних случаях это связано с тем, что методы оценки надежности опираются на слишком упрощенные допущения, в других — с тем, что внешние факторы, влияющие на надежность, недостаточно изучены или формально не учитываются в расчетах. Например, отклонения в технологии изготовления, человеческий фактор, несовершенства контроля качества и недостаточная точность соблюдения технологических норм могут привести к тому, что фактические параметры надежности окажутся намного ниже, чем предсказанные по расчетам.

Например, в сфере Интернета вещей (IoT) традиционные подходы к оценке надежности сталкиваются с проблемами из-за высокой динамичности таких систем. В исследовании Ксинга (2020) [2] показано, что IoT-устройства, особенно беспроводные сенсоры и интеллектуальные узлы обработки данных, подвержены множеству факторов отказов: нестабильности сети, энергозависимости, влиянию внешней среды. Однако существующие модели прогнозирования надежности не в полной мере учитывают сложные взаимосвязи между устройствами и их адаптивное поведение, что приводит к занижению расчетной надежности IoT-систем.

В силовой электронике также наблюдается значительное расхождение между расчетными и фактическими показателями надежности. Как показано в исследованиях Пейгами [3] и Ванга [4], традиционные методики прогнозирования не учитывают процессы деградации компонентов, что приводит к завышению расчетных значений. В реальных условиях эксплуатации силовые модули (например, SiC MOSFET и GaN-транзисторы) часто выходят из строя раньше прогнозируемого срока из-за тепловых нагрузок и электромеханического старения.

При этом основное внимание в прогнозах надежности уделяется термическому износу, в то время как другие механизмы отказов, вызванные влажностью, вибрацией и загрязнениями, не анализируются количественно. В исследовании отмечается, что такие внешние воздействия в современных моделях прогнозирования надежности фактически редко учитываются, что приводит к недостаточной точности расчетов.

Несоответствие теоретических расчётов реальной статистике отказов проявляется и в высоконагруженных космических системах. Как отмечают Рутледжа и Мослеха [5], а также подчёркивается в статье Гиуглиарелли и Генета [6], длительное время стандартные (то есть «универсальные») методы полагались на предположение независимости отказов и усреднённые показатели отказоустойчивости. Однако в пилотируемых космических проектах это приводило к ощутимому расхождению между расчётными величинами надёжности и фактическим количеством отказов. Во многом проблема усугубляется тем, что недостаточно статистических данных для точной оценки влияния организационно-технологических и иных факторов, специфичных для конкретного производства или конкретной миссии.

Кроме того, у Гиуглиарелли и Генета показано, что в космической отрасли часто не учитываются «зависимые» или «общие» причины отказов (Common Cause Failures, CCF), при которых один и тот же производственный дефект, конструкторская ошибка либо единичное внешнее воздействие может одновременно вывести из строя несколько элементных модулей. В условиях, когда для повышения надёжности активно применяется резервирование, такое игнорирование CCF приводит к тому, что теоретически «избыточная» система оказывается более уязвимой, чем предполагалось в классических расчётах. В результате на практике выявляются факторы, которые формально не были заложены в исходные модели, и итоговая разница между реальными отказами и прогнозными значениями возрастает.

Как отмечают Гиуглиарелли и Генета, при создании прогнозных моделей надежности в космических миссиях необходимо учитывать специфику производственного процесса, включая уровень автоматизации, особенности системы управления качеством, человеческий фактор и условия эксплуатации. Однако формальные количественные методики, позволяющие количественно оценить влияние этих факторов, все еще находятся в стадии развития. Это особенно актуально для гражданских и коммерческих отраслей, где существующие методы прогнозирования надежности часто основаны на усредненных данных и не отражают вариативность производственных и эксплуатационных условий. Таким образом, возникает необходимость разработки более адаптивных моделей оценки надежности, учитывающих влияние человеческих, технологических и управленческих факторов на итоговые показатели безотказности изделий.

Методы. Как было показано в предыдущих разделах, традиционные методы оценки надежности, основанные на усредненных коэффициентах отказов, не позволяют учитывать влияние организационно-технологических факторов. Это приводит к значительному расхождению между расчетными и фактическими показателями безотказности, особенно для сложных электронных модулей. В связи с этим в данной работе рассматривается возможность повышения точности прогнозирования надежности за счет дифференциального подхода к оценке коэффициента качества производства.

В качестве основы для разработки метода выбраны справочники FIDES [7] и 217Plus [8], которые предлагают более точные модели оценки надежности по сравнению с классическими подходами.

Методика FIDES была разработана французскими оборонными и аэрокосмическими компаниями и использует данные об отказах из различных источников, включая оборонную промышленность, аэрокосмический сектор и производителей комплектующих. Основная идея FIDES заключается в том, чтобы учитывать не только физические характеристики компонентов, но и управленческие, технологические и организационные факторы, влияющие на их надежность. Авторы Анусуя и Виджаякумар [9] подчеркивают, что одно из основных преимуществ FIDES является то, что данная методология не противоречит существующим моделям оценки отказов, а также адаптируется к различным отраслям, что делает ее универсальной и применимой для широкого спектра систем.

217Plus, в свою очередь, представляет собой развитие методологии MIL-HDBK-217 и предлагает обновленные модели расчета отказов, учитывающие данные о производственных процессах. Аналогично FIDES, 217Plus позволяет учитывать принципы СМК.

Все благодаря встроенному опроснику, который используется в FIDES и 217Plus для оценки организационно-технологических факторов, влияющих на надежность. В отличие от традиционных подходов, основанных на усредненных коэффициентах отказов, эти справочники позволяют учитывать специфику конкретного производства за счет сбора информации о его реальном состоянии.

В качестве возможного метода для повышения точности оценки коэффициента качества производства может быть использован дифференциальный подход, основанный на раздельном учете различных причин отказов.

Так, в работах Полесского и Королева [10,11] предлагается учитывать влияние различных факторов отказов путем их раздельного анализа и введения соответствующих корректирующих коэффициентов. Основная идея заключается в том, что «коэффициент качества производства» не определяется единым интегральным показателем, а формируется за счет совокупного влияния множества факторов, относящихся к различным категориям отказов. В качестве основы для модели принят подход 217Plus, адаптированный под российские условия.

$$K_{\text{А}} = \Pi_P \Pi_{IM} \Pi_{\text{Е}} + \Pi_D \Pi_G + \Pi_M \Pi_{IM} \Pi_E \Pi_G + \Pi_S \Pi_G + \Pi_I + \Pi_N + \Pi_W \quad (1)$$

Полесский вводит модель (1), в которой коэффициент качества производства ($К_А$) представлен в виде комбинации факторов, отражающих основные категории отказов. Такой подход позволяет дифференцированно учитывать влияние проектирования, инженерного контроля, эксплуатационных условий, уровня документационного сопровождения, управления, свойств материалов, технологических процессов, человеческого фактора, внешних воздействий и окружающей среды и многое другое. Предложенный подход позволяет адаптировать расчет с учетом специфики отечественного производства, уровня внедрения системы менеджмента качества и фактического выполнения требований нормативных документов.

Ожидаемые результаты. Изначально встроенные опросники в FIDES и 217Plus были разработаны для оценки влияния организационно-технологических факторов на надежность, однако их структура оставалась достаточно упрощенной. Каждый вопрос имел фиксированный вес и предопределенные варианты ответов, что ограничивало возможность детального учета специфики конкретного производства. При этом в FIDES опросник предусматривал разбиение по стадиям жизненного цикла изделия, тогда как 217Plus предлагал классификацию причин отказов. В представленной работе предпринята попытка объединить эти подходы, что позволило учитывать как влияние производственных процессов на различных этапах жизненного цикла, так и дифференцировать факторы, приводящие к отказам. Дополнительно внесены изменения в структуру анкетирования, включающие ряд ключевых метрик, что повысило точность и гибкость оценки надежности применительно к различным производственным условиям.

В ходе разработки уточненного опросника была проведена его структурная систематизация и доработка. Вопросы привязаны к нормативным документам (ГОСТ) и классифицированы по процессам согласно ГОСТ Р 57193-2016 [12] с разделением на главные и второстепенные. Введена категоризация по направленности: вопросы теперь делятся на относящиеся к персоналу и к продукту. Помимо этого, была введена предметная область для каждого вопроса, что позволяет структурировать анкету и сделать результаты анализа более удобными для восприятия пользователем. Реализовано распределение вопросов по стадиям и этапам жизненного цикла изделия. Данный подход основан на методологии FIDES, но был адаптирован с учетом отечественных нормативных требований. Вопросы также классифицированы по структуре организации, что позволяет учитывать влияние различных подразделений. Кроме того, внедрена система разбиения по причинам отказов, аналогичная применяемой в 217Plus, что обеспечивает детализированное выделение факторов, влияющих на надежность. Проведена адаптация опросника к российским условиям: переведены вопросы на русский язык, учтены особенности национальных стандартов и терминологии, а также приведены в соответствие с локальными нормами оценки надежности. На текущем этапе

реализованы вопросы, основанные на 217Plus, с дальнейшим расширением структуры за счет элементов методологии FIDES.

В дальнейшем планируется адаптация вопросов из FIDES для более точного учета различных факторов, влияющих на надежность. Кроме того, будет продолжено совершенствование онтологического подхода, направленное на уточнение взаимосвязей между параметрами надежности. Для этого в опросник будут добавляться новые метрики, учитывающие специфику производственных процессов, уровень внедрения системы управления качеством и влияние внешних факторов, что позволит повысить детализацию и адаптивность методики.

Выводы. Точность оценки надежности электронных модулей критически важна, однако традиционные методики не учитывают множество организационно-технологических факторов. В данной работе предложен подход, объединяющий идеи FIDES и 217Plus с адаптацией к российским условиям. Улучшена структура анкетирования, внедрено разбиение по стадиям жизненного цикла и классификация причин отказов.

Дальнейшее развитие включает адаптацию вопросов из FIDES, совершенствование онтологического подхода и добавление новых метрик.

Этот подход позволит снизить расхождения между расчетными и реальными показателями надежности, повысив точность прогнозов и эффективность управления ею. В итоге предприятия смогут лучше контролировать процессы, минимизируя риски и затраты.

Благодарность. Публикация подготовлена в ходе проведения исследования (Проект № 24-00-024 «Развитие методов прогнозирования показателей надежности электронных модулей») в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2025 г.

Литература

1. Kumar V., Singh L.K., Tripathi A.K. Reliability prediction methods for electronic devices: a state-of-the-art review // IETE Technical Review. Taylor & Francis. 2022. Vol. 39. No. 2. P. 460–470.
2. Xing L. Reliability in Internet of Things: Current status and future perspectives // IEEE Internet Things J. IEEE. 2020. Vol. 7. No. 8. P. 6704–6721.
3. Peyghami S., Wang Z., Blaabjerg F. A guideline for reliability prediction in power electronic converters // IEEE Trans Power Electron. IEEE. 2020. Vol. 35. N0. 10. P. 10958–10968.
4. Wang H., Blaabjerg F. Power electronics reliability: State of the art and outlook // IEEE J Emerg Sel Top Power Electron. IEEE, 2020. Vol. 9. No. 6. P. 6476–6493.
5. Rutledge P.J., Mosleh A. Dependent-failures in spacecraft: root causes, coupling factors, defenses, and design implications // Annual Reliability and Maintainability Symposium 1995 Proceedings. IEEE. 1995. P. 337–342.
6. Giugliarelli M., Genet E. Common Cause Failures Quantification in Fault Trees: A Space-specific Analysis and Methodology // 2024 IEEE Aerospace Conference. IEEE. 2024. P. 1–19.
7. FIDES Guide 2009, Reliability Methodology for Electronic Systems, DGA (Délégation Générale pour l'Armement), France, 2009, 270 p.
8. RIAC-HDBK-217Plus, Handbook of 217PlusTM Reliability Prediction Models, Reliability Information Analysis Center (RIAC), США, 2006, 182 p.
9. Anusuya K., Vijayakumar K. Comparative Study of Component-Level Reliability Approaches in Power Electronic Components // 2024 3rd International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering, ICAEEE 2024. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2024.
10. Артюхова М., Жаднов В., Полесский С. Оценка показателей надежности электронных средств с учетом многофакторного коэффициента качества производства // Компоненты и технологии. 2014. № 4 (153). С. 204–207.
11. Королев П.С. Комплексный метод оценки показателей безотказности радиотехнических устройств космической аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 4. С. 316–328.
12. ГОСТ Р 57193-2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. М.: Стандартинформ. 2016. 98 с.

УДК 520.2

ПРОЦЕСС МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕЛЕСКОПА МТМ-500 В КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Назаров С.В., Кривенко А.С.
astrotourist@gmail.com
Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный, Крым, Россия

В работе представлен процесс модернизации одного из первых в Советском Союзе менисковых телескопов МТМ-500 [1]. Оптическая система демонстрирует хорошую сохранность, однако механика и электроника нуждаются в модернизации. Авторами выполнен расчёт кинематики телескопа, позволяющий выбрать электромеханические компоненты для полной автоматизации системы управления телескопом. Следующим этапом установлены новые привода, контроллеры и эмпирически определены оптимальные режимы работы. Удалось добиться наведения телескопа по координатам и точной компенсации вращения планеты с использованием программы для гидирования PhD2.

Ключевые слова: автоматизация телескопа, МТМ-500, система управления, часовое ведение

Введение. Автоматизация телескопа включает в себя создание системы управления, позволяющей осуществлять наведение телескопа на цели и сопровождать их требуемое для решения научных задач время. Это предполагает компенсацию вращения планеты, рефракции, ветровой нагрузки, неточности выставления полярной оси, неравномерностей в редукторах и других моментов. В предыдущей статье было описание модернизации телескопа и приведены расчеты кинематики для выбора электромеханики [2]. В этой работе мы описываем результаты работы с установленными узлами системы наведения. Основой системы являются сервоприводы, управляемые ПЛК контроллером Coolmay L02.

Механизация оси прямого восхождения. В качестве нового привода оси применен сервопривод HANPOSE ASD240 с двигателем 60SS40 и планетарным редуктором 1:10. При этом скорость грубого движения по оси прямого восхождения равна 1,375 град/сек. В режиме часового ведения нагрузка на сервоприводе составила 0.08 Н/м, а в режиме грубого движения 0,17 Н/м. При этом номинальное значение для сервопривода составляет 1,7 Н/м. Запас по нагрузке позволяет в перспективе повысить скорость наведения. Диапазон рабочих скоростей сервопривода вполне оказался пригоден как для часового движения, так и для грубой коррекции. Соотношение рабочих скоростей сервопривода часового и грубого движения составило 1:330.

При доработке привода спроектирован упорный подшипниковый узел для фиксации червячного вала вдоль оси. Этот узел минимизирует люфт червяка и принимает на себя основную нагрузку от главной шестерни.

Управление телескопом для решения наших наблюдательных задач предполагает наведение по координатам по двум осям и последующее гидирование со звёздной скоростью. В этой статье мы описываем расчёты и результаты экспериментов, позволившие «научить» телескоп выполнять эти функции по оси прямого восхождения.

Управление движением оси прямого восхождения. При управлении наведением требуется одновременно проводить расчеты параметров движения и выдавать управляющие импульсы на сервопривод. Для этого применяют контроллеры со специальными функциями движения. Они представляют из себя готовые инструкции для управления сервосистемами, а в операционной системе контроллера есть системные модули, которые выполняют расчет и выдачу команд, вне зависимости от программы исполнения. Таким образом, разработчику нужно выполнить нужную инструкцию с заданными параметрами, и контроллер начнет выдавать в выходные порты команды движения самостоятельно.

ПЛК контроллеры имеющие инструкции позиционирования, как правило работают в неподвижной системе координат. Астрономическая экваториальная система координат находится в движении из-за вращения планеты, то есть конечная координата, куда должен приехать телескоп по оси прямого восхождения, непрерывно изменяется. Для решения задачи наведения координаты цели обсчитываются дополнительным счетчиком канала управления, что позволяет перейти от подвижной системы координат к неподвижной.

Подбор скорости часового ведения. Сервопривод оси прямого восхождения имеет интерфейс управления Step/Dir, где скорость вращения задается частотой входных импульсов.

Первые опытные испытания в режиме часового ведения с применением гидирующей камеры и программы PHD, выявили значительный сдвиг звезды при часовом сопровождении. Изменение коэффициента N и выходной частоты, приводили к грубой коррекции скорости, и не позволяли установить скорость с требуемой точностью. На данном этапе было подобрано и проверено оптимальное значение входной частоты сервопривода для часового ведения и грубой коррекции.

Для решения проблемы точности часового ведения, в сервоприводе реализован дробный режим задания скорости вращения, где выходная скорость вала задается по формуле:

$$S=F/(C/(j/k)), \quad (1)$$

где F-входная частота (Гц); (j/k)-коэффициент передачи G, который задается целыми значениями j и k; C – коэффициент энкодера сервопривода. В нашем случае равен 112000. Значения J и K могут быть в пределах 1-32767.

Таким образом получаем задачу с тремя целочисленными коэффициентами, где нужно подобрать скорость S с большой точностью. Задача решена методом перебора:

На первом шаге выбрали величину J взято близко к верхнему пределу чтобы изменением значения k достичь минимального шага изменения значения скорости S. Далее, подобрали значение k при котором, гидирование максимально устойчиво. Полученные значения подставлены в формулу:

$$W=F*(j/k), \quad (2)$$

где W – коэффициент скорости движения, или коэффициент наклона кривой графика гидирования.

При одной частоте подбираются два значения коэффициента k, чтобы кривая отклонения гидирования уходила вверх для одного значения и вниз, для другого.

Из графиков находим величину отклонения Q кривой в пикселях, за одно и тоже время. Таким образом получаем значения W1 для Q1 и W2 для Q2. Вычисляем значение W3, для Q=0:

$$W3=W2-((W1-W2)/(Q1-Q2))*Q2) \quad (3)$$

В результате находим коэффициент W, при котором значение Q близко к нулю.

В математической среде Wolfram Mathematica написана программа перебора значений F, j, k для формулы 4, чтобы было минимальное отклонение от найденного значения W3. Перебор позволил выбрать коэффициенты F=62, j=32761, k=464. Эксперимент показал идеальное попадание, часовое ведение работает с требуемой точностью.

Примеры рабочих графиков приведены на рис. 1

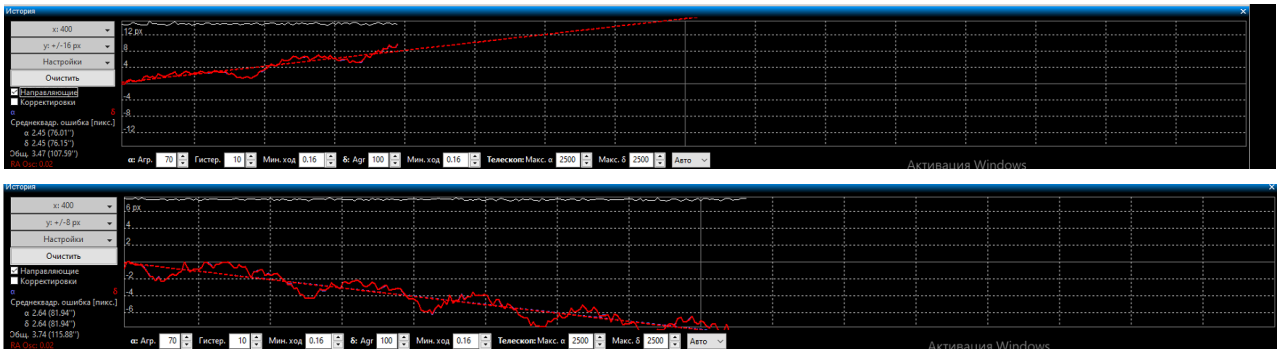


Рисунок 1 – Примеры рабочих графиков

Расчет координат телескопа по оси прямого восхождения. Прямое восхождение светила — угловое расстояние на небесной сфере по небесному экватору от точки весеннего равноденствия до круга склонений светила. Прямое восхождение отсчитывается в сторону, противоположную направлению суточного движения светил, то есть, на запад. Прямое восхождение объекта будем обозначать α и выражать в секундах.

Звездное время равняется сумме часового угла светила и прямого восхождения.

$$s = t + \alpha. \quad (4)$$

Для приведения часового угла светила в машинные координаты введем коэффициент Kt, который связывает изменение часового угла телескопа с машинными координатами положения.

$$Kt=dx/dt, \quad (5)$$

тогда t=X*Kt, где X - положение в машинных координатах.

Для нахождения звездного времени, прибегнем к упрощенной методике переведя суточное время в секунды, по следующей формуле:

$$Rt*Kst+b=S, \quad (6)$$

где Rt - суточное текущее время, выраженное в секундах; Kst - коэффициент соотношений звездного времени и суточного земного времени; B - добавочный коэффициент. Отсюда:

$$Rt*Kst+b=X*Kt+ \alpha. \quad (7)$$

Формула позволяет находить в машинные координаты X из звездных α и наоборот.

Для определения коэффициента Kt, связывающего машинные координаты с часовым углом необходимо после подбора скорости часового ведения поставить телескоп в зенит для минимизации рефракции и задать координаты цели таким образом, чтобы телескоп проехал несколько часов. В начальном и конечном положениях делается астрометрия. Таким образом мы находим dx - разницу в машинных координатах между начальным и конечным положением, и dt - разницу координат прямого восхождения до начала движения и после. В нашем случае коэффициент Kt=61.89055

Коэффициент звездного времени Kst находится так:

Телескоп ставится в положение близкое к зениту для минимизации рефракции, включается часовое ведение и фиксируются: X1 - машинная координата; Rt1 - значение реального времени в секундах; α1 - координаты прямого восхождения. Далее выжидается не менее часа чтобы добиться изменения положения телескопа по часовому углу. После фиксируются: X2 - машинная координата; Rt2 - значение реального времени в секундах; A2 - координаты прямого восхождения. Затем находится коэффициент звездного времени:

$$Kst=((x1-x2)/Kt+(\alpha1- \alpha2))/(Rt1- Rt2) \quad (8)$$

Метод позволяет учесть неточность часов ПЛК и погрешность часового ведения. Коэффициент b находится из процедуры синхронизации телескопа с небом:

Телескоп ставится в положение близкое к зениту, включается часовое ведение, фиксируется текущая машинная координата X, значение времени Rt, делается астрометрия α.

Зная все коэффициенты, мы можем получать машинные координаты объекта из звездных и управлять наведением в заданную точку. На испытаниях погрешность позиционирования составила 0,1 сек. в области зенита и до 20 сек. близко к горизонту.

Выводы. Проведенные испытания подтвердили выводы математических расчётов и справедливость выбора электромеханических узлов, в частности сервопривода HANPOSE ASD240. Удалось добиться более широкого диапазона скоростей наведения телескопа, чем предполагалось изначально. При этом получена достаточная точность наведения по оси прямого восхождения и правильная скорость часового ведения при помощи всего лишь одного привода. Это упрощает обслуживание системы, повышая надежность и ремонтопригодность.

Литература

1. Максутов Д.Д. Новые катадиоптрические менисковые системы. М.: НКАП Оборонгиз. 1944. 134 с. (Тр. Гос. оптического ин-та. Т. 16. Вып. 124).
2. Назаров С.В., Кривенко А.С. Проект модернизации телескопа МТМ-500 в Крымской астрофизической обсерватории // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Сб. материалов XVI Междунар. конф. молодых ученых и студентов, г. Бишкек, 24–26 апреля 2024 г. Бишкек: НС РАН. 2024. С. 452-456.

УДК 550.343.6:591.51

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЖИ ЖИВОТНЫХ В СИСТЕМЕ СЕЙСМОБИОМОНИТОРИНГА КАЗАХСТАНА

Суровцева Н.В., Арифулова И.И.
natali.s71@mail.ru, arif_irina@mail.ru
Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований МЧС РК,
г. Алматы, Казахстан

В работе приведены результаты изучения электрических параметров кожи норных животных в биологически активных точках (ЭП БАТ) в системе сейсмобиомониторинга Казахстана. Приводятся результаты анализа полученных за 2024 год данных ЭП БАТ кожи биообъектов, содержащихся в естественных условиях на территории биостационара в городе Алматы. Проведен анализ влияния различных внешних факторов окружающей среды на вариации электрических параметров кожи норных животных. Рассмотрен вопрос механизма формирования биопредвестниковых аномалий накануне зафиксированных ощутимых землетрясений.

Ключевые слова: сейсмобиология, сейсмобиомониторинг, биополигон, биологические предвестники, электрические параметры кожи животных, краткосрочное прогнозирование сильных землетрясений.

Введение. Землетрясения являются одними из самых разрушительных природных катастроф, и выявление различных способов их прогнозирования является одной из главных задач сейсмологии [1]. На протяжении десятилетий ученые-сейсмологи исследуют различные предвестники землетрясений и механизмы их формирования [2]. В настоящее время было выявлено более 300 видов предвестниковых аномалий, наблюдаемых в эпицентральных зонах накануне и во время сильных землетрясений. В основном они подразделяются по природе происхождения на сейсмические, геомагнитные, электромагнитные, гидрогеохимические, ионосферные, биологические и т.д. [3]. Одним из явлений, наблюдаемых перед землетрясениями, является «свечение землетрясений» или «глобальная электролюминесценция». Это явление заключается в появлении светящихся явлений в атмосфере, может проявляться в виде ярких вспышек или сияний, иногда напоминающих северное сияние. Исследования, проведённые японскими учёными, показали, что свечение может быть связано с высоким напряжением в земной коре, которое возникает в период подготовки землетрясения. Одной из причин такого свечения может быть разряд электрических зарядов в результате изменения давления в земной коре и взаимодействия с электромагнитными полями [4].

В некоторых случаях перед землетрясениями наблюдается появление звуковых аномалий, которые часто описываются как «гул» или «шум». Эти звуковые явления могут быть слышны в течение нескольких минут или часов перед землетрясением и часто воспринимаются как низкочастотные звуки. Существуют гипотезы, что эти звуки связаны с движениями тектонических плит, которые происходят за несколько дней или часов до землетрясения. Один из наиболее известных примеров таких звуковых аномалий был зафиксирован в Японии в 2011 году, перед крупнейшим землетрясением в Тохоку [5]. Изменения магнитных полей Земли также могут быть предвестниками землетрясений. Это может быть связано с внутренними процессами, такими как разрушение горных пород, изменение напряжений и высвобождение энергии в земной коре. Некоторые исследования показывают, что перед землетрясениями с магнитудами более 5,0 могут наблюдаться изменения в параметрах земного магнитного поля. Учёные предполагают, что эти изменения

происходят из-за утечек ионных частиц и изменения электрического потенциала в земной коре [6].

Одним из самых ранних известных предвестников землетрясений, наблюдаемых очевидцами, является необычное поведение животных [7]. Некоторые учёные утверждают, что животные могут чувствовать изменения в магнитном поле, вибрациях или в выделении химических веществ, которые происходят в процессе подготовки сейсмического события в эпицентральной зоне. Научные объяснения этого явления связаны с высокочувствительными органами животных, такими как слух, обоняние и чувствительность к вибрациям [8]. Эти изменения могут быть вызваны предвестниковыми вариациями различных геофизических параметров, которые животные могут воспринимать до того, как они становятся ощутимыми для человека или приборов. Использование исследований аномального поведения животных перед землетрясением как одного из методов краткосрочного прогноза — это идея, которая привлекала внимание ученых на протяжении десятилетий [9].

Методика исследования. Для изучения биопредвестников землетрясений кроме изменения поведенческих реакций информативно исследование физиологических параметров организма животных, так как их изменение может опережать возникновение других видов аномалий. Для проведения исследований в направлении влияния процессов подготовки сейсмического события на формирование аномалий физиологического состояния животных была разработана методика аппаратурной регистрации электрической проводимости кожи наружной ушной раковины норных животных в биологически активных точках (ЭП БАТ) [10]. Данная методика позволяет получить вариации численных электрических параметров кожи, которые могут быть не только индикатором состояния самого организма животного в период стрессовых воздействий, каковым является сильное землетрясение, но и отражать влияние внешних факторов.

Биообъектами данного исследования являются кролики породы «Шиншилла», обитающие на биостационаре «Ботсад» на территории города Алматы. Животные находятся в норах, вырытых на территории вольера, глубиной около 2 метров. Эти кролики ведут образ жизни максимально приближенный к природному. Животные находятся круглый год на открытом воздухе под воздействием естественных метеогеофизических полей. Совокупность всех животных, находящихся под наблюдением, рассматривается как единый «макрообъект» исследования. Замеры ЭП БАТ проводятся в одно и то же время суток после отлова и 15-минутной адаптации (рисунок 1).



Рисунок 1 – Процесс проведения замеров электрических параметров кожи норных животных

Всего в день регистрируется 27 показателей, что достаточно для получения статистически значимых данных. Полученные в результате экспериментальных замеров первичные данные архивируются и подвергаются математической обработке для дальнейшего анализа.

Методика обработки данных. Для выявления аномальных вариаций ЭП БАТ первичный ряд наблюдений подвергают статистической обработке. Путем стандартизации ряда данных, находят среднеквадратичное отклонение (σ). Определяются фоновые значения среднеквадратичного отклонения и «доверительный коридор» показателей σ, в пределах которого фиксируются вариации параметра ЭП БАТ на воздействие метеополей, солнечной активности и других геофизических и биологических факторов. Вариации среднеквадратичного отклонения, выходящие за пределы доверительного интервала 2 σ, считаются аномальными. Превышение порога фонового уровня в пределах 2-3 σ дает основание к определению «желтого уровня опасности» и свидетельствует об аномалиях активности животных. «Красный уровень опасности» определяется по вариациям σ > 3.

В 2024 году было выявлено 43 случая превышения порога фонового уровня ЭП БАТ кожи кроликов в пределах 2-3 σ, 2 из них – с превышением порога фона σ > 3, то есть «красный уровень опасности», который был зафиксирован 09.01.2024 г и 14.01.2024 г (рисунок 2).

Рассмотрим вопрос формирования предвестниковых параметров в вариациях ЭП БАТ кожи биообъектов накануне зафиксированных ощутимых землетрясений. Необходимо отметить, что в основном рассматривается влияние землетрясений с расстоянием не более 100-120 км от Алматы до эпицентра. Но ввиду того, что сильное землетрясение от 23.01.2024 г. вызвало ощутимое землетрясение на территории города Алматы и продолжительную афтершоковую активность, анализ был проведен с учетом данной информации. Из 33 сейсмических событий, ощутимых на территории Алматы, на расстоянии не более 100 км от биостационара «Ботсад» было 4: 07.01.24 г, 04.03.24 г, 13.06.24 г и 05.11.24 г. (таблица 1).

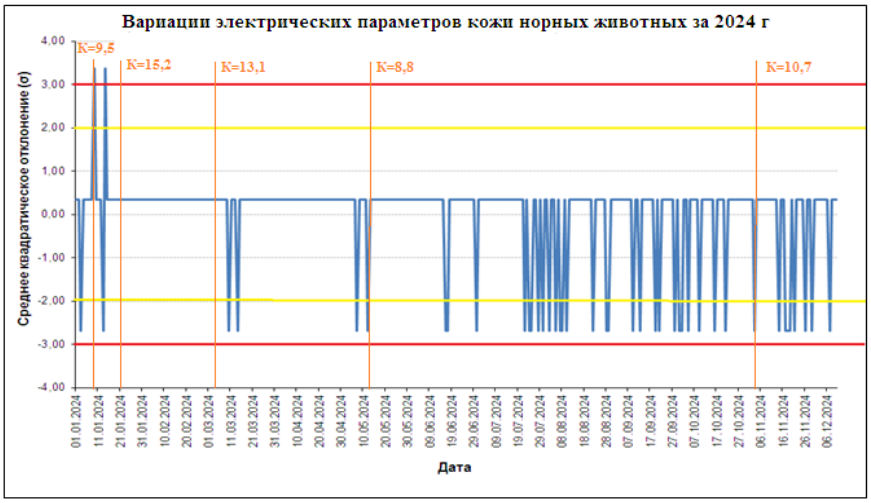


Рисунок 2 – График вариаций среднеквадратичного отклонения (σ) ЭП БАТ кожи кроликов за 2024 г.

Таблица 1 – Перечень ощутимых землетрясений на территории г. Алматы за 2024 год, использованных для анализа

№ n\n	Дата, местное	Время, местное (ч-м)	К, класс	Расстояние от Алматы (км) и направление	Регион	Сведения об ощутимости, интенсивности (баллы по шкале MSK-64)
1	07.01.24	09ч10м	К=09.5	55 на в	Казахстан	г. Алматы- 2 балла
2	23.01.24	00ч09м	К=15.2	264 на ю-в	Китай	г. Алматы-5 баллов
3	04.03.24	11ч22м	К=13.1	31 на ю	гр. Кыргызстана и Казахстана	г. Алматы - 5 баллов
4	13.06.24	22ч25м	К=08.8	29 на ю	гр. Казахстана и Кыргызстана	г. Алматы - 2 балла
5	05.11.24	10ч00м	К=10.7	33 на в	Казахстан	г. Алматы 3 балла

Результаты и обсуждение. Путем анализа вариаций ЭП БАТ кожи норных животных, был выявлен механизм возникновения аномалий, связанных с предвестниковой активностью накануне ощутимых землетрясений, что составило 9 % от общего количества. Воздействие сейсмической активизации предвестникового характера чаще приводят либо к повышенным показателям значений ЭП БАТ кожи норных животных, либо к резким перепадам от пониженных к повышенным (рисунок 2). Количественный анализ в процентном соотношении зависимости вариаций значений ЭП БАТ кожи норных животных от основных помехообразующих факторов представлен на рисунке 3.

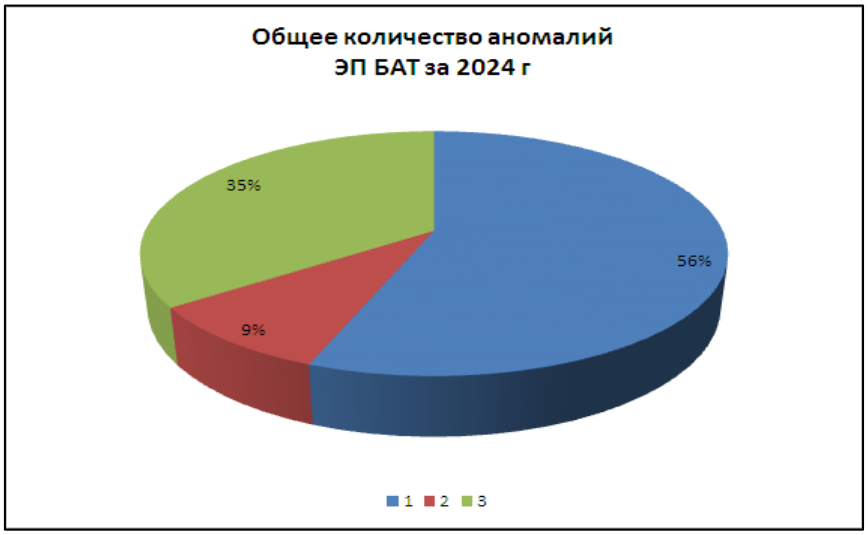


Рисунок 3 – Диаграмма распределения количества аномалий ЭП БАТ за 2024 г: 1 - аномалии, связанные с магнитными бурями и возмущениями; 2- аномалии предвестникового характера; 3- аномалии, связанные с резкими изменениями метеопараметров.

Изменения в магнитосфере в виде магнитных бурь и возмущений оказывают непосредственное влияние на состояние организма животных, что в свою очередь отражается на электрических параметрах кожи наблюдаемых биообъектов: кроликов породы «Шиншилла». Анализируя данные, представленные на рисунке 3, можно сделать вывод, что магнитные бури и возмущения, а также резкие перепады атмосферных параметров приводят к угнетенному состоянию организма биообъектов и, соответственно, пониженным показателям электрической проводимости кожи.

Важным аспектом в анализе вариаций активности животных под воздействием экологических факторов внешней среды - атмосферных процессов, магнитных бурь, и сейсмической активизации являются установление устойчивости вариаций биообъектов к внешним факторам. Таким образом, детальный анализ экспериментальных данных выявил фоновые вариации электрической активности кожи норных животных в условиях их обитания в зоне повышенной сейсмической опасности и устойчивость фоновых показателей к воздействию внешних факторов и слабых сейсмических событий. Потеря устойчивости фоновых показателей (порог> 2-3 σ) приводит, как правило, к изменениям адаптационных процессов в организме биообъектов в сейсмически уязвимой зоне, которые в период подготовки землетрясений рассматриваются как предвестниковые [11].

Выводы. Исследования биопредвестников являются важным шагом на пути к более точному прогнозированию сильных землетрясений. Создание четкой прогностической модели затрудняет отсутствие стабильных, повторяющихся закономерностей между колебаниями параметров аномального поведения животных и сейсмическими событиями. Тем не менее, с учетом постоянного совершенствования методов мониторинга и анализа большого объема данных, исследования аномального поведения животных и физиологических параметров их организма, могут быть полезным дополнением к

существующим методам сейсмологического прогноза. Ярким примером такого «симбиоза» различных видов предвестниковых аномалий для краткосрочного прогноза сильных землетрясений служит землетрясение в китайском городе Хайчэн в 1975 году [12]. Таким образом, хотя использование изменений поведенческих реакций животных как самостоятельного инструмента прогноза землетрясений часто остается спорным, в сочетании с другими методами оно может предоставить важную информацию для краткосрочного прогнозирования и своевременной эвакуации населения в зонах повышенной сейсмической опасности.

Литература

1. Гуц А.К. Тектонические землетрясения и теория катастроф // МСиМ. 2023. № 4 (68). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tektonicheskie-zemletryaseniya-i-teoriya-katastrof (дата обращения: 19.03.2025).
2. Аксёнов В.В. Математическое моделирование предвестников землетрясений, возникающих в физических полях // Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration. 2016. P. 36-44.
3. Серазетдинова Б.З. Сейсмобиология: теория, методы, практика прогноза землетрясений. Алматы: Эверо. 2012. 364 с.
4. Hayakawa, M., Aritomi, S., Nakamura, T., & Ishii, M. Pre-earthquake phenomena observed by the Japan Meteorological Agency's electromagnetic observation network // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. P. 16–22. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.10.003
5. Sato, T., Nakanishi, H., & Ishii, M. Pre-earthquake sounds and their relation to earthquake occurrence in Japan // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2012. No. 42. P. 48–56. https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.09.001
6. Liu, K., Zhang, D., & Li, Y. Magnetic field anomalies before large earthquakes in China // Nature Communications. 2014. No. 5. P. 3387. https://doi.org/10.1038/ncomms4387 .
7. Животные способны ощущать ранние признаки приближающегося землетрясения. https://mir-znaniy.com/zhivotnyie-sposobnyi-oshhushhat-rannie-priznaki-priblizhayushhegosya-zemletryaseniya
8. Qiu, J. Unusual animal behavior before the 2008 Wenchuan earthquake in China // Science. 2009. No. 323 (5911). P. 1441–1442. https://doi.org/10.1126/science.323.5911.1441
9. Wikelski M., Mueller U., Scocco P., Catorci A., Desinov L.V., Belyaev M.Y., Keim D., Pohlmeier W., Fechteler G., Mai P.M. Potential short-term earthquake forecasting by farm animal monitoring // Ethology. 2020. No. 126. P. 931–941. https://doi.org/10.1111/eth.13078
10. Серазетдинова Б.З., Суровцева Н.В. Изучение электрического сопротивления кожи в биологически активных точках норных животных на Алматинском прогностическом полигоне // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений для территории Республики Казахстан. Междунар. науч-практ. конф., г. Алматы 16–18 июня 2022 г. Алматы. 2022. С. 198–203.
11. Арифулова И.И., Суровцева Н.В., Ню А.В., Диханбаев А.Н. Сейсмобиологические исследования в Казахстане: виды наблюдений в системе сейсмобиомонитринга // Доклады XI Казахстанско-Китайского международного симпозиума «Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска в Центральной Азии», 26-28 сентября 2023 г. Алматы, 2023. С. 141-146.
12. Суровцева Н.В., Арифулова И.И. Биологические наблюдения в системе мониторинга сейсмических процессов на Алматинском прогностическом полигоне // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. Тез. докл. IX Междунар. симп., г. Бишкек, 24-29 июня 2024 г. Бишкек. 2024. С. 249-252.

УДК 622.23.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ В УСЛОВИЯХ ЗАЖАТОЙ СРЕДЫ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Тимофеев П.А. Райымкулов М.А.
timofeevp@blastmaker.kg
ОсОО “BlastMaker”, г. Бишкек, Кыргызстан

В статье рассматриваются методы и подходы численного моделирования движения горной массы при проведении БВР в условиях зажатой среды. Применение инструментов САПР БВР BlastMaker и физической библиотеки Bullet3 Physics позволило получить движения взорванной горной массы в условиях зажатой среды. Движения могут быть описаны физико-математическими формулами для прогнозирования и моделирования развала горной массы, подчиняются определённым закономерностям и зависимостям. Характер смещения частиц во взорванной горной массе зависит от свойств взрывчатого вещества, физико-механических свойств горного массива, порядка взрыва, схемы короткозамедленного взрывания, глубины положения элемента и др.

Ключевые слова: развал горной массы, численное моделирование, система автоматизированного проектирования буровзрывных работ, прогнозирование, метод дискретных элементов, экструзия.

Актуальность. Задача прогнозирования и моделирования развала горной массы при буровзрывных работах является важной и актуальной для отрасли горной промышленности, поскольку решение задачи позволит произвести оценку смещения полезного ископаемого в развале, снизить потери и разубоживания. Существуют различные методы моделирования развала. Выделяются такие подходы, как применение специализированных датчиков смещения [1], а также метод численного моделирования, с использованием соответствующего программного обеспечения. Несмотря на высокую достоверность, датчики смещения имеют ряд недостатков: датчики являются дорогостоящими, не позволяют производить прогнозирование на стадии проектирования взрывных работ, точность подхода обусловлена частотой покрытия горного массива датчиками, а также имеют высокий процент потерь после взрыва.

Метод численного моделирования требует учета различных факторов, влияющих на формирование развала. Один из факторов, затрудняющих применение данного инструмента, обусловлен зависимостью результата от применяемых дискретных элементов. Так, при применении дискретных элементов в форме кубов одинаковых размеров 0.25м х 0.25м х 0.25м. и моделировании лобового столкновения частиц с применением библиотеки Bullet3 Physics [2], модель не позволила определить заметное движение, поскольку частица плотно прижата со всех сторон. Моделирование движение частиц в зажатой среде с использованием инструмента Ansys Autodyn[1] также не показывают заметного смещения внутри массива. Однако, опытно-промышленные испытания с применением датчиков смещения, в промышленных условиях демонстрируют существенное движение взорванной горной массы в условиях зажатой среды (6-9 м). В связи с этим, возникает необходимость учёта сжатия среды при моделировании, а также расположения элементов, что позволит приблизить модель к более реальным условиям.

Постановка задачи. Основной задачей является прогнозирование и моделирование развала, смещения горной массы при взрывах в зажатой среде. Это состояние массива, при котором порода разрушается, но остаётся окруженной цельной горной массой. В статье рассматривается решение задачи определения смещения горной массы, а также возможности его прогнозирования.

Методы и инструменты:

- Датчики смещения. Практические опыты с ними показывают, что происходит существенное перемещение рудного тела. Принцип работы датчиков основан экспериментальном методе: после взрыва можно определить положение датчиков, заранее заложенных на определённую глубину в специально подготовленные скважины.
- Численные методы:
  - → Физическая библиотека Bullet3 Physics [2]. Моделирование взрыва с её помощью также показывает существенное смещение рудного тела, причем, судя по результатам, это смещение можно прогнозировать и моделировать физико-математическими методами. Сама библиотека, так же, как и Ansys Autodyn [3], использует метод конечных элементов.
  - → Модуль численного моделирования системы автоматизированного проектирования буровзрывных работ “BlastMaker” [4, 5]. Система позволяет на основе проекта (положение скважин, заряды, схема короткозамедленного взрывания) произвести прогноз смещения горной массы в виде трёхмерной шапки развала.

Постановка начальных условий. Рассматривалась модель 44м x 6м x 6м. Моделируемый массив представлен литологическим типом - грандиориты, плотностью - 2650 кг/куб.м, коэффициентом трещиноватости - 7.5, коэффициентом крепости по шкале проф. Протодьяконова - 8, что соответствует породам средней крепости. В модели заданы 10 скважин, схема взрывания – порядная, время замедления 70 мс, применяемый тип взрывчатого вещества - Фортис, теплота взрыва - 2.57 МДж/кг, плотность - 1130 кг/куб.м, скорость детонации - 4.9 км/с. Моделируемый участок был представлен в виде массива частиц сферической формы, диаметром 0.25 м. Количество дискретных элементов - 275200.

Нагрузка на частицы задавалась в виде вектора начальных скоростей [6]. Начальные скорости определены через закон сохранения энергии. Энергия взрыва расходуется на разрушение горной массы, движение сформированных кусков, на движение забойки в скважине и т.д. Кинетическая энергия частиц соответствует доли энергии взрыва:

$$\frac{1}{2}mv_{\text{в}}^2 = \text{c}_{\text{в}}Qq, \quad (1)$$

Q – теплота взрыва, Дж/кг, $m_{\text{вв}}$ – масса взрывчатого вещества в скважине, кг, $\text{c}_{\text{в}}$- доля передаваемой энергии, в промышленных условиях $\text{c}_{\text{в}} \approx 0.12$, m – масса разрушаемой горной массы, кг. Уравнение (1) может быть записано в следующем виде:

$$\rho v_{\text{в}}^2 = 2\text{c}_{\text{в}}Qq, \quad (2)$$

где ρ – плотность породы, кг/куб.м, q – удельный расход кг/куб.м. В результате получаем значение начальной скорости частицы в участке разрушаемой горной массы:

$$v_{\text{вв}} = \sqrt{\frac{2\text{c}_{\text{в}}Qq}{\rho}}. \quad (3)$$

Таким образом, начальный вектор кусков в разрушенной горной массы зависит от свойств породы, применяемого удельного расхода и типа взрывчатого вещества. Направление скоростей задавались в зависимости от положения частицы относительно источника заряда.

На участках вблизи скважин заданы частицы-маркеры для которых фиксировалось начальное и конечное положение, что обеспечивает оценку смещения горной массы в зависимости от положения частицы в массиве.

Результаты и их описание. Результаты представлены в виде векторов смещения элементов в массиве на рис.1. Порядок взрывания скважин - справа налево, с одинаковым шагом времени замедления. Точки на рисунке соответствуют исходным положениям элемента. Первый и последний вертикальные ряды точек - начальные положения элементов, находящихся вплотную к зажатой среде. Как видно из рисунка, для дискретных элементов в виде шаров наблюдается смещения в массиве. Длина вектора смещения элементов составила в среднем составляет 4-6 м, характер смещения частиц в массиве зависит от порядка взрыва и глубины положения элемента.

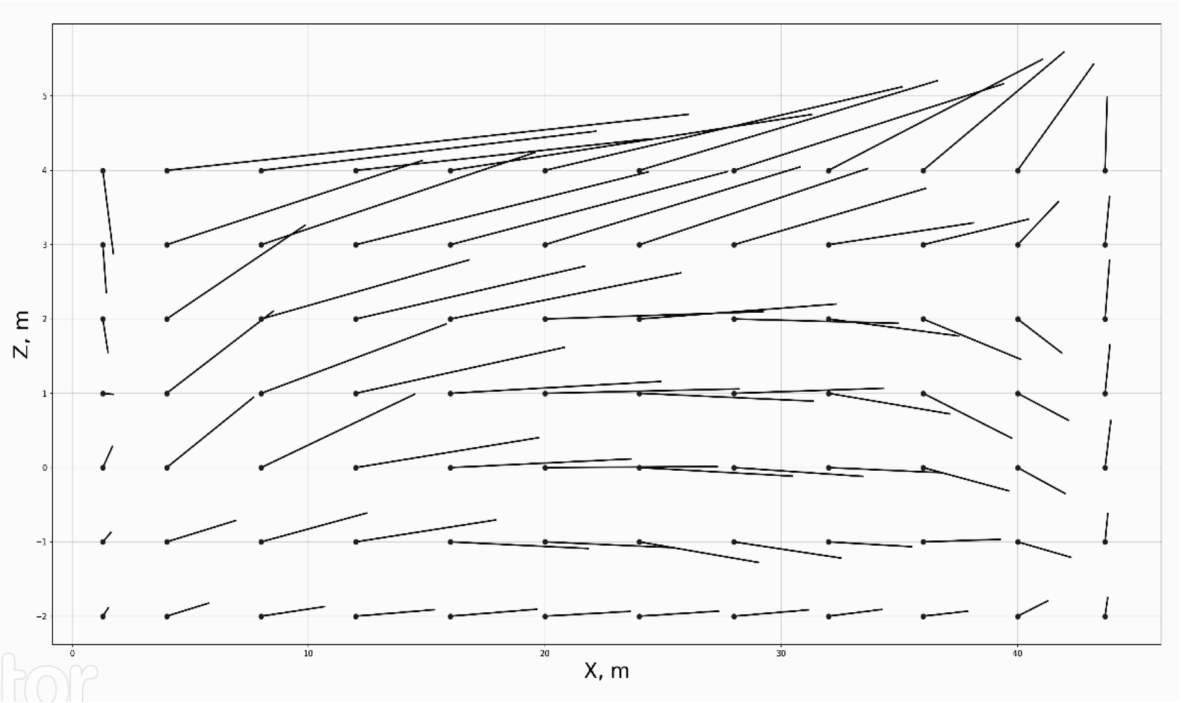
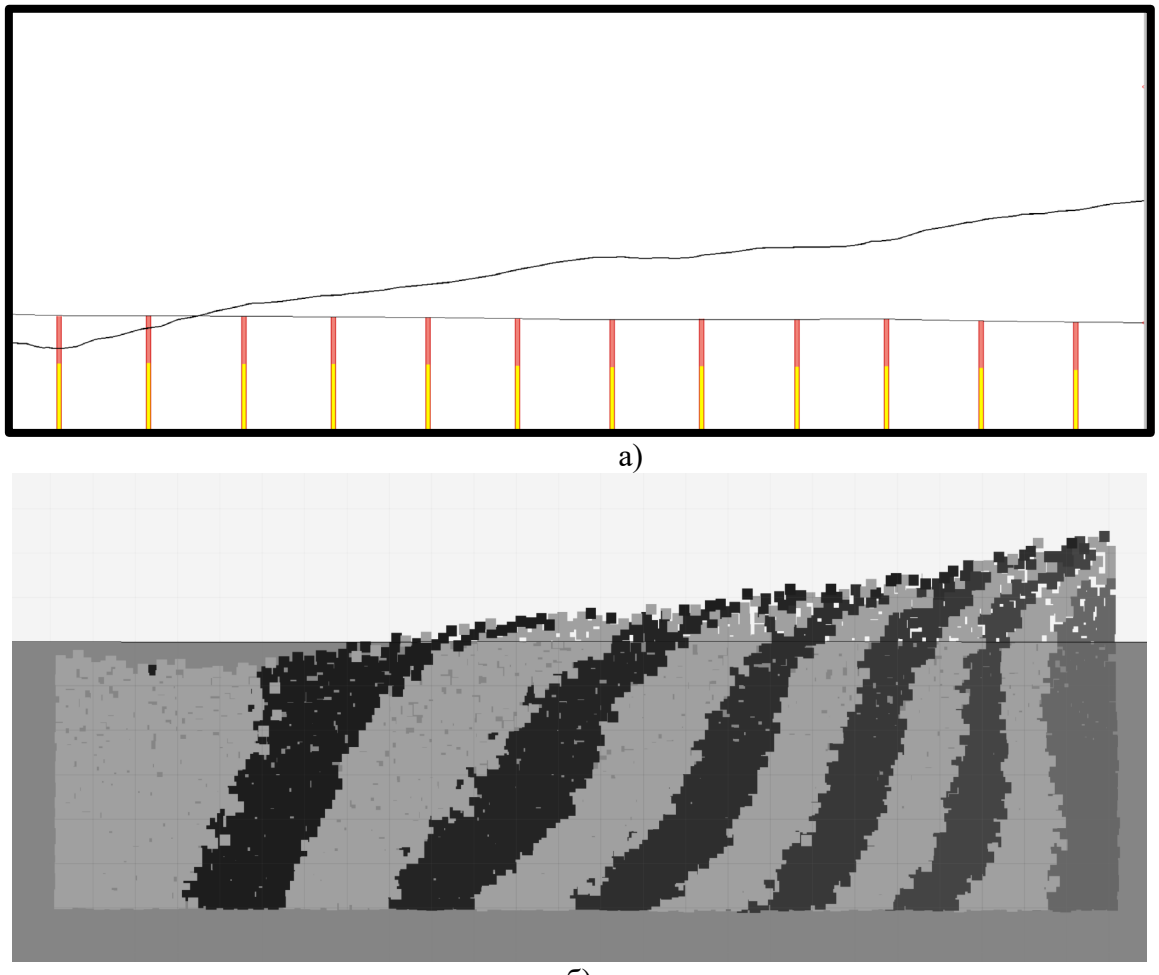


Рисунок 1 - Вектора смещения элементов массива при взрыве в зажатой среде: точки соответствует начальному положению частиц-маркеров



а)

б)

Рисунок 2 - Вертикальное сечение поверхности развала горной массы: а) факт, б) результат моделирования

В зависимости от порядка взрывания скважин:

- Горная масса, подверженная воздействию взрыва первой группы скважин, разрушается и уплотняется. Преобладает вертикальное смещение вследствие экструзии разрушенной породы. Это видно на рисунке 2 б, с левого краю.
- Последующие взрываемые группы скважин, не включая последнюю, передают элементам импульс в сторону разрушенной горной массы, параллельно выдавливая её, придавая также вертикальную составляющую вектора перемещения
- Последняя группа скважин также вдавливает горную массу в сторону разрушений, за исключением того, что за ней - неразрушенная горная масса. Вследствие этого получается углубление на месте последней группы (рисунок 2 б справа).

В зависимости от высоты положения элемента в массиве: чем выше расположен элемент - тем сильнее его движение по всем направлениям. Так получается из-за влияния свободной поверхности и меньшего давления сверху.

Вследствие описанного поведения формируется неравномерная поверхность развала горной массы при взрыве в условиях зажатой среды. Максимальные отклонения от исходной поверхности наблюдаются на участках, сформированных в результате экструзии разрушенной горной массы, и в области скважин, взрываемых в последнем порядке.

Выводы. Проведённые результаты численного моделирования и рассуждения показывают, что происходят существенные движения горной массы при взрывании в условиях зажатой среды. Эти движения могут быть описаны физико-математическими формулами для прогнозирования и моделирования развала горной массы, подчиняются определённым закономерностям и зависимостям. Характер смещения частиц во взорванной горной массе зависит от свойств взрывчатого вещества, физико-механических свойств горного массива, порядка взрыва и схемы короткозамедленного взрывания, а также от глубины положения элемента.

Для дальнейшего исследования требуется рассмотреть модель с дискретными элементами различных размеров и провести исследование влияния значений времени замедления на вектор смещения частиц.

Литература

1. Рахманов Р.А., Лоеб Д., Косухин Н.И. Оценка смещений рудных контуров после взрыва с применением ВММ–системы // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 547-553.
2. Бутяга С., Плакин М., Слючаренко А., Чернов А. Инженерно-технический журнал Ansys Solutions:от идей к решениям. 2006. Русская редакция. С. 5-10.
3. Izadi, E., and Bezuijen, A. (2014). “Simulation of granular soil behaviour using the Bullet physics library // Geomechanics from Micro to Macro, Vols I and II, vol. 2, Taylor and Francis Group - London, 2015, pp. 1565–1570.
4. Татарчук С., Долгушев В. Имитационное моделирование массовых взрывов в ПО "Blast Maker" // Передовые технологии на карьерах: Сб. докл. Бишкек. 2017. С. 74-77.
5. Воробьев Д.А., Долгушев В.Г., Коваленко В.А. Численное моделирование развала горной массы при короткозамедленном подрыве скважинных зарядов // Передовые технологии на карьерах: Сб. докл. Бишкек. 2017. С. 68-73
6. Zhang Z.X., Chi L.Y., Yi C. An empirical approach for predicting burden velocities in rock blasting // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021. 13. 4. 767–773.

УДК 550.8.052

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ КАРОТАЖНЫХ КРИВЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Юсупов Д.Д.[1,2], Закирова О.Ф.[2], Халбаев С.Б.[2,1]
diyorbek.yusuopov@gmail.com, anisa.zakirova2006@gmail.com, surathalbaev@gmail.com
[1] Институт сейсмологии им. Г.О. Мавлонова АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан
[2] Филиал РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Ташкент, Узбекистан

В данной работе проведен сравнительный анализ методов машинного обучения для автоматической интерпретации попластовых каротажных кривых. Рассматривались алгоритмы k-NN, SVM, XGBoost и Random Forest. Сравнительный анализ проводился на основе синтетических каротажных данных. Создана модель пласта мощностью 500 метров, включающая пять литотипов: глина, песчаник, алевролит, аргиллит. Сгенерировано 1200 одномерных геологических моделей с различными толщинами и последовательностями пропластков, на основе которых рассчитаны попластовые кривые акустического каротажа. По данной выборке проводилось обучение алгоритмов ML. Оценена точность классификации каждого алгоритма, выявлены их преимущества и ограничения.

Ключевые слова: Автоматическая интерпретация, попластовые кривые, машинное обучение, синтетические каротажные данные, XGBoost, k-NN, SVM, Random Forest.

Введение. Автоматизация интерпретации каротажных кривых с применением методов машинного обучения (ML) является актуальной задачей в геофизике, поскольку она позволяет значительно повысить точность и скорость анализа скважинных данных. Традиционные методы интерпретации требуют значительных временных затрат, участия экспертов и могут содержать элемент субъективности. В то же время современные алгоритмы искусственного интеллекта способны минимизировать влияние человеческого фактора и ускорить процесс принятия решений.

В данной работе рассматривается автоматическая интерпретация акустических каротажных кривых на примере реального месторождения «N». Исследуемый целевой горизонт был детально проанализирован с точки зрения литологического состава, выделены четыре основных литотипа. Также были изучены диапазоны изменения скоростей продольных волн в пределах горизонта с учетом термобарических условий, характерных для данной глубины. На основе этих данных была разработана синтетическая модель геологической колонки мощностью 500 метров, включающая 5 пропластков литотипов с толщинами от 50 до 200 метров.

Выбор методов машинного обучения был обусловлен анализом большого количества алгоритмов [1, 5], включая нейронные сети (NN), однако после детального рассмотрения особенностей данных и поставленной задачи было принято решение сравнить четыре метода: XGBoost, k-Nearest Neighbors (k-NN), SVM (метод опорных векторов) и Random Forest (RF). Эти алгоритмы были выбраны по следующим причинам:

Random Forest — устойчив к выбросам, хорошо работает с табличными данными и обладает высокой интерпретируемостью.

SVM — эффективно работает с небольшими выборками и сложными разделяющими границами.

XGBoost — один из самых мощных бустинговых алгоритмов, показывает высокую точность, но требует тщательной настройки.

k-NN — один из базовых методов, который используется для сравнения с более сложными алгоритмами [5].

Для обучения алгоритмов было сгенерировано 1200 одномерных геологических моделей, каждая из которых включает попластовые кривые акустического каротажа. Выбор именно попластовых кривых обусловлен тем, что они упрощают вычисления и позволяют эффективнее применять ML-методы. Это также связано с нашей долгосрочной целью — разработкой алгоритма автоматического осреднения каротажных кривых.

После построения синтетических данных и моделирования попластовых кривых обучение моделей ML осуществлялось с разделением выборки: 90% данных использовались для обучения, а 10% (120 моделей) — для тестирования. Затем проводилась проверка корректности работы алгоритмов на независимой выборке, полученной по тем же условиям. Оценка точности предсказаний проводилась с использованием коэффициента корреляции и среднеквадратичного отклонения (СКО). По результатам анализа коэффициентов корреляции Random Forest показал наилучшую точность – 0,85; SVM — 0,78; XGBoost — 0,82; k-NN — 0,77.

Таким образом, данная работа направлена на сравнительный анализ эффективности различных алгоритмов ML в задаче интерпретации акустических каротажных данных. Полученные результаты позволят определить наиболее перспективные методы, а также послужат основой для дальнейшего усложнения моделей и разработки более точных алгоритмов автоматической интерпретации данных.

Материалы и методы. Машинное обучение (ML) — это область искусственного интеллекта, которая занимается разработкой алгоритмов, способных обучаться на данных и делать предсказания. В отличие от традиционных методов программирования, в ML алгоритмы не требуют явного кодирования правил, а строят модели на основе закономерностей, выявленных в обучающих данных. В геофизике ML активно применяется для разного ряда задач, как правило связанных с решением обратной геофизической задачи. В рамках интерпретации каротажных данных ML позволяет автоматизировать процесс классификации литотипов и повышает точность анализа.

Обоснование выбора методов ML. В данной работе для автоматической интерпретации каротажных кривых были выбраны следующие алгоритмы машинного обучения: Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), k-Nearest Neighbors (k-NN) и XGBoost. Выбор этих методов обусловлен их различными свойствами и преимуществами, подходящими для решения поставленной задачи (таблица 1).

1. Random Forest (RF). Алгоритм Random Forest представляет собой ансамблевый метод, основанный на построении множества решающих деревьев. Он обладает высокой устойчивостью к переобучению и способен эффективно обрабатывать данные с большим количеством признаков и классов. Кроме того, RF предоставляет возможность оценки важности отдельных переменных в модели, что повышает интерпретируемость результатов.[2]

2. Support Vector Machine (SVM). Метод опорных векторов (SVM) направлен на поиск оптимальной гиперплоскости, разделяющей классы в пространстве признаков. SVM эффективен при работе с высокоразмерными данными и доказал свою способность обеспечивать высокую точность классификации в различных задачах. Его применение обосновано при наличии сложных разделяющих границ между классами.

3. K-Nearest Neighbors (k-NN). Алгоритм k-NN является одним из простейших методов классификации, основанным на определении ближайших соседей объекта в пространстве признаков. Его преимущество заключается в простоте реализации и отсутствии необходимости в фазе обучения. Однако k-NN чувствителен к масштабированию признаков и может быть неэффективен на больших выборках из-за высокой вычислительной сложности.

4. XGBoost. Extreme Gradient Boosting — это реализация градиентного бустинга, которая широко используется благодаря своей высокой производительности и эффективности. Алгоритм сочетает в себе методы уменьшения смещения и дисперсии, что позволяет достигать высоких результатов в задачах классификации и регрессии.

Выбор алгоритмов Random Forest, SVM, k-NN и XGBoost обусловлен их доказанной эффективностью в задачах классификации геофизических данных [1]. RF и XGBoost показали высокую точность, SVM продемонстрировал хорошие результаты в условиях четких границ классов, а k-NN использовался в качестве базового метода для сравнения. В следующих разделах представлено применение этих алгоритмов к синтетическим каротажным данным.

Таблица 1 – Сравнение алгоритмов машинного обучения

Алгоритм	Тип модели	Точность	Обучение на малых данных	Устойчивость к шуму	Скорость обучения	Основные недостатки
Random Forest	Ансамблевый метод (бэггинг)	Высокая	Хорошо	Высокая	Средняя	Медленное предсказание, требует много памяти
SVM	Метод опорных векторов	Средняя-Высокая	Хорошо	Высокая	Средняя	Чувствительность к выбору ядра
K-NN	Локальный метод	Средняя	Удовлетворительно	Низкая	Быстрая	Плохо масштабируется, чувствителен к шуму
XGBoost	Градиентный бустинг	Высокая	Плохо	Средняя	Медленная	Требует точной настройки параметров
Logistic Regression	Линейная модель	Низкая-Средняя	Хорошо	Средняя	Очень быстрая	Плохо работает на сложных данных
Neural Networks	Глубинное обучение	Очень высокая	Плохо	Средняя	Очень медленная	Высокие вычислительные затраты, требуется много данных
Сверточные нейронные сети (CNN)	Глубинное обучение (работа с изображениями)	Очень высокая	Плохо	Средняя	Очень медленная	Требует больших вычислительных мощностей, трудно интерпретировать

Моделирование данных для обучения алгоритмов ML. Задача обучения алгоритма сводится в основном к корректной подготовке данных для обучения. Для этого необходимо предоставить данные геологической модели и наблюденных по ним геофизическим данным. Для этого необходимо решить прямую задачу, а перед этим смоделировать репрезентативный ряд вариаций геологических данных, описываемых один объект исследования. Эксперимент проводился на основе данных реального месторождения «N». В ходе исследования был проанализирован целевой геологический горизонт, в котором выделены четыре основных литотипа: **Песчаник, Алевролит, Аргиллит, Глина.**

Моделирование одномерной геологической структуры. Для имитации реальных условий была разработана синтетическая модель геологической колонки (таблица 2) со следующими условиями:

- Общая мощность 500 метров;
- 5 пропластков различной литологии;
- Диапазоном мощностей пропластков от 50 до 200 метров.

Таблица 2 – Пример геологической колонки для дальнейшего построения синтетической попластовой кривой

n	мощность	сумма	лит.
1	149	149	песчаник
2	124	273	ариллит
3	89	362	алевролит
4	50	412	глины
5	88	**500**	ариллит

Далее для каждого литотипа были определены диапазоны скоростей продольных волн с учетом термобарических условий исследуемого пласта. Эти параметры были взяты из

данных месторождения, а также сопоставлены с литературными источниками для повышения достоверности [3] (таблица 3).

Таблица 3 – Петрофизические данные скоростей продольных волн по лит источникам и по месторождению

Породы	лит. данные	данные по месторождению	
	Vp, м/с	Vp, м/с (мин)	Vp, м/с (макс)
Песчаник	3000 - 5700	1905	3810
Алевролит	3800 - 4900	1725	3450
Аргиллит	3300 - 4500	1195	2390
Глина	2000 - 3300	2005	4010

Генерация синтетических попластовых кривых. Было создано 1200 одномерных геологических моделей с различными последовательностями литотипов. Для каждой модели были рассчитаны акустические каротажные кривые на основе диапазонов скоростей, соответствующих каждому литотипу.

Важно отметить, что данный эксперимент был проведён на попластовых кривых, а не на точечных (рисунок 1). Выбор попластовых кривых обусловлен рядом факторов, основные из которых:

- Оптимизация вычислений – ML-алгоритмы легче применять к попластовым данным, чем к точечным записям. Это связано с ресурсоёмкими вычислениями необходимыми для работы с поточечными кривыми;

- Большая сложность построения синтетических поточечных кривых. Это связанно с тем, что необходимо указывать корректную флуктуацию кривой в рамках заданного диапазона геологического пласта. К тому же для корректной задачи моделирования поточечной каротажной кривой необходимо учитывать гораздо большее количество входных петрофизической обстановки исследуемого горизонта;

- Будущая разработка алгоритма осреднения – данное исследование является частью более широкой задачи по созданию алгоритма по автоматической интерпретации реальных каротажных записей. Для этого планируется, что реальная каротажная кривая до этапа автоматической интерпретации будет усредняться посредством разрабатываемого алгоритма автоматического осреднения каротажных кривых [4].

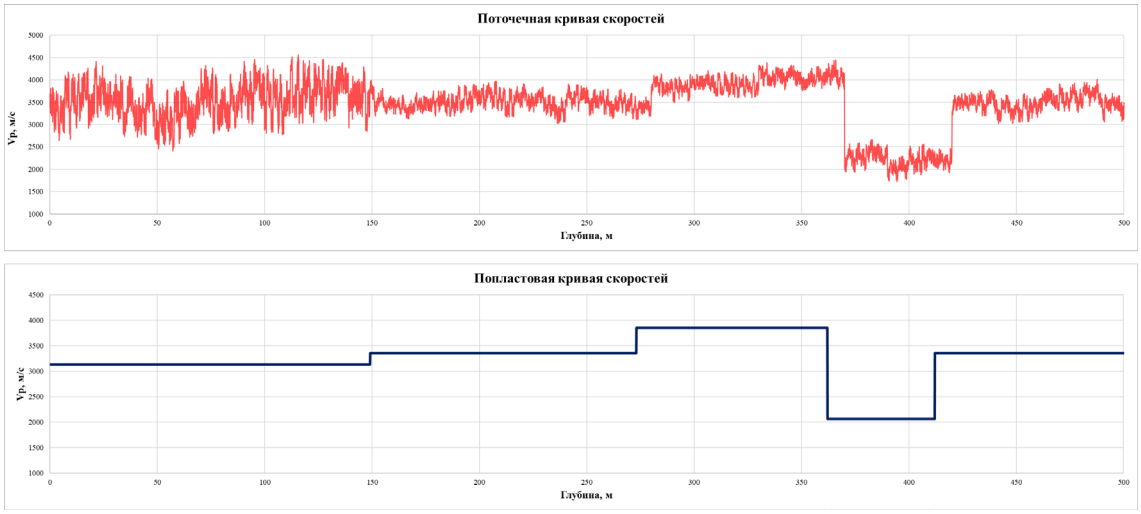


Рисунок 1 – Синтетическая поточечная и попластовая кривые скоростей по пяти пропласткам

На базе созданной обучающей выборки было проведено обучение алгоритмов. В ходе анализа различных ML-методов были протестированы четыре алгоритма: Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbors (K-NN), XGBoost. Помимо подготовки тренировочной выборки также было подготовлено 120 моделей для тестирования корректности работы алгоритмов. Объём тестовой выборки выбирался из расчета 10% к объёму обучающей выборки. Это означает, что обучение осуществлялось на 1200 моделях, а тестирование – на 120 моделях. Для каждого алгоритма была проведена гиперпараметрическая настройка с использованием кросс-валидации для повышения точности предсказаний.

Результаты и обсуждение. Оценка точности предсказаний. Оценка качества предсказаний производилась с использованием коэффициента корреляции (R^2). Эти метрики позволяют количественно оценить, насколько точно алгоритмы воспроизводят истинные значения литотипов на основе каротажных данных. На рисунке 2 изображено сравнение коэффициентов корреляции по каждому из методов.

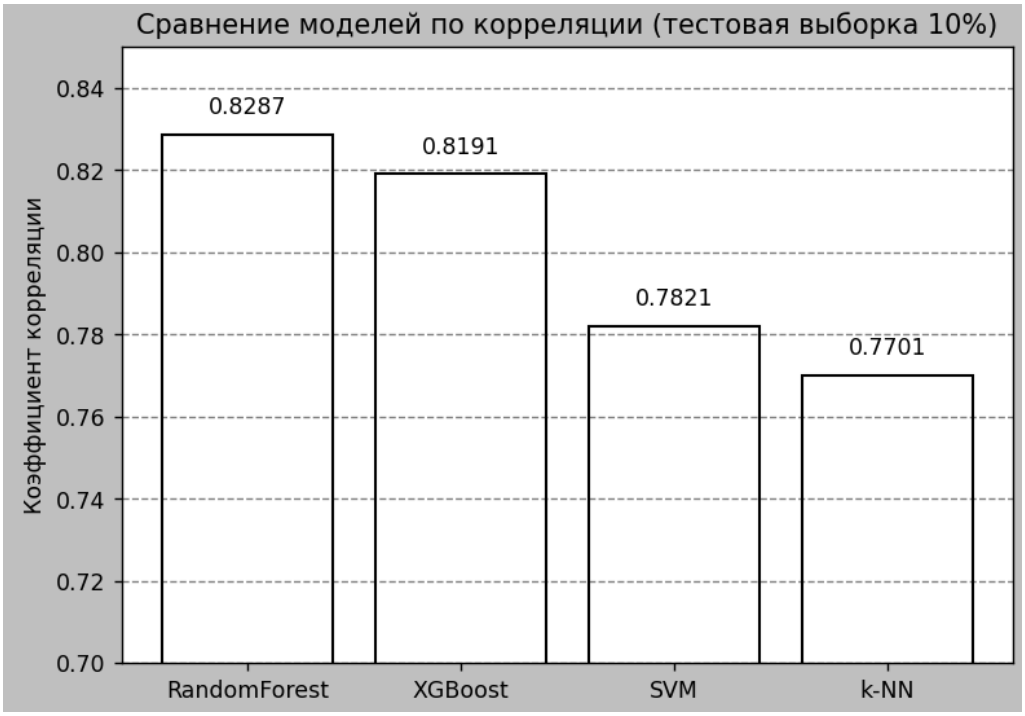


Рисунок 2 – Сравнение моделей по корреляции по тестовой выборке

Итоговые результаты по сравнению алгоритмов представлены ниже:

Random Forest (RF) продемонстрировал наивысший коэффициент корреляции (0,8287), что свидетельствует о его способности эффективно находить закономерности в каротажных данных. Это объясняется тем, что RF является ансамблевым методом, объединяющим несколько деревьев решений, что делает его устойчивым к шуму и переобучению. Кроме того, RF хорошо обрабатывает нелинейные зависимости, характерные для геофизических данных.

XGBoost показал высокую предсказательную способность (R^2 = 0,8191), но его результаты оказались менее стабильными, чем у RF. Это связано с тем, что XGBoost строит деревья последовательно, минимизируя ошибку, что делает его чувствительным к вариациям в данных. Несмотря на это, XGBoost является мощным инструментом, особенно при использовании оптимизированных гиперпараметров.

SVM (метод опорных векторов) показал R^2 = 0,7821, что также является хорошим результатом. Однако данный метод хуже справляется с шумами в данных и требует тщательной настройки параметров ядра, что может объяснять его несколько более низкую точность по сравнению с RF и XGBoost.

k-NN (метод ближайших соседей) использовался в качестве базовой модели и продемонстрировал наименьшую точность (R^2 = 0,7701). Данный алгоритм чувствителен к размерности данных и шумам, а также требует значительных вычислительных ресурсов при увеличении объема данных.

Выводы. *Random Forest* показал наилучшую точность среди всех протестированных алгоритмов. Его высокий коэффициент корреляции (0,8287) подтверждает его надежность при анализе каротажных данных. Этот алгоритм рекомендуется для автоматической интерпретации каротажа в практических геофизических исследованиях. *XGBoost* оказался перспективным методом, уступая RF, но показывая стабильные результаты. Его использование целесообразно в задачах с большим объемом данных, где важна точная настройка гиперпараметров. *SVM* продемонстрировал хорошую, но не лучшую точность. Он может быть полезен для задач, где важны четко разделенные классы, но требует значительной вычислительной мощности для оптимизации. *k-NN* подтвердил свою роль простого и интерпретируемого алгоритма, но его точность оказалась наименьшей среди рассмотренных методов, что делает его менее предпочтительным для данной задачи.

Результаты подтверждают, что ансамблевые методы (Random Forest, XGBoost) являются наиболее перспективными для автоматической интерпретации каротажных данных.

Дальнейшие исследования направлены на разработку алгоритма автоматического осреднения поточечных каротажных данных, для применимости данных результатов к поточечным записям.

Литература

1. Ахметсафин Р.Д., Ахметсафина Р.З. Применение методов машинного обучения для прогноза или замещения недостающих каротажных данных // Известия вузов. Приборостроение. 2021 Т. 64. № 7. С. 532-541.
2. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. 45. 1. 5-32
3. Гаврилов В.П. Физика Земли: Учебник для вузов. М.: Недра-Бизнесцентр. 2008. 287 с.
4. Юсупов Д.Д., Мамарозиков Т.У., Отажанова Ш.Х. Работа алгоритма умного осреднения на примере строения одномерной глубинно-скоростной модели среды по данным акустического каротажа // Science and Innovation. International scientific conference of young scientists. Collection of scientific papers: November 15, 2024 / Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan, Center for Advanced Technologies. Tashkent: Innovatsion rivojlanish nashriyot - matbaa uyi. 2024. P. 303-305.
5. Малыгин И.В. Адаптация алгоритмов машинного обучения к геофизическим задачам с дефицитом данных. Дис. ... канд. техн. наук. М.: ИФЗ РАН. 2022. 154 с.

СОДЕРЖАНИЕ

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ

RESPONSE OF "RESERVOIR-WELL" SYSTEMS TO QUASI-STATIONARY AND EPISODIC IMPACT IN SEISMOACTIVE AND PLATFORM REGIONS 4
Gorbunova E.M., Besedina A.N., Petukhova S.M., Huang F., Chen Y.

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF QUARTZ SAND DEPOSITS IN THE CENTRAL KYZYLKUM 11
Nazarov U.Kh.

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ МЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ФЕРГАНСКОГО РЕГИОНА 13
Алиев А.Б.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЬСКОГО МЕГАБЛОКА (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ) ПО ГЕОЛОГИЧЕСКИМ ИНДИКАТОРАМ ДЕФОРМАЦИЙ 17
Бондарь И.В.

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ АМТ И ЭТ: ПРЕИМУЩЕСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ 22
Валуйский А.Ю.

ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ 26
Каримова Д.А.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОСТОБРАБОТКИ РАСЧЁТОВ ИЗ ПРОГРАММЫ BERNESE 31
Кенигсберг Д.В.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «MAGSEISMOEFFECT» ДЛЯ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА ЗАПИСЕЙ ВОЛНОВЫХ ФОРМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ДАННЫХ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ 37
Лазарева Е.А.

КИНЕМАТИКА НОВЕЙШИХ РАЗРЫВОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ГОРНОГО АЛТАЯ 42
Мануилова Е.А.

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ НА МИНИПОЛИГОНЕ КЕНТОР (СЕВЕРНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ) ПО ДАННЫМ ДЗЗ 2024 Г. 46
Непеина К.С.

НОВОЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ СОБЫТИЕ В ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОМ АВЛАКОГЕНЕ 51
Пивоваров Р.С., Ефременко М.А., Стволина З.В.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАНЦИЙ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ 56
Пивоваров Р.С.

ОЦЕНКА КАРСТО-СУФФОЗИОННЫХ ПОЛОСТЕЙ В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ МЕТОДОМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ 61
Рузимбоев Ф.Ф.

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 66
Сагдуллаева К.А., Назаров С.Х., Болтаев Ф.Ш. угли

ДИАГРАММА РАЗМАХА ДАННЫХ ЛИНЕЙНО-УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДКЕ 71
Саламатина Ю.М.

РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ СИСТЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВАНИИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ГРАДИЕНТНОЙ УСТАНОВКИ 76
Стасенко Л.В.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ 82
Стрельников А.А.

СОСТОЯНИЕ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ 24-25 МАРТА 2024 ГОДА 86
Тилеу Г.Б., Мукашева С.Н.

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ И ПОДГОТОВКЕ СТРУКТУР В РЕСПУБЛИКЕ УЗБЕКИСТАН 90
Хмыров П.В., Абдураимов М.Х., Тухтаев Р.Р., Богданов А.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОСАДОЧНОСТЬ ЛЕССОВЫХ ПОРОД ФЕРГАНСКОЙ МЕЖГОРНОЙ ВПАДИНЫ 94
Хусомиддинов А.С., Бозоров.Ж.Ш., Ядигаров.Э.М., Исроилов.Х.Б.

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ СЕЙСМОГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ 99
Шозиёев Ш.П., Асаншоева Ш.А., Шозиёев А.П.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЙОНАХ УЗБЕКИСТАНА ЗА ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ 103
Шукуров З.Ф., Алимухамедов И.М., Зубович А.В.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СРЕДНИХ СКОРОСТЕЙ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В УСЛОВИЯХ СЕЙСМОСТАНЦИЙ KNDC и KASK 108
Шульга М.В, Жолдыбаев А.К., Исагали А.

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ МЕЛОВЫХ И ЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРЕДЕЛАХ СТРУКТУРЫ ШАРКИЙ ЖИЙДАЛИК 115
Юлдашев Н.Н., Саотов М.Х., Шокиров А.Ш., Давронов Н.Н., Бойтемиров А.М.

СОСТОЯНИЕ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ ПО ПОИСКУ НЕФТИ И ГАЗА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЧАРДЖОУСКОЙ СТУПЕНИ НА ПРИМЕРЕ СТРУКТУРЫ АКНАЗАР 122
Юлдашев Н.Н., Курбонов Ш.Б., Киргизов И.К., Давронов Н.Н.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА МОНИТОРИНГОВЫХ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ПРОФИЛЯ «ТОКБАЙ» 126
Юнусов А.И.

МОДЕЛИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 132
Юсупов В.Р.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ОПАСНОСТИ

INVESTIGATION ON DIVERSIFYING ECONOMIES IN UZBEKISTAN AS A RESPONSE TO CLIMATE CHANGE: A CASE STUDY ON ECOTOURISM IN THE SENTYAB (SENTOB) VILLAGE 136
Cantlow R., Orunbaev S.Z.

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON BISHKEK'S WATER SHORTAGES 145
Dzhenyshpekova B., Orunbaeva S.A., Orunbaev S.Z.

CLIMATE CHANGE IMPACTS ON THE KAYRAKKUM RESERVOIR: CHALLENGES AND ADAPTATION STRATEGIES IN TAJIKISTAN 152
Orunbaev S.Z., Erkaev N.

PHOTOVOLTAIC AND MICRO-HYDROPOWER POTENTIAL IN KYRGYZSTAN AND ITS LOW EXPANSION RATE 159
Orunbaev S.Z., Lehmann J.

SUSTAINABILITY OF SPRING WATER RESOURCES AND VEGETATION IN SOUTHWEST KYRGYZSTAN UNDER CLIMATE CHANGE PRESSURES 168
Tagaibekov K., Orunbaev S.Z.

ИЗУЧЕНИЕ РЕШЕНИЙ ПО ПОСТРОЕНИЮ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 177
Алимов Б.Г., Курбанов Т.С., Артиков Ф.Р.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ОЦЕНОК СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ 181
Ашуров С.Х.

НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ТАДЖИКИСТАНА 187
Ёқубов Ш.А.

НОВАЯ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩАЯ ЗОНА В ДЖУНГАРО-СЕВЕРО-ТЯНЬ-ШАНЬСКОМ РЕГИОНЕ 192
Ельдеева М.С., Абдрахматов К.Е.

ОНЛАЙН ОПРОС НАСЕЛЕНИЯ, КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД СБОРА МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА 195
Зверева А.С.

ВЫЗЫВАЮТ ЛИ СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ И МЕЖПЛАНЕТНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ? 201
Зинкин Д.В., Пилипенко В.А.

ВОЗМОЖНОСТЬ ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ НАРУШЕНИЙ В БЕТОННОЙ ПЛОТИНЕ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ 208
Коковкин И.В., Уколов Д.А, Селезнев В.С., Пархоменко Е.Э.

РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОДНОГО ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ГАЗА 213
Кузьмин Д.К.

СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП АКТИВИЗАЦИИ СЕЙСМИЧНОСТИ В РЕГИОНЕ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ, АНАЛИЗ КОНТУРОВ РОЕВ И АФТЕРШОКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 218
Лютикова В.С., Литовченко И.Н.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ ХВОСТОХРАНИЛИЩ 223
Мирзоев Г.Г.

СТАДИИ ДЕГРАДАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ЛЕДНИКОВ ТЯНЬ-ШАНЯ 230
Оморова Г.К., Эрменбаев Б.О.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ЛЕДНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАЙКЕРИТА 237
Петрас Р.А., Орунбаев С.Ж.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК 244
Тажибаев Д.К., Мокешова А.Т.

ГИДРОРАСЧЕТЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАЛЫХ ГЭС В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА 249
Эгизов И.А., Акматов Д.Р.

МЕХАНИКА И МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ITERATIVE OPTIMIZATION FOR NLP SYSTEMS: TEXTUAL GRADIENT DESCENT AND MONTE CARLO METHODS 255
Atabekov T.A.

DEVELOPMENT OF MULTISTAGE NUMERICAL METHOD FOR SOLVING NONLINEAR REACTION-DIFFUSION EQUATIONS 261
Masalbekova A.M.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ФРАКЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ОПЕРАТИВНОГО РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ БВР 267
Александров В.Г., Даньшин М.П., Ефимов А.Л., Милько А.А.,
Майрамбекова А.М., Доскожоева Н.М., Братцев К.О.

ФРАКЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ТЕКУЩЕГО РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ БВР НА ПРИМЕРЕ КАЧКАНАРСКОГО ГОК 271
Братцев К.О., Даньшин М.П., Ефимов А.Л., Милько А.А.,
Майрамбекова А.М., Доскожоева Н.М., Александров В.Г.

ВНЕДРЕНИЕ ИИ В ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНОЙ ОЦЕНКЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА СОЛЯНЫХ ОЗЕР 278
Доненко С.Л., Доненко И.Л.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ФРАКЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ 284
Доскожоева Н.М., Майрамбекова А.М., Милько А.А., Братцев К.О.,
Даньшин М.П., Ефимов А.Л., Александров В.Г.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ *H*-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДВУМЕРНОЙ ГЕОСРЕДЕ. ЧАСТЬ 1: РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ, ТЕСТОВАЯ ЗАДАЧА 287
Забинякова О.Б., Скляр С.Н.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ *H*-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДВУМЕРНОЙ ГЕОСРЕДЕ. ЧАСТЬ 2: РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ 291
Забинякова О.Б., Скляр С.Н

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ПЕРЕГРЕВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ШИН КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ И МЕТОДЫ ЕГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ 303
Истаблаев Ф.Ф., Атакулов Л.Н.

ТЕПЛОВЫЕ РАЗРУШЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ШИН КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ: ПРИЧИНЫ, ПОСЛЕДСТВИЯ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ 309
Истаблаев Ф.Ф., Хайдаров Ш.Б.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАЗРЫВНОГО ГАЛЁРКИНА НА НЕКОНФОРМНЫХ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ СЕТКАХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТЕФАНА 314
Кислин А.В.

КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ПОДЪЕМА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ СО ДНА КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА 319
Кисляков В.Е., Цимбалюк Н.А., Карпов Р.В., Катышев П.В.

ВЫБОР СОВРЕМЕННЫХ СЕЙСМОПРИЕМНИКОВ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СЕЙСМОРЕГИСТРИРУЮЩЕЙ ГРАДИЕНТНОЙ УСТАНОВКИ 326
Коломейцев Д.В.

ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ 332
Кыдыралиев Э.М.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЛИТОСФЕРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ 335
Лисимов М.О.

ПОСТРОЕНИЕ СРЕДНЕЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 342
Магай В.С., Рычков Б.А.

ФРАКЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ТЕКУЩИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ БВР, ЕГО ИННОВАЦИОННАЯ ЗНАЧИМОСТЬ 346
Милько А.А., Майрамбекова А.М., Братцев К.О.,Даньшин М.П.,
Доскожоева Н.М., Ефимов А.Л., Александров В.Г.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОДХОДА 351
Мкртчян Г.А., Суслова А.А., Буцкий Д.О., Зубрильцев Е.Е.

ПРОЦЕСС МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕЛЕСКОПА МТМ-500 В КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ 356
Назаров С.В., Кривенко А.С.

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЖИ ЖИВОТНЫХ В СИСТЕМЕ СЕЙСМОБИОМОНИТОРИНГА КАЗАХСТАНА 359
Суровцева Н.В., Арифулова И.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ В УСЛОВИЯХ ЗАЖАТОЙ СРЕДЫ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 364
Тимофеев П.А. Райымкулов М.А.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ КАРОТАЖНЫХ КРИВЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 368
Юсупов Д.Д., Закирова О.Ф., Халбаев С.Б.

Научное издание

XVII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Сборник материалов
XVII Международной конференции молодых ученых и студентов

23-25 апреля 2025 года
Научная станция РАН г. Бишкек,
Кыргызская Республика

Электронное издание НС РАН
720049, Кыргызстан, Бишкек-49
Тел.: +996 (312) 61 31 40