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

XVIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ

МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ

22 - 24 апреля 2026 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**

**XVIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ**

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

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

**22-24 апреля 2026 года
г. Бишкек**

УДК 001
ББК 30.6
С56

Ответственный редактор:
Лазарева Е.А.

Редакционная коллегия:
Баталева Е.А., Валуйский А.Ю., Воронцова Е.В., Ермаков Д.Н., Забинякова О.Б., Засорина Ю.И., Кенигсберг Д.В., Кожогулова Г.К., Коломейцев Д.В., Кульков Д.С., Лисимов М.О., Морозова Л.Е., Мухамадеева В.А., Непеина К.С., Паров С.В., Прохоров О.А., Саламатина Ю.М., Стасенко Л.В., Стасенко Р.В.

Рецензенты:
Рыбин А.К., Скляр С.Н.

Дизайн обложки:
Борисова О.Г.

С56 Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сборник материалов XVIII Международной конференции молодых ученых и студентов. – Бишкек: НС РАН, 2026. – 297 с.

ISBN 978-9967-14-285-5

В данный сборник включены материалы XVIII 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 978-9967-14-285-5

©ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкеке
© Коллектив авторов, 2026

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ

УДК 551.43

TECTONIC - GEOMORPHOLOGIC INTERACTION: INSIGHTS FROM LABORATORY FAULT MODELLING AND APPLICATIONS FOR NATURAL SYSTEMS

Zasorina I.I.
iulliazasorina@yandex.com
Research station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan

Laboratory modelling enables the reproduction of large-scale, long-term deformation processes within short time frames at observable scales. In natural settings, only the resulting surface landforms are typically visible, whereas experimental modelling allows direct observation of morphotectonic development and facilitates analysis of cause-and-effect relationships. This work reviews scientific studies on laboratory sand modelling of classical tectonic fault and resulting surface structures, primarily the work conducted by Fabien Graveleau and colleagues that was published in 2015. It also discusses whether a reliable interpretation of faults in natural settings can be derived from the geomorphological observations. Such modelling approaches are most suitable for relatively shallow crust depths (~5-10 km) and tectonically young orogen (<10 Ma). The experiments demonstrate two-sided interaction between tectonic and geomorphologic processes, in which erosion plays a significant role in the evolution of fault zones. The paper also briefly examines whether geomorphological features visible in satellite imagery can be used to infer possible fault settings.

Key words: geomorphology, modelling, tectonics, fault, erosion, deformation.

Introduction. Active tectonic deformation plays an important role in the evolution of landforms, yet many deformation processes remain difficult to observe directly in natural environments. In most natural settings, only the resulting surface landforms are visible, while the processes responsible for their formation occur over long geological timescales and often at depth.

Analogue morphotectonic experiments provide a controlled environment for studying the interaction between tectonic deformation and surface processes. This paper focuses on modelling studies conducted by researchers at the University of Montpellier, who over the past 40 years have carried out a series of so-called sandbox experiments [1].

Initially, this experiment primarily focused on tectonic processes. Over the last 10 years – also short-term surface processes like erosion and its influence on topography around the deformation zone. The main focus has been paid to the role of fluid shear and surface runoff in shaping topography, without the influence of other types of erosion. The aim of these experiments is to combine tectonic deformation with erosion and sedimentation processes in order to reproduce realistic geomorphotectonic settings and to observe the interaction between active deformation and landforms evolution.

Analogue modelling also makes it possible to observe processes that are difficult to capture in nature, such as the development of displacement fields, the nucleation of secondary faults, and the incision of drainage networks in real time.

In these experiments, sand models are constructed to simulate the three principal stress regimes occurring in the Earth's crust (figure 1). The resulting surface structures are systematically observed and analyzed. Such analogue experiments a useful framework for understanding the development of natural fault zones. In contrast to natural systems, where most tectonic processes remain hidden, analog modelling allows real-time monitoring of displacement the initiation of secondary faults, and the development of drainage incision – processes, that take hundreds of thousands of years in nature.

Using remote sensing methods, it became possible to consider the morphological features from the satellite images. For example, the topographic position index (TPI) method showed good results for extracting the lineament-features from the digital elevation models and satellite images

[2]. Within selected area with the help of this method they were able to detect 76 geological lineaments and 71 faults. But still it is required expert interpretation and validation with geological maps.

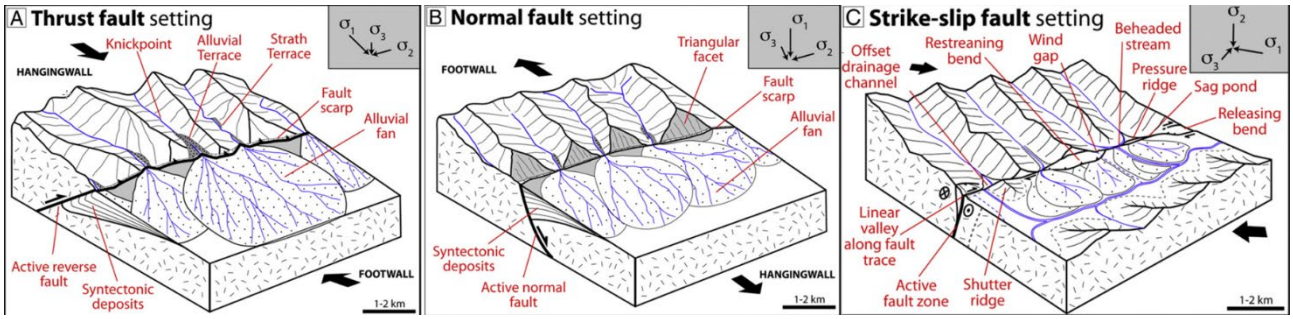


Figure 1 – Classical geomorphological markers for (A) thrust, (B) normal, and (C) strike-slip fault

Method Sandbox Modelling.

Experimental setup. The system includes a rainfall system and an optical measurement system consisting of a CCD (Charge-Coupled Device) camera and a laser interferometer.

The relief is built by the water sprinkler, which is used for creating water runoffs, channeling and general surface erosion.

Surface deformation was monitored using the laser interferometer and the CCD camera. High-resolution images were taken regularly, and subpixel spectral image correlation was used to observe the changes in the displacement field over time. In addition, digital elevation models (DEMs) were generated and analyzed in serial cross-section in order to study the three-dimensional geometry of faults and sedimentation, that develops during deformation. For each tectonic setting, multiple DEMs and high-resolution images were produced at different time intervals. In the end of the experiment a video sequences were created, which allowed to monitor the development of tectonic and morphological structures.

Each experiment was repeated several times for every deformation setting, particularly for normal and thrust fault. The results show that under identical rainfall intensity and fault slip rate, similar geomorphological patterns developed, including the same number of watersheds, triangular facets, similar relief amplitudes, and comparable values of rives and hillslope gradients.

Experimental configuration. The experimental apparatus is computerized and its configuration depends on the type of the simulated fault.

For the trust experiment, a large table (100 x 200 cm) was used. The experimental material was placed on a moving band. The band moves in the direction of the rigid stop, causing the material to thicken and form thrust structures at the deformation front.

For the normal fault experiments, two plates with a total size 130 x 100 cm were used. The footwall remained fixed, while the hanging wall moved along a predetermined normal fault plane.

For strike-slip experiments, the same experimental table as for the normal fault was used, but the plates were connected to crossed motor-driven linear actuator in order to simulate lateral displacement. The model simulated dextral strike-slip fault.

The duration of the experiments varied depending on the deformation regime. A thrust-fault experiment lasted approximately 130 min., whereas a normal fault experiment lasted about 240 min. For the strike-slip setting, there is no direct information about the total duration of the experiment; however, the displacement rate was approximately 2,7mm every 30 seconds, which corresponds to an estimated experiment duration of about 40 min.

Experimental Material. Analogue materials used in erosion-tectonic experiments must reproduce the first-order deformational and erosional behavior of the lithosphere, following the Mohr-Coulomb failure criterion. For this purpose, a specific granular material known as MatIV was developed.

The mixture consists of 4 granular components: silica powder, glass microbeads, plastic powder, and graphite mixed with water. The physical paraments of the experimental material are presented in table 1.

The mixture was slightly modified during the experiments in order to reproduce realistic geomorphotectonic behavior. For example, the ratio between silica powder and plastic powder was adjusted to increase river incision into hillslopes.

Table 1 – Physical properties of MatIV

Dry	Median grain size D_{50}	90±10 μm
	apparent density	1,30±0,05 g/cm^3
	porosity	38±2 %
	angle of internal friction	33±1º
	cohesion	150±50 Pa
Water-saturated	saturation rate	23±3 %
	apparent density	1,61±0,1 g/cm3
	porosity	34±1 %
	permeability	$4{,}9\times10^{-13}$ m^2
	dynamic-stable angle of internal friction	37±3º
	dynamic-stable cohesion	675±75 Pa

The physical properties of the mixture allow the development of morphological and stratigraphic for the modelling features: drainage basins, hillslopes and channels, fluvial terraces (strath or alluvial), knickpoints, alluvial fans with stratigraphic markers, faceted spurs, fault scarps, and pressure ridges.

Scaling. Approximate geometric and temporal scaling relationships were established for the experiments. In the model, 1 cm corresponds to approximately 50-500 m in the nature. This relationship was obtained by comparing both the quantitively and qualitatively of experimental landforms with their natural counterparts. Similarly, 1 s in the experiment corresponds to approximately 30-300 years in natural conditions. However, the authors emphasize that these relationships represent only rough geometric and time scaling and should be taken with caution rather than as precise calculations.

Results of the modelling. In case of compressional stress setting 2 thrusts occur with more uplifting and accumulation of the material at the frontal thrust, the one that is closer to the active fault. The frontal thrust occurs at about 60 min. (~750 ky in nature) after the onset of the experiment. This is the time when the video analysis begins. The frontal thrust accommodated 75% of convergence and disposed more shortening than the hinterland thrust and tectonically has a simple fault-bend fold model with an average ramp dip of $\alpha = 35 \pm 2°$. The nucleation of the frontal thrust triggers the uplift of the hanging wall become dissected via development of parallel watersheds, depositing lobed alluvial bodies in the footwall of the thrust. Building of terraces with a complicated system of water channels. Deposition permanently occurs in the foreland. Large and fast landsliding occurs at the hillslopes at the front, which is also observable in the nature.

During extensional stress setting in the beginning of the experiment a dense hydrographic network with short fault-perpendicular gullies developed on the footwall side of the fault. A fault perpendicular sorting of deposits is observed, with the relatively denser particles (glass microbeads and silica powder) being deposited closer to the fault scarp than the lighter particles (plastic and graphite powders). There is also an along-fault sorting (lateral facies transition) of particles with the relatively lighter grains preferentially deposited at the base of the trapezoidal/triangular facets and the denser ones at the outlet of the major channel's fans. The along-fault geometry of the deposits in the hanging-wall basin indicates moreover that avulsion is a dominant process in and down the major incising channels. During the experience there was no relief equilibrium achieved. There is less erosion on the hillslope.

The slip-strike model well reproduced real morphostructures like Riedel shears, pull-apart basin, pressure and shutter ridges, alluvial fans, terraces, which are well seen in the Fig.2. The surface measurements of the slip always were smaller than the real displacement and this difference increased with the growth of the complexity of the fault. Channels and basins are directly influenced by the fault and develop zigzag lateral displacements. Erosion is asymmetrical along the fault – right bank eroded more. In the subsurface secondary faults create a vertical master flower structures, positive and negative. In some works [3], for the Kyrgyz Range these structures described as concentrated deformation, which nucleated during the alpine orogen.

In most models, the morphology of the drainage network differs slightly from the natural systems: major incising channels tend to present generally wider beds (approximately 250-2500 m in nature-equivalent scale) than those typically observed in natural rivers (approximately 100-1000 m).

Similar experiment – transpressional systems. Of course, the above-mentioned classical fault settings are not that common in nature and in the reality more often their combinations of the deformational slips. There is an example of a more recent, similar, but also more complex analogue model, whereas compressional setting and lateral displacement were combined, what reflects more closely the reality of the orogenic belts like Kyrgyz Range [4]. The authors were interested to observe, what surface processes occur depending on different erosion and shortening rates.

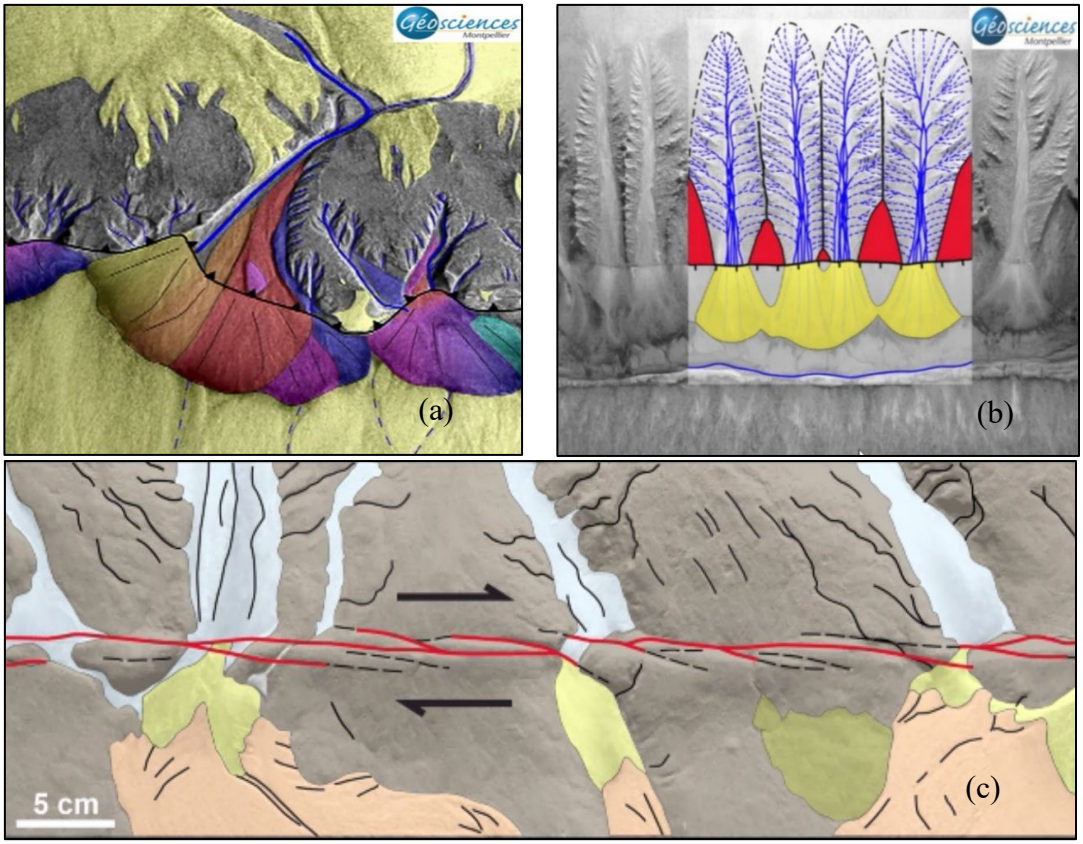


Figure 2 – Results of the sand modelling [1]: colored geomorphologic markers of the images obtained by a CCD camera for thrust fault (a), normal fault (b), and strike-slip (c)

The setting of the model and the experimental material are quite similar to the MatIV. Digital elevation models from the laser scans and conducted image correlation analysis on photos taken during the experiments. The modelling showed that erosion accelerate the development of the faults and plays an important role in the incision of master faults. Specifically, whereas faults influence how the rivers flow, and rivers in turn modify the fault activity, deformation patterns, topography. So, there is a feedback loop controlling system evolution. All models produce a bivergent wedge (main thrust + back thrust), which also occurred at the thrust modelling before [1]. The experiment showed, that by low erosion dendritic, forked, asymmetric networks occur, and in case of high erosion –

rectangular, fault-aligned networks. Transpressional landscapes evolve through a dynamic coupling of faulting and erosion, where rivers actively reorganize deformation and accelerate the development of strike-slip dominated structures.

Discussion/Results. Thanks to the analog modelling it is possible to recreate semi-realistic geomorphotectonic settings in a controlled environment and within a relatively short time. These experiments demonstrate that nature-like structures can develop under simplified laboratory conditions (figure 2).

However, analogue experiments have some limitations. They simulate relatively simple, classical tectonic settings and are most applicable to shallow crustal depths (approximately 5-10 km). In addition, they reproduce processes occurring over geologically short time frame (typically less than 10 Ma). Hydraulic processes cannot be fully scaled and, it is impossible to simultaneously preserve all main physical parameters, such as flow velocity, viscosity. For instance, the width of the channels is browed than in the nature. As the other more recent experiment on transressional settings showed, erosion plays a big role in the determination of the deformations [3]. However, analogue models cannot adequately reproduce the impact of the climate, extreme events, and they typically assume relatively constant weathering and erosion rates.

During experiments, particular geological and morphostructural markers develop (figure 2). For example, thrust fault settings produced landforms such as strath terraces and knickpoints. Different laboratory experiments have shown that two thrusts form – a back thrust followed, after some time, by a frontal thrust. Normal fault generated triangular and trapezoidal facets, gullies. While slip-strike fault resulted in offset drainage channel, releasing bands, linear valleys along fault, shutter ridge and formation of flower structures. Some geomorphologic features like alluvial fans, fault scarps and troughs, facets, channels can be well observable in natural settings, even without specialized equipment. Different fold-structures develop.

Today, remote sensing methods are widely used for recognizing such features [5]. The most detectable structures in satellite imagery are lineaments like fault scarp, linear valley along fault trace, linear ridges, linear gullies. There are a lot of works for this issue. For instance, one of the recent studies used Topographic Position Index (TPI) model to extract lineaments from remotely sensed data and compared the results with those derived from DEMs, sun's azimuth, the slope, and hillshade [2]. The method successfully detected already known faults and identified new structures. Although the main faults were correctly identified, the authors emphasize, that fully automated approach creates too much noise, while fully manual is to subjective. Therefore, a semi-automatic approach combined with expert interpretation is necessary. Further discussion of similar methods is required.

References

1. Graveleau F., Strak V., Dominguez S., Malavieille J., Chatton M., Manighetti I., Petit C. (2015). Experimental modelling of tectonics–erosion–sedimentation interactions in compressional, extensional, and strike–slip settings // Geomorphology. 2015. 244. P. 146–168.
2. Villalta E.M.D.P., Viña O.A.G., Larreta E., Romero C.P., Mulas M. Lineament extraction from digital terrain derivate model: A case study in the Girón–Santa Isabel basin, South Ecuador // Remote Sensing. 2022. 14. 5400.
3. Leonov M.G., Przhiyalgovskii E.S., Rybin A.K., Shchelochkov G.G. (2021). Features of the Tien Shan newest orogen morphostructure // Lithosphere (Russia). 2021. Vol. 21. No. 6. P.747-774.
4. Conrad M., Reitano R., Faccenna C., Becker W.T. Morpho-tectonics of transpressional systems: insights from analog modelling. 2023.
5. Ren Z., Zhang P., Oguchi T., He Z. Remote Sensing Perspectives on Geomorphology and Tectonic Processes // Remote Sensing. 2023. 15. 2327

УДК 550.83:550.8.011:553.98(575.1)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОБЪЕКТОВ К БУРЕНИЮ И ВОСПОЛНЕНИИ РЕСУРСНОЙ БАЗЫ УГЛЕВОДОРОДОВ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Абдураимов М.Х., Богданов А.Н., Эйдельнант Н.К., Хмыров П.В., Тухтаев Р.Р.
abduraimov_mx@mail.ru
Институт геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений,
г. Ташкент, Узбекистан

В условиях необходимости восполнения ресурсной базы углеводородов Республики Узбекистан особую актуальность приобретает оценка эффективности геофизических работ при подготовке объектов к бурению. Целью настоящей работы являлся анализ результатов проведённых геофизических исследований при подготовке структур и подтверждении перспективных ресурсов на основе статистических данных за 2020–2024 гг. Задачи исследования включали сопоставление эффективности сейсморазведки МОГТ-2D и МОГТ-3D, анализ показателей успешности бурения, подтверждение ресурсов категории C_3 и удельных экономических показателей. Полученные результаты позволяют количественно оценить уровень подготовки объектов и выявить резервы повышения эффективности геологоразведочных работ. Показано, что достигнутые значения успешности и подтверждаемости соответствуют среднемировому уровню, при наличии значительного потенциала их роста за счёт оптимизации отбора и ранжирования объектов.

Ключевые слова: геологоразведочные работы, сейсморазведка, эффективность, перспективная структура.

Введение. В пределах Республики Узбекистан выделены пять нефтегазоносных и четыре перспективных региона общей площадью перспективных земель 282,4 тыс. км², отличающихся условиями геологического развития и тектонического строения.

На 1 января 2026 г. на Государственном балансе Республики Узбекистан числятся 323 месторождения углеводородного сырья, из них 31 – в Устюртском, 222 – в Бухаро-Хивинском, 19 – в Юго-Западно Гиссарском, 16 – в Сурхандарьинском и 35 – в Ферганском регионах [1].

Одним из ключевых условий эффективного поиска залежей углеводородов является наличие достаточного и достоверно подготовленного фонда перспективных объектов, сопоставление которых по качеству, масштабам и объёму ресурсов позволяет обосновать приоритеты дальнейших геологоразведочных работ [2, 3].

Материалы исследования. Исходными материалами послужили данные проведённых геофизических работ и результаты подготовки объектов к бурению на территории Республики Узбекистан за 2020–2024 гг., включая материалы сейсморазведки МОГТ-2D и МОГТ-3D. Методика исследования основана на статистическом анализе показателей подготовки объектов, успешности бурения, подтверждаемости перспективных ресурсов категории C_3 и удельных экономических параметров.

Результаты. В 2020–2024 гг. количество объектов, подготовленных к глубокому бурению, составило 90 структур, при этом 52 % из них согласно данным МОГТ-2D, а 48 % — МОГТ-3D, что подчёркивает сопоставимый вклад обоих методов в формирование фонда подготовленных структур (рисунок 1).

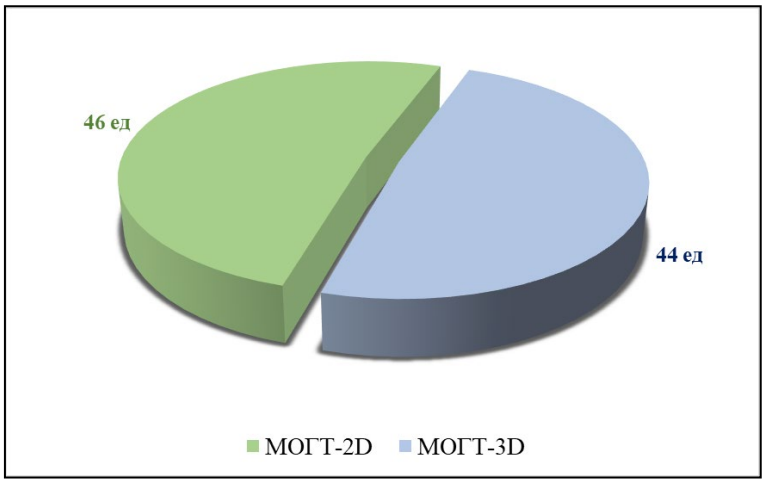


Рисунок 1 – Сопоставление количества подготовленных объектов методами сейсморазведочных работ

Выполненный анализ эффективности проведённых геофизических работ за 2020–2024 гг. показал, что из 46 структур, подготовленных по данным сейсморазведки МОГТ-2D, в глубокое бурение были введены 22 площади (47,8 %), в пределах которых впоследствии открыто 6 месторождений, что составляет 27,3 % от числа объектов, введённых в бурение. В то же время из 44 структур, подготовленных методом МОГТ-3D, в бурение также вовлечены 22 площади (50 %), на которых открыто 9 месторождений (40,9 %). Таким образом, сейсморазведка МОГТ-3D демонстрирует более высокую результативность на стадии бурения, при сопоставимых объёмах подготовленных объектов (рисунок 2) [4].

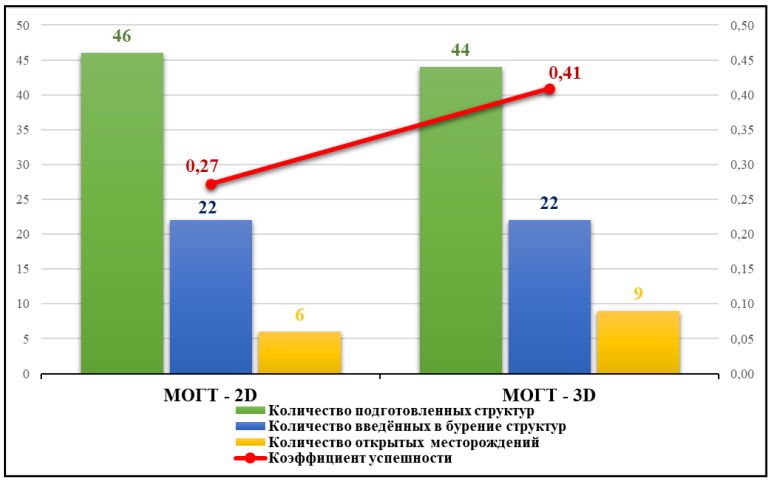


Рисунок 2 – Сравнительная эффективность сейсморазведки МОГТ-2D и МОГТ-3D на этапе подготовки объектов к бурению

В целом, из 90, подготовленных геофизическими методами структур за 5 лет, в глубокое бурение были введены 44 площади, на которых, в последующем, было открыты 15 месторождений (коэффициент успешности 0,34). Полученный коэффициент успешности находится на уровне мировых стандартов, что подтверждает эффективность геофизической подготовки, при этом имеется значительный резерв для дальнейшего улучшения (19 объектов всё ещё находятся в стадии бурения, то есть коэффициент успешности в случае успешного проведения геологоразведочных работ может увеличиться до 0,77).

На 15 открытых месторождениях, в своё время, были оценены перспективные ресурсы категории C_3 в количестве 83,9 млн. т.у.т. По результатам проведённых геологоразведочных работ, на сегодняшний день, на этих месторождениях подсчитаны запасы в количестве 28,3 млн. т.у.т. Таким образом, коэффициент подтверждаемости перспективных ресурсов

категории C_3 (отношение количества подсчитанных запасов УВ категорий $АВС_1$ к количеству ранее подсчитанных перспективных ресурсов на этих 15 месторождениях) в среднем составляет 0,34 [5]. Кроме того, на открытых месторождениях также числятся предварительно оценённые запасы категории C_2 в количестве 13,7 млн. т.у.т. Опыт оценок перевода предварительно оценённых запасов в запасы промышленных категорий показывает, что этот коэффициент по республике Узбекистан превышает 1,0. Учитывая определённые риски и проявляя осторожность нами этот показатель был принят на отметке 0,9. Исходя из этого, в случае успешного проведения разведочных работ на открытых месторождениях, можно ожидать дополнительный прирост запасов в количестве 12,3 млн. т.у.т. В таком случае, коэффициент подтверждаемости перспективных ресурсов на открытых месторождениях может составить 0,48, что является достаточно высоким показателем, характеризующим качество подготовки объектов и проведения геологоразведочных работ.

Необходимо отметить, что по состоянию на 01.01.2026 г. по 2 месторождениям из 15 открытых выполнен окончательный подсчёт запасов, по результатам которого они отнесены к категории мелких месторождений. По оставшимся месторождениям запасы оценены в оперативном порядке, что, в дальнейшем, может повлиять на величину их запасов, и, соответственно, на показатели подтверждаемости перспективных ресурсов категории C_3.

Анализ показателей успешности подготовки структур по годам (2020–2024 гг.) позволяет выявить как общие тенденции, так и различия в эффективности геофизических работ.

За период 2020–2024 гг. геофизическими методами было подготовлено 90 структур общей площадью 918,2 км². Количество подготовленных объектов по годам изменялось в узком диапазоне — от 17 до 19 структур, тогда как их суммарная площадь варьировала значительно: от 150,2 км² в 2023 г. до 230,5 км² в 2021 г. Средняя площадь одной структуры изменялась от 8,3 км² (2023 г.) до 13,6 км² (2021 г.), при среднем значении за период 10,2 км².

Суммарная стоимость подготовки структур за пятилетний период составила 22,0 млн долл. США. Средние затраты на одну структуру изменялись от 0,13 млн долл. в 2020 г. до 0,32 млн долл. в 2023 г., при среднем значении 0,24 млн. долл. (рис. 3). Стоимость геофизической подготовки в расчёте на 1 км² площади колебалась в пределах 0,014–0,038 млн долл./км², достигая максимума в 2023 г., что указывает на рост детальности и сложности выполняемых работ.

Общий объём перспективных ресурсов категории C_3, подготовленных за анализируемый период, составил 554,0 млн т.у.т. При этом годовые значения изменялись от 65,9 млн т.у.т. (2020 г.) до 182,0 млн т.у.т. (2023 г.). Средний объём перспективных ресурсов, приходящийся на одну структуру, увеличился с 3,9 млн т.у.т. в 2020 г. до 10,1 млн т.у.т. в 2023 г., что свидетельствует о повышении качества отбора и геологической обоснованности объектов (рисунок 3).

Показатель стоимости подготовки перспективных ресурсов в недрах 1 т.у.т. изменялся от 0,0317 долл./т.у.т. (2023 г.) до 0,0605 долл./т.у.т. (2021 г.), при среднем значении 0,0398 долл./т.у.т. Минимальные значения данного показателя соответствуют периодам наибольшей эффективности геофизических работ с точки зрения соотношения «затраты–результат» (рисунок 3).



Рисунок 3 – Средняя стоимость подготовки в недрах 1 т.у.т. перспективных ресурсов

Выводы. Всё вышесказанное говорит о том, что:

1. При практически неизменном количестве подготовленных структур (17–19 в год) их суммарная площадь изменялась более чем в 1,5 раза (от 150,2 до 230,5 км²), что указывает на отсутствие линейной зависимости между числом объектов и масштабом вовлекаемых в изучение территорий. Это свидетельствует о гибкой стратегии отбора объектов, ориентированной не на количество, а на геологическую значимость структур.

2. Увеличение средней площади одной структуры с 8,3 км² до 13,6 км² отражает смещение акцента в сторону более крупных ловушек, что, соответственно, сопровождается ростом средних объёмов перспективных ресурсов категории C_3 на одну структуру (с 3,9 до 10,1 млн. т.у.т.).

3. Годы с максимальными затратами на 1 км² (до 0,038 млн. долл./км²) не всегда соответствуют максимальным значениям подготовленных ресурсов, что подтверждает нелинейный характер зависимости «стоимость – результат» и подчёркивает ведущую роль геологической обоснованности объектов.

4. Минимальные значения стоимости подготовки 1 т.у.т. в недрах (0,0317–0,040 долл./т.у.т.) соответствуют годам с наибольшими объёмами перспективных ресурсов, что статистически указывает на периоды оптимального соотношения затрат и геологического результата.

5. За анализируемый период средний объём перспективных ресурсов категории C_3, приходящийся на одну структуру, увеличился более чем в 2,5 раза, что отражает качественное улучшение подготовки объектов и более эффективное использование геофизических данных.

6. Совокупность показателей (коэффициент успешности бурения 0,34, рост оценённых перспективных ресурсов на структуру, снижение удельной стоимости подготовки ресурсов) соответствует среднемировым значениям для поисково-разведочного этапа и указывает на управляемый уровень геологического риска.

7. Существенный разброс показателей стоимости подготовки 1 т.у.т. и среднего объёма подготовленных ресурсов на структуру свидетельствует о наличии резервов повышения эффективности за счёт дальнейшего совершенствования критериев ранжирования и отбора объектов.

Литература

1. Хмыров П.В., Абдураимов М.Х., Тухтаев Р.Р., Богданов А.Н. Ретроспективный анализ результатов геофизических работ по выявлению и подготовке структур в Республике Узбекистан // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Сб. материалов XVII Междунар. конф. молодых учёных и студентов. Бишкек. 2025. С. 90-93.

2. Богданов А.Н., Хмыров П.В., Абдураимов М.Х., Тухтаев Р.Р. Результаты геологоразведочных работ на нефть и газ в Бухаро-Хивинском регионе // Геология и минеральные ресурсы. 2021. № 6. С. 67-70.
3. 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. Сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., г. Ташкент, 10-11 октября 2019 г. Ташкент. 2019. С. 245-248.
4. 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.
5. Богданов А.Н., Эйдельнант Н.К., Хмыров П.В., Абдураимов М.Х., Тухтаев Р.Р. Оценка эффективности геологоразведочных работ в Республике Узбекистан: опыт АО "Узбекнефтегаз" и АО "Узбекгеофизика" // Нефтегазоносность активизированных областей Туранской платформы и её горного обрамления. Материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Ташкент, 8-9 октября 2025 г. Ташкент. 2025. С. 217-221.

УДК 550.34

ОЦЕНКА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ КАК ИНДИКАТОРА СТРУКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЗРЫВОВ

Асаншоева Ш.А.[1], Шозиёев Ш.П.[2]
shamsiya.asanshoeva@gmail.ru
[1] Хорогский государственный университет, г. Хорог, Таджикистан
[2] Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук, г. Душанбе, Таджикистан

В данном исследовании анализируется пространственная кластеризация 11 последовательностей афтершоков с использованием корреляционной фрактальной размерности D_2, рассчитанной по алгоритму Грассбергера-Прокаччиа. С помощью метрики трехмерного расстояния было установлено, что значения D_2 варьируются от 0,7 до 2,3, отражая переход от простых линейных структур к сложным объемным зонам. Результаты показывают, что мелкофокусные землетрясения обычно формируют четкие плоскостные или линейные разрывы, в то время как глубокие события характеризуются диффузным распределением афтершоков. Выявленная сильная корреляция между глубиной очага и фрактальной размерностью подтверждает гипотезу о менее хрупком и более пластичном характере разрушения в глубоких слоях коры. Работа количественно обосновывает неоднородность геометрии зон разломов и механизмов снятия напряжений в различных тектонических условиях.

Ключевые слова: сейсмичность, афтершоки, фрактальная размерность, алгоритм Грассбергера-Прокаччиа, геометрия разломов, пространственная кластеризация.

Введение. Пространственное распределение землетрясений является критически важным параметром для понимания механики разломов, накопления напряжений и высвобождения энергии. Начиная с новаторской работы Аки [1], фрактальная геометрия была признана мощным инструментом для количественной оценки сложности сейсмичности, выходящим за рамки простых евклидовых измерений. Фрактальная размерность, D_2 измеряет способность набора точек (гипоцентров) заполнять пространство и напрямую связана с характеристиками кластеризации сейсмического процесса. В частности, корреляционная фрактальная размерность (D_2) является наиболее широко используемой мерой пространственной кластеризации в сейсмологии [2].

Анализ последовательностей афтершоков, где пространственная протяженность афтершоков обычно определяет физическую зону разрыва основного землетрясения. Главная цель количественная оценка структурной сложности этих зон разломов в зависимости от D_2. Ожидаемые значения для D_2 напрямую связаны с физической геометрией: $D_2 \approx 1.0$ подразумевает линейную структуру (след разрыва) $D_2 \approx 2.0$ предполагает плоскую структуру (плоскость разлома), и $D_2 \approx 3.0$ указывает на случайное распределение, заполняющее объем. Классификации структур на основе их фрактальной размерности более подробно описаны в таблице 1. В геомеханике и геологии этот параметр помогает понять, насколько «заполнено» пространство трещинами или разломами [3, 4].

Таблица 1

Фрактальная размерность (D2)	Типичная интерпретация геометрии разлома
$D_2 \approx 0.9 - 1.2$	Линейный участок разлома или вершина трещины
$D_2 \approx 1.5 - 2.0$	Плоский пластинчатый разлом или волнистая поверхность разлома
$D_2 \approx 2.2 - 2.5$	Обширный объем трещин или широкая, диффузная зона разрушения

Использование фрактальных методов в сейсмологии позволяет преодолеть ограничения классических моделей, которые часто рассматривают разломы как идеально гладкие плоскости. В реальности геометрия сейсмогенных зон обладает свойством самоподобия на различных масштабах, что делает корреляционную размерность D_2 незаменимым параметром для описания «шероховатости» и разветвленности трещин. Понимание того, как афтершоки заполняют пространство вокруг основного разрыва, дает ключ к оценке объема горной породы, вовлеченного в процесс перераспределения напряжений.

Методы. Один из методов сбора данных был собран в одиннадцать основных различных последовательностей афтершоков, каждая из которых содержала координаты гипоцентра (широта, долгота и глубина в км) и минимальное количество $N \geq 100$ афтершоки. Метаданные основного толчка, включая магнитуду (K также были извлечены данные о глубине и времени).

Второй метод это метрика трехмерного расстояния для точного отражения трехмерного гипоцентрального разделения расстояние между любыми двумя афтершоками рассчитывалось с использованием метрики трехмерного расстояния по большому кругу. Этот метод объединяет расстояние по большому кругу (гаверсину) для горизонтального разделения ($\Delta x, \Delta y$) с абсолютной разницей глубин (Δz) для получения трехмерного расстояния (r)

$$r = \sqrt{(\text{GreatCircleDistance})^2 + (\Delta\text{Depth})^2} .$$

Корреляционная составляющая D_2 оценка производилась с использованием алгоритма Грассбергера-Прокаччиа [5]. Корреляционный интеграл $C(r)$ был рассчитан для ряда радиусов r

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i,j} \Theta(r - |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|),$$

где $\Theta(\cdot)$ — это функция Хевисайда, подсчитывающая долю всех уникальных пар, разделенных расстоянием $\leq r$. D_2 - режим оценки и масштабирования.

Фрактальная размерность D_2 это наклон в линейной области логарифмического графика $\log_{10} C(r)$ против $\log_{10} r$. Этот линейный сегмент известен как режим масштабирования. Для автоматической оценки мы использовали центральный 40% из допустимых точек данных в логарифмическом масштабе выполнить линейную регрессию методом наименьших квадратов, подогнав модель:

$$\log C(r) = D_2 \cdot \log r + c,$$

где D_2 показывает наклон линии.

Применение алгоритма Грассбергера-Прокаччиа требует строгого обоснования выбора диапазона масштабирования (scaling region) на логарифмическом графике. Ошибка в определении линейного участка может привести к существенным искажениям D_2, поэтому использование метода наименьших квадратов для автоматизированной регрессии позволяет минимизировать субъективный фактор при расчетах. Важно отметить, что использование

трехмерной метрики расстояния, объединяющей гаверсинус и вертикальное разделение, обеспечивает корректный учет сферичности Земли при анализе глубокофокусных событий.

Результаты и обсуждение. Ниже представлены систематизированные данные по 11 последовательностям афтершоков, проанализированным в исследовании. Эти данные позволяют количественно оценить структурную сложность зон разломов через корреляционную фрактальную размерность. Сведения результатов фрактальной размерности и метаданных основного толчка даны в таблице 2.

Таблица 2

Дата и время	N	D_2	D_2 ошибка	Широта	Долгота	Глубина, м	Класс, К
2000.07.17 22:53:45	237	2.336	0.043	36.1	70.7	130	14.7
2001.02.25 02:22:00	362	2.289	0.04	36.5	70.7	210	14.9
2002.01.03 07:05:32	480	1.706	0.04	36.3	70.4	100	15
2002.03.25 14:56:25	176	0.961	0.045	35.8	69	10	15
2004.04.05 21:24:00	1086	1.673	0.025	36.5	71	200	15.9
2004.11.17 20:58:21	101	1.19	0.058	39.3	71.6	10	14.5
2005.10.08 03:50:45	870	2.015	0.031	34.52	73.64	8	17.7
2008.09.05 04:57:52	960	2.308	0.041	36.5	71.2	220	14.5
2008.10.05 15:52:49	987	0.741	0.092	39.5	73.8	30	15
2009.01.03 20:23:23	1157	2.248	0.04	36.5	70.5	200	15
2009.10.29 17:44:34	307	1.982	0.033	36.6	70.6	210	14.6

Большое количество афтершоков (N) в крупных последовательностях позволяет более точно определить наклон на логарифмическом графике алгоритма Грассбергера-Прокаччиа. Количество зарегистрированных событий в последовательностях варьируется от 101 до 1157, что позволяет оценивать как локальные микро-разрывы, так и масштабные зоны разрушения

Это превосходный набор результатов, полученных с помощью метода 3D-корреляционной фрактальной размерности (D_2 анализ 11 последовательностей афтершоков). Данные позволяют напрямую интерпретировать пространственную сложность зон разломов, породивших эти последовательности. Ниже представлен анализ наших результатов, сгруппированный по предполагаемым значениям. D_2 и соотношение их с сейсмологическими интерпретациями геометрии разломов.

Корреляционная составляющая D_2 значения варьируются от 0,741 до 2,336 по всем последовательностям. Этот диапазон убедительно свидетельствует о различной структурной сложности в зонах разломов.

Высокая сложность. Объемные структуры ($D_2 \approx 2.0 - 2.3$)

Последовательности с D_2 значения, близкие к 2,0 и выше, указывают на то, что афтершоки широко рассеяны, заполняя больший объем или сложную, неровную структуру разлома, которая приближается к... $D_2 \approx 3$ (случайный, объемный) предел.

Третья таблица демонстрирует, что **увеличение глубины очага сопровождается ростом сложности пространственной структуры сейсмичности**, приближающейся к случайному объемному распределению.

Таблица 3

Последовательность	D_2	N	K	Глубина (км)	Интерпретация
2000.07.17	2.336	237	14.7	130.0	Наивысшая сложность, приближающаяся к случайному распределению объема. Это указывает на очень размытую зону разрушения, возможно, из-за большой глубины залегания или сильно трещиноватой вмещающей породы.
2008.09.05	2.308	960	14.5	220.0	Аналогичный, сложный случай разрушения. Глубокий источник (220 км) может способствовать образованию более широкого, менее плоского облака афтершоков.
2001.02.25	2.289	362	14.9	210.0	Очень глубокий, высокий D_2 Глубинные землетрясения часто характеризуются менее выраженными плоскими структурами.
2009.01.03	2.248	1157	15.0	200.0	Высокий D_2 Это указывает на широкую, возможно, трещиноватую зону на большой площади, что согласуется с большим значением N.

*Умеренная сложность: плоские/листовидные структуры ($D_2 \approx 1.7 - 2.0$).*Эти значения очень распространены в зрелых зонах разломов и часто интерпретируются как афтершоки, происходящие преимущественно на плоскости разлома. $D_2 \approx 2.0$), но с некоторым разбросом или кластеризацией (Таблица 2).

Четвертая таблица иллюстрирует переход от классической плоскостной геометрии разлома к более сложным, но всё ещё преимущественно двумерным структурам, что подчёркивает роль геометрии источника даже для глубинных землетрясений.

Таблица 4

Последовательность	D_2	N	K	Глубина (км)	Интерпретация
2005.10.08	2.015	4870	17.7	8.0	Классическая плоская структура. Это ваше самое крупное событие (K=17,7, малая глубина), и оно $D_2 \approx 2.0$. Это позволяет предположить, что афтершоки четко определяют большую, плоскостную плоскость разлома (поверхность разлома).
2009.10.29	1.982	307	14.6	210.0	Очень близок к плоскости ($D_2 \approx 2.0$).
2002.01.03	1.706	480	15.0	100.0	Промежуточная сложность. Структура менее разрознена, чем $D_2 \approx 2.0$ Это позволяет предположить, что события сосредоточены в большом количестве на одной плоскости или образуют

					гофрированную/шероховатую плоскую поверхность.
2004.04.05	1.673	1086	15.9	200.0	Аналогично вышеизложенному, это указывает на сильную кластеризацию на сложной поверхности разлома.

Низкая сложность. Линейные самоподобные структуры ($D_2 < 1.5$). Значения ниже 1,5 указывают на то, что афтершоки носят сильно локализованный характер и происходят преимущественно вдоль линии или узкого следа в пределах зоны разлома (например, на краю или в зоне наиболее сильного смещения разрыва).

В таблице 5 демонстрируется, что при малых глубинах и ограниченных размерах источника, сейсмичность может быть организована в **резко выраженные линейные структуры**, существенно отличающиеся от плоскостных и объёмных зон разрушения.

Таблица 5

Последовательность	D_2	N	K	Глубина (км)	Интерпретация
2004.11.17	1.190	101	14.5	10.0	Строго линейная структура. Эпицентрические события в значительной степени сосредоточены вдоль небольшой, четко очерченной линии или узкого сегмента разлома. Это характерно для небольших последовательностей землетрясений или тех, у которых ограниченная протяженность разрыва.
2002.03.25	0,961	176	15.0	10.0	Высоко линейная структура. Значение, близкое к 1,0, является классическим признаком разрыва, ограниченного линейной траекторией.
2008.10.05	0,741	987	15.0	30.0	Экстремальная кластеризация/ линейность. Это наименьшее значение, указывающее на невероятную концентрацию афтершоков вдоль очень тонкой, почти одномерной линии или точечного кластера, несмотря на большое количество событий (N=987). Этот результат требует тщательной визуальной проверки графика C(r), чтобы убедиться в правильности диапазона аппроксимации.

Глубокие землетрясения ($\text{Depth} > 100\text{km}$ последовательности на большой и средней глубине (2000.07.17, 2001.02.25, 2008.09.05, 2009.01.03) обычно имеют более высокую плотность D_2 значения (выше 2,2). Это согласуется с глубоким разрушением, где порода теплее и потенциально менее хрупкая, что приводит к более диффузному, заполняющему объем снятию напряжения, а не к разрыву на резкой, холодной плоскости разлома.

Поверхностные землетрясения ($\text{Depth} < 30\text{km}$ последовательности на небольшой глубине (2002.03.25, 2004.11.17, 2005.10.08, 2008.10.05) обычно демонстрируют более низкие значения. D_2 значения (от 0,741 до 2,015), что соответствуют хрупкому разрушению, сосредоточенному на четко определенных, структурно более простых плоскостях разлома или линейных сегментах.

В четвертой таблице приведена обобщённая интерпретация **фрактальной размерности D_2** как индикатора геометрии зоны сейсмического разрыва. Низкие значения D_2 соответствуют **одномерным структурам**, таким как линейные участки разломов или вершины трещин, где сейсмичность концентрируется вдоль узкой линии.

Структурная сложность и D_2. Результаты демонстрируют значительную неоднородность в кластеризации афтершоков.

Планарные (плоские) разломы ($D_2 \approx 2.0$). Самая крупная проанализированная последовательность ($08.10.2005, K = 17.7, N = 4870$) дала $D_2 = 2.015 \pm 0.031$. Это значение исключительно близко к теоретическому размеру плоскости ($D_2 = 2$), что подтверждает, что массивное облако афтершоков в основном занимает обширную, четко выраженную поверхность разлома, типичную для крупных, неглубоких землетрясений в земной коре [6].

Высоколинейные разломы ($D_2 < 1.2$). Последовательности 2002.03.25 ($D_2 = 0.961$) и 05.10.2008 ($D_2 = 0.741$) характеризуются очень низким D_2 значением. Эти значения интерпретируются как чрезвычайно плотное скопление, где афтершоки ограничены узким следом разлома или локализованной зоной высокой концентрации напряжений, приближающейся к одномерному (линейному) фрактальному пределу. Это говорит о том, что разрыв главного землетрясения был сильно локализован [6].

Объемное заполнение, диффузные разломы ($D_2 > 2.2$). Последовательности 2000.07.17 ($D_2 = 2.336$) и 05.09.2008 ($D_2 = 2.308$) показывают размеры, приближающиеся к $D_2 = 2.5$. Эти более высокие значения указывают на диффузное распределение афтершоков, занимающее значительный объем, а не ограниченное резкой плоскостью.

Зависимость от глубины существует сильная корреляция между глубиной основного землетрясения и расчетной глубиной D_2:

Поверхностные события ($< 30\text{km}$) показазывают широкий диапазон D_2 (0,741–2,015), что указывает на значительную пространственную сложность хрупких разломов, от простых линейных следов до массивных плоскостей.

Глубокие события ($\geq 100\text{km}$). Последовательно демонстрировать более высокие показатели D_2 значения (среднее) $D_2 \approx 2.25$. Это наблюдение подтверждает гипотезу о том, что на больших глубинах повышение температуры и давления приводит к менее хрупкой и более пластичной среде вмещающей породы. Напряжение снимается более широко в сильно трещиноватом объеме, а не концентрируется на простой, четко определенной плоскости разлома, тем самым увеличивая эффективную фрактальную размерность [7].

Заключение. Фрактальная размерность трехмерной корреляции (D_2 этот метод обеспечивает надежную количественную оценку пространственной сложности афтершоков, предоставляя непосредственное представление о геометрии зоны разлома).

Анализ подтверждает два основных способа снятия напряжений.

1. Хрупкие, неглубокие разломы (малая глубина) приводят к D_2 значению между 0.7 и 2.0. Это свидетельствует о разрывах, ограниченных сильно сгруппированными линейными следами или четко определенными плоскими поверхностями.
2. Более глубокий отказ ($\geq 100\text{km}$) дает высокие результаты D_2 ценности (> 2.2), что указывает на диффузный, заполняющий объем стиль релаксации напряжений, соответствующий менее хрупким средам с более высокими температурами.

В будущих исследованиях следует включить расчет уравнения Гутенберга-Рихтера. b - значение для изучения установленной сейсмологической взаимосвязи между пространственной статистикой и статистикой магнитуды. $D \approx 2b$ [Aki, 1981].

Литература

1. Aki K. A probabilistic synthesis of precursory phenomena // Earthquake Prediction: An International Review. Washington, DC: American Geophysical Union. 1981. P. 566–574.
2. Turcotte D.L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press. 1997. 398 p.
3. Sammis C.G., King G.C.P., Biegel R. The kinematics of gouge deformation // Pure and Applied Geophysics. 1987. Vol. 125. No. 5. P. 777–812.
4. Oncel A.O., Alptekin O. The scaling of aftershock patterns and its spatio-temporal evolution // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1999. Vol. 112. No. 3-4. P. 191–201.
5. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1983. Vol. 9. No. 1-2. P. 189–208.
6. Hirata T. A correlation between the b-value and the fractal dimension of earthquakes // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1989. Vol. 94. No. B 6. P. 7507–7514.
7. Turcotte D.L. Fractal geometry in seismicity and earthquake faults // Reports on Progress in Physics. 1997. Vol. 60. No. 11. P. 1303.

УДК 550.379:550.34.06.013.22:550.343

ЭЛЕКТРО-ТОМОГРАФО-СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ОПОЛЗНЕ-ОПАСНОГО СКЛОНА ТУЮК-СУУ В БАССЕЙНЕ РЕКИ МИН-КУШ

Бектурсунов Ж.З., Абдыбачаев У.А., Усупаев Ш.Э., Коноков Т.К., Тумышев Б.А., Казиев Э.Б.
zh.bektursunov@email.com
Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, г. Бишкек, Кыргызстан

Проведены комплексные полевые работы, в целях выявления особенностей внутреннего строения оползне-опасного склона восточнее п.г.т. Мин-Куш на правобережьи р. Туюк-Суу, правого притока р. Мин-Куш. Сопряженные электротомографические и сейсмометрические зондирования позволили выявить в условиях высокой степени неотектонической нарушенности на активном оползнеопасном борту развитие проникающих вглубь массива субгоризонтальных трещин откола и ступенчатых уступов оседания на слагающих склон рыхлых, связных и полускальных грунтах. Геофизические зондирования показали, что оползне формирующие разрывы сплошности в горных породах, находятся на различных стадиях трансформации нестабильного массива, где подвижки приводят к раскрытию имевшихся ранее и проявлению новых трещин. В рамках полевой работы была осуществлена аэрофотограмметрическая съёмка дроном для построения цифровой модели рельефа.

Ключевые слова: геофизика, электротомография, профиль, уступ, зондирование, сопротивление, трещины, сейсмометрия, карта, оползень.

Введение. Оползневой склон Туюк-Суу находится восточнее населённого пункта Мин-Куш в Жумгальском районе Нарынской области. Далее на восток от оползнеопасного склона в пойме р. Мин-Куш, размещено ураносодержащее хвостохранилище. Угроза схода оползня представляет собой риск образования сошедшим оползнем запрудной плотины [1-4].

Образовавшееся озеро с оползневой плотиной затопит хвостохранилище и размытые радиоактивные ингредиенты попавшие в воду, прорыв грунтовой запруды несет угрозу заражения населения, биоте и территории по р. Туюк-Суу, попадая каскадно через русловой поток по р. Мин-Куш, далее в р. Кёкёмерен, затем через р. Нарын трансгранично в бассейн р. Сыр-Дарья.

Методика исследований. Электроразведочные полевые работы выполнены методом сопротивлений с помощью геофизического электротомографического оборудования немецкого производства Point Light 10W (рисунок 1) установками диполь-диполь и Веннера.

В ходе работ осуществлялось непосредственное построение двумерных геоэлектрических псевдоразрезов на выбранном оползневом склоне, в виде сетей продольных и поперечных профилей.

Обработка полученных записей зондирования проводилась посредством программного продукта Res2Dinv (рисунок 2) [1-4].

Всего получены кондиционные данные глубинного зонирования по 21 продольному и поперечному профилю.

Сейсмометрические измерения осуществлялись методом Site Effect (сейсмическая активность на площадке) с распределёнными по участку семью сейсмическими датчиками SENSOR Nederland PE-6/B (рисунок 3) на участке, один из которых был установлен за пределами оползневой зоны и использовался как базовая точка. Остальные шесть сейсмодатчиков размещались на склоне, последовательно переставляясь по участку для охвата всей оползневой зоны. Итого замеры велись на 18 точках. Запись каждого передвижного сейсмодатчика длилась 25-50 минут, а базового, около 6 часов.



Рисунок 1 – Геофизическое электротомографическое оборудование немецкого производства 4-Point Light 10W

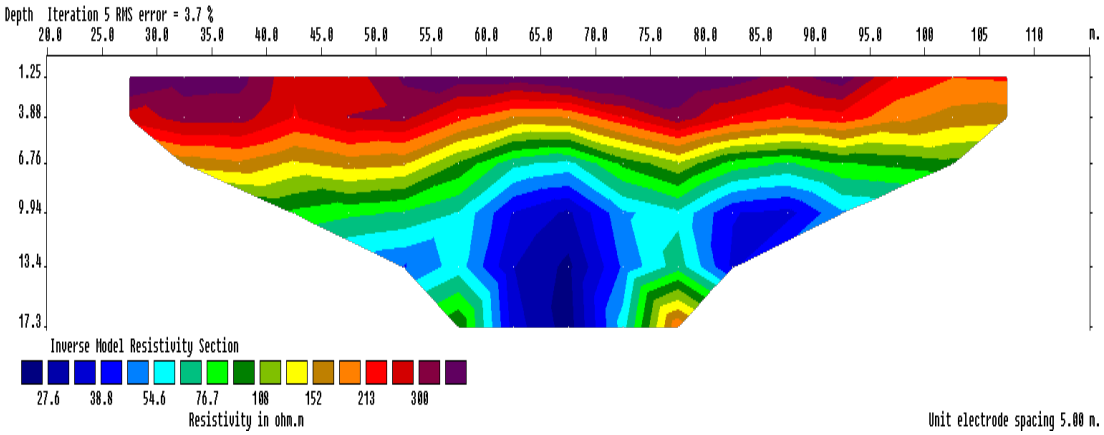


Рисунок 2 – Построение двумерного геоэлектрического псевдоразреза, полученного на местах расположения профилей, с обработкой записи программным продуктом Res2Dinv, сопряженной способом вертикального электрического зондирования установкой Шлюмберже



Рисунок 3 – Сейсмометрические измерения осуществлялись методом Site Effect (сейсмическая активность на площадке) с распределёнными по сети сейсмическими датчиками SENSOR Nederland PE-6/B

Результаты полученных данных обрабатывались программным обеспечением Geopsy (рисунок 4).

Проведена была аэрофотограмметрическая съёмка Дроном для создания цифровой модели рельефа (рисунок 5).

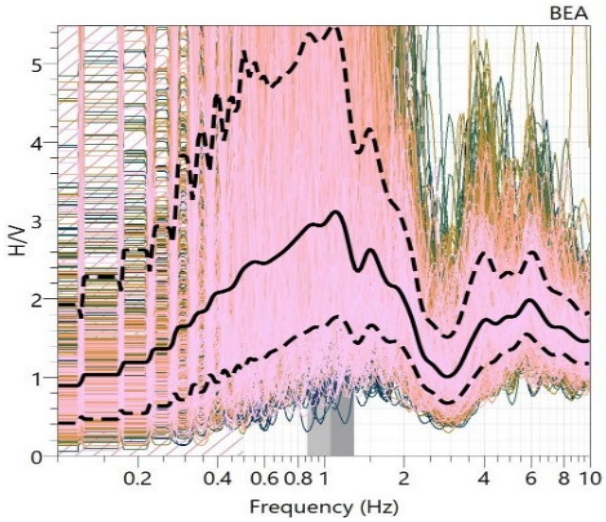


Рисунок 4 – Сейсмометрические данные обрабатывались программным обеспечением Geopsy


Рисунок 5 – Аэрофотограмметрическая съёмка дроном оползне-опасного склона у п.г.т. Мин-Куш, для создания цифровой модели рельефа

Организация, обработка и анализ данных геофизических измерений оползневого склона. Всего измерено 21 электротомографический профиль. Длина каждого (рисунок 6) профиля составила 100 м., а расстояние между электродами – 5 метров. Глубина разреза каждого профиля варьировалась в зависимости от установок от 16 до 22 метров.

На рисунке 6 демонстрируется расположение профилей на участке с замерами удельного сопротивления на подложке Google Earth для визуализации.

Результаты электротомографии. Мощность поверхностных отложений в пределах исследуемой территории варьируется от 4 метров на профиле 1 до 23 метров на профиле 14, при этом наибольшие значения отмечаются на профилях 7, 14 и 20, что указывает на развитие значительных толщ поверхностных отложений, вероятно связанных с активной аккумуляцией элювиально-делювиального материала. Значения удельного электрического сопротивления (УЭС) изменяются в широком диапазоне — от 60 Ом·м на профилях 1 и 2 до 2979 Ом·м на профиле 5.

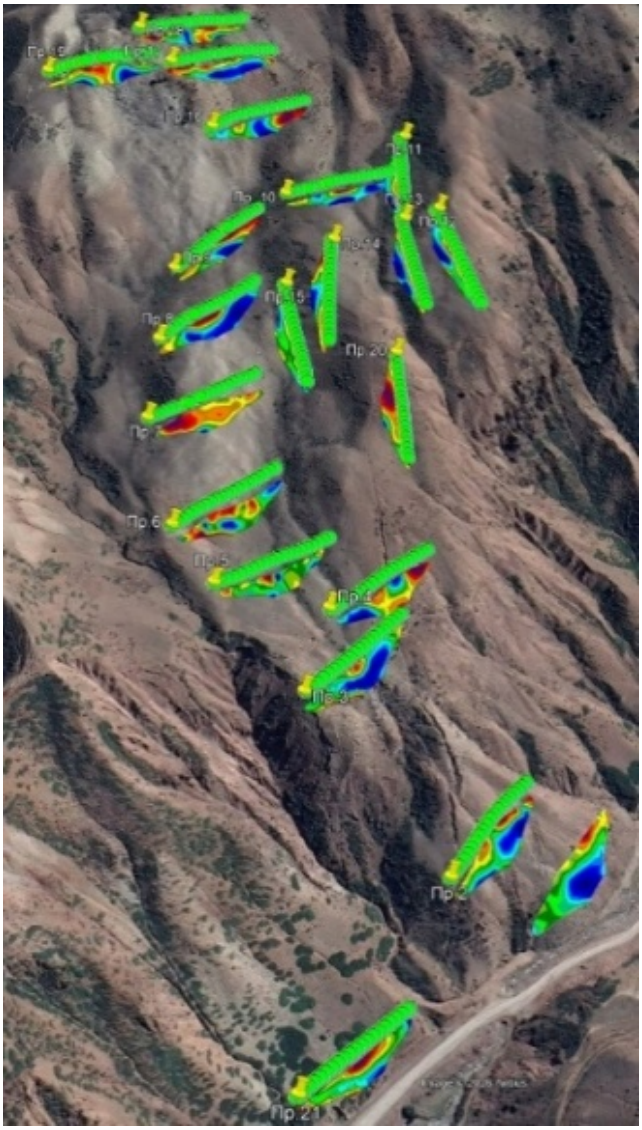


Рисунок 6 – Расположение 21 электро-томографических профилей на оползне-опасном склоне в районе п.г.т. Мин-Куш, на участке с замерами удельного сопротивления на подложке Google Earth

Низкие значения УЭС (<100 Ом·м) свидетельствуют о высоком содержании глинистого материала и/или обводненности пород, что характерно для профилей 1 и 2, тогда как высокие значения УЭС (>1000 Ом·м) указывают на присутствие более осушенных и плотных пород. Минимальные значения УЭС зафиксированы на профиле 5 (1,3–12 Ом·м), что может свидетельствовать о насыщенности слоя водой и/или наличии солевых минералов; на профилях 16 и 18 также наблюдаются низкие значения УЭС (до 15 Ом·м), отражающие повышенную влажность пород, тогда как на профиле 19 значения низкого УЭС существенно выше (78,4–195 Ом·м), что указывает на иные геологические условия. На рисунке 7 отображается карта распространения максимального ускорения грунта (A_0) на подложке Google Earth.

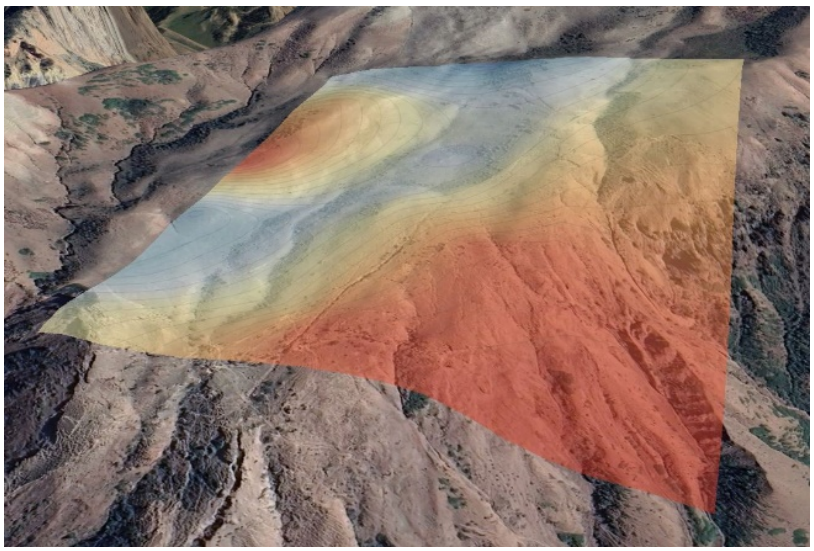


Рисунок 7 – Карта сейсмометрического зондирования и выявления распространения максимального ускорения в кровле оползневого массива грунта (A_0) на подложке Google Earth

Результаты сейсмометрии. Приращение балльности для большинства записей варьирует от 0 до 1,1, что указывает на сравнительно невысокий уровень сейсмической опасности для рассматриваемого региона.

Однако в ряде случаев значения превышают 1, что может свидетельствовать о наличии локальных участков с повышенным сейсмическим риском и усилением сейсмических воздействий; учет приращения балльности имеет важное значение для оценки риска, так как позволяет определить степень усиления сейсмических волн в конкретных инженерно-геологических условиях.

Глубина характерной частоты f_0 изменяется от 1,5 до 18 м, отражая неоднородность строения рыхлых грунтов, что оказывает существенное влияние на распространение сейсмических волн и может приводить как к их усилению, так и к затуханию на различных глубинах. особенно при более глубоких значениях. Скорость поперечных волн VS30 варьируется от 109 до 238 м/с и, является ключевым показателем сейсмоустойчивости грунтов: более высокие значения соответствуют более плотным и устойчивым грунтам с меньшими амплитудами колебаний, низкие значения характерны для мягких грунтов, способных усиливать колебания, что следует учитывать при выборе конструктивных решений и мер по снижению сейсмических рисков.

Выводы:

- Комплексные геофизические (электротомографические и сейсмометрические) зондирования позволили выявить неоднородность с развитием субгоризонтальных дислокаций глубинное строение оползневого склона.
- Измеренные вариации по УЭС для различных мощностей поверхностных отложений варьируют значительно и связано с чередованием обводнённых глинистых отложений с увлажненными и плотными скальными грунтами.
- Сейсмические измерения показывают потенциальную опасность воздействия землетрясений, на участках обводнения к приращениям сейсмической балльности.
- Рекомендуется составление карты типизации по методике VS30, для оценки сейсмических рисков.

Литература

1. Усупаев Ш.Э., Молдобеков Б.Д., Абдыбачаев У.А., Сарногоев А.К., Ибатулин Х.В., Ормуков Ч., Коноков Т., Серенков А. Метод дистанционной кадастризации оползней Кыргызстана // Мониторинг и прогноз возможной активизации чрезвычайных ситуаций

на территории Кыргызской Республики. 12-е изд. с доп. Бишкек: МЧС КР. 2015. С. 654-658.
2. Moeen Hamid Bukhari, Paula F. da Silva, Jürgen Pilz, Erkan Istanbulluoglu, Tolga Görüm, Juneseok Lee, Ajlina Karamehic-Muratovic, Tamanna Urmi, Arezoo Soltani, Wahyu Wilopo, Javed Akhter Qureshi, Sabid Zekan, Kranthi Swaroop Koonisetty, Usupaev Sheishenaly, Latifur Khan, Juan Espinoza, Edna Patricia Mendoza, Ubydul Haque. Community perceptions of landslide risk and susceptibility: a multi-country study // Springer Nature. Technical Note. 2023. Vol. 20. P. 1321-1334. DOI: 10.1007/s10346-023-02027-5.
3. Ажикеев Б.Э., Молдобеков Б.Д., Шамырканов У.М., Усупаев Ш.Э., Абдыбачаев У.А., Анаркулов Б.А, Коноков Т.К. Новая каталогизация и типизация георисков от оползней в бассейне реки Мин-Куш // Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. 20-е изд. с доп. Бишкек: МЧС КР. 2023. С. 786-792.
4. Усупаев Ш.Э., Молдобеков Б.Д., Туркбаев П.Б., Зубович А.В., Абдыбачаев У.А. Актуотектонические движения индуцирующие георискы от землетрясений и склоновых опасных процессов в земной коре литосферы Кыргызстана и стран Центральной Азии // Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. 21-е изд. с изм. и доп. Бишкек: МЧС КР. 2024. С. 3-5.

УДК 550.34

ОЧЕРКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ 1885–1889 ГОДОВ НА СТРАНИЦАХ СИБИРСКОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

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

В работе представлены результаты анализа сибирской периодической печати как исторического источника для изучения крупнейших землетрясений последней четверти XIX века на Северном Тянь-Шане. Данный материал для исследования был выбран исходя из следующих факторов. Ежедневная периодическая печать содержит хронологически последовательную информацию о состоянии населения, о продолжительности афтершоков, о предпринимаемой помощи пострадавшим и многую другую. Кроме того, в официальной части газет опубликованы телеграммы непосредственно от администрации пострадавших населенных пунктов с официальными комментариями и оценками катастрофы. Периодическая печать стремилась завоевать внимание своих читателей, поэтому нередко изобиловала доскональными подробностями случившегося катаклизма, включая публикации воспоминаний очевидцев. Таким образом, данный вид исторического источника помогает воссоздать многие аспекты землетрясения, произошедшего в доинструментальный период.

Ключевые слова: историческая сейсмология, Беловодское землетрясение, Верненское землетрясение, Чиликское землетрясение, Семиречье.

Введение. Историческая сейсмология занимается вопросом изучения исторических землетрясений на основе анализа упомянутых в источнике макросейсмических эффектов, то есть непосредственных признаков колебания почвы вроде покачивания люстр или разрушения зданий. Данная дисциплина помогает воссоздать масштабность природного катаклизма, произошедшего в доинструментальный период. Периодическая печать является одним из важнейших источников для исторической сейсмологии, так как она фиксировала последовательное развитие событий в регионе минувшего землетрясения. В данном докладе будет представлено исследование трех крупнейших землетрясений Северного Тянь-Шаня (Беловодское 1885 г., Верненское 1887 г., Чиликское 1889 г.) последней четверти XIX века через призму сибирской периодики. Глобальной целью данного исследования является расширение и уточнение каталога исторических землетрясений.

Историческая сейсмология как метод. Историческая сейсмология помогает реконструировать параметры землетрясений доинструментального периода на основе письменных, изобразительных и устных (мифы, легенды) источников. Основой метода является поиск и анализ архивных документов — летописей, газет, памятных книжек, личных дневников, рапортов и многих других, которые фиксируют приблизительное время, интенсивность и последствия подземных толчков. Сопоставление источников позволяет уточнить данные, определить географию разрушений и оценить макросейсмическую интенсивность в баллах, а в ряде случаев — рассчитать магнитуду и эпицентр.

География региона. Северный Тянь-Шань представляет собой систему горных хребтов, разделенных крупными межгорными впадинами. В его состав входят хребты Киргизский, Терскей Алатау, Кунгей Алатау, Заилийский Алатау, Кетмень, Джунгарский Алатау, а также впадины Чуйская, Иссык-Кульская, Текесская, Кегеньская, Каркаринская и Илийская. Северный Тянь-Шань принадлежит к числу наиболее сейсмоактивных регионов Средней Азии. За последние сто лет здесь зафиксировано несколько сот сильных землетрясений, среди которых Верненское (1887 г.), Чиликское (1889 г.) и Кеминское (1911 г.), которые относятся к крупнейшим катастрофам Средней Азии. Беловодское землетрясение

1885 г. ощущалось на площади 30 000 км², полностью разрушив селения Беловодское, Карабалты и Сукулук. Верненское землетрясение в средней части северного склона хребта Заилийский Алатау отозвалось на площади 1 000 000 км², образовав множество сбросов и сдвигов. Чиликское землетрясение 1889 г. охватило площадь более 200 000 км², вызвав многочисленные разрывы на поверхности по зонам глубинных разломов [21].

Беловодское землетрясение. В ночь на 22-ое июля 1885 г. началось Беловодское землетрясение (M = 7.0), запустившее серию разрушительных землетрясений в регионе Северного Тянь-Шаня [13]. Оно имело ярко выраженные макросейсмические эффекты, которые подробно описаны в корреспонденции Сибирской газеты – подземный гул, шум, гром и дрожание земли, сопровождавшееся двумя настолько сильными ударами, что дверь, запертая на крючок, распахнулась, мебель задвигалась, штукатурка с трещавших стен и потолков стала отваливаться, многие дома получили трещины [14]. Данная корреспонденция доставлена из города Аулие-Ата, находившегося более чем в 200 верстах от эпицентра. Географическое распространение землетрясения оказалось крайне обширным, согласно телеграммам и корреспонденциям оно ощущалось в Верном, Джаркенте, Бишкеке, была объята площадь Александровского хребта от границ Сырдарьинской области до Верного и до Боомского ущелья [11]. Безусловно, наибольшие толчки ощутили в Беловодске, Сукулуке и Караболтах – городах, находящихся в эпицентральной зоне землетрясения. Первой телеграммой из Верного доставлены следующие известия: в Бишкеке повреждены дома, деревни Беловодск и Сукулук разрушены, убито 54, ранено 64 человека [16]. Далее телеграммой генерал-лейтенанта Колпаковского от 23-го июля уточняется, что « В Беловодске убито 37, ранено 43; в Караболтах убито 17, ранено 20; дома почти все разрушены; Караболты и Сукулук - соседние Беловодску деревни; первоначальное сведение о несчастьях в Сукулуке (имеется ввиду упоминание погибших), вероятно, ошибочно» [23]. В корреспонденции из Верного описывается степень повреждения строений в городах, ощутивших колебание почвы. В Верном и Бишкеке значительных повреждений нет, жители покинули дома, испугавшись землетрясения, к счастью, никто не пострадал, однако около Бишкека, во время самого сильного ночного удара образовалась расщелина, а воду из прудков выбрасывало фонтанами. Выше уже упоминалась корреспонденция из г. Аулие-Ата, теперь же уточнив данные о пострадавших от официальных источников можно рассмотреть восприятие катастрофы частным лицом. Формулировка автора крайне интересная, он озвучивает, что на три села – Беловодск, Сукулук и Караболты, общее население которых составляло не менее 2000 душ (хотя из той же телеграммы Колпаковского следует, что население Беловодска и Сукулука вместе взятых составляло чуть больше 1000 душ обоих полов; данные по Караболтам в официальной сводке не приводились [23], осталось немного. Далее автор уточняет, что отрыто больше 100 трупов, но после поясняет, что «осталось немного», потому что оставшиеся сошли с ума. Конечно, к такому подсчету стоит относиться скептически, однако в завершении своего письма автор упоминает о 150 юртах, заваленных камнями вместе с проживавшими в них киргизами, о которых в официальных телеграммах упоминаний не было [14]. Безусловно, воспринимать эти данные необходимо с долей скептицизма и критического анализа, но игнорировать их нельзя, поскольку именно частные письма нередко фиксируют события, которые оставались за рамками официальных рапортов.

Верненское землетрясение. Следующее землетрясение случилось через два года – 28 мая в исходе пятого часа утра произошло сильнейшее землетрясение, которое по площади ощущения толчков в несколько раз превосходило Беловодское. География распространения основываясь на газетных телеграммах охватывала следующие города и поселки: в поселке Любовном и селении Узунагач землетрясением разрушило или сильно повредило каменные здания; по Копальскому тракту пострадал выселок Карасуйский, Илийск – слабее, Копал - еще слабее, без повреждений; в Джаркенте также в селениях, на востоке от Верного: Софийском, Надеждинском, Михайловском, Зайцевском, Маловодном — повреждены кирпичные здания; более пострадало Маловодное. Людей, погибших в означенных селеньях, нет, кроме одного в Любовном; в горах много обвалов, трещин; погибло много людей и скота у киргизов. В

казачьем Карабулакском поселке пострадала церковь; в дерене Гавриловке разрушилось два дома [3]. Станица Кескелент в 24 верстах от Верного разрушена до основания, по слухам пострадал Бишкек. На Аксе и ниже города земля вся в трещинах, из которых забила вода, на берегу Иссык-Куля, в Сазановке, полуразрушена церковь, землетрясение в Караколе без тяжких последствий, дома дали трещину. Колебание почвы ощущалось в долине р. Или. Выселок, расположенный в 25 верстах от города и населенный малороссами-переселенцами совсем провалился; открылись громадные трещины по дороге к Ташкенту. Некоторые жители Семипалатинска уверяют, что чувствовали землетрясение. Целая гора около города, самая высокая из окружающих Верный, рухнула [6]. Наибольшим разрушениям был подвержен город Верный. Первая официальная телеграмма, полученная из Верного, гласит: «Сильным землетрясением город разрушен совершенно. Разрушены все каменные дома, церкви, губернаторский дом, тюрьмы: масса несчастий с людьми. В остроге убито около ста арестантов. Верного больше не существует» [17]. Фраза о полном уничтожении Верного повторяется неоднократно и в последующих телеграммах. Например, в телеграмме от 29 мая «города больше не существует» [18], в корреспонденция из Семипалатинска «город буквально разрушен» [6], военный губернатор Семиреченской области телеграфирует из Верного от 28 мая: «города более не существует» [20]. Конечно, такого масштаба катастрофы жители Верного еще не встречали, Беловодское землетрясение хоть и было ощутимо в городе, но все же обошло его стороной, поэтому заявления о том, что Верный стерт с лица земли вполне ожидаемы и резонны. Скорее подобные громкие фразы подразумевали уничтожение инфраструктуры и полную непригодность построек для последующей жизни. Однако, чтобы детально разобраться в степени разрушения города, вновь обратимся к газетам. Первые телеграммы сообщают о разрушениях губернаторского дома, гимназии, госпиталя, церкви [20], госпиталя и тюрем [18]. В телеграмме от 29 мая губернатор Семиреченской области уточняет свое состояние: «Я и семья спаслись, благодаря милосердию Божию и получили только тяжелые раны в голову и ушибы ног. Командование войсками не сдавал. Необходимые распоряжения сделаны, и меры, соответствующие общему положению, принимаю» - а на следующий день уже лично объезжал город, справляясь о его состоянии и успокаивая пострадавших жителей Верного [9]. Также пострадал генерал Фриде, однако он и жена были ранены не опасно, дети ушиблены [2]. Возвращаясь к разрушениям, Здания бригады, батареи в крепостной артиллерии разрушены. Здания верненского лазарета разрушены; все больные спасены; аптека значительно пострадала. По мере поступления телеграмм и корреспонденций из Верного сведения о жертвах землетрясения постепенно уточнялись. Первая телеграмма, полученная в Омске 28 мая, уже упомянутая выше, сообщала лишь о гибели «около ста арестантов» в остроге, не называя общего числа погибших среди жителей [17], телеграмма, опубликованная в другой газете того же дня, уточняла, что погибло 120 человек, большею частью детей. Генерал Фриде, его супруга и дети получили раны; на гауптвахте погибло 15 арестантов и 125 ушиблено и поранено [20]. На следующий день, 29 мая, появились первые цифры: 112 человек погибших, преимущественно детей, а также 12 убитых и 125 раненых на гауптвахте. К 31 мая данные были скорректированы в большую сторону: телеграмма из Верного сообщила о 140 погибших, из которых 105 детей [5]. Из Верного от 31 мая: «хоронили 106 покойников православных, а в Татарской слободе 8 татар. Сколько погибло сартов и дунган еще неизвестно. Раненых много» [2]. Таким образом, процесс пополнения информации о жертвах шел от общих, частично преувеличенных данных к более точным, но с осознанием того, что полный учет погибших, особенно среди кочевников и в отдаленных районах, так и не был определен. Верненская катастрофа была освещена в Сибирской периодике намного более подробно нежели чем Беловодское землетрясение, что, конечно обуславливается её масштабностью.

Чиликское землетрясение. Основным источником информации по данному землетрясению является корреспонденция из Пржевальска, к сожалению, официальные телеграммы предоставляющие справки о состоянии региона во время и после землетрясения, в исследованных номерах опубликованы не были или содержали незначительную

информацию. 30 июня 1889 г. в 3 часа 25 минут ночи Северный Тянь-Шань потрясло новое разрушительное землетрясение. Исходя из слов автора корреспонденции, колебания почвы продолжались около 5 минут. Волнообразные движения сменялись вертикальными и круговыми, заставляя людей падать на землю и не давая возможности удержаться на ногах [4]. Наиболее тяжелые разрушения пришлись на прибрежную зону озера Иссык-Куль. Селения Преображенское, Уйтал и Сазановское оказались почти полностью уничтожены: в Уйтале разрушены все дома, в Сазановке большая часть строений стала непригодной для жилья [4]. Жители остались без крова, размещаясь в наспех сооруженных шалашах из холста и войлока или под открытым небом. Дачные постройки на берегу озера полуразрушены, две из них превратились в груды кирпича и обломков дерева [4]. Человеческие жертвы зафиксированы в Уйтале, где отрыто семь погибших, преимущественно детей; в Сазановке насчитывалось около 50 раненых [4]. Береговая местность оказалась исковеркана: образовались глубокие трещины, значительные оседания почвы от полуаршина до двух аршин, а также кратерообразные воронки, из которых во время землетрясения били фонтаны горячей грязи с запахом сернистого водорода [4]. Само озеро в момент катастрофы «кипело ключом», хотя накануне его поверхность оставалась совершенно спокойной [4]. Значительные повреждения получил город Джаркент. Здесь подземный гул и сильные толчки продолжались около 20 минут; трубы с домов попадали, стены потрескались, многие большие здания развалились [4]. Телеграмма из Ташкента, опубликованная 9 июля, сообщила, что землетрясение разрушило город Джаркент «на половину» [15]. В Кульдже толчки были незначительными, в Копале ощущалось лишь легкое содрогание почвы [4]. Афтершоковая активность сохранялась в течение длительного времени. Легкие колебания не прекращались и после главного удара, изредка повторялись довольно сильные толчки [4]. Даже несмотря на весьма скудную информацию всего пара корреспонденций могут весьма живо описать проявившиеся макросейсмические эффекты.

Выводы. Данное исследование наглядно демонстрирует значение исторической сейсмологии как инструмента реконструкции землетрясений доинструментального периода. Анализ сибирской периодической печати конца XIX века позволил весьма подробно восстановить хронологию, географию и масштаб разрушений Беловодского (1885 г.), Верненского (1887 г.) и Чиликского (1889 г.) землетрясений. Полученные материалы позволяют специалистам уточнить параметры этих землетрясений (интенсивность, положение эпицентра, магнитуду), дополнить сейсмологические базы данных и, что особенно важно, использовать эти данные для оценки долгосрочной сейсмической опасности региона.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Структуры Земной коры в различных геодинамических обстановках, параметризация и пространственно-временное распределение связанных с ними сильных землетрясений» лаборатории палеосейсмологии и палеогеодинамики Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН.

Литература

1. Землетрясение в Верном // Сибирский вестник. 1887. 17 июня (№ 69). С. 1.
2. Землетрясение в Верном // Сибирский вестник. 1887. 19 июня (№ 70). С. 2.
3. Землетрясение в Семиречье // Сибирский вестник. 1887. 21 июня (№ 71). С. 2.
4. Корреспонденция «Восточного обозрения», Пржевальск, Джаркент // Восточное обозрение. 1889. 6 августа (№ 32). С. 7–8.
5. Корреспонденция «Сибирского Вестника», Копал // Сибирский вестник. 1887. 17 июня (№ 69). С. 3.
6. Корреспонденция «Сибирского Вестника», Семипалатинск // Сибирский вестник. 1887. 14 июня (№ 68). С. 4.
7. Мушкетов И.В. Верненское землетрясение 28 мая 1887 г. // Труды Геологического комитета. 1890. Т. X. № 1. 154 с.
8. Последние известия Семиреченской области // Восточное обозрение. 1887. 11 июня (№ 23). С. 5–7.

9. Подписка в пользу пострадавших от землетрясения // Сибирский вестник. 1887. 21 июня (№ 71). С. 1.
10. Сибирская летопись // Сибирский вестник. 1885. 22 августа (№ 15). С. 8.
11. Сибирская летопись // Сибирский вестник. 1885. 29 августа (№ 16). С. 7.
12. Сибирская летопись // Сибирский вестник. 1885. 3 октября (№ 21). С. 10.
13. 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.
14. Страшное землетрясение (Из частного письма) // Сибирская газета. 1885. 18 августа (№ 33). С. 851.
15. Телеграммы // Восточное обозрение. 1889. 9 июля (№ 28). С. 12.
16. Телеграммы // Сибирский вестник. 1885. 25 июля (№ 11). С. 4.
17. Телеграммы // Сибирский вестник. 1887. 29 мая (№ 61). С. 1.
18. Телеграммы // Сибирский вестник. 1887. 31 мая (№ 62). С. 1.
19. Телеграммы // Сибирский вестник. 1887. 5 июня (№ 64). С. 1.
20. Телеграммы // Томские губернские ведомости. 1887. 4 июня (№ 22). С. 10.
21. Хованский Б.Н. Тектоника, рельеф и сейсмичность Северного Тянь-Шаня. М.: Недра. 1977. 127 с.
22. Хроника // Восточное обозрение. 1885. 25 июля (№ 30). С. 5.
23. Хроника, необыкновенное землетрясение в Сибири // Восточное обозрение. 1885. 1 августа (№ 31). С. 3.

УДК 550.34.016:550.8.08:550.834

ОПЫТ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИКИ РАЗЛОМОВ ДОНБАССА

Грицаенко А.Ю., Мартынов Г.П., Ялпута Е.А.
anthony.yuriev@yandex.ru
Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела,
г. Донецк, Россия

В статье рассматриваются результаты пассивных сейсмических наблюдений, полученные при проведении опытных работ в Донбассе по оценке геодинамической активности тектонических разломов и изменения во времени геофизических полей в рамках выполнения государственного задания по теме № FRSR-2026-0006. Описываются программное обеспечение и применяемые авторами спектральные методы анализа данных для обработки и анализа микросейсмических колебаний в пунктах наблюдений, устроенных над разломными зонами. Наряду с особенностями применения различных модификаций сейсмических датчиков СМ-3КВ, описывается постоянно действующая на базе института станция сейсмических наблюдений. Результаты непрерывного сейсмологического мониторинга используются как базовые при анализе и интерпретации локальных микросейсм, зафиксированных над зонами тектонических нарушений.

Ключевые слова: геодинамика разломов, микросейсмические наблюдения, сейсмостанция, сейсмический датчик, регистратор микросейсм, спектральный анализ.

Введение. Изучение геодинамики разломов в Донбассе позволяет прогнозировать газодинамические явления в горных выработках [1], ведь случайное вскрытие коллекторов метана при проведении горных работ создает аварийную ситуацию на шахте. Поэтому выявление тектонических нарушений до начала ведения добычи угля является актуальной задачей.

К современным способам решения данной задачи относятся методы активной и пассивной сейсморазведки. Активная сейсморазведка [2] способна выделять геологические нарушения и скопления метана, отличающиеся от вмещающих пород динамическими и кинематическими характеристиками упругих волн. Пассивная сейсморазведка базируется на другой физической основе. В этом случае тектонические нарушения выявляются не по их физическим свойствам, а по микросейсмическому излучению, обусловленному трещинообразованием в приразломных зонах [3].

Определить механизм образования сейсмических событий можно используя сейсмологический подход и методы микросейсмики [4]. По микросейсмическому излучению в зоне динамического влияния разломов можно выделить участки горного массива, находящиеся в состоянии горизонтального сжатия или растяжения.

Аппаратура для сейсмических исследований. Сейсмоприёмник фиксирует форму и время прихода сейсмической волны [5], что позволяет вычислить её частоту, амплитуду и другие параметры. Для записи данных с датчиков используются регистраторы в одноканальном [6], многоканальном [7, 8] или модульном [9] исполнении. Количество аналоговых каналов, диапазон частот дискретизации, динамический диапазон и другие параметры сейсмостанции зависят от её назначения, т.е. вида проводимого геофизического исследования.

Для пассивного микросейсмического (сейсмологического) мониторинга существует тенденция построения универсальных автономных сейсмических регистраторов с возможностью выбора количества каналов и параметров записи данных [10].

На основании многолетнего опыта проектирования сейсмостанций в отделе геофизических исследований в ФГБНУ «РАНИМИ» (г. Донецк) создан 3-х канальный автономный регистратор низкочастотных малоамплитудных сейсмических сигналов [11], структурная схема которого приведена на рисунке 1. Для опытно-методических полевых работ изготовлена серия приборов, фотография которых представлена на рисунке 2.

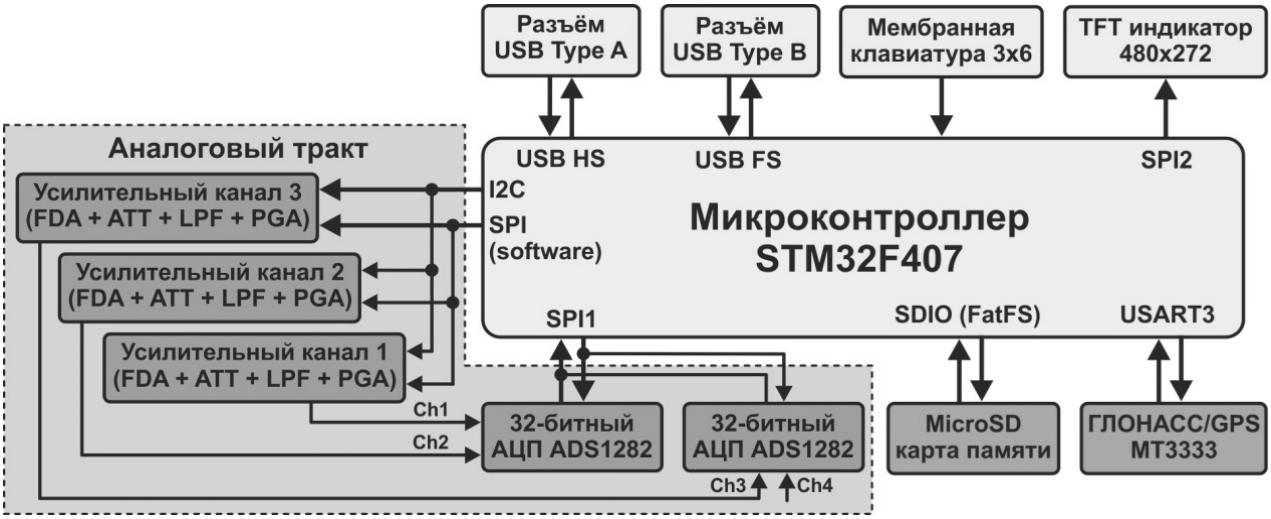


Рисунок 1 – Структурная схема микросейсмического регистратора: FDA – дифференциальный усилитель (Fully Differential Amp), ATT – аттенюатор (Attenuator), LPF – фильтр низких частот (Low Pass Filter), PGA – усилитель с программируемым коэффициентом усиления (Programmable Gain Amplifier)



Рисунок 2 – Микросейсмический регистратор нового поколения, разработанный в отделе геофизики ФГБНУ «РАНИМИ»

Методы исследований. Мониторинг низкочастотного сейсмического фона позволяет оценить напряжённо-деформированное состояние углепородного массива, а также исследовать динамику образования и пространственные характеристики газоносных

трещинных структур, образующихся в зонах динамического влияния разломов. Это возможно благодаря тому, что амплитудно-частотный спектр (АЧХ) естественного сейсмического фона в частотном диапазоне 0,05 - 20 Гц для геологических структур, содержащих газ, существенно отличается от спектра ненарушенных участков горного массива. Тем более существенные отличия в спектрах появляются над областью горных выработок за счёт большого количества искусственных пустот в толще пород. Кроме этого, микросейсмические исследования позволяют выявлять закономерности проявления и источники сейсмичности в условиях сильных техногенных помех, исходящих от наземного и подземного оборудования [13].

Для анализа геодинамических явлений в приразломных зонах на поле шахты «Калиновская-Восточная» проводились сейсмические исследования с использованием методов активной сейсморазведки и непрерывного пассивного микросейсмического мониторинга [14]. Опытные пассивные сейсмические наблюдения проводились авторами с использованием разработанных микросейсмических регистраторов и 3-х датчиков СМ-3КВ, смонтированных на шасси системы Гальперина (рисунок 3), расположенных на точках зондирования МС (рисунок 4) по профилям, заданным в крест простирания надвигов Тимошенко и Французского. Расположение на местности точек МС выбиралось с учетом минимального воздействия на результаты наблюдений техногенных факторов и близости известных геологоразведочных скважин.

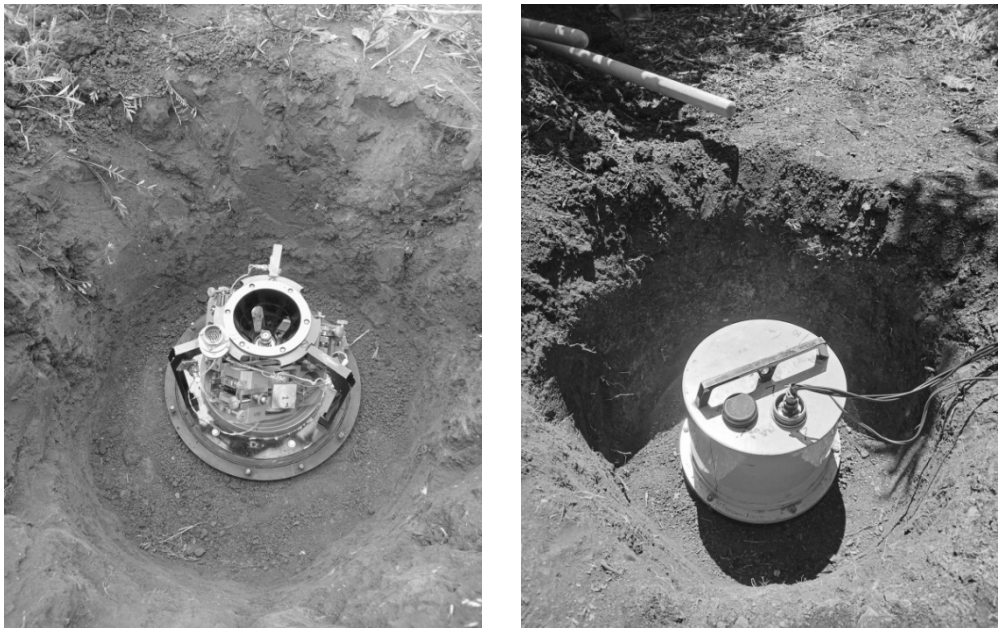


Рисунок 3 – Устройство пунктов микросейсмических наблюдений с датчиками СМ-3КВ на поле шахты «Калиновская-Восточная»

По результатам проведенных полевых геофизических исследований на поле шахты «Калиновская-Восточная» методами пассивной сейсморазведки установлено, что записи пассивных сейсмических сигналов разными датчиками соответствуют классическим представлениям о формах и амплитудах микросейсмического сигнала для платформенных территорий. Подтверждено, что характерный глобальный пик между 0,1 ÷ 0,3 Гц и провал спектра в диапазоне частот от 0,7 до 1,4 Гц является общим для разных регионов [15, 16], в том числе и для Донецко-Макеевского каменноугольного района, где данные исследования проводились вдоль линий тектонических разломов и разрывных нарушений (рисунок 5).

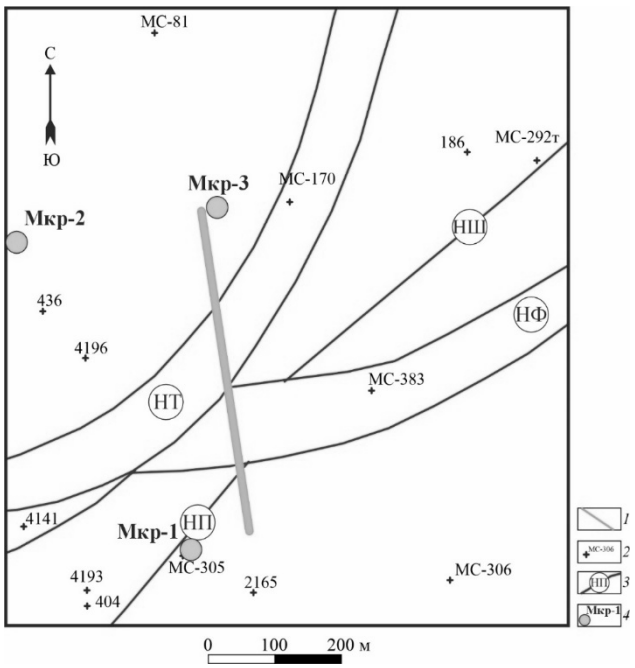


Рисунок 4 – Расположение сейсморазведочного профиля и пунктов микросейсмических наблюдений на поле шахты «Калиновская-Восточная»: 1 – линия сейсмометрических наблюдений; 2 – устье геологоразведочной скважины, ее номер; 3 – линия выхода разрывного нарушения под наносы; 4 – пункт микросейсмических наблюдений. Разрывные нарушения: НП – надвиг Промежуточный, НШ – надвиг Шахтный, НТ – надвиг Тимошенко, НФ – надвиг Французский

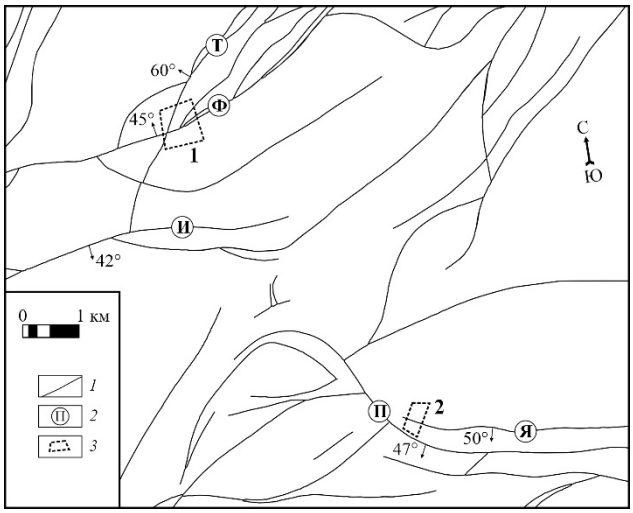


Рисунок 5 – Схема расположения участков проведения опытных геофизических исследований над линией разрывных нарушений Донецко-Макеевского района: 1 – линии разрывных нарушений; 2 – наименование надвигов (Ф – Французский, Т – Тимошенко, И – Итальянский, Я – Яблуновский, П – Продольный); 3 – границы участков геофизических исследований

На рисунке 6 показана суточная трёхкомпонентная запись микросейсмических колебаний на поверхности шахты «Калиновская-Восточная», зашумлённая техногенными помехами. Выделенная на рисунке вертикальная область длительностью всего один час содержит как информативную составляющую естественного микросейсмического поля, так и случайные всплески техногенного происхождения с амплитудами выше нормального фона.

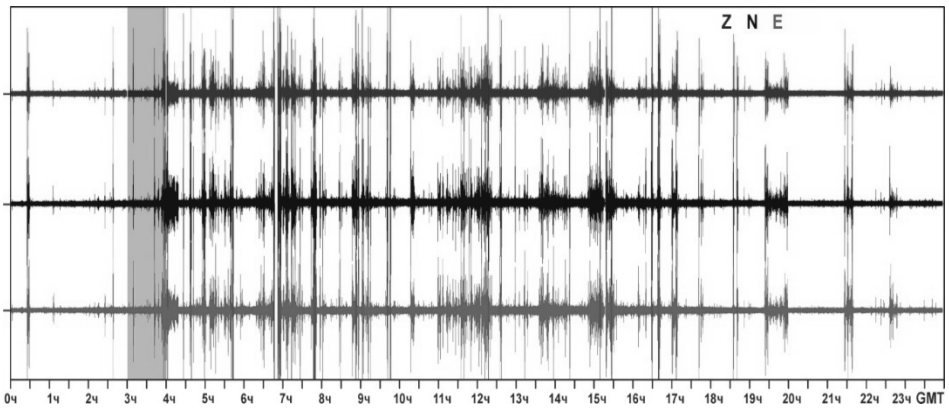


Рисунок 6 – Трёхкомпонентная запись микросейсмических колебаний на пункте наблюдения, зашумлённая техногенными помехами

Для достоверного выделения фоновых значений помимо низкочастотной фильтрации высокоамплитудных помех применяют специальные методы цифровой обработки данных [17, 18]. Один из подходов – это усреднение амплитудных спектров сигналов, когда запись разделяется на блоки, для каждого из которых посредствам преобразования Фурье вычисляются и усредняются единичные амплитудные спектры [19, 20]. Тогда с ростом длины записи микросейсмического шума спектры сглаживаются, но при достижении определённого числа блоков (предела усреднений) спектры не меняются.

В практике поверхностных наблюдений микросейсм соотношение сигнал/шум много меньше единицы из-за интенсивных объёмных и поверхностных волн, источником которых является транспорт и технологическое оборудование. Хотя частотная фильтрация позволяет отфильтровать данные сигналы, проблемным остаётся выделение и локализация естественного шумового фона.

Для постоянного наблюдения за региональным микросейсмическим фоном в ФГБНУ «РАНИМИ» устроена постоянная сейсмостанция, фотографии которой показаны на рисунке 7. На фотографии слева бетонный блок объёмом 2,5 м^3 (длина верхних граней 1,5 м, высота блока 1,1 м). На фотографии справа система бесперебойного питания сейсмического регистратора с аккумулятором большой ёмкости. Устройство станции соответствует требованиям к станциям сети сейсмологических наблюдений.



Рисунок 7 – Постоянно действующая сейсмостанция ФГБНУ «РАНИМИ», расположенная в Донецко-Макеевском каменноугольном районе

Так, на данной станции постоянно фиксируются удалённые сейсмические события. Для примера на рисунке 8 показана запись землетрясения, произошедшего в Тибете 7 января 2025

года. Эпицентр находился на расстоянии 4650 км от Донецка и глубине около 10 км. Для обработки данных используется процессор обработки сигналов программы WSG [21].

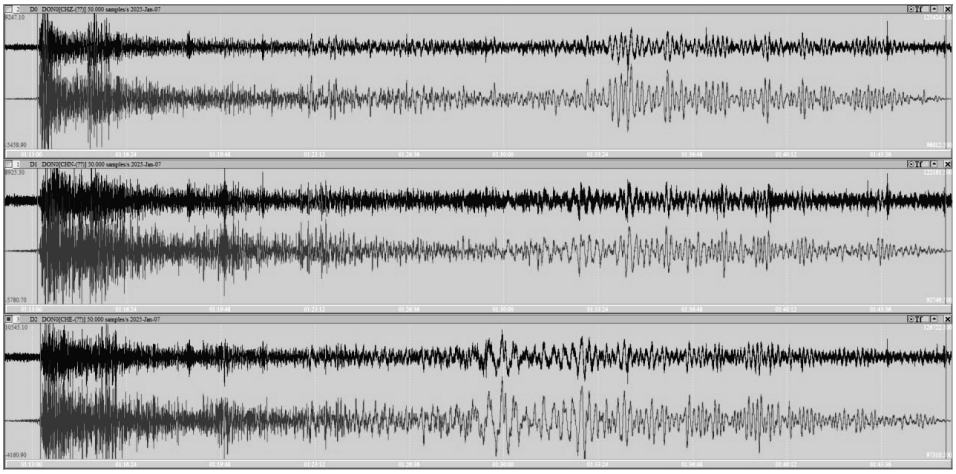


Рисунок 8 – Запись землетрясения 07.01.2025 в уезде Тингри (Тибетский автономный район, КНР), зафиксированного сейсмостанцией в Донецке

Результаты исследований. Установлено, что поверхностные волны от заглублённых источников формируются в верхней части разреза в результате интерференции и представляют собой сложные колебаний различной природы, но основной составляющей являются волны Рэлея. Для достоверного выделения фоновых значений естественных микросейсм разработан алгоритм усреднения амплитудных спектров сигналов на основе данных постоянного мониторинга, когда запись разделяется на блоки, для каждого из которых посредствам преобразования Фурье вычисляются и усредняются мгновенные амплитудные спектры. Это позволяет выделять на фоне естественного шумового фона низкоэнергетические события.

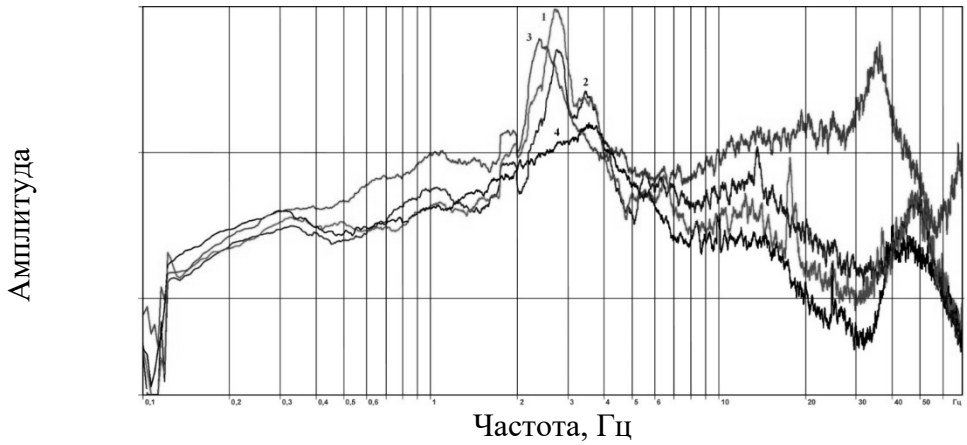


Рисунок 9 – Усреднённые АЧХ микросейсмических сигналов естественного фона, зафиксированных над тектоническими разломами (кривые 1-3). АЧХ микросейсмического фона ненарушенного участка массива вдали от регионального надвига (кривая 4)

На рисунке 9 показаны усреднённые АЧХ микросейсмического фона, полученные после обработки многочасовых наблюдений в разных точках шахтного поля. Видно, что отчётливая характеризация протяжённых аномалий проявляется в диапазоне частот 2-4 Гц. В более низкочастотной области 0,5-2 Гц, как и в более высокочастотной 4-30 Гц, поведение семейств кривых АЧХ повторяется.

Работа выполнена в рамках проекта по оценке геодинамической активности тектонических разломов и изменения во времени геофизических полей в рамках выполнения государственного задания по теме № FRSR-2026-0006.

Литература

1. Газоносность угольных месторождений Донбасса. Монография / А.В. Анциферов, М.Г. Тиркель, М.Т. Хохлов и др. Киев: Наукова думка. 2004. 232 с.
2. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. Донецк. 2003. 312 с.
3. Иванов Л.А., Туманов В.В., Савченко А.В. Структурно-геодинамические предпосылки использования микросейсм для поиска аномальных скоплений метана // Труды РАНИМИ. Донецк. 2022. № 16-17 (31-32). С. 46-59.
4. Горбатиков А.В. и др. Технология глубинного зондирования земной коры с использованием естественного низкочастотного микросейсмического поля // Изменение окружающей среды и климата. Монография. Т. 1. Ч. 2. М.: ИФЗ РАН. 2008. С. 223-236.
5. Райфельд М.А., Соколова Д.О., Спектор А.А. Пассивная сейсмическая локация: аппаратное и базовое программное обеспечение // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 1. С. 116-126.
6. Шмыков А.Н., Сагайдачная О.М., Сальников А.С., Вершинин А.В. Автономный одноканальный сейсмический регистратор для выполнения наземно-подземных исследований // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 4. С. 204-210.
7. Туманов В.В., Мартынов Г.П. Развитие автономного аппаратно-аналитического комплекса ААК12 для шахтной сейсморазведки // 50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли. Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. М.: ИПКОН РАН. 2017. С. 251-254.
8. Анциферов А.В., Камбурова Л.А., Туманов В.В., Мартынов Г.П., Гладков А.Ю., Балакин Ю.А. Модульная шахтная сейсморазведочная станция // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2021. Т. 8. № 2. С. 7-12.
9. Бутырин П.Г. Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5». Пять лет развития // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 3. С. 84-94.
10. Анциферов А.В., Туманов В.В., Мартынов Г.П., Горбунов И.Э., Молошникова Н.Б., Деговцов И.В., Сафин А.А. Сейсмометры и регистраторы низкочастотных малоамплитудных сейсмических сигналов // Труды РАНИМИ. Сб. науч. тр. Донецк. 2022. № 16-17 (31-32). С. 18-32.
11. Туманов В.В., Мартынов Г.П., Молошникова Н.Б., Деговцов И.В., Горбунов И.Э., Сафин А.А. Регистратор микросейсм // Труды РАНИМИ. Сб. науч. тр. Донецк. 2023. № 20-21 (35-36). С. 27-32.
12. Мартынов Г.П., Грицаенко А.Ю., Донченко Э.В., Молошникова Н.Б. Синхронизация геофизической аппаратуры на микропроцессорах с микросекундной точностью // Труды РАНИМИ. Сб. науч. тр. Донецк. 2024. № 2 (40). С. 123-134.
13. Анциферов А.В., Туманов В.В., Новгородцева Л.А., Мартынов Г.П., Бородин Д.С., Ялпута Е.А. Помехи и шумы микросейсмических сигналов на примере мониторинговых наблюдений в Донбассе // Труды РАНИМИ. Сб. науч. тр. Донецк. 2023. № 22-23 (37-38). С. 137-147.
14. Мартынов Г.П., Туманов В.В., Грицаенко А.Ю., Бородин Д.С. Анализ пассивных и активных сейсмических наблюдений на поле шахты «Калиновская-Восточная» // Труды РАНИМИ. Сб. науч. тр. Донецк. 2024. Т. 1. № 3 (41). С. 232-245.
15. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Шахов Е.В. Исследования активности платформенных территорий с использованием микросейсм /. Екатеринбург: УрО РАН. 2008. 129 с.
16. Надежка Л.И., Орлов Р.А., Пивоваров С.П., Сафронич И.Н., Ефременко М.А. О связи параметров сейсмического шума с геологическими и геодинамическими особенностями воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2003. № 2. С. 179-185.

17. Орлов Р.А. Опыт использования микросейсмического шума для решения геологических задач в условиях платформы (на примере Воронежского кристаллического массива) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2011. № 1. С. 184–192.
18. Сафронич И.Н. Выделение нормальной и аномальной составляющей сейсмического поля на урбанизованных территориях // Куражковские чтения. Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Астрахань. 2023. С. 397-401.
19. Сафронич И.Н. Использование спектра Накамуры для зондирования пород в кровле докембрийского фундамента // Лучший исследовательский проект 2022. Сб. ст. III Междунар. науч.-исслед. конкурса. Петрозаводск. 2022. С. 114-124.
20. Данилов К.Б. Выявление геологических неоднородностей в верхней части земной коры на основе анализа низкочастотных микросейсм (на примере Архангельской области) / Дис. … канд. физ.-мат. наук: 25.00.10 / Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаверова. Архангельск. 2017. 181 с.
21. Сафронич И.Н., Красилов С.А., Колесников С.И., Савенков А.В. Повышение эффективности использования процессора обработки сигналов программы WSG в научно-исследовательской работе // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Сб. материалов Восьмой Междунар. сейсмологической школы. Обнинск. 2013. С. 372-385.

УДК 553.98:551.24:519.7

ФРАКТАЛЬНО-ИТЕРАЦИОННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ АНАЛИЗА НЕФТЯНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ В АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

Доненко Л.Н.[1], Доненко И.Л.[2], Доненко С.Л.[3]
sofiadonenko56@gmail.com
[1] Кыргызский авиационный институт им. И. Абдраимова, г. Бишкек, Кыргызстан
[2] Муниципальное казенное общеобразовательное учреждение «Школа-интернат им. Д.Б. Закирова п. Эвенск», пгт. Эвенск, Магаданская область, Россия
[3] Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан

В статье рассматривается фрактально-итерационный подход как инновационный метод анализа нефтяных залежей в условиях Арктического шельфа. Исследование направлено на преодоление ограничений традиционных детерминистских методов геологического моделирования, которые не способны адекватно описывать сложную фрактальную природу геологических объектов Арктики. Актуальность исследования обусловлена огромным потенциалом арктических нефтяных ресурсов и необходимостью их эффективного освоения с минимальным воздействием на окружающую среду. Авторы демонстрируют преимущества фрактально-итерационного подхода, который учитывает фрактальную геометрию геологических структур и использует итерационные алгоритмы для повышения точности моделирования. В работе подробно анализируется применение фрактальной геометрии для описания неоднородности нефтеносных пластов, включая трещины, разломы и другие геологические структуры. Особое внимание уделяется влиянию вечной мерзлоты на формирование резервуаров углеводородов. Практическая значимость исследования заключается в возможности более точного прогнозирования геометрии и параметров нефтяных залежей, оптимизации выбора месторождений для бурения и повышения эффективности разведки и добычи нефти в сложных арктических условиях. Ключевые результаты показывают, что фрактально-итерационный подход позволяет:

- *Более точно оценивать запасы нефти и газа*
- *Снижать риски при бурении и добыче*
- *Оптимизировать затраты на разведку и разработку месторождений*
- *Учитывать особенности геологической структуры Арктического шельфа*

Полученные результаты могут быть использованы при планировании геологоразведочных работ и разработке месторождений в Арктическом регионе.

Ключевые слова: фрактально-итерационный подход, анализ нефтяных залежей, Арктический шельф, нефтегазовая разведка, геологическое моделирование, фрактальная геометрия.

Введение. Актуальность работы обусловлена необходимостью преодоления ограничений традиционных методов геологического моделирования при анализе нефтяных залежей в Арктическом шельфе. Традиционные методы, основанные на детерминистских подходах, не в состоянии адекватно описать сложную фрактальную природу геологических объектов в Арктике, что приводит к неточным прогнозам запасов и неэффективному планированию разработки месторождений. Фрактально-итерационный подход, учитывая фрактальную геометрию и используя итерационные алгоритмы, предоставляет более точную картину геологических структур и позволяет более реалистично моделировать поведение нефтеносных пластов в условиях вечной мерзлоты, ледяных покровов и сложной геологии Арктики. Это позволяет более эффективно определять перспективные месторождения, снижать риски и оптимизировать затраты на бурение и добычу, что имеет решающее значение для успешного и устойчивого освоения арктического региона. Актуальность работы также

связана с огромным потенциалом арктических нефтяных ресурсов, который может стать важным источником энергии для мира. Однако освоение этого региона должно проводиться с учетом экологических рисков и с применением современных технологий, которые минимизируют воздействие на хрупкую арктическую экосистему. Фрактально-итерационный подход соответствует этим требованиям и способствует более устойчивому и ответственному развитию арктического региона. Арктический шельф, с его огромным потенциалом запасов нефти и газа, представляет собой огромный интерес для нефтегазовой отрасли. Однако освоение этого региона сопряжено с множеством вызовов, связанных с его суровыми климатическими условиями, ледяным покровом, вечной мерзлотой и сложной геологической структурой. Традиционные методы геологического моделирования, основанные на детерминистских подходах, часто не в состоянии адекватно описать реальную геометрию и характеристики арктических нефтеносных формаций, что приводит к заниженным оценкам запасов и неэффективному планированию разработки месторождений.

В этой связи, фрактально-итерационный подход, интегрирующий методы фрактальной геометрии и итерационные алгоритмы, представляет собой перспективный инструмент для анализа нефтяных залежей в Арктике, позволяя преодолеть ограничения традиционных методов моделирования. Он открывает новые горизонты в понимании геологических процессов и структур Арктики, обеспечивая более точное прогнозирование геометрии и параметров нефтяных залежей, оптимизацию выбора месторождений для бурения и повышение эффективности разведки и добычи нефти в условиях сложной арктической среды.

Фрактальная геометрия: ключевой особенностью фрактально-итерационного подхода является учет фрактальной природы геологических объектов, в частности, нефтеносных пластов. Фракталы, представляющие собой геометрические фигуры, обладающие самоподобием, то есть их части похожи на целое в разных масштабах, отличаются сложным геометрическим строением и нерегулярным распределением пор, трещин и других неоднородностей. Такая структура характерна для нефтеносных пластов в Арктике, где вечная мерзлота и ледниковая активность создают специфические условия для формирования резервуаров углеводородов.

Методы исследований

1. Фрактальная геометрия в анализе нефтяных залежей Арктики. Фрактальные модели позволяют учитывать неоднородность нефтеносных пластов, трещины, разломы и другие геологические структуры, которые влияют на распределение и перемещение углеводородов. Традиционные методы, основанные на детерминистских моделях, не в состоянии адекватно описать такую сложную геометрию, что приводит к неточным прогнозам и неэффективному планированию разработки месторождений. Более точное прогнозирование проницаемости и пористости: фрактальные модели позволяют учесть нерегулярное распределение пор и трещин в нефтеносных пластах, что имеет решающее значение для оценки проницаемости и пористости пластов и прогнозирования дебита скважин. Это позволяет более эффективно планировать разработку месторождений и оптимизировать процесс добычи нефти. Учёт влияния вечной мерзлоты: фрактальные модели позволяют учесть влияние вечной мерзлоты на геологические структуры, что является важным фактором для оценки рисков разработки месторождений в Арктике (рис. 1). Вечная мерзлота влияет на распределение пор и трещин в нефтеносных пластах, что может привести к изменениям в поведении флюидов и осложнить процесс добычи нефти. Фрактальные модели позволяют учесть эти особенности и более точно предсказать поведение нефтеносных пластов в условиях вечной мерзлоты.

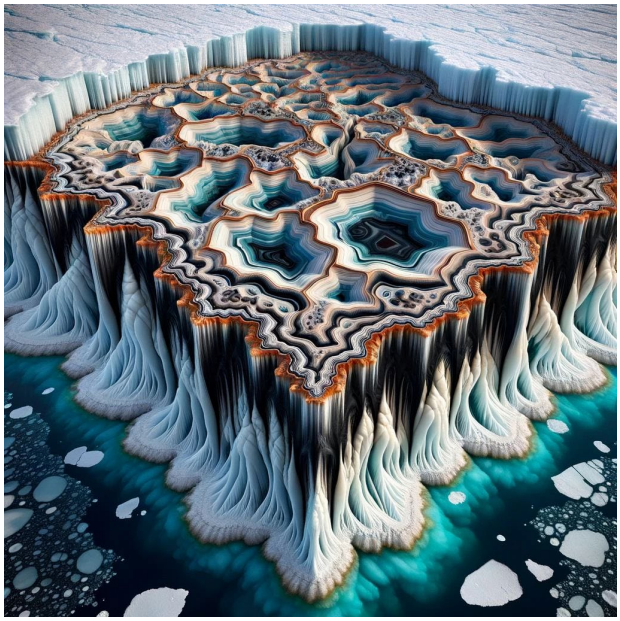


Рисунок 1 – 3D модель нефтяных залежей

2. Итерационные алгоритмы. Фрактально-итерационный подход также основывается на итерационных алгоритмах, которые позволяют постепенно уточнять решение задачи моделирования, исходя из предварительных данных и результатов предыдущих итераций. Итерационные алгоритмы позволяют учитывать неопределенность в геологических данных и позволяют получить более точное и реалистичное решение задачи моделирования.

Преимущества итерационных алгоритмов в фрактально-итерационном подходе:

- повышение точности моделирования: постепенное уточнение модели нефтяного залежи, учитывая все доступные данные и устраняя неточности предыдущих итераций.
- улучшение стабильности моделирования: создание более стабильные модели нефтяных залежей, которые менее чувствительны к изменениям входных данных.
- снижение затрат на моделирование: создание более точных моделей с меньшими затратами времени и ресурсов, по сравнению с традиционными методами.

Для рассмотрения поверхности при помощи элементов искусственного зрения, а также создания моделей нам следует рассмотреть дифракционный интеграл для случая итерируемой системы:

$$\Phi(x,y)=\iint\Psi(x',y')\exp\left[-\frac{ik(xx'+yy')}{l}\right]dx'dy', \tag{1}$$

где x, y, x', y' – координаты в плоскости наблюдения и на объекте, l – расстояние до экрана, k – модуль волнового вектора или волновое число $k=\frac{2\pi}{\lambda}$, λ – длина волны), $\Psi(x, y)$ – функция пропускания объекта. Учитывая, что в качестве приемника излучения чаще всего используется связка LIDAR + CCD-камера, чувствительная площадка которой имеет дискретную регулярную структуру, получаем следующее уравнение:

$$\Phi(mx_0,ny_0)=\sum_{p=1}^{p=N}\sum_{q=1}^{q=M}\Psi(x_q',y_p')\exp\left[-\frac{ik(mx_0x_q'+ny_0y_p')}{l}\right], \tag{2}$$

где M и N – количество элементов дискретизации в плоскости исследуемого объекта по вертикали и горизонтали, x_0' и y_0' – размеры элемента дискретизации, x_q' и y_q' – размеры светочувствительной ячейки регистрирующего устройства, m и n – вертикальные и горизонтальные координаты этих элементов соответственно. Заметим, что выражение (2) соответствует формуле двумерного дискретного преобразованием Фурье [3].

Данные нелинейные параболические уравнения приводят нас к решению «режимов с обострением производных (РОП)», что ведет к совершенно новым физическим явлениям, которые долгое время оставались не исследованными в должной мере [4].

Как показано в [5] для уравнений вида: $u_t = u_{xx} + f(u_x)$, при некоторых предположениях о поведении функции $f(s)$ на бесконечности (например, для спиралевидного транспаранта $f(s) = e^s$) возрастание длины интервала изменения x может вызвать возникновение вышеуказанных РОП-решений при краевых условиях Дирихле, т. е. на интервале «малой» длины существует глобальное по времени решение, а при «сверхкритической длине» решение, оставаясь ограниченным в норме C, разрушается за конечное время.

В работе [5] показано, что эффект также зависит от граничных условий.

А именно, для уравнения $u_t = u_{xx} - xu_x^3$, следуют данные значения:

1) Для случая граничных условий $u(0,t) = 0,\ u(1,t) = \alpha,$ при $\alpha > \frac{\pi}{2}$ решение, остающееся ограниченным, не может обладать ограниченной производной;

2) Для случая граничных условий $u(0,t) = 0,\ u_x(1,t) - u(1,t) = 0$ классическое решение существует для всех $t > 0$ при соответствующей гладкости начальных данных $u_0(x)$ Более того, это решение остается равномерно ограниченным вместе со своими производными и стремится к нулю при $t \to \infty$.

Основная идея состоит в том, чтобы использовать семейства функционалов Ляпунова для определения решений параболических уравнений. Семейства таких функционалов предложены и построены Т. И. Зеленяком [2] для изучения поведения решений при большом времени. Фактически были построены вариационные множители $\rho(x,u,u_x)$ для решений параболических уравнений. Это отличные от нуля функции $\rho \geq \delta > 0$ такие, что после умножения на них правая часть уравнения (2) превращается в уравнение Эйлера — Лагранжа для соответствующего интеграда $\Phi(x,u,u_x)$. Другими словами, уравнение (2) может быть записано в вариационной форме:

$$\rho(x,u,u_x) \cdot u_t = \frac{d}{dx}\frac{\partial\Phi(x,u,u_x)}{\partial u_x} - \frac{\partial\Phi}{\partial u}, \frac{\partial^2\Phi}{\partial u_x^2}\ x \geq \delta > 0.$$

Прямые вычисления показывают, что каждый из этих множителей ρ порождает функционал Ляпунова на решении динамической задачи [6, 7]:

$$\frac{d}{dt}\int_0^1 \Phi(x,u,u_x)dx = -\int_0^1 \rho(x,u,u_x)u_t^2\ dx$$

На основе этой математической модели мы можем получить 3D модель шельфа и провести более детальный анализ (рис. 2). Применение фрактально-итерационного подхода в анализе нефтяных залежей Арктики приводит к множеству преимуществ, способствующих более эффективному освоению этого региона [8-10]. Более точное прогнозирование запасов нефти и газа за счет более точной оценки объемов запасов нефти и газа в арктических залежах, учитывая их сложную геометрию и неоднородность. Фрактальные модели позволяют выбрать наиболее перспективные месторождения для бурения, снижая риски неудачи и оптимизируя затраты на разведку и бурение.

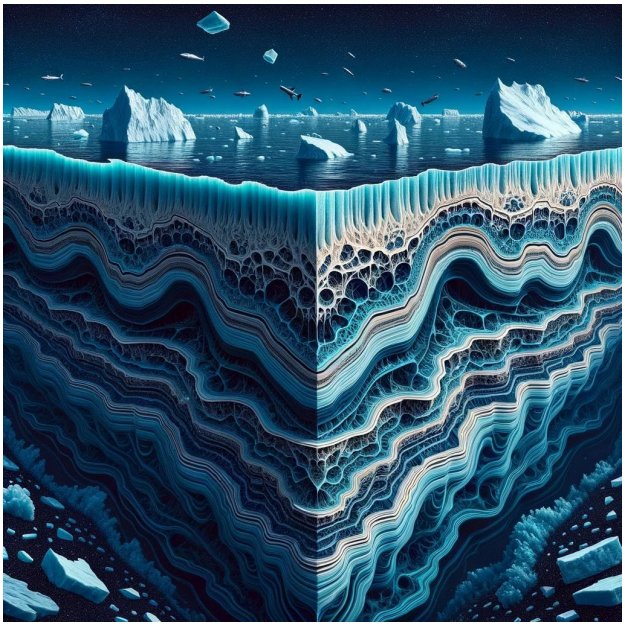


Рисунок 2 – ИИ анализ 3D модели Арктического шельфа

Фрактальные модели позволяют более эффективно планировать разработку месторождений, учитывая неоднородность пластов и особенности перемещения углеводородов. Фрактальные модели позволяют снизить риски, связанные с бурением и добычей нефти в условиях сложной арктической среды, учитывая особенности геологической структуры и влияние вечной мерзлоты.

Выводы. Разработка нефтяных ресурсов Арктического шельфа является одной из важнейших задач современной нефтегазовой отрасли, однако, сложные геологические условия, суровый климат и ледяной покров делают разведку и добычу углеводородов в этом регионе крайне сложной и рискованной. Традиционные методы геологического моделирования, основанные на детерминистских подходах, не в состоянии адекватно описать фрактальную природу арктических нефтеносных формаций, что приводит к заниженным оценкам запасов и неэффективному планированию разработки месторождений. Фрактально-итерационный подход, представленный в данной работе, открывает новые перспективы для анализа нефтяных залежей в Арктике. Он позволяет преодолеть ограничения традиционных методов моделирования, учитывая фрактальную природу геологических объектов и используя итерационные алгоритмы для повышения точности моделирования. Применение фрактально-итерационного подхода в Арктике позволяет более точно прогнозировать геометрию и параметры нефтяных залежей, повышает эффективность разработки месторождений, снижает риски, связанные с бурением и добычей нефти в условиях сложной арктической среды, а также способствует более эффективному и устойчивому освоению арктического региона. Данная работа представляет собой первый шаг в исследовании фрактально-итерационного подхода для анализа нефтяных залежей в Арктике. Необходимы дальнейшие исследования и разработка более совершенных моделей, учитывающих все особенности геологической структуры Арктики. Однако уже сейчас можно с уверенностью сказать, что фрактально-итерационный подход является перспективным инструментом для успешного и устойчивого освоения этого важного региона.

Литература

1. Швецов П.К. Геология нефти и газа. Учебник для вузов. СПб: Недра. 2018. 384 с.
2. Бакиров Э.А. Нефтегазоносные бассейны: генезис, геология, поиски и разведка. М.: Недра. 2022. 368 с.
3. Козлов А.В., Смирнова М.М. Методы геологического моделирования: Учеб. пособие. М.: МГУ. 2019. 256 с.

4. Сидоров С.С. Применение фрактального моделирования в анализе нефтеносных пластов Арктического шельфа // Нефтегазовое дело. 2022. № 3. С. 25-32.
5. Кузнецов К.К., Соколов В.В. Особенности применения фрактально-итерационного подхода для прогнозирования запасов нефти в Арктике // Известия РАН. Серия Геологическая. 2023. № 3. С. 45-54.
6. Иванов И.И., Петров П.П. Фрактально-итерационный подход к моделированию нефтяных залежей // Геология и геофизика. 2021. № 2. С. 12-20.
7. Романов А.С., Коновалов И.В. Моделирование нефтегазоносных систем Арктического шельфа: проблемы и перспективы // Геология и разведка. 2020. № 10. С. 32-39.
8. Геологический факультет МГУ. (2023). Геология нефти и газа [Электронный ресурс]. URL: https://geo.msu.ru/ru/education/disciplines/geology-of-oil-and-gas (дата обращения: 15.03.2023).
9. Нефтегазовая энциклопедия. (2022). Фрактальное моделирование в нефтегазовой отрасли [Электронный ресурс]. URL: https://www.oil-gas-encyclopedia.ru/ (дата обращения: 20.03.2023).
10. Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. (2023). Научные публикации [Электронный ресурс]. URL: https://www.igig.nsc.ru/ (дата обращения: 25.03.2023)

УДК 556.55

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КАК ИНДИКАТОР ГЛУБИННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Зулпухарова Б.А.
balaussa.zulpukharova@mail.ru
Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований,
г. Алматы, Казахстан

В статье рассматривается роль гидрогеохимических параметров подземных вод в отражении глубинных геодинамических процессов и сейсмической активности. Проанализированы временные вариации ионного состава, газовых компонентов и изотопных соотношений подземных вод в сейсмоактивных районах. Установлено, что аномалии в соотношениях Na^+/Cl^-, Ca^{2+}/Mg^{2+}, а также в концентрациях CO_2 и Rn могут предшествовать сейсмическим событиям и отражать перераспределение напряжений в земной коре. Предложена концептуальная модель миграции флюидов вдоль тектонических разломов как механизма формирования гидрогеохимических предвестников. Полученные результаты подтверждают перспективность использования гидрогеохимического мониторинга для оценки геодинамической активности.

Ключевые слова: гидрогеохимия, подземные воды, радон, сейсмология, землетрясения, флюидная миграция, разломы.

Введение. Прогнозирование землетрясений остаётся одной из наиболее сложных задач современной геофизики. В последние десятилетия всё большее внимание уделяется флюидным процессам в земной коре и их роли в формировании сейсмических событий. Подземные воды, находясь в непосредственном контакте с горными породами и разломными структурами, способны оперативно реагировать на изменения напряжённо-деформированного состояния среды, что проявляется в виде гидрогеохимических аномалий.

Гидрогеологические наблюдения входят в состав комплексных исследований естественных полей Земли, направленных на мониторинг сейсмической активности в пределах Алматинского прогностического полигона. Их основной задачей является выявление гидрогеологических и гидрогеохимических предвестников сильных землетрясений. Объектом исследования являются подземные воды как чувствительный индикатор геодинамических процессов.

Цель работы: Выявить взаимосвязь между изменениями гидрогеохимических параметров подземных вод и процессами глубинной геодинамики, включая подготовку землетрясений.

Теоретические основы гидрогеохимического прогноза землетрясений. Концептуальные основы. При изучении процессов прогнозирования землетрясений гидрогеохимическими и гидрогеодинамическими методами в первую очередь выявляются ключевые причины либо их совокупность, определяющие аномальные изменения газохимического состава подземных вод и генетически связанные с этими данными процессами.

Подземные воды гидросферы характеризуются выраженной гетерогенностью. Совокупное воздействие геологических, гидрогеохимических и сопутствующих процессов определяет направление, интенсивность и масштаб происходящих преобразований, а также миграционное поведение отдельных химических элементов в пределах конкретных зон, которые, как и все процессы, протекающие при погружении в литосферу Земли, имеют зональный характер [1].

Таким образом, рассматриваемая система представляет собой частично (локально)

равновесную, но в целом неравновесную гидрогеохимическую систему, в пределах которой протекают многочисленные химические реакции и преобразования, приводящие к состоянию химического равновесия лишь в отдельных зонах, участках и геосферах.

Локальные равновесия обладают собственной природой, специфическим гидрогеохимическим фоном и характеризуются метастабильностью при неизменных внешних условиях. Следовательно, изучаемая система отличается структурной неравномерностью и наличием контролирующих факторов, формирующих подобное состояние в процессе геологического развития [2].

При резком изменении внешних условий равновесие системы нарушается, а процессы, формирующие гидрогеохимический облик подземных вод и их гидродинамических систем, начинают реагировать на эти изменения, выступая в качестве индикаторов напряжённо-деформационного состояния массивов горных пород.

При этом каждая гидродинамическая система и каждый тип подземных вод, пространственное положение которых в литосфере Земли индивидуализировано и определяется геологическим строением и геодинамическими процессами, формируют собственный, специфический спектр элементов-предвестников.

Характер их проявления зависит от совокупности факторов и условий, включая физическое состояние горных пород, литолого-фациальной обстановки, направленностью и интенсивностью тектонических процессов, геодинамической обстановки, глубиной формирующегося разрыва, расстоянием до очага и другие параметры.

Гидрогеологические условия. На территории прогностического полигона выделяются основные типы подземных вод: грунтовые, трещинные, порово-трещинные, воды палеозойского фундамента, а также пластовые воды мезо-кайнозойских отложений.

Трещинные воды, в зависимости от генезиса трещин и особенностей гидродинамического режима формирующихся в них вод, подразделяются на два подтипа: воды трещин выветривания и воды тектонических трещин.

Грунтовые воды и воды трещин выветривания характеризуются свободным газообменом с атмосферой и приурочены к верхним частям земной коры, породам с высокими фильтрационными свойствами, четвертичным и частично неогеновым отложениям. Их разгрузка приурочена к основаниям склонов, речным долинам, а также зонам перфорации конусов выноса [3].

Существенное влияние климатических, метеорологических, техногенных и иных факторов на динамику и химический состав данных вод значительно ограничивает возможности их использования в качестве надежных гидрогеохимических и гидрогеодинамических предвестников сейсмической активности.

В связи с этим их изучение целесообразно осуществлять исключительно во взаимосвязи с другими типами подземных вод, на которые они способны оказывать гидрогеодинамическое и гидрохимическое воздействие, в частности: при процессах смешения инфильтрационных вод с азотными термами, а также при участии в питании глубинных водоносных горизонтов и других аналогичных процессах.

Материалы и методы. Отбор проб и аналитические методы. В настоящее время гидрогеохимическая сеть сейсмостанций включает 11 пунктов наблюдений, расположенных вблизи активных тектонических разломов и эпицентральных зон сильных землетрясений. На всех станциях проводятся режимные комплексные наблюдения, включающие определение концентраций основных ионов (HCO_3^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}, Cl^-, Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, F^-), содержания H_4SiO_4, а также анализа газового состава подземных вод (Rn, He, H_2, O_2, N_2, CO_2). Дополнительно регистрируются общие физико-химические параметры (pH, Eh, температура) и гидродинамические характеристики подземных вод (дебит, уровень).

Отбор проб подземных вод проводился в соответствии с действующими методическими рекомендациями гидрогеохимического мониторинга. Пробы отбирались ежедневно с последующим лабораторным анализом ионного состава (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, HCO_3^-, SO_4^{2-}) с применением различных методов анализа.

Для аналитических определений применяются следующие методы:

- H_2, O_2, N_2, CO_2 — метод газовой хроматографии;
- K^+, Na^+ — пламенно-фотометрический метод;
- SO_4^{2-} — турбидиметрический метод;
- H_4SiO_4 — фотометрический метод;
- Ca^{2+}, Mg^{2+} — титриметрический метод;
- Cl^- — аргентометрический метод;
- pH, Eh — потенциометрические измерения с использованием иономеров.

Методы газогеохимического анализа: определение радона и газовая хроматография. Инертный газ ^{222}Rn при радиоактивном распаде испускает α-частицы, что обуславливает применение сцинтилляционного метода регистрации, основанного на учёте световых вспышек, возникающих под воздействием α-излучения. Данный метод реализован в эманометре «Радон». Измерения проводятся в непрерывном режиме с автоматической регистрацией данных 1 раз в час и их сохранением в электронном журнале ПК [4].

Прибор включает сцинтилляционную камеру с люминофором и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), преобразующий световые сигналы в электрические импульсы. В качестве люминофора используется сернистый цинк, активированный серебром или медью. Газ поступает в камеру непрерывно через газоотделитель, связанный с протоком исследуемой воды. Интенсивность излучения определяется как число импульсов в секунду, при постоянной скорости протока воды. Измерения вариаций радона носят относительный характер в связи с невозможностью калибровки по радиевому эталону.

Отбор проб спонтанного газа подземных вод проводится на станциях в стеклянные емкости ≥500 см³, предварительно очищенные от воздуха. Состав газовой смеси анализируют на следующий день в лаборатории на газовом хроматографе Цвет 800. Газ подается в хроматограф напрямую, систему продувают объемом, в 20 раз превышающим объем соединений. Для удаления механических примесей и влаги используют фильтры и осушители на основе $CaCl_2$ [5].

Результаты. Связь гидрогеохимических аномалий с сейсмичностью. В настоящее время известно, что аномальные изменения газохимического состава подземных вод тесно связаны с изменением напряженного состояния в зоне гипергенеза и проявлениями сейсмичности. Исследования показывают, что предвестниковые аномалии зависят от энергии землетрясения и расстояния до эпицентра: при сильных сейсмических событиях эффекты наблюдаются на расстояниях в несколько тысяч километров, при слабых — на 500–1000 км (К=10–13).

На основе исходных данных мы провели исследование при подготовке статьи, изучая предвестники на гидрогеохимических станциях отдельно, в результате чего получили следующие графики (рисунок 1).

Анализируя графики, можно сделать следующие выводы:

Сейсмическое событие 23.01.2024 г. сопровождалось выраженной постсейсмической реакцией гидрогеохимических параметров подземных вод.

Таблица 1 – Изменение величин Q, Rn и HCO3 после землетрясений на ст. Алма-Арасан

Станция Алма-Арасан			
Дата	Q	Rn	HCO3
14.01.2024	2,037	160	0,02
15.01.2024	2,041	158	0,03
16.01.2024	2,034	159	0,03
17.01.2024	2,034	160	0,03
18.01.2024	2,037	159	0,03
19.01.2024	2,027	160	0,03
20.01.2024	2,024	160	0,03

21.01.2024	2,024	160	0,03
22.01.2024	2,024	160	0,03
23.01.2024	2,21	161	0,04
24.01.2024	2,235	163	0,05
25.01.2024	2,252	162	0,07
26.01.2024	2,299	164	0,07
27.01.2024	2,312	162	0,05
38.01.2024	2,326	163	0,02

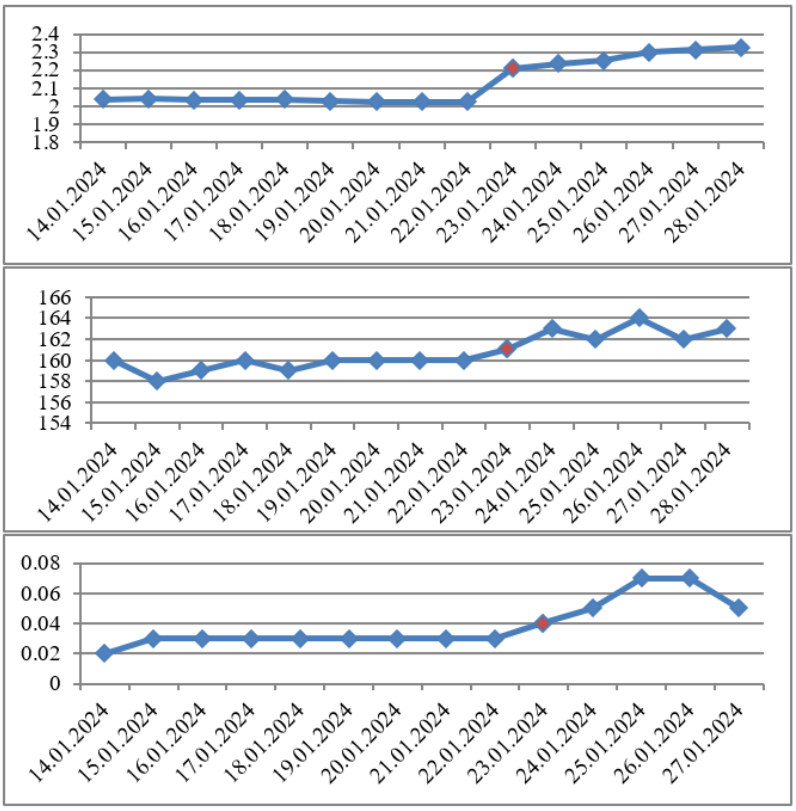


Рисунок 1 – Изменения Q, Rn и HCO3 до и после землетрясений на ст. Алма-Арасан (красным отмечено само событие).

В фоновый период дебит составлял в среднем 2,03–2,04 л/с, концентрация радона — около 159 усл. ед., содержание HCO_3^- — 0,03 г/л. После землетрясения зафиксировано устойчивое увеличение показателей:

1. дебит увеличился до 2,32 л/с, что на 13–14% выше фонового уровня;
2. концентрация радона возросла до 164 усл. ед. (≈3% относительно фона);
3. содержание гидрокарбонатов достигло 0,07 г/л.

Наиболее значительная амплитуда изменения характерна для HCO_3^-, что может указывать на усиление притока глубинных углекислых флюидов и активизацию процессов водо-породного взаимодействия. Рост дебита на 13–14% свидетельствует о повышении проницаемости трещинно-разломной зоны вследствие перераспределения напряжений. Относительно небольшое, но устойчивое увеличение радона (≈3%) отражает интенсификацию миграции глубинных газов.

Полученные количественные оценки подтверждают, что подземные воды реагируют на тектонические события изменением как гидродинамических, так и газогеохимических характеристик, что делает их информативным индикатором постсейсмических процессов.

Заключение. В представленной работе подземные воды рассмотрены как чувствительный индикатор глубинных геодинамических процессов в пределах Алматинского

прогностического полигона. Теоретический анализ показал, что гидрогеохимическая система является неравновесной и способна оперативно реагировать на изменения напряжённо-деформационного состояния земной коры посредством вариаций ионного и газового состава.

Полученные данные свидетельствуют о том, что сейсмическое воздействие приводит к изменению фильтрационно-емкостных свойств трещинно-разломных зон, усилению проницаемости и перераспределению потоков флюидов.

Таким образом, установлена прямая связь между вариациями гидрогеохимических параметров и тектоническими процессами в зоне разломов. Подземные воды демонстрируют высокую чувствительность как к предразрывным изменениям напряжённого состояния, так и к постсейсмическим эффектам.

Гидрогеохимический мониторинг может рассматриваться как перспективный инструмент оценки геодинамической активности и выявления аномальных состояний литосферы. Вместе с тем его использование для краткосрочного прогнозирования землетрясений требует накопления длительных рядов наблюдений, проведения статистической обработки аномалий, определения пороговых критериев их значимости и обязательного комплексирования с другими геофизическими методами. В целом полученные результаты подтверждают целесообразность включения гидрогеохимических исследований в систему комплексного прогноза сейсмических событий и мониторинга глубинных геодинамических процессов.

Литература

1. Оспанов А.Б. Гидрогеохимические особенности Алма-Атинской сейсмоактивной зоны. Алма-Ата: Наука. 1985. 128 с.
2. Abdullayev A. Geochemical monitoring of the active breakings at the megapolicies as an effective method of the strong Earthquake prediction // Problems of destructive Earthquake disaster prevention. Almaty. 2003. P. 234–240.
3. Kalinin V., Beloslyudtcev O. Registration of influence of mode-generating factors in searching hydrogeodinamic Earthquake forerunners at Almaty forecasting polygon // Problems of destructive Earthquake disaster prevention. Almaty. 2003. P. 184–188.
4. Курчиков А.Р., Плавник А.Г., Ицкович М.В. Воздействия геодинамических процессов на гидрогеохимические условия подземных вод Западно-Сибирского бассейна // Академический журнал Западной Сибири. 2017. Т. 13. № 2 (69). С. 16–18.
5. Abdullayev A., Yessenzhigitova Y. Physical and mathematical models of the occurrence of earthquake fluid anomalies in hydrogeochemical fields of seismically active areas // Annals of geophysics. 2024. 67. 6. 660.

УДК 528.06+528.088

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ GNSS-НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ВЗРЫВОНАБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ КАМБАРАТА 2

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

Проведено сравнение методов обработки GNSS-наблюдений в программных комплексах Bernese GNSS Software и GAMIT/GLOBK. Исследование выполнено по данным четырёх локальных станций в районе строительства Камбаратинской ГЭС-2 за период 20–24 декабря 2009 г., включающий момент мощного промышленного взрыва. В качестве эталона были приняты базовые линии из программы GAMIT/GLOBK, рассчитанные ранее. Сравнению с эталоном подлежали данные из четырёх методов расчёта в программе Bernese с использованием корреляции и параметров на основе Евклидова расстояния. Наибольшая согласованность отмечается между эталоном и расчётами в Bernese методом двойной разности с добавлением дополнительных стабилизирующих станций. В этом случае коэффициент корреляции для изменения длин базовых линий достигает 0.99, максимальное суммарное расхождение в Евклидовом пространстве не превышает 5.45 мм, а среднее отклонение на одну базовую линию составляет ~0.19 мм. По данным Bernese, в день взрыва зафиксировано увеличение длин базовых линий на 0.54–1.82 мм, с постепенным их уменьшением в последующие дни.

Ключевые слова: GNSS, среднесуточные координаты, взрыв, Камбар-Ата.

Введение. На территории Кыргызской Республики ежегодно выполняются полевые GNSS-наблюдения на пунктах локальных и региональных геодинамических сетей, а также осуществляется сбор данных с перманентных станций Кыргызстана и сопредельных территорий. Многолетние ряды наблюдений позволяют решать задачи мониторинга деформационных процессов и уточнения пространственно-временных характеристик геодинамических процессов.

В НС РАН с 1994 года для обработки спутниковых измерений используется программный комплекс GAMIT/GLOBK, на основе которого рассчитываются высокоточные координаты и скорости для региональных и локальных пунктов [1, 2]. За более чем тридцатилетний период эксплуатации GAMIT/GLOBK методика обработки GNSS-данных была детально адаптирована сотрудниками лаборатории JGPS НС РАН к массовым расчётам. В последние шесть лет в практику обработки GNSS-наблюдений у нас внедряется программа Bernese GNSS Software, которая также способна обеспечивать высокую точность позиционирования и векторов скорости. Этот программный комплекс позволяет рассчитывать внутрисуточные координаты по эпохам, но наличие нескольких методов расчёта координат создаёт проблему выявления наиболее подходящего для наших целей [3]. Кроме того, Bernese позволяет моделировать тропосферные и ионосферные задержки, выбирать методы разрешения фазовых неоднозначностей, а также манипулировать комбинациями GPS и ГЛОНАСС наблюдений.

Техногенное событие на Камбаратинской ГЭС (взрывные работы) предоставило возможность провести сравнительный анализ методов обработки GNSS-данных в условиях резкого кратковременного изменения геометрии базовых линий. Наличие независимых решений, полученных в среде GAMIT/GLOBK и Bernese, позволяет оценить чувствительность различных методов обработки к импульсным деформациям, выявить особенности поведения временных рядов и определить условия, при которых обработка данных в Bernese

максимально приближена по точности и устойчивости решения к традиционно используемому программному комплексу GAMIT/GLOBK.

Геодезические работы в районе проведения взрыва для возведения плотины Камбарата 2. В районе возведения взрывонабросной плотины Камбарата 2 лабораторией GPS был проведён комплекс геодезических работ для исследования влияния мощного промышленного взрыва на возможное возникновение приповерхностных подвижек по разломным зонам, расположенным в непосредственной близости от эпицентра. В качестве объекта геодезического исследования рассматривается район строительства плотины в пределах 73.30°–73.45° в.д. и 41.75°–41.80° с.ш. Для определения параметров движения земной поверхности в указанном районе были решены задачи по проектированию, выбору и закладке геодезических пунктов комплексного наблюдения методами космической (GNSS) и наземной (светодальномерной) геодезии. Такое значимое техногенное событие можно рассматривать как эталонное для оценки качества расчёта разных методик позиционирования в Bernese.

Таким образом, рассматриваемый промышленный взрыв выступает не только как объект геодинамического исследования, но и как эталон для тестирования различных методов обработки GNSS-данных и оценки их применимости при мониторинге локальных деформационных процессов.

Программные комплексы и методы расчёта ГНСС позиций. Эталонный программный комплекс GAMIT/GLOBK предоставляет возможность расчёта высокоточных координат станций и векторов скорости с использованием широкого спектра входных вспомогательных данных. Здесь метод расчёта использует стандартные настройки программы (G/G Standart Processing, GSP), а также необходимые файлы для учёта сейсмогенных трендовых разрывов или уступов во временных рядах координат [2].

Для сравнения с эталоном в рамках настоящей работы выполняется расчёт координат и базовых линий с использованием нескольких методических схем обработки, включая решения типа B3P, BRS, BRS_P и BRS_IP.

Первый метод Precise Point Positioning (B3P) в своих алгоритмах расчёта использует данные сигнала между одним спутником и одной станцией, что имеет название нулевой разницы [3]. Данный метод по умолчанию настроен для расчёта как среднесуточных, так и внутрисуточных позиций.

Второй метод в Bernese имеет название Rinex2Sinex (BRS) и предназначен для расчёта среднесуточных координат. При других настройках этот метод способен рассчитывать позиции по каждой эпохе измерения. Здесь используется алгоритм «два спутника – две станции» или метод двойной разницы [4]. Кроме того, локальные GNSS данные рассчитываются в разных условиях при использовании метода BRS: с добавлением станций непрерывных измерений из региональной GNSS-сети НС РАН (BRS_P), а также перманентных станций из международной сети IGS (BRS_IP).

Таким образом, описанные методы расчёта отличаются подходами к стратегиям обработки и включением априорной информации. Особое значение придаётся стабилизации решения сети при использовании метода двойных разностей (методы BRS). Применение двойных разностей обеспечивает эффективное устранение систематических спутниковых ошибок и ошибок приёмников, однако требует корректной фиксации опорной системы и выбора стабилизирующих станций. Анализ устойчивости воспроизведения вариаций длин базовых линий позволяет оценить степень влияния указанных выше методов расчёта позиций.

Подготовка и обработка данных в Bernese GNSS Software. Для выполнения расчетов были использованы четыре локальные станции: K1G4, KJG4, GCH4 и KAM4, расположенные в пределах исследуемого района за период 20-24 декабря 2009 года.

С целью обеспечения устойчивости решения при обработке методом двойных разностей (метод BRS) в расчётную схему дополнительно были включены перманентные станции региональной сети — CHUM, IATA, KAZA, KMTR и TALA, и дополнительно станция KIT3, входящая в международную сеть IGS. Использование внешних пунктов позволило

корректно реализовать процедуру стабилизации сети и минимизировать влияние возможных локальных подвижек на определение опорной системы координат.

По результатам обработки GNSS-данных в Bernese были получены среднесуточные координаты всех станций. На основе которых вычислены длины базовых линий между локальными пунктами по формуле (например):

$$L = \sqrt{\left(x_{KJG4} - x_{KAM4}\right)^2 + \left(y_{KJG4} - y_{KAM4}\right)^2 + \left(z_{KJG4} - z_{KAM4}\right)^2} \quad (1)$$

Таким образом, на основе полученных координат станций были рассчитаны 6 базовых линий между 4 станциями, каждая с каждой (таблица 1).

Таблица 1 – Пример сравнения длин линий, рассчитанных методами B3P и GSP

B3P - GSP	дек.20	дек.21	дек.22	дек.23	дек.24
KJG4-KAM4, мм	4.39	0.45	1.37	2.71	1.63
KJG4-GCH4, мм	2.25	1.03	1.35	0.06	0.04
KAM4-GCH4, мм	1.50	0.22	1.27	0.35	6.75
KAM4-K1G4, мм	4.51	2.61	5.18	1.30	7.47
KJG4-K1G4, мм	0.56	1.37	5.02	0.88	1.74
K1G4-GCH4, мм	0.40	1.37	0.93	0.58	0.98
Среднее, мм	2.27	1.18	2.52	0.98	3.10

В таблице 1 представлены разности длин базовых линий, рассчитанных методами B3P и GSP, по результатам суточных решений за период 20–24 декабря 2009 г и характеризуют расхождения между двумя методами обработки GNSS-наблюдений. Средние по базовым линиям расхождения изменяются от 0,98 мм (23 декабря) до 3,10 мм (24 декабря). Наименьшее расхождение между этими двумя методами отмечается 23 декабря, тогда как 24 декабря фиксируется максимум средних различий.

По отдельным базовым линиям максимальные расхождения отмечаются для KAM4–K1G4 (до 7,47 мм 24 декабря) и KAM4–GCH4 (6,75 мм 24 декабря). В то же время для линий K1G4–GCH4 и KJG4–GCH4 в большинстве суток различия не превышают 1–1,5 мм, что свидетельствует о высокой устойчивости решений по данным направлениям. В целом результаты свидетельствуют, что за исследуемый интервал времени методы B3P и GSP обеспечивают согласованные решения на миллиметровом уровне, однако отдельные базовые линии отличаются друг от друга более существенно.

Для обобщённой оценки согласованности результатов также были рассчитаны коэффициенты корреляции длин базовых линий между методами расчёта в Bernese и GAMIT/GLOBK. Для отдельно взятых базовых линий коэффициенты корреляции составляют 0.33-0.98. В общем случае для всех базовых линий коэффициент корреляции составил 0.99.

Для более точного сравнения всех методов мы использовали Евклидово расстояние в качестве меры сходства-различия. Для сравнения двух методов позиционирования мы использовали Евклидово расстояние в 90-мерном пространстве координат [5]. Параметр **ED** представляет собой евклидово расстояние, вычисляемое как корень из суммы квадратов разностей длин базовых линий, рассчитанных двумя методами (например):

$$ED = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(L_{B3P} - L_{GSP}\right)_i^2} \quad (2)$$

где L_{B3P}, L_{B3P} – базовые линии между станциями, рассчитанные разными методами расчёта

Кроме этого, мы использовали два дополнительных критерия при сравнении двух методов [6]. *Регулярная дивергенция* (*ed*) – это средняя разница 2-х величин по всем мерностям пространства, *максимальная дивергенция* (*edm*) – это максимальное значение модуля разности двух величин (например):

$$ed = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(L_{B3P} - L_{GSP}\right)_i^2}}{n},\ edm = \max\left(\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(L_{B3P} - L_{GSP}\right)_i^2}\right) \quad (3)$$

Значения *ED*, *ed* и *edm* для комбинаций пар исследуемых методов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение методов расчёта по трём параметрам Евклидова расстояния

Сравнение методов	B3P - GSP	BRS - GSP	BRS_P - GSP	BRS_IP - GSP
ED, мм	15.35	11.87	5.74	5.72
ed, мм	0.51	0.40	0.19	0.19
edm, мм	55.76	26.62	5.45	5.36

Из таблицы 2 видно, что по всем рассмотренным параметрам наименьшие значения расхождения у метода **BRS_IP**, в котором используется оптимально подобранное количество вспомогательных станций. Наибольшие расхождения наблюдаются в решении **B3P**, что свидетельствует о его меньшей устойчивости по сравнению с другими вариантами обработки. Для наглядного сопоставления результатов, полученных методами BRS_IP и GSP, на рисунке представлены графики изменения длин базовых линий:

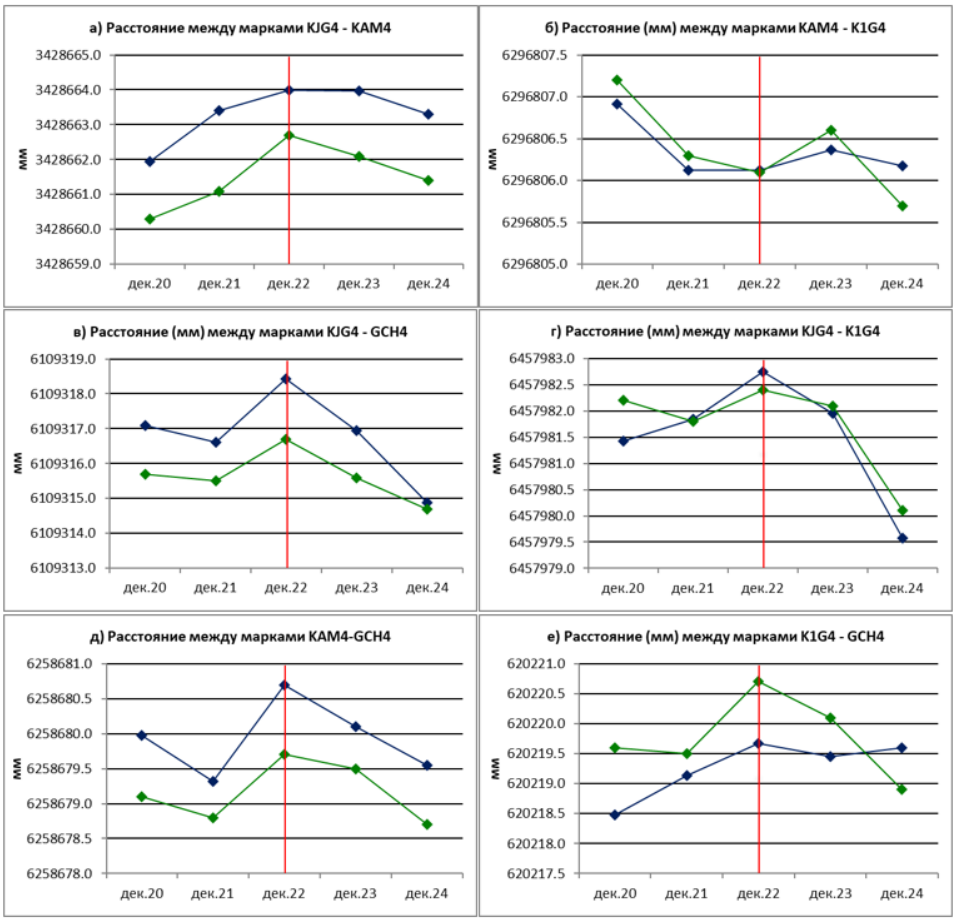


Рисунок 1 – Посуточные вариации 6 линий между 4-мя GPS марками до и после взрыва (вертикальная красная линия) на Камбаратинской ГЭС-2 (UTC время), рассчитанных двумя методами: зелёная линия – GSP, синяя линия – BRS_IP. Красная линия – день взрыва

По всем базовым линиям наблюдается схожая динамика изменений расстояний, полученных при обработке в программных пакетах **Bernese, метод BRS_IP (синяя линия)** и

GAMIT/GLOBK (зелёная линия). Оба метода демонстрируют близкие тенденции изменения длин линий, при этом значения, полученные в Bernese, как правило, незначительно больше. Для большинства базовых линий характерно увеличение расстояний в день взрыва **22 декабря** (обозначен красной линией) по сравнению с предыдущим днём наблюдений. На линиях **KJG4–KAM4 (а), KJG4–GCH4 (в), KJG4–K1G4 (г), KAM4–GCH4 (д)** и **K1G4–GCH4 (е)** в этот день фиксируется локальный максимум длины. Прирост расстояний 21-22 декабря составляет примерно **0,6–1,6 мм**, в среднем около **1 мм**. Исключением является базовая линия **KAM4–K1G4 (б)**, где в день взрыва наблюдается минимальное значение длины. В последующие дни наблюдается уменьшение длин базовых линий. К **24 декабря** на большинстве линий достигаются минимальные значения расстояний за рассматриваемый период (за исключением линии **KJG4–KAM4 (а)**). Таким образом, результаты обоих методов согласуются между собой и указывают на **кратковременное растяжение сети базовых линий в день взрыва**, сменяющееся последующим **сокращением расстояний**.

Выводы. В работе выполнен сравнительный анализ четырёх методов обработки GNSS-наблюдений, реализованных в программном комплексе Bernese GNSS Software, с результатами, полученными в программном пакете GAMIT/GLOBK. Анализ проведён на основе изменений длин базовых линий между четырьмя локальными станциями в районе Камбаратинской ГЭС-2 за период 20–24 декабря 2009 г., включающий момент проведения мощного промышленного взрыва.

Полученные результаты показывают, что решения, рассчитанные в Bernese и GAMIT/GLOBK, в целом хорошо согласуются между собой и демонстрируют миллиметровый уровень расхождений. При этом наибольшая согласованность с результатом GAMIT/GLOBK наблюдается для варианта обработки BRS_IP, что подтверждается высокими коэффициентами корреляции и минимальными значениями параметров Евклидова расстояния. Метод B3P характеризуется меньшей устойчивостью и большей величиной расхождений, что связано с особенностями метода нулевой разности.

Анализ временных вариаций длин базовых линий показал, что в день проведения взрывных работ (22 декабря) на большинстве линий наблюдается кратковременное увеличение расстояний между станциями порядка 1 мм, что может свидетельствовать о локальном увеличении длин измеряемых линий. В последующие дни фиксируется уменьшение длин базовых линий, что указывает на возврат системы к исходному состоянию.

Таким образом, результаты исследования показывают, что применение стратегий обработки Bernese типа BRS_P и BRS_IP обеспечивает более высокую устойчивость и согласованность координатных решений с традиционно используемым программным комплексом GAMIT/GLOBK. Это подтверждает возможность эффективного использования Bernese при анализе кратковременных геодинамических процессов и мониторинге локальных деформаций в районах строительства крупных гидротехнических сооружений.

Работа выполнена в рамках темы "Геодинамические исследования Тянь-Шаня и прилегающих территорий с использованием данных спутниковых систем" (1025032800041-4-1.5.1). 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. Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK: Release 10.7. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. 2018. 54 p.
2. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. GAMIT Reference Manual: GPS Analysis at MIT. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. 2010. 171 p.
3. 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.
4. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. Bernese GNSS Software, Version 5.2. Tutorial. Astronomical Institute University of Bern. 2018. 166 p.

5. Kenigsberg D.V., Salamatina Yu.M., Prokhorov O.A., Kuzikov S.I. Convergence of daily mean coordinates of precise positioning methods // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 929. 012014. https://doi:10.1088/1755-1315/929/1/012014
6. Kuzikov S., Kenigsberg D.V., Salamatina Yu., Prokhorov O.A. Comparison of methods for computing highly accurate daily GNSS positions // Civil Engineering Journal. 2023. V. 9. No. 2. Pp. 305-318.

УДК 550.837.3:550.34.038

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ СОВМЕЩЕННЫХ УСТАНОВОК С МНОГОШТЫРЕВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Коломейцев Д.В.
kolomeitsev_denis@mail.ru
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

В работе представлено разработанное аппаратно-программное решение для вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), ориентированное на повышение производительности полевых исследований. Основной проблемой использования двухэлектродной (совмещенной) установки (вместо обычной четырехэлектродной) в методе постоянного тока являются неконтролируемые условия заземления электродов. Предложенная установка, включающая источник тока, измерительный тракт, а также систему цифровой регистрации и обработки сигналов позволяет получить сопротивление заземляющих устройств и земли. Измерение сопротивления не требует мощных источников тока и является более энергосберегающим, чем измерение электрического поля при разнесенных приемных и питающих электродах.

Ключевые слова: электроразведка постоянным током, метод сопротивлений, вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), совмещенная установка.

Введение. Электроразведочные методы постоянного тока, в частности вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), остаются базовым инструментом исследования геоэлектрического строения разрезов при решении инженерно-геологических и гидрогеологических задач. Классические методики основаны на применении четырехэлектродных симметричных установок (например, Шлюмберже или Веннера), в которых функции питающей (AB) и приемной (MN) линий разделены. Существенным преимуществом четырехэлектродной схемы является ее нечувствительность к переходным сопротивлениям контакта «электрод–грунт», поскольку ток в приемной линии отсутствует.

Однако развертывание четырехэлектродных схем в полевых условиях сопряжено со значительными трудозатратами. Требуется прокладка протяженных кабельных линий, постоянный контроль геометрии установки и разнесение электродов на значительные расстояния. Это снижает общую производительность и мобильность измерений.

Альтернативой является использование двухэлектродной (совмещенной) схемы, в которой функции подачи тока и регистрации потенциала объединены в одной паре заземлений. Эквивалентность четырех- и двухэлектродных схем показана в работе [1]. Основным препятствием для внедрения совмещенных схем является нестабильность гальванического контакта штырей с грунтом: флуктуации переходного сопротивления заземления аддитивно входят в измеряемый параметр, искажая данные о сопротивлении земли. В этих условиях стабильность заземления становится определяющим фактором точности измерений. Экспериментальное определение сопротивления заземлителей сводится к одновременному измерению падения напряжения на электроде и протекающего через него тока [2], что усложняет процедуру измерений. Применение предложенной двухэлектродной схемы позволяет сократить объем кабельных линий и повысить оперативность проведения измерений.

В отличие от универсальных измерителей иммитанса, использованных в работе [1], разработанная аппаратура основана на принципе раздельной прямой регистрации падения напряжения U на электродах и силы тока I в питающей цепи. Такой подход исключает методические погрешности, обусловленные применением приборов, не адаптированных к высокоомным геоэлектрическим цепям.

Вычисление сопротивления земли в совмещенных установках. При использовании двухэлектродной схемы измеряемое полное сопротивление R при фиксированном расстоянии между точками A и B описывается выражением:

$$R = R_A + R_B + R_Z$$

где R_A и R_B — переходные сопротивления заземления электродов, R_Z — искомое сопротивление исследуемой геологической среды. Из-за изменчивости R_A и R_B прямое определение R_Z из одного измерения невозможно. Для устранения неопределенности предложено использовать избыточные дублирующие электроды. На рисунке 1 показана схема измерения с дублирующими электродами.

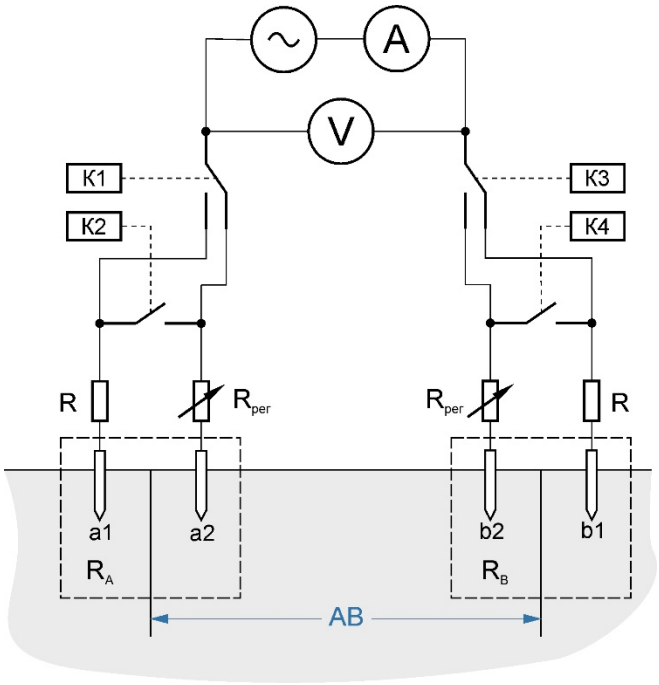


Рисунок 1 – Схема измерения сопротивления. R_A, R_B – Контактные сопротивления «электрод-грунт», R – компенсирующее сопротивление, $R_{рег}$ – регулировочное сопротивление, *К1..К4* – коммутирующие реле

В точке A устанавливаются два близкорасположенных штыря a1 и a2, в точке B — штыри b1 и b2. Расстояние между дублирующими элементами внутри одного узла пренебрежимо мало по сравнению с расстоянием AB, что гарантирует неизменность величины R_Z при любых комбинациях их включения.

Для создания переопределенной системы в измерительную цепь последовательно вводится регулировочное сопротивление $R_{рег}$, служащее для выравнивания и калибровки сопротивлений заземления отдельных электродов. Коммутация элементов с помощью реле К1..К4 позволяет получить серию измерений из которых можно составить систему из четырех независимых уравнений:

$$\begin{cases} R_A + R_Z + R_B = R_1 \\ \frac{1}{2}R_A + R_Z + R_B = R_2 \\ R_A + R_Z + \frac{1}{2}R_B = R_3 \\ \frac{1}{2}R_A + R_Z + \frac{1}{2}R_B = R_4 \end{cases},$$

где R_1 – сопротивление, измеренное между электродами a1 и b1; R_2 – сопротивление, измеренное между электродом a1 и параллельно соединенными электродами b1 и b2; R_3 - сопротивление, измеренное между параллельно соединенными электродами a1 и a2 и электродом b1; R_4 - сопротивление, измеренное между параллельно соединенными электродами a1 и a2 и параллельно соединенными электродами b1 и b2.

Введение регулировочного сопротивления и избыточных каналов измерения формирует математически замкнутую систему. Путем алгебраических преобразований данной переопределенной системы неизвестные компоненты R_A и R_B исключаются, позволяя аналитически вычислить истинное значение сопротивления земли:

$$R_Z = -\frac{5}{4}R_1 + \frac{1}{4}R_2 + \frac{1}{4}R_3 + \frac{7}{4}R_4 \quad (1)$$

Аппаратно-программная реализация. Разработанный измеритель представляет собой аппаратно-программную систему, схема которой представлена на рисунке 2.

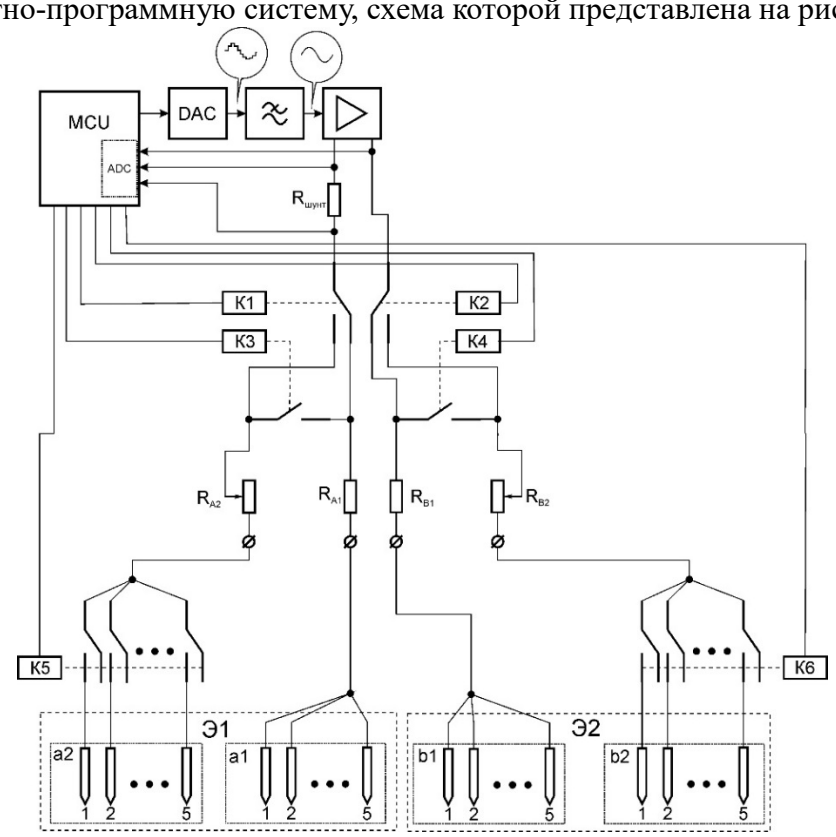


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема измерителя сопротивлений. MCU – микроконтроллер; ADC – Аналогово-цифровой преобразователь; DAC – Цифро-аналоговый преобразователь; K1..K6 – реле коммутатора; Э1, Э2 – совмещенные многоштыревые электроды, R_{A1}, R_{B1} – компенсирующие резисторы, R_{A2}, R_{B2} –регулировочные резисторы

Основой разработанного измерителя является микроконтроллер (MCU). Он формирует цифровой код зондирующего сигнала, управляет коммутационными элементами (K1-K6) и осуществляет регистрацию измерительных данных посредством встроенного аналого-цифрового преобразователя (ADC). Генерация сигнала реализуется программным способом: микроконтроллер вычисляет мгновенные значения синусоидальной функции методом полиномиальной аппроксимации второго порядка с последующей передачей сформированного массива данных в цифро-аналоговый преобразователь (DAC).

DAC преобразует цифровую последовательность в ступенчатый аналоговый сигнал, который далее сглаживается фильтром нижних частот. В результате формируется синусоидальное напряжение с задаваемой частотой и минимальным уровнем высших

гармоник. Полученный сигнал поступает на усилительный каскад, обеспечивающий требуемый уровень амплитуды и согласование с нагрузкой измерительной цепи.

Коммутация электродной системы осуществляется с помощью релейных ключей. Реле K1-K4 выполняют выбор активной конфигурации электродов в соответствии с заданной схемой измерений. Реле K5 и K6 предназначены для электрической развязки неиспользуемых электродов, что исключает паразитные токи утечки и влияние замкнутых контуров на результаты измерений. Временная диаграмма цикла измерений показана на рисунке 3. Алгоритм работы предусматривает последовательную коммутацию четырех измерительных конфигураций электродов: a1~b1, a1~b1+b2, a1+a2~b1 и a1+a2~b1+b2. После активации определенной коммутационной комбинации электродов устанавливается задержка длительностью 40,32 мс перед началом опроса АЦП. Данная пауза необходима для завершения переходных процессов механического переключения реле и исключения влияния дребезга контактов на полезный сигнал. Продолжительность активного цикла измерения составляет 589,82 мс, что при заданной частоте дискретизации обеспечивает накопление в памяти микроконтроллера массива из 131072 отсчетов.

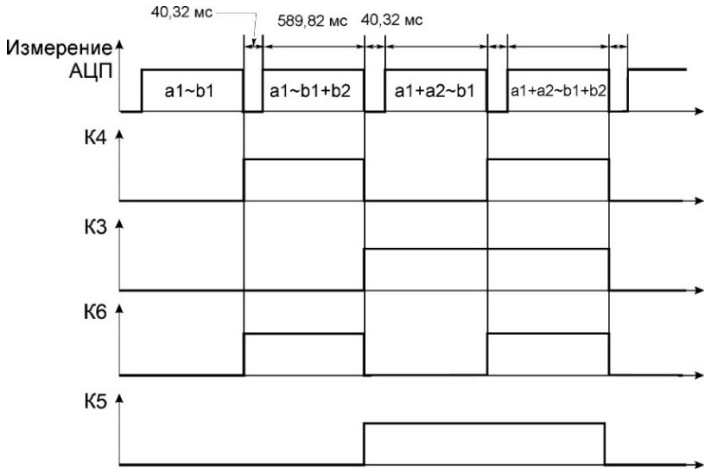


Рисунок 3 – Временная диаграмма работы измерителя сопротивлений в режиме измерений

В программном обеспечении микроконтроллера реализуется процедура обработки, которая включает в себя накопление и фильтрацию массивов данных для повышения помехоустойчивости измерительного тракта. По завершении активного цикла измерения вычисляются среднеквадратичные значения по разности среднего квадрата и квадрата среднего значений отсчетов. Использование данной расчетной схемы позволяет аппаратно-программными средствами полностью исключить влияние постоянной составляющей без применения громоздких аналоговых фильтров высоких частот. Алгоритмически расчет выполняется в один проход по мере заполнения буфера, что минимизирует требования к вычислительной мощности процессора. На основе полученных очищенных значений тока и напряжения вычисляется истинное сопротивление для текущей коммутационной конфигурации. Дополнительно может применяться синхронное детектирование, что позволяет выделить полезный сигнал на фоне шумов и нестабильностей контакта «электрод–грунт». В таблице 1 приведены основные характеристики измерителя.

Общий вид установки показан на рисунке 4. Для снижения контактного сопротивления и усреднения локальных неоднородностей грунта изготовлена многоштыревая конструкция электрода (рисунок 4, 1). Конструктивно блок коммутации (рисунок 4, 2) содержит релейные переключатели и аккумуляторные батареи. В блоке управления размещены микроконтроллер, ЦАП, фильтр нижних частот, усилительный каскад, жидкокристаллический дисплей для отображения результатов измерений и органы ручного управления.

Таблица 1 – Основные характеристики измерителя

№ п.п	Наименование	Значение
1	Разрядность АЦП	12 бит
2	Частота дискретизации АЦП	222222 Гц
3	Разрядность ЦАП	16 бит
4	Диапазон перестройки частоты сигнала ЦАП	0,01..50000 Гц
5	Диапазон измеряемого напряжения (среднеквадратичное значение)	1 мВ..1,17 В
6	Диапазон амплитуды выходного сигнала	0..3 В

Каждый из двух базовых электродов выполнен в виде жесткого изоляционного диска диаметром 60 мм, на котором радиально закреплены 10 металлических штырей диаметром 1 мм. Данное конструктивное решение обеспечивает равномерное распределение плотности тока по площади контакта и усреднение переходных сопротивлений отдельных штырей. В результате снижается чувствительность установки к неоднородностям среды в точке заземления.

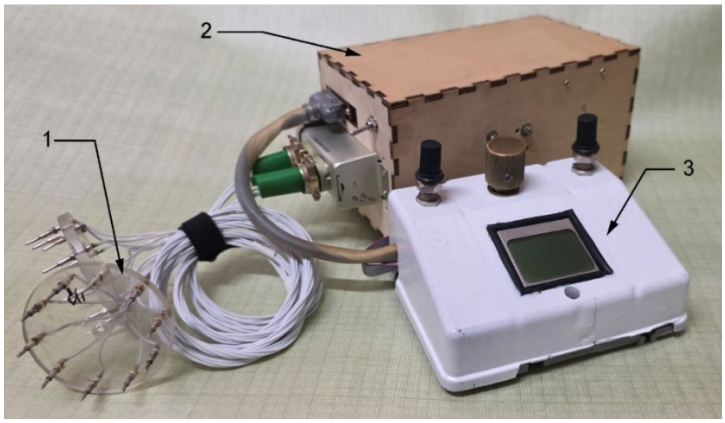


Рисунок 4 – Общий вид измерителя сопротивлений с совмещенными электродами. 1 – многоштыревые электроды, 2 – блок коммутации, 3 – блок управления

Экспериментальные исследования. Для проверки предложенного метода и разработанного прибора проведен цикл лабораторных экспериментов на физической модели среды. Тестовая установка включала в себя емкость объемом 30 литров, заполненную водой. Электродные системы монтировались на подвижной планке из органического стекла, обеспечивающей линейность перемещения и фиксацию геометрических параметров (рисунок 5) и погружались в воду на 5 мм.

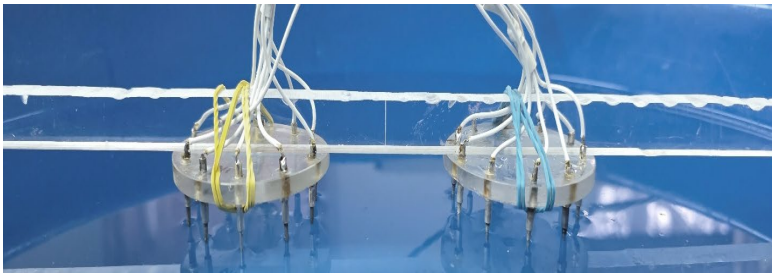


Рисунок 5 – Общий вид электродов, погруженных в воду. Расстояние между электродами 130 мм

Зондирование выполнялось переменным синусоидальным током частотой 100 Гц. В процессе эксперимента изменялось расстояние между электродными узлами *A* и *B* (фиксировалось на оси абсцисс). Измерения проводились последовательно во всех четырех комбинациях дублирующих электродов (рисунок 6).

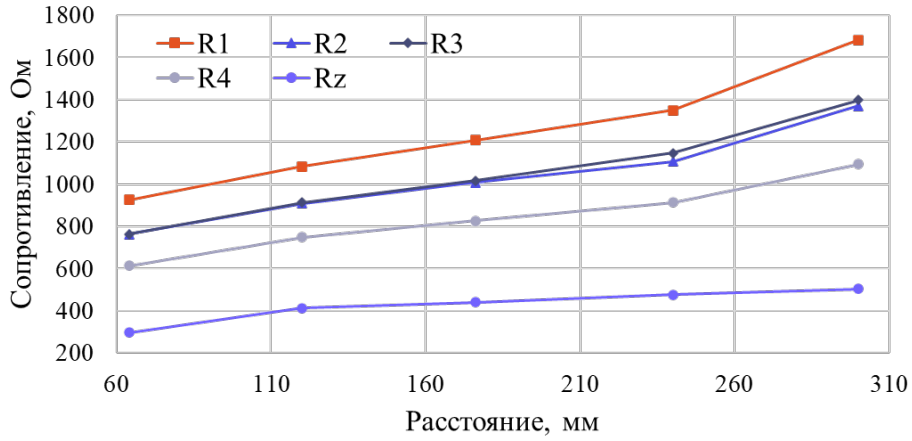


Рисунок 6 – График зависимости измеренного сопротивления от расстояния между электродами

На графике R1, R2, R3, R4 - сопротивления, измеренные при различных комбинациях электродов, Rz - вычисленное по формуле (1) значение сопротивления среды. Из графика следует, что при увеличении расстояния между электродами измеренное сопротивление возрастает. Дальнейшее увеличение межэлектродного расстояния было ограничено линейными габаритами используемой модельной емкости. Анализ полученных данных показал, что амплитудные значения тока и напряжения в цепи регистрируются устойчиво, без срывов генерации и фазовых искажений. Вычисленные значения сопротивлений на различных удалениях электродов продемонстрировали высокую сходимость.

Заключение. Разработанный аппаратно-программный комплекс подтвердил работоспособность концепции совмещенных установок с многоштыревыми электродами для задач электроразведки методом постоянного тока (ВЭЗ). Изготовленный измеритель отличается компактностью и низким энергопотреблением. Применение переменного гармонического тока в сочетании с раздельной регистрацией тока и напряжения позволило повысить помехозащищенность тракта. Предложенное методическое и аппаратное обеспечение переопределенной системы измерений нивелирует проблему нестабильности заземлений. Разработанное решение упрощает проведение полевых работ, сокращает время развертывания профилей и повышает общую производительность метода ВЭЗ. Направления дальнейших исследований связаны с проведением натурных испытаний на физических моделях.

Литература

1. Александров П.Н. О совмещенных установках в методе сопротивлений // Инженерные изыскания. 2014. № 13-14. С. 58-67.
2. Квятковский Г.И. Метод сопротивления заземления в инженерной геофизике. М.: Недра. 1993. 90 с.

УДК 550.34

ОРГАНИЗАЦИЯ ВРЕМЕННОГО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО ПУНКТА НАБЛЮДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКВАЖИННОГО ПРИБОРА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Косоротова Е.А.
kosorotiha30@gmail.com
Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

В работе оценивается эффективность временного сейсмологического пункта наблюдения со скважинным сейсмоприёмником в условиях повышенной техногенной активности – на примере площадки ИГФ УрО РАН в черте г. Екатеринбурга. Цель исследования – оценить работоспособность станции в городской среде, где наземные станции неэффективны из-за высокого уровня антропогенных шумов. Регистрация данных велась 4 месяца с помощью сейсмического регистратора «Урал»; результаты верифицированы по каталогу ГИ УрО РАН. За 4 месяца наблюдений с помощью регистратора «Урал» зафиксировано 123 сейсмических события: 55 подтверждены каталогом ГИ УрО РАН, 68 ранее не фиксировались. Станция уверенно регистрирует события с ML<1,6 в радиусе 15-35 км, с ML<2,2 – до 85 км; в радиусе до 20 км зафиксированы события с минимальной магнитудой 0,8. Также зарегистрированы 3 естественных события с Mb>3. Полученные данные подтверждают целесообразность использования скважинных пунктов для сейсмического мониторинга в промышленных городах и на горнопромышленных объектах.

Ключевые слова: сейсмология, скважинный сейсмоприёмник, мониторинг слабой сейсмичности, сейсмический мониторинг, магнитуда, промышленный взрыв.

Введение. Развитие сейсмологии в России, в частности на Урале, тесно связано с задачами обеспечения безопасной эксплуатации горнодобывающих предприятий и крупных инфраструктурных объектов [1, 2]. В сейсмологии разработаны принципы регистрации слабых событий и методы выделения сигнала на фоне промышленных помех. Рост техногенной нагрузки обуславливает необходимость создания локальных систем мониторинга.

В городской среде основной проблемой является высокий уровень антропогенных шумов. Применяются различные способы размещения сейсмоприёмников: наземная установка на дневной поверхности, размещение в подземных помещениях, а также заглубление в скважины, которое считается наиболее эффективным для снижения уровня помех [3, 4, 5].

В предыдущих исследованиях авторы использовали наземную установку приборов [6]. В 2024 году выполнены временные наблюдения в Свердловской области с последующим сопоставлением данных с каталогом, формируемым Горным институтом УрО РАН, который является единственным регулярно обновляемым региональным источником информации о сейсмических событиях и промышленных взрывах на Урале [7, 8]. Такой подход эффективен вне городской застройки, однако в условиях города не обеспечивает требуемого качества записей.

В настоящей работе реализован временный сейсмологический пункт наблюдения со скважинным размещением сейсмоприёмника в городской черте. Цель исследования — оценить эффективность такого подхода и определить регистрационные возможности пункта для событий малых магнитуд.

Методика исследования и исходные данные. Временная сейсмологическая точка организована в черте г. Екатеринбург на территории ИГФ УрО РАН. Скважинный сейсмоприемник [9] установлен на уровне монолитной скалы на глубине 22 м с

использованием прижимного устройства [10]. Установка сейсмоприемников в скважинах позволяет снизить уровень помех по сравнению с наземным размещением, что важно для регистрации событий малой магнитуды [11]. Регистрация осуществлялась в течение четырех месяцев, в качестве регистрирующего оборудования использовался сейсмический регистратор «Урал» [12]. Частота дискретизации – 250 Гц, что позволяет провести анализ широкого диапазона частот, включая высокочастотные составляющие, характерные для техногенных взрывов.

Для верификации полученные данные сопоставлены с каталогом сейсмических событий ГИ УрО РАН. Институт ведет постоянный мониторинг в регионе на основе стационарной сети. Использование данных каталога позволяет объективно оценить регистрационные возможности временного пункта наблюдения.

Результаты и обсуждение. За четыре месяца непрерывной регистрации на станции «Кисловодск» выделено 123 события, имеющих четкое вступление первых P- и S-волн. По результатам сопоставления с региональным каталогом ГИ УрО РАН удалось идентифицировать 55 событий, для которых так же были определены координаты. Ещё 68 событий, зарегистрированных на станции Кисловодск, не отмечены в региональном каталоге.

На основе идентифицированных событий построена карта распределения, по которой дополнительно выделены зоны регистрационной возможности станции «Кисловодск» (рисунок 1).

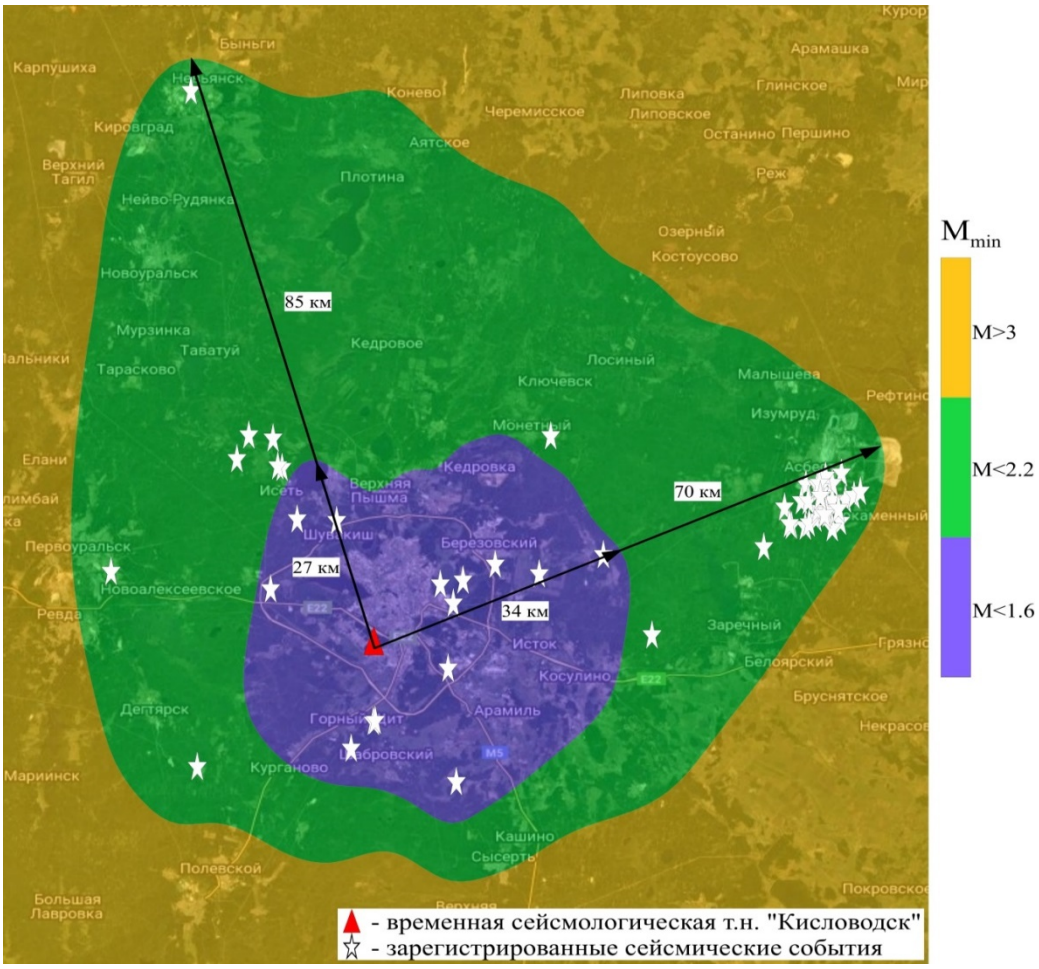


Рисунок 1 – Карта распределения сейсмических событий с зонами регистрационной возможности станции «Кисловодск»

Построенные зоны регистрационной возможности на рисунке 1 (изолинии минимальной магнитуды регистрируемых событий) демонстрируют, что в радиусе 15-35 км

от станции обеспечивается уверенная регистрация событий с ML<1.6. В то время как для событий с ML<2.2 радиус регистрации увеличивается до 85 км.

Также станцией «Кисловодск» зарегистрировано 68 событий, которые не указаны в каталоге ГИ УрО РАН, предположительно по причине малых магнитуд. События зарегистрированы единственной станцией «Кисловодск», поэтому их координаты эпицентров не определены. Расстояние от станции до события рассчитано по разнице времён прихода S- и P-волн. Анализ данных показал, что эти события локализуются на расстоянии до 40 км от временной сейсмологической точки наблюдения «Кисловодск». Зарегистрированные события станцией «Кисловодск», которых нет в сейсмическом каталоге ГИ УрО РАН, характеризуются ML<2.2. В радиусе до 20 км зарегистрированы события с минимальной магнитудой 0.8.

Также временной сейсмологической точкой «Кисловодск» зарегистрировано 3 события с Mb>3. Из них два микроземлетрясения с Mb=3.3; 3.5 на территории Республики Башкортостан и одно землетрясение в Афганистане с Mb=6.8 [13]. Пример записи землетрясения представлен на рисунке 2.

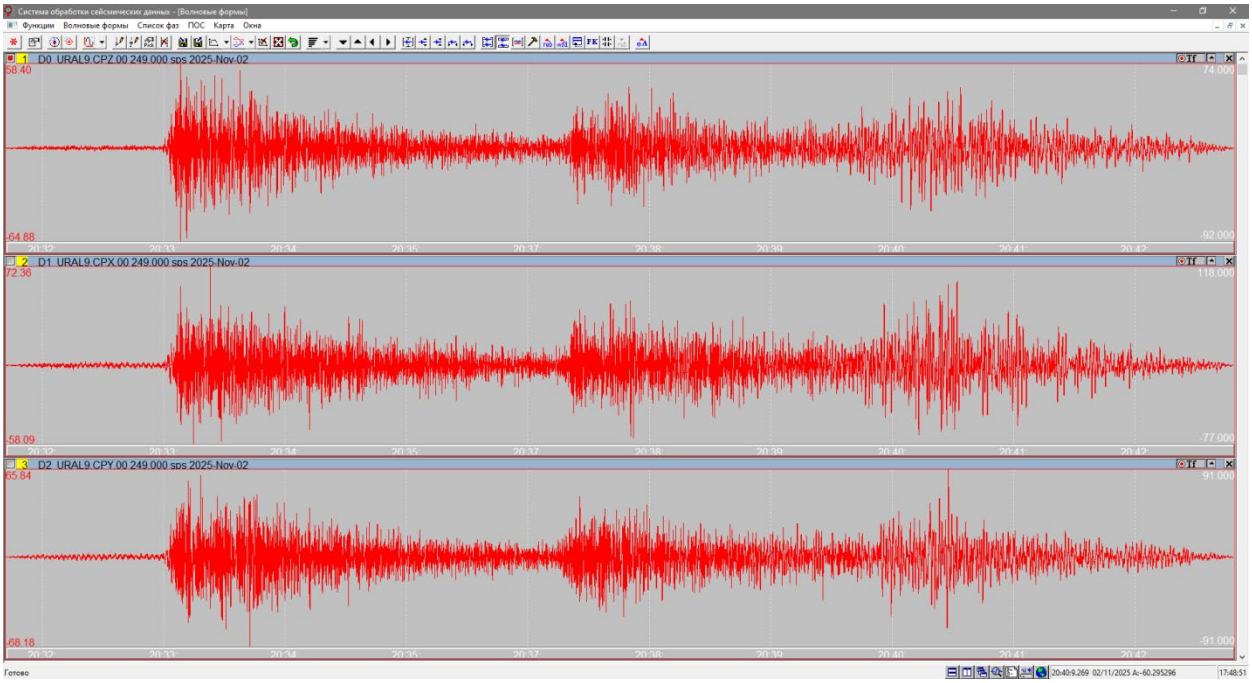


Рисунок 2 – Сейсмограмма землетрясения, произошедшего в Афганистане, полученная на пункте наблюдения «Кисловодск». Время в очаге по Гринвичу – 2025-11-02 20:29:00, Mb=6.8

Выводы. Проведенные наблюдения подтверждают, что организация временного сейсмологического пункта наблюдения с использованием скважинного сейсмоприемника на уровне скалы позволяет успешно регистрировать сейсмические события малой магнитуды (ML<2) даже в условиях высокой техногенной активности на расстоянии до 85 км от эпицентра события. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования сейсмологических пунктов наблюдения в скважинах для решения задач инженерной сейсмологии, мониторинга слабой сейсмичности в крупных промышленных городах, а также могут быть полезны для решения задач сейсмологического мониторинга горнопромышленных предприятий.

Литература

1. Кашубин С.Н., Дружинин В.С., Гуляев А.Н. и др. Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона. Екатеринбург: УрО РАН. 2001. 126 с.
2. Дягилев Р.А. Техногенная сейсмичность горнодобывающих регионов и ее влияние на сейсмическую опасность // Проблемы региональной экологии. 2011. № 5. С. 116-120.

3. Носкова Н.Н., Верхоланцев Ф.Г. Временные сейсмические наблюдения на севере Республики Коми (Полярный Урал) в 2023 году // Вестник геонаук. 2025. № 2. С. 34-42.
4. Сычева Н.А. Киргизская сейсмологическая сеть KNET // Вестник Кыргызско-российского славянского университета. 2016. № 5. С. 175-183.
5. Михайлова Н.Н., Мукамбаев А.С. Сейсмические станции национального ядерного центра РК и их вклад в решение задач оценки сейсмической опасности Восточного Казахстана // Вестник НЯЦ РК. 2022. № 2. С. 3-16.
6. Косоротова Е.А., Курданова А.А., Воскресенский М.Н., Парыгин Г.И. Организация временных сейсмологических точек наблюдения на территории Свердловской области // Уральский геофизический вестник. 2023. № 2. С. 55-61.
7. Региональный каталог сейсмических событий // Сейсмологический мониторинг Западного Урала. URL: http://pts.mi-perm.ru/mlp/?page_id=727&php=tcat (дата обращения 14.01.2026).
8. Голубева И.В., Иванова Ю.В., Белевская М.А., Старикович Е.Н. Западно-Уральская сейсмологическая сеть и результаты мониторинговых наблюдений в 2005 г. // Международная сейсмологическая школа. Петергоф. 2006. С. 62-65.
9. Воскресенский М.Н., Михайлов В.С. Скважинный сейсмоприемник. 2024. Патент РФ № 2815393.
10. Воскресенский М.Н., Михайлов В.С. Прижимное устройство скважинного сейсмоприемника // Патент РФ № 2844754. 2025.
11. Михайлова Н.Н., Комаров И.И. Спектральные характеристики сейсмического шума по данным Казахских станций мониторинга // Вестник НЯЦ РК. 2006. № 2. С. 19-26.
12. Сейсмический регистратор Урал // Конструкторское бюро Урал. URL: https://xn----8sbb9ai2au.xn--p1ai/ (дата обращения 31.03.2026).
13. Каталог сейсмических событий // Казахстанский национальный центр данных. URL: https://kndc.kz/index.php/sejsmicheskie-byulleteni/interactive-bulletin (дата обращения 15.01.2026).

УДК 550.344.094.6

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «SEISMICPHASETIME» ДЛЯ РАСЧЕТА ВРЕМЕН ВСТУПЛЕНИЯ ФАЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

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

Представлены результаты работы программы «SeismicPhaseTime», предназначенной для вычисления времен прихода P- и S-волн в пункт наблюдения на основе параметров сейсмического события и скоростной модели IASP91. В качестве исходных данных используются характеристики Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г., а также географические координаты пунктов наблюдений. В качестве иллюстрации работы программы приведены расчеты времени вступления сейсмических фаз, а также моделирование путей распространения сейсмических волн. Визуализация включает как прямолинейную траекторию в плоскости, так и траекторию по дуге большого круга с использованием эллипсоидальной модели Земли WGS84. Погрешность расчета времен вступления фаз P и S-сейсмических волн, рассчитанных по программе и определенных экспертами вручную по волновой форме на приемной станции, не превышает 0,5 секунд.

Ключевые слова: землетрясение, параметры, P-волна, S-волна, данные, время вступления, сейсмический эффект.

Введение. Расчет времен вступления сейсмических волн является одной из ключевых задач современной сейсмологии и геофизики. Точные оценки времени прихода продольных *P* и поперечных *S* волн лежат в основе определения параметров землетрясений, а также используются при построении скоростных моделей земных недр и интерпретации сейсмических данных [1]. С ростом плотности сейсмических сетей и объемов регистрируемой информации возрастает необходимость в автоматизированных и высокоточных методах расчета времен прихода сейсмических фаз [2]. Не менее важной задачей является моделирование путей распространения сейсмических волн. Анализ траекторий распространения позволяет учитывать геометрию Земли, неоднородность ее внутреннего строения и влияние различных скоростных моделей на параметры волн. Это особенно актуально при интерпретации данных от удаленных землетрясений, где существенную роль играют кривизна поверхности Земли и глобальные геодезические модели.

В настоящей работе рассматривается программный комплекс «SeismicPhaseTime», разработанный на Научной станции РАН, предназначенный для расчета времен вступления фаз *P*- и *S*-сейсмических волн в пункты наблюдения, моделирования путей их распространения и визуализации полученных результатов [3]. Использование программы способствует детальному анализу процессов распространения сейсмической энергии и развитию методов комплексного анализа сейсмических и сопряженных геофизических эффектов.

Данные. Графический интерфейс и функционал вычислений реализованы в виде программного кода на языке Python версии 3.x, который осуществляет запуск оконного приложения для расчетов и построения карт. Времена пробега фаз сейсмических волн, распространяющихся во внутреннем строении Земли, были рассчитаны на основе модели IASP91, разработанной в 1991 году Международной ассоциацией сейсмологии и физики внутреннего строения Земли (International Association of Seismology and Physics of the Earth’s Interior) с использованием референтной модели Земли (эллипсоида) [4]. В настоящей программе применяется модуль obspy.taup, входящий в состав многофункциональной

библиотеки ObsPy, специально разработанной для обработки, анализа и визуализации сейсмологических данных [5, 6].

Для вычисления расстояний, азимутов и конечных точек между географическими координатами использовался класс в библиотеке pyproj, позволяющий решать прямые и обратные геодезические задачи в глобальной трехмерной геодезической системе координат WGS84 (World Geodetic System, https://epsg.org/). Данная модель Земли, принятая в 1984 году, включает эллипсоид и набор параметров, являясь стандартом для GPS-навигации, картографии и авиации. Использование эллипсоидальной модели WGS84 позволяет более точно описывать форму планеты по сравнению со сферической моделью.

Функциональные возможности программы рассмотрим на примере Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г. Согласно данным международного сейсмологического центра ISC (On-Line Bulletin https://www.isc.ac.uk/), событие M=6.9 произошло в 18:09:04 UTC, на глубине 13 км (41.2555° с. ш., 78.6538° в. д.). На рисунке 1 приведена сейсмограмма с корейской сейсмостанции Taejon (TJN), расположенной на расстоянии около 4210 км от эпицентра, где вступлению *P*-волны Учтурфанского землетрясения соответствует время 18:16:20 UTC. Рассчитанное в программе время вступления *S*-волны на станции TJN составляет 18:22:11 UTC.

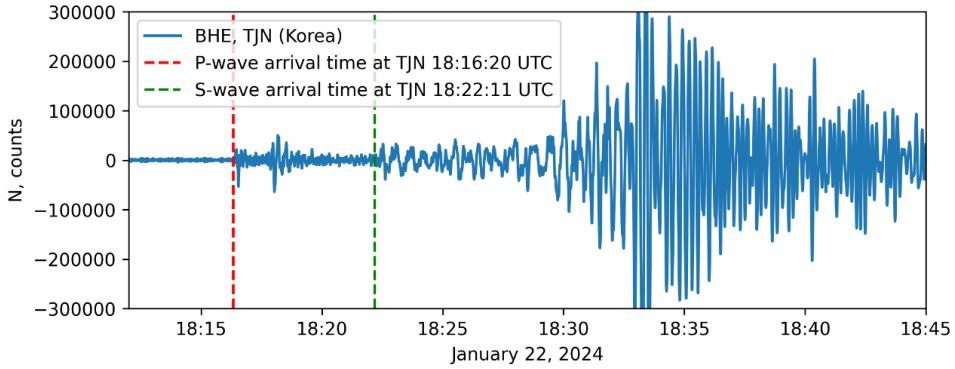


Рисунок 1 – Время вступления *P*-волны (красная пунктирная линия) по данным ISC и рассчитанное в программе время вступления *S*-волны (зеленая пунктирная линия) Учтурфанского землетрясения на сейсмостанции TJN

Следует отметить, что вычисление времен прихода *P* и *S*-волн землетрясения в программе можно производить не только для сейсмостанций, но и для других обсерваторий с заданными координатами. Так, например, для изучения косейсмических вариаций геомагнитного поля, возникающих синхронно с прохождением сейсмических волн, можно рассчитать времена вступления фаз *P*- и *S*-сейсмических волн в пунктах геомагнитных наблюдений по их географическим координатам.

Результаты и обсуждение. Вычисление времен прихода *P* и *S*-волн в пункт наблюдения TJN с заданными координатами (широта, долгота) производится на основе параметров сейсмического события (дата, время, широта, долгота, глубина) во вкладке программы «Расчет» (рисунок 2). Для рассматриваемого события, рассчитанное время вступления *P*-волны на станции TJN составляет 18:16:19.917 UTC, что практически соответствует времени, представленному в каталоге ISC (18:16:20.395 UTC). Погрешность результатов расчета времен вступления фаз *P*- и *S*-сейсмических волн не превышает 0,5 секунд.

Кроме этого, поля результатов программы включают определение расстояния между очагом землетрясения и пунктом наблюдения (в километрах и градусах), а также расчет прямого и обратного азимута между сейсмическим событием и пунктом наблюдения. Изучение азимутальной структуры косейсмического геомагнитного отклика и ее согласованности с направлением на источник землетрясения может использоваться в качестве

дополнительного критерия идентификации косейсмического геомагнитного эффекта на удаленных (более 4000 км) станциях [7, 8].

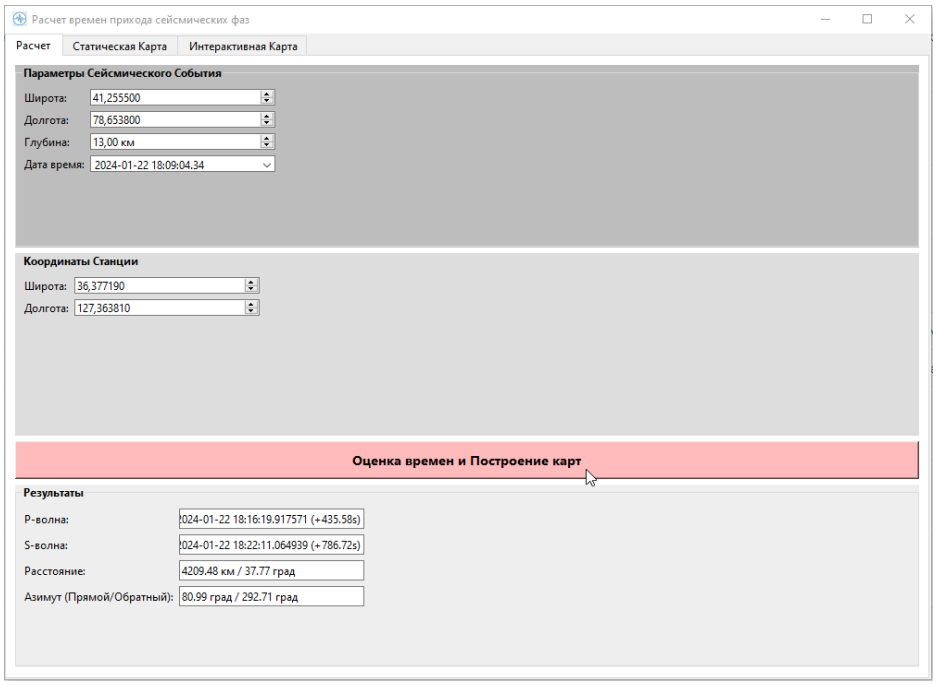


Рисунок 2 – Вкладка окна программы «Расчет»

Вкладки «Статическая карта» (рисунок 3) и «Интерактивная карта» (рисунок 4) предусматривают визуализацию трасс распространения сейсмической волны от землетрясения на станцию в виде географических карт. Пути распространения сейсмической волны включают прямолинейную траекторию в плоскости и траекторию по дуге большого круга с использованием эллипсоидальной модели WGS84. Размер и масштабирование карт можно производить с помощью инструментов в левом верхнем углу программы.

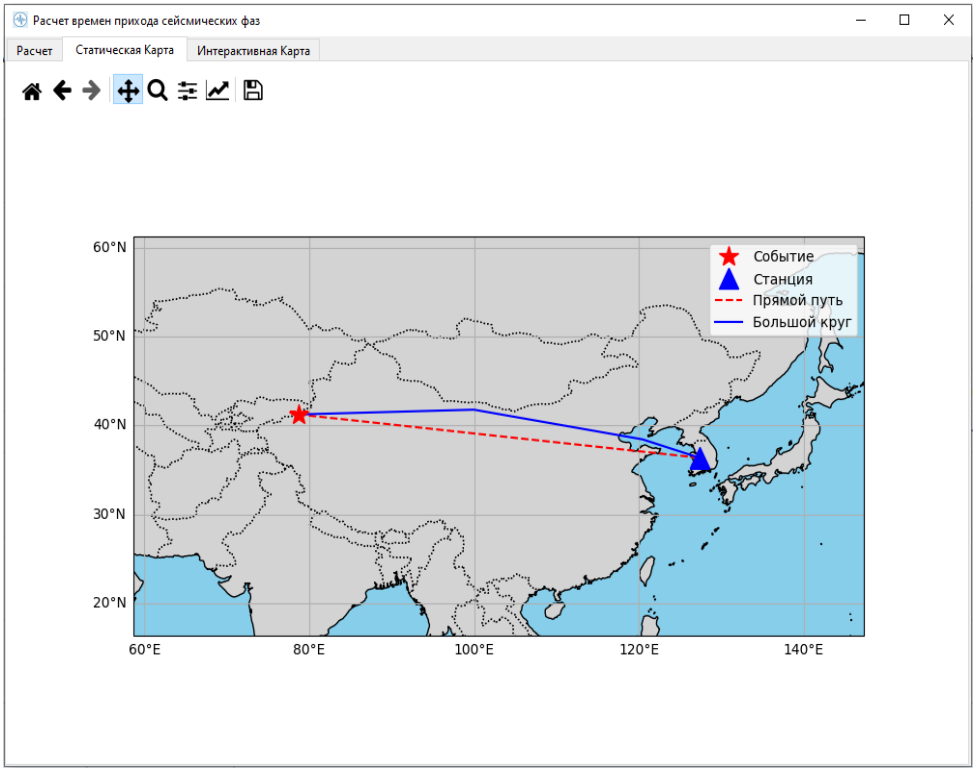


Рисунок 3 – Вкладка окна программы «Статическая карта»

Использование эллипсоидальной модели WGS84 позволяет более точно описывать форму планеты по сравнению со сферической моделью. Реальное распространение сейсмической волны (рисунок 3 и рисунок 4) происходит не по прямой линии (красным цветом), а по траектории наиболее кратчайшего пути (синим цветом).

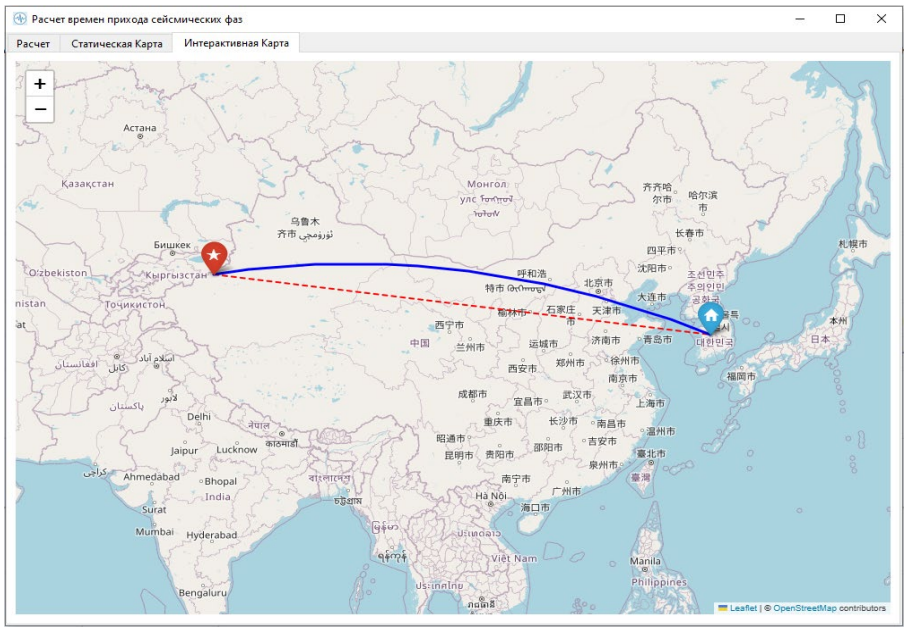


Рисунок 4 – Вкладка окна программы «Интерактивная карта»

Как было отмечено ранее, вычисление времен прихода *P*- и *S*-волн землетрясения можно производить для любых пунктов наблюдения с заданными координатами. Так, например, для оценки косейсмического геомагнитного эффекта на 1-секундных магнитограммах, можно рассчитать времена вступления фаз *P*- и *S*-сейсмических волн в пунктах геомагнитных наблюдений (рисунок 5).

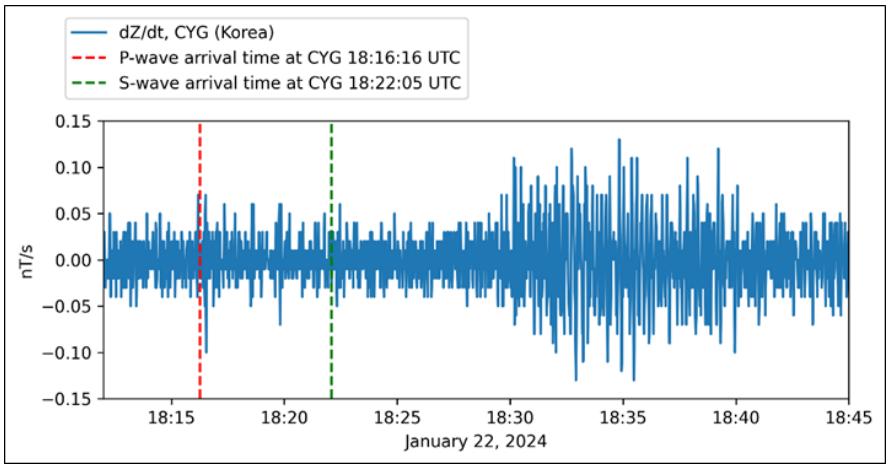


Рисунок 5 – Время вступления *P*-волны (красная пунктирная линия) и *S*-волны (зеленая пунктирная линия) Учтурфанского землетрясения на геомагнитной станции CYG

На рисунке 5 представлен график скорости изменения вертикальной компоненты геомагнитного поля *dZ/dt* (нТл) на Корейской геомагнитной обсерватории CYG. Расстояние от землетрясения до геомагнитной станции составляет 4167 км, что на 42 км ближе местоположения сейсмостанции TJN, поэтому приход *P* и *S*-волн на магнитную станцию наблюдается раньше и составляет 18:16:16.738 UTC и 18:22:05.364 UTC соответственно.

Заключение. Использование программы «SeismicPhaseTime» позволяет определять время вступления, а также интервалы времени между приходами *P*- и *S*-волн в пункт наблюдения с заданными координатами (широта, долгота) на основе параметров

сейсмического события (широта, долгота, глубина, дата и время) и скоростной модели IASP91. Погрешность в сравнении результатов расчетов между каталогом ISC и представленной программой не превышает 0,5 секунд. Визуализация трасс распространения сейсмической волны в программе представлена в виде статичных и интерактивных карт, включает прямолинейную траекторию в плоскости и траекторию по дуге большого круга.

Совместный анализ волновой формы Учтурфанского землетрясения и данных геомагнитного поля на корейских обсерваториях выявил наличие косейсмического эффекта, который проявляется в виде кратковременных аномальных вариаций магнитного поля. Обнаруженные магнитные возмущения демонстрируют временное опережение их вступления относительно прихода сейсмической волны. Этот эффект объясняется различным расстоянием от эпицентра до магнитной обсерватории и сейсмостанции, в связи с чем регистрация косейсмического эффекта в магнитном поле зависит от времени распространения сейсмических волн в земной коре. Кроме этого, возможное влияние вторичных процессов, таких как перераспределение заряженных частиц в породах или взаимодействие сейсмических волн с ионосферными токами, также может способствовать временной задержке или опережению магнитных возмущений [9]. Представленные результаты расширяют представления о пространственной структуре косейсмического геомагнитного отклика и дают возможность использования азимутального анализа в качестве дополнительного критерия его идентификации в обсерваториях, находящихся на расстояние более 4000 км.

Результаты, представленные в данной работе, получены в рамках выполнения государственного задания Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке по теме «Комплексное исследование геофизических полей и неупругих процессов в сейсмоактивных зонах литосферы Северного Тянь-Шаня для мониторинга и прогноза сейсмической активности». Регистрационный номер 1025032800066-3-1.5.1.

Литература

1. Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Travel times for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. 1991. Vol. 105. No. 2. P. 429–465. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x
2. Nigmatullin R.R., Imashev S.A. RSNet: A Neural Network Model for Picking of Seismic Wave Arrival Times Based on Mesofluctuations // Journal of Volcanology and Seismology. 2025. Vol. 19. No. 6. P. 586-597. DOI: 10.1134/S0742046325700289
3. Имашев С.А., Лазарева Е.А. Программа для расчета времен вступления фаз сейсмических волн SeismicPhaseTime // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026610465, 2026. EDN EAPITH.
4. Gao W., Wang Y., Yu S. An Interactive System Based on the IASP91 Earth Model for Earthquake Data Processing // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 22. 11846. https://doi.org/10.3390/app122211846
5. Crotwell P.H., Owens T.J., Ritsema J. The TauP Toolkit: Flexible Seismic Travel-time and Ray-path Utilities // Seismological Research Letters. 1999. Vol. 70. No. 2. P. 154–160.
6. Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., Megies T., Behr Y., Wassermann J. ObsPy: A Python Toolbox for Seismology // Seismological Research Letters. 2010. Vol. 81. No. 3. P. 530–533.
7. Flinn E.A. Signal Analysis Using Rectilinearity and Direction of Particle Motion // Proceedings of the IEEE. 1965. Vol. 53. № 12. P. 1874-1876. DOI: 10.1109/PROC.1965.4462
8. Magotra N., Ahmed N., Chael E. Seismic event detection and source location using single-station (three-component) data // Bulletin of the Seismological Society of America. 1987. Vol. 77. No. 3. P. 958–971. DOI: 10.1785/BSSA0770030958
9. Surkov V.V., Pilipenko V.A., Sinha A.K. Possible mechanisms of co-seismic electromagnetic effect // ActaGeod.Geophys. 2018. Vol. 53. P. 157-170. DOI: 10.1007/s40328-018-0211-6.

УДК 537.226:678.027.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ FDM-ПЕЧАТИ

Лисимов М.О., Лашин О.А.
makcimeil@mail.ru
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

В работе представлена экспериментальная установка и методика определения диэлектрической проницаемости полимерных материалов, изготовленных методом FDM-печати, в низкочастотном диапазоне измерений, исследование влияния параметров печати (infill, ориентация слоёв) на диэлектрические свойства и обоснование выбора материалов для минимизации паразитных ёмкостей в узлах измерительных систем (элементы конструкции датчиков, включая чувствительные элементы, определяющие стабильность и точность измеряемых сигналов, например, каркасы измерительных катушек индукционных датчиков).

Ключевые слова: 3D-печать, FDM, диэлектрическая проницаемость, анизотропия, полимерные материалы, измерение емкости.

Введение. Аддитивные технологии, в частности FDM-печать, широко применяются при изготовлении элементов измерительных систем, включая каркасы катушек индуктивности, корпуса датчиков и конструкционные элементы [1]. Диэлектрические свойства используемых полимеров оказывают существенное влияние на паразитные емкости, распределение электрического поля и стабильность параметров электронных устройств. Однако в технической документации производителей, как правило, отсутствуют данные о диэлектрической проницаемости таких материалов и её зависимости от частоты, что обуславливает необходимость их экспериментального определения.

Теоретическая модель измерения основана на квазистатическом приближении электростатики, при котором предполагается отсутствие свободных зарядов в объеме диэлектрика и линейная связь между электрическим полем и электрическим смещением. В этих условиях электрическое поле может быть представлено как градиент скалярного потенциала, удовлетворяющего уравнению Лапласа [2, 3].

Для экспериментального определения диэлектрической проницаемости использован метод, основанный на измерении емкости плоскопараллельного конденсатора.

Емкость конденсатора определяется выражением:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d},$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала; S – площадь электрода; d – расстояние между электродами.

Для исключения влияния геометрии параметров используется метод отношения емкостей:

$$\varepsilon_r = \frac{\mathrm{C}_{sample}}{C_{air}},$$

где C_{sample} – емкость с исследуемым образцом; C_{air} – емкость при воздушном зазоре.

Данный подход позволяет снизить влияние систематических погрешностей, связанных с неточностью размеров и краевыми эффектами диэлектрического образца.

В качестве измерительной структуры используется плоскопараллельный конденсатор с фиксированной геометрией электродов. При условии, что расстояние между электродами существенно меньше их характерных размеров, электрическое поле в рабочей области можно считать однородным и направленным перпендикулярно поверхности электродов. В этом

приближении емкость конденсатора определяется диэлектрической проницаемостью среды, заполняющей межэлектродный зазор, и геометрическими параметрами системы.

Определение относительной диэлектрической проницаемости осуществляется путем сравнения емкости конденсатора с образцом и емкости воздушного зазора при неизменной геометрии. Использование метода отношения емкостей позволяет существенно снизить влияние систематических погрешностей, связанных с неточностью геометрических параметров и краевыми эффектами [4].

Экспериментальная установка и методика измерений. Для проведения исследований была изготовлена экспериментальная установка, представляющая собой плоскопараллельный конденсатор с возможностью размещения исследуемого образца между электродами. Схема установки показана на рисунке 1.

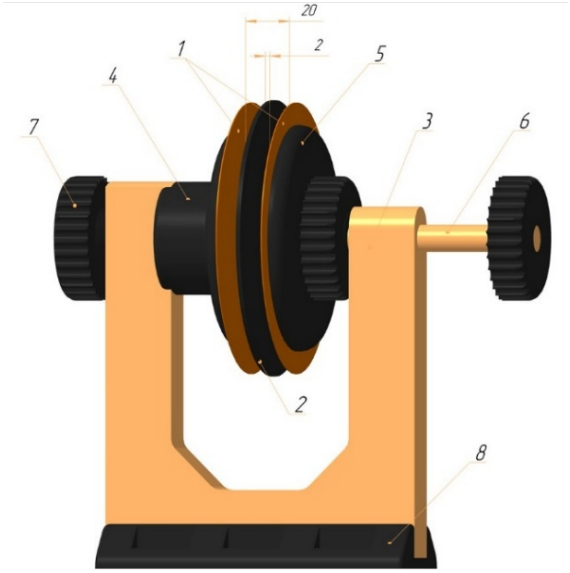


Рисунок 1 – Схема конденсаторной измерительной установки: 1 – электрод; 2 – диэлектрический образец; 3 – основание; 4 – держатель электрода; 5 – держатель второго электрода; 6 – шток; 7 – фиксирующий винт; 8 – стойка

Основными элементами конструкции являются два круглых медных электрода (1), между которыми размещается исследуемый образец (2). Один из электродов закреплён на держателе (4), который жёстко фиксируется на основании (3) с помощью фиксирующего винта (7). Второй электрод установлен на подвижном держателе (5), обеспечивающем возможность его вращения вокруг собственной оси. Регулировка расстояния между электродами осуществляется с помощью штока (6), что позволяет устанавливать образцы различной толщины и обеспечивать надёжный контакт электрода с поверхностью образца.

Конструкция установки предусматривает возможность быстрой замены электродов, что позволяет использовать электроды различных размеров и проводить исследования образцов с различными геометрическими параметрами.

Измерительная установка обеспечивает исследование диэлектрических образцов с различной толщиной в диапазоне: d = 0.5 – 20 мм. Толщина ~2 мм выбрана как компромисс между погрешностью изготовления и точностью измерений: при малых зазорах возрастает погрешность изготовления, при больших - увеличивается погрешность измерений. Выбранные круглые электроды обеспечивают более однородное электрическое поле и минимизируют краевые эффекты, что повышает точность измерений.

Исследуемые образцы. Особенностью полимерных материалов, полученных методом FDM-печати, является их анизотропия, обусловленная послойной структурой. Материал формируется в виде набора слоев, что приводит к различию диэлектрических свойств в направлениях, параллельных и перпендикулярных слоям. Для описания таких материалов

используется модель трансверсально-изотропной среды с различными значениями диэлектрической проницаемости в этих направлениях.

Экспериментальное определение компонент диэлектрической проницаемости осуществляется за счёт использования образцов, напечатанных с различной ориентацией слоёв (рисунок 2) относительно направления электрического поля при неизменной геометрии измерительной ячейки. В одном случае слои ориентированы параллельно плоскости электродов (рисунок 2б), и поле направлено перпендикулярно слоям печати, в другом — слои ориентированы перпендикулярно электродам (рисунок 2а), и поле направлено вдоль них, что позволяет раздельно оценить соответствующие компоненты проницаемости.

Дополнительно рассматривается влияние параметра заполнения (infill 30%), определяющего объёмную долю материала (рисунок 2в). При неполном заполнении образец представляет собой эффективную двухфазную среду «полимер–воздух», и измеряемая диэлектрическая проницаемость является эффективной величиной, зависящей от структуры материала.

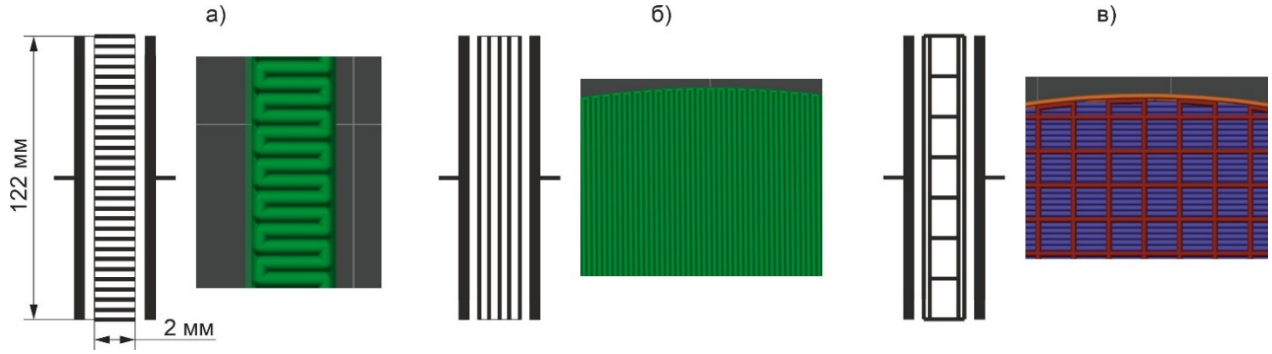


Рисунок 2 – Примеры структуры образцов: а) – образец с перпендикулярными слоями; б) – образец с параллельными слоями; в) – образец с параллельными слоями и 30% заполнением

В работе исследовались образцы полимерных материалов, изготовленные методом FDM-печати. Были использованы материалы: PETG, ABS, а также PETG с углеродным наполнением (PETG-CF), всего было рассмотрено 5 образцов.

Результаты измерений и обсуждение. Измерения проводились на дискретном наборе частот: 100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц и 100 кГц с использованием LCR-метра (Актаком АМ-3001) при малых амплитудах сигнала (напряжение возбуждения 1 В), что обеспечивает квазилинейный режим поляризации и позволяет оценить возможную частотную зависимость диэлектрической проницаемости в исследуемом диапазоне. Существенное влияние на точность результатов оказывают нестабильность межэлектродного зазора, неровность поверхности образца, наличие воздушных зазоров и внутренняя пористость материала.

В таблице 1 представлены результаты измерения ёмкости измерительной ячейки с воздушным диэлектриком. Данные значения использовались в качестве опорных при последующем расчёте относительной диэлектрической проницаемости исследуемых материалов методом отношения ёмкостей.

Таблица 1 – Результаты измерения ёмкости конденсатора с воздушным диэлектриком

		C, пФ					T, °C
f, кГц		0.1	0.120	1	10	100	
Материал	Воздух	50					23.6

Анализ результатов показывает, что ёмкость измерительной ячейки в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц остаётся практически постоянной и составляет около 50 пФ. Незначительные отклонения измеренных значений находятся в пределах погрешности

измерений и могут быть обусловлены нестабильностью условий эксперимента, влиянием паразитных ёмкостей измерительной схемы и точностью измерительного прибора.

Полученные результаты подтверждают стабильность параметров измерительной установки и позволяют использовать измеренную ёмкость воздушного зазора в качестве базового значения при определении диэлектрической проницаемости исследуемых образцов.

Результаты измерения ёмкости исследуемых образцов представлены в таблицах 2 и 3. Измерения проводились в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц для образцов, изготовленных методом FDM-печати с различными параметрами заполнения и ориентацией слоёв. На основании полученных значений ёмкости были рассчитаны соответствующие значения относительной диэлектрической проницаемости материалов.

Таблица 2 – Результаты измерения ёмкости (образцы с параллельной ориентацией слоёв)

		$C_{пар.сл.}$, пФ					T, °C	d, мм	ε
f, кГц		0.1	0.120	1	10	100			
Материал	PETG	155.6	155.5	154.89	152.9	149.4	22.7	1.95-2 мм	3.07
	PETG-30%	102.7	102.7	102.5	101.6	100	23.8	1.95-2 мм	2.04
	PETG-CF	165.5	166	165.6	163.7	160.5	24.1	2.16-2.2 мм	3.29
	ABS	133	132.6	131.6	130.5	129.5	24.4	1.95-2 мм	2.63

Таблица 3 – Результаты измерения ёмкости (образцы с перпендикулярной ориентацией слоёв)

		$C_{пер.сл.}$, пФ					T, °C	d, мм	ε
f, кГц		0.1	0.120	1	10	100			
Материал	PETG	140	140	139.8	138.3	135.6	23.7	1.95-2 мм	2.77

Анализ экспериментальных данных показывает, что значение емкости, а следовательно, и диэлектрической проницаемости, слабо зависят от частоты в исследуемом диапазоне. Это свидетельствует о том, что измерения проводятся в квазистатическом режиме, при котором диэлектрические свойства материалов практически не проявляют дисперсии.

Сравнение результатов, представленных в таблице 2 и 3 для различных материалов показывает, что наибольшие значения емкости наблюдаются для материала PETG-CF, что может быть связано с наличием углеродного наполнения, увеличивающего эффективную диэлектрическую проницаемость. Наименьшее значение диэлектрической проницаемости при полном заполнении имеет ABS (ε = 2,63). Это указывает на меньшую способность материала к поляризации по сравнению с PETG и PETG-CF.

Результаты измерений для образцов PETG с заполнением 30% наблюдается значительное снижение емкости.

Это объясняется тем, что материал представляет собой эффективную двухфазную среду «полимер-воздух». В этом случае эффективная диэлектрическая проницаемость может быть оценена как:

$$\varepsilon_{eff} \approx f\varepsilon_{poly} + (1 - f)\varepsilon_{air},$$

где f – объемная доля полимера. Наличие воздушных включений ($\varepsilon \approx 1$) приводит к снижению общей проницаемости материала. Расчёт по данной модели для материала PETG при заполнении 30% (при $\varepsilon_{poly} \approx 3.07$) даёт значение $\varepsilon_{eff} \approx 1.62$, тогда как экспериментально получено $\varepsilon_{eff} \approx 2.04$. Наблюдаемое расхождение связано с упрощённым характером модели и особенностями внутренней структуры FDM-образцов, включая неоднородное распределение воздушных включений и наличие внешних оболочек. Следует отметить, что используемая модель не учитывает геометрию и размеры воздушных ячеек, их пространственное распределение, а также анизотропию материала, обусловленную послойной

структурой. Дополнительным фактором, влияющим на расхождение между расчётным и экспериментальным значениями, является особенность технологии FDM-печати, заключающаяся в наличии сплошной внешней оболочки (perimeters). При уменьшении параметра заполнения (infill) изменяется только внутренняя структура образца, тогда как внешние стенки остаются практически полностью заполненными. В результате эффективная объёмная доля полимера оказывается выше номинального значения, что приводит к увеличению измеренной диэлектрической проницаемости по сравнению с расчётной.

Сравнение результатов для образцов с различной ориентацией слоёв показывает наличие анизотропии диэлектрических свойств, обусловленной послойной структурой материалов, изготовленных методом FDM-печати. В частности, для материала PETG получены значения: при параллельной ориентации слоёв $\varepsilon \approx 3.07$, а при перпендикулярной – $\varepsilon \approx 2.77$. Это подтверждает, что материалы, изготовленные методом FDM-печати, обладают направленными диэлектрическими свойствами.

В зависимости от ориентации электрического поля относительно структуры материала определяется соответствующая компонента диэлектрической проницаемости: $\varepsilon\perp$ – при направлении поля перпендикулярно слоям и $\varepsilon\|$ – при направлении вдоль слоёв. Полученные различия подтверждают, что FDM-материалы могут рассматривается как трансверсально-изотропные среды.

Заключение. Проведённые экспериментальные исследования показали, что диэлектрические свойства материалов, используемых для изготовления конструктивных элементов датчиков (исключая каркасы измерительных катушек), зависят от структуры материала, параметра заполнения и ориентации слоёв печати. Температурная зависимость диэлектрических свойств исследуемых материалов в рамках настоящей работы не исследовалась, в связи с чем их применение в каркасах измерительных катушек требует осторожности.

Установлено, что: диэлектрическая проницаемость слабо зависит от частоты в исследуемом диапазоне; наличие пористости (infill) приводит к снижению эффективной проницаемости; FDM-материалы обладают анизотропией диэлектрических свойств; материалы с более высокой диэлектрической проницаемостью увеличивают паразитные ёмкости.

С точки зрения минимизации паразитных ёмкостей наиболее предпочтительным является материал ABS, обладающий сравнительно низким значением диэлектрической проницаемости.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании датчиков и высокочувствительных измерительных систем с целью минимизации паразитных ёмкостей и обеспечения стабильности частотных характеристик измерительного канала.

Перспективными направлениями данной работы являются создание базы данных диэлектрических свойств материалов и проведение систематических исследований полимерных и композиционных материалов с различной структурой и составом (в том числе и образцов горных пород). Исследование температурной зависимости диэлектрических свойств материалов в широком диапазоне условий эксплуатации.

Дальнейшее развитие работы связано с разработкой измерительной установки для определения комплексной диэлектрической проницаемости полимерных материалов с расширением рабочего диапазона частот до сотен килогерц. Использование установки, обеспечивающей измерение комплексного импеданса в широком диапазоне частот, позволит перейти от определения диэлектрической проницаемости на отдельных фиксированных частотах к исследованию её спектральной зависимости.

Такой подход позволит анализировать частотную дисперсию диэлектрической проницаемости, исследовать релаксационные процессы и механизмы поляризации в материале, а также раздельно определять действительную и мнимую составляющие комплексной диэлектрической проницаемости. Кроме того, станет возможной количественная оценка диэлектрических потерь и проводимости исследуемых материалов.

Анализ полной частотной зависимости позволит повысить достоверность определения диэлектрических характеристик, выявлять особенности внутренней структуры материала и регистрировать переходные и резонансные явления, которые не могут быть обнаружены при измерениях на ограниченном наборе частот.

Литература

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. New York: Springer. 2015. 498 p.
2. Jackson J.D. Classical Electrodynamics. 3rd ed. Wiley. 1998. 832 p.
3. Griffiths D.J. Introduction to Electrodynamics. 4th ed. Pearson. 2013. 623 p.
4. Von Hippel A.R. Dielectrics and Waves. MIT Press. 1954. 284 p.

УДК 550.34:534.23

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ОЧАГАХ РОЕВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Лютикова В.С., Литовченко И.Н.
nikki.valo16@gmail.com
Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований МЧС РК,
г. Алматы, Казахстан

В работе представлены результаты расчета физико-механических параметров роев землетрясений в Северо-Тянь-Шаньском сейсмоактивном регионе за период 2017-2025 гг. На основе регионального каталога сейсмических данных о землетрясениях рассчитаны физико-механические параметры в очагах роев землетрясений в регионе исследования. Расчетные значения параметров имеют математическую связь с магнитудой в очагах роев землетрясений. Предложенная модифицированная методика может быть использована для определения физических условий формирования очагов роев землетрясений земной коры в Северо-Тянь-Шаньском сейсмоактивном регионе. По результатам исследований получены физико-механические характеристики в очагах роев землетрясений на основе методики количественной оценки физических параметров сейсмических процессов. Проанализированы зависимости между магнитудой, энергией сейсмических волн, температурой, деформациями и напряжённым состоянием пород в очагах роев. Установлены обратные связи между температурой очага роя и энергетическими характеристиками роев землетрясений. Показано, что полученные результаты согласуются с данными других исследований и подтверждают универсальность используемого подхода для анализа геодинамических процессов в земной коре.

Ключевые слова: рой землетрясений, очаг роя, ороген, физико-механические параметры, взаимосвязь параметров в очаге роя.

Введение. Современные исследования сейсмоактивного региона Северного Тянь-Шаня на базе региональных и мировых сейсмических данных несут в себе ключевую роль в изучении очагов роевых скоплений землетрясений. Эти исследования всё чаще опираются на комплексный анализ их физико-механических характеристик. К числу ключевых параметров относятся энергия сейсмических волн, температура в очаговой зоне, напряжённо-деформированное состояние, плотность и потенциальная энергия деформации, а также прочностные и вязкостные свойства горных пород. Количественная оценка этих характеристик имеет принципиальное значение для интерпретации геодинамических процессов и уточнения границ сейсмотектонических регионов. Для территории Северного Тянь-Шаня за период 2017-2025 гг. распознавались и исследовались роевые скопления землетрясений с $K \geq 7.0$, для которых рассчитывались физико-механические параметры по модифицированной методике расчета термодинамических и реологических характеристик.

Постановка задачи. Целью проводимых исследований является: выяснение физико-механических условий формирования роевых скоплений землетрясений на территории Северного Тянь-Шаня. Для этого в работе рассматриваются следующие физико-механические характеристики роев землетрясений: энергия сейсмических волн (lgE_{sw}), температура в области очага (T_{sw}°C), термические напряжения, объёмные деформации, деформации формы очага, плотность энергии деформации, потенциальная энергия деформировании, предел прочности горных пород в зоне разрушения, отношение потенциальной энергии к энергии разрушения и другие параметры [1]. Оценка физико-механических условий формирования очагов роев землетрясений имеет весьма важное теоретическое значение. В этом плане для количественного анализа геодинамических процессов в земной коре, а также для оценки

параметров роевых скоплений землетрясений применялись такие параметры как: E_{sw} - энергия, M_{sw} - магнитуда, V_{sw} - критический объём очага, U_{sw} - удельная потенциальная энергия сейсмических волн (эрг/см³), E_{ksw} - удельная энергия изменения формы очага, G_{sw} - объёмный модуль упругости, k - постоянная Больцмана, α_{vsw} - коэффициент объёмного теплового расширения, τ_{kpsw} - сбрасываемые напряжения, σ_{sw} - нормальная составляющая эффективных напряжений, η_{sw} - вязкость пород внутри очага, η_{max} - максимум вязкости верхних слоёв Земли.

Методика обработки. Исходными данными служит каталог распознанных роев землетрясений [4-8]. Далее представлена система уравнений для расчета физико-механических параметров роев землетрясений (1-11), которые применяются в данной работе. Для каждого уровня магнитуды роя рассчитаны термодинамические и реологические параметры по указанным формулам.

$$lgE_{sw} = 9.257 + 2.7M - 0.1M^2$$
$$E_{sw} = 10^{(9.257+2.7M-0.1M^2)} \quad (1)$$

$$lgV_{sw}(\text{см}^3) = 6.56 + M(2.6 - 0.1M)$$
$$V_{sw} = 10^{(6.56+M(2.6-0.1M))} \quad (2)$$

$$U_{sw} = \frac{E}{V} = \frac{10^{(9.257+2.7M-0.1M^2)}}{10^{(6.56+M(2.6-0.1M))}} = 10^{2.697+0.1M} \quad (3)$$

$$E_{k_{sw}} = 2.7 + 0.1M \quad (4)$$

$$T(K)_{sw} = 196.8K(lgE_{max} - LgE_{sw}) \quad (5)$$

$$\alpha_{V_{sw}} = T(K)_{sw}/(7733)^2 \quad (6)$$

$$G_{sw} \approx k/V_{sw}\alpha_{V_{sw}} \quad (7)$$

$$\tau_{\text{кр}_{sw}} = \sigma_{sw} * tg\varphi \quad (8)$$

$$\varepsilon_{sw} = \alpha_{V_{sw}} T(K)_{sw} \quad (9)$$

$$\sigma_{sw} = \varepsilon_{sw} * G_{sw} \quad (10)$$

$$lg\eta_{sw} = lg\eta_{max} - \lg(E_{max}/E_{sw}) \quad (11)$$

$$\eta_{sw} = 10^{(lg\eta_{max} - \lg(E_{max}/E_{sw}))}$$

Индекс sw указывает на значения, получаемые конкретно для роя землетрясений. Результаты расчетов параметров приводятся в таблице 1.

Для каждого роя землетрясений рассчитывались два варианта значений параметров, например: $\lg E_{sw}$ - логарифм энергии сейсмических колебаний в очаге роя и E_{sw} – Энергия сейсмических колебаний, при этом $\lg E_{max}$ – логарифм максимальной энергии применяется и для оценки вязкости $\eta_{sw.}$ Отметим, что помимо $\lg V_{sw}$ рассчитывалось и V_{sw} аналогично как рассчитывались $\lg\eta_{sw}$ и η_{sw}.

Результаты и обсуждение. Для роев землетрясений на территории Северного Тянь-Шаня, у которых магнитуды не превышали значений 2.5-4.5, при том, что расчетные значения

температур в очагах роев землетрясений и давления внутри единицы объёма приводят к частичной компенсации их эффектов. Что, в свою очередь определяет $\alpha\nu_{sw}$ как среднюю величину термоупругой вариации объёма. Сопоставление логарифмических значений энергии сейсмических волн, рассчитанных по предложенной методике, с температурами, вычисленными по формулам из источника [1], выявляет обратную зависимость между энергией E_{sw} и температурой T_{sw}, а также между магнитудами и температурой. Так, в скоплениях роев землетрясений выявлено, что при повышении температуры наблюдается снижение магнитуд и, следовательно, уровней сейсмической энергии. В то же время, рост $\alpha\nu_{sw}$ связан с близостью направлений максимального теплового расширения и наибольшей сжимаемости [3].

Деформация ε_{sw} в очагах роев, объёмный модуль упругости G_{sw} и нормальная компонента эффективных напряжений σ_{sw} определяются по представленным уравнениям с использованием найденных значений $\alpha\nu_{sw}$ и соответствующих температур T_{sw} (в Кельвинах). Данные о роях землетрясений [10] свидетельствуют, что гипоцентры землетрясений с магнитудами M < 5,0 сконцентрированы в вытянутых квазивертикальных пространствах (см. рисунок 1).

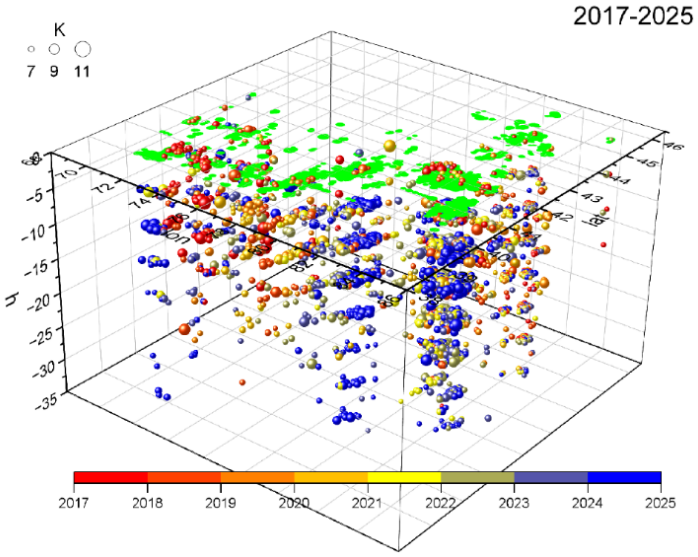


Рисунок 1 – 3D представление гипоцентров роев землетрясений для территории Северного Тянь-Шаня 70-85°E, 39-46°N (с K≥7,0) за период 2017 начало 2026 гг

На рисунке 1 представлены гипоцентры скопления роевой активности землетрясений по глубинам с учетом года в период с 2017-2025 гг. разными цветами показаны глубины роев землетрясений, произошедших в каждом из этих годов. Выделяются определенные слои в диапазоне глубин представлено цветовой шкалой.

Итак, температуры (см. таблицу 1), рассчитанные для событий с M от 2.5 до 5, соответствуют температурам кристаллизации минеральных компонентов земной коры [1, 3, 8, 9]. Анализ зависимости ε_{sw}, σ_{sw} и G_{sw} от температуры показывает, что первые два параметра возрастают с её ростом, тогда как объёмный модуль упругости G_{sw} - наоборот, уменьшается.

В таблице 1, в качестве примера, представлены расчеты физико-механических параметров в очагах роев землетрясений.

Например, эффективные касательных напряжений τ_{kpsw} согласуются с типичными уровнями напряжённости в очагах роев землетрясений при масштабных тектонических разрушениях [2]. А, с ростом температуры и связанных с ними эффективных напряжений, происходит наоборот снижение магнитуд, энергии волн и модуля сдвига. Выявленные закономерности в сейсмоактивном регионе Северного Тянь-Шаня способствуют формированию условий для активизации сейсмических процессов, и частичного плавления пород коры [1, 2, 9].

Таблица 1 – Физико-механические параметры роев землетрясений в сейсмоактивном регионе Северного Тянь-Шаня 2025 г.

Год	Месяц	Долгота	Широта	M_{sw}	H_{sw}	K_{sw}	lgE_{sw}	lgV_{sw}	T_{sw}	lgU_{sw}	Ek_{sw}	$G*10^{-11}{}_{sw}$	α_{Vsw}	τ_{kpsw}	ε_{sw}	σ_{sw}	$Lg\eta_{sw}$	η_{sw}
2025	1	81.07	44.03	4.5	-10	12.1	19.38	16.24	1322.65	3.147	3.15	1.72391	2.67E-05	0.0025	0.04258	0.0734	19.892	7.80E+19
2025	1	78.96	44.2	4	-10	11.2	18.46	15.36	1504.69	3.097	3.1	1.54738	2.97E-05	0.00224	0.05285	0.08177	18.967	9.27E+18
2025	1	82.65	41.83	4	-10	11.2	18.46	15.36	1504.69	3.097	3.1	1.54738	2.97E-05	0.00224	0.05285	0.08177	18.967	9.27E+18
2025	1	81.93	41.44	4.5	-10	12.1	19.38	16.24	1322.65	3.147	3.15	1.72391	2.67E-05	0.0025	0.04258	0.0734	19.892	7.80E+19
2025	1	79.06	41.42	4.5	-14	12.1	19.38	16.24	1322.65	3.147	3.15	1.72391	2.67E-05	0.0025	0.04258	0.0734	19.892	7.80E+19
2025	1	73.37	39.21	4	-28	11.2	18.46	15.36	1504.69	3.097	3.1	1.54738	2.97E-05	0.00224	0.05285	0.08177	18.967	9.27E+18
2025	1	80.5	40.41	4.2	-10	11.56	18.83	15.72	1430.7	3.117	3.12	1.61459	2.85E-05	0.00234	0.04854	0.07837	19.343	2.20E+19
2025	1	84.01	41.02	4.4	-10	11.92	19.2	16.06	1358.28	3.137	3.14	1.68627	2.73E-05	0.00245	0.0445	0.07504	19.711	5.14E+19
2025	1	83.56	41.41	4.1	-10	11.38	18.65	15.54	1467.5	3.107	3.11	1.58045	2.91E-05	0.00229	0.05066	0.08006	19.156	1.43E+19
2025	2	83.77	41.23	5	-10	13	20.26	17.06	1150.45	3.197	3.2	1.93246	2.38E-05	0.0028	0.03388	0.06548	20.767	5.85E+20
2025	2	83.92	41.32	4	-10	11.2	18.46	15.36	1504.69	3.097	3.1	1.54738	2.97E-05	0.00224	0.05285	0.08177	18.967	9.27E+18
2025	2	71.77	39.45	4.4	-10	11.92	19.2	16.06	1358.28	3.137	3.14	1.68627	2.73E-05	0.00245	0.0445	0.07504	19.711	5.14E+19
2025	2	82.66	41.99	4.6	-10	12.28	19.56	16.4	1287.43	3.157	3.16	1.76283	2.61E-05	0.00256	0.04072	0.07178	20.071	1.18E+20
2025	2	82.76	41.96	4.3	-10	11.74	19.02	15.89	1394.29	3.127	3.13	1.64984	2.79E-05	0.00239	0.04649	0.0767	19.528	3.37E+19
2025	3	82.67	42	4.9	-10	12.82	20.09	16.9	1184.11	3.187	3.19	1.88783	2.44E-05	0.00274	0.0355	0.06703	20.596	3.94E+20
2025	3	80.1	44.52	4.1	-14	11.38	18.65	15.54	1467.5	3.107	3.11	1.58045	2.91E-05	0.00229	0.05066	0.08006	19.156	1.43E+19
2025	3	72.75	40.54	4.1	-10	11.38	18.65	15.54	1467.5	3.107	3.11	1.58045	2.91E-05	0.00229	0.05066	0.08006	19.156	1.43E+19
2025	3	71.72	39.28	4.3	-10	11.74	19.02	15.89	1394.29	3.127	3.13	1.64984	2.79E-05	0.00239	0.04649	0.0767	19.528	3.37E+19
2025	3	75.08	41.6	4.1	-10	11.38	18.65	15.54	1467.5	3.107	3.11	1.58045	2.91E-05	0.00229	0.05066	0.08006	19.156	1.43E+19
2025	3	84.19	40.8	4	-10	11.2	18.46	15.36	1504.69	3.097	3.1	1.54738	2.97E-05	0.00224	0.05285	0.08177	18.967	9.27E+18
2025	3	73.01	42.72	4.9	-10	12.82	20.09	16.9	1184.11	3.187	3.19	1.88783	2.44E-05	0.00274	0.0355	0.06703	20.596	3.94E+20
2025	3	72.96	42.73	4.5	-24	12.1	19.38	16.24	1322.65	3.147	3.15	1.72391	2.67E-05	0.0025	0.04258	0.0734	19.892	7.80E+19
2025	3	83.71	41.38	4.1	-10	11.38	18.65	15.54	1467.5	3.107	3.11	1.58045	2.91E-05	0.00229	0.05066	0.08006	19.156	1.43E+19
2025	4	72.77	40.54	4.3	-10	11.74	19.02	15.89	1394.29	3.127	3.13	1.64984	2.79E-05	0.00239	0.04649	0.0767	19.528	3.37E+19
2025	4	83.76	40.69	4.4	-10	11.92	19.2	16.06	1358.28	3.137	3.14	1.68627	2.73E-05	0.00245	0.0445	0.07504	19.711	5.14E+19
2025	4	79.69	44.8	4.3	-10	11.74	19.02	15.89	1394.29	3.127	3.13	1.64984	2.79E-05	0.00239	0.04649	0.0767	19.528	3.37E+19
2025	4	81.19	42.29	4.2	-10	11.56	18.83	15.72	1430.7	3.117	3.12	1.61459	2.85E-05	0.00234	0.04854	0.07837	19.343	2.20E+19
2025	4	82.46	45.52	4.3	-10	11.74	19.02	15.89	1394.29	3.127	3.13	1.64984	2.79E-05	0.00239	0.04649	0.0767	19.528	3.37E+19
2025	4	70.59	39	4.4	-10	11.92	19.2	16.06	1358.28	3.137	3.14	1.68627	2.73E-05	0.00245	0.0445	0.07504	19.711	5.14E+19
2025	4	84.17	40.87	4.4	-10	11.92	19.2	16.06	1358.28	3.137	3.14	1.68627	2.73E-05	0.00245	0.0445	0.07504	19.711	5.14E+19
2025	5	82.44	41.87	4.5	-10	12.1	19.38	16.24	1322.65	3.147	3.15	1.72391	2.67E-05	0.0025	0.04258	0.0734	19.892	7.80E+19
2025	5	71.83	39.25	4.2	-10	11.56	18.83	15.72	1430.7	3.117	3.12	1.61459	2.85E-05	0.00234	0.04854	0.07837	19.343	2.20E+19
2025	5	73.4	39.31	4.6	-10	12.28	19.56	16.4	1287.43	3.157	3.16	1.76283	2.61E-05	0.00256	0.04072	0.07178	20.071	1.18E+20
2025	5	70.64	39.03	4.5	-10	12.1	19.38	16.24	1322.65	3.147	3.15	1.72391	2.67E-05	0.0025	0.04258	0.0734	19.892	7.80E+19
2025	5	81.89	41.77	4.3	-20	11.74	19.02	15.89	1394.29	3.127	3.13	1.64984	2.79E-05	0.00239	0.04649	0.0767	19.528	3.37E+19
2025	5	78.26	40.99	4.4	-10	11.92	19.2	16.06	1358.28	3.137	3.14	1.68627	2.73E-05	0.00245	0.0445	0.07504	19.711	5.14E+19

2025	5	74.94	41.55	4.2	-10	11.56	18.83	15.72	1430.7	3.117	3.12	1.61459	2.85E-05	0.00234	0.04854	0.07837	19.343	2.20E+19
2025	5	74.96	41.53	4.5	-10	12.1	19.38	16.24	1322.65	3.147	3.15	1.72391	2.67E-05	0.0025	0.04258	0.0734	19.892	7.80E+19
2025	5	82.92	39.6	4.5	-10	12.1	19.38	16.24	1322.65	3.147	3.15	1.72391	2.67E-05	0.0025	0.04258	0.0734	19.892	7.80E+19
2025	5	83.39	42.83	4.2	-10	11.56	18.83	15.72	1430.7	3.117	3.12	1.61459	2.85E-05	0.00234	0.04854	0.07837	19.343	2.20E+19
2025	5	78.37	45.18	4.3	-10	11.74	19.02	15.89	1394.29	3.127	3.13	1.64984	2.79E-05	0.00239	0.04649	0.0767	19.528	3.37E+19
2025	5	81.31	42.12	4.6	-10	12.28	19.56	16.4	1287.43	3.157	3.16	1.76283	2.61E-05	0.00256	0.04072	0.07178	20.071	1.18E+20
2025	6	75.15	41.07	4.5	-10	12.1	19.38	16.24	1322.65	3.147	3.15	1.72391	2.67E-05	0.0025	0.04258	0.0734	19.892	7.80E+19
2025	6	75.26	41.05	5	-10	13	20.26	17.06	1150.45	3.197	3.2	1.93246	2.38E-05	0.0028	0.03388	0.06548	20.767	5.85E+20
2025	6	75.24	41.07	4.1	-10	11.38	18.65	15.54	1467.5	3.107	3.11	1.58045	2.91E-05	0.00229	0.05066	0.08006	19.156	1.43E+19
2025	7	83.38	44.27	4.7	-10	12.46	19.74	16.57	1252.59	3.167	3.17	1.80308	2.55E-05	0.00261	0.03892	0.07018	20.248	1.77E+20
2025	7	72.85	42.97	4.1	-10	11.38	18.65	15.54	1467.5	3.107	3.11	1.58045	2.91E-05	0.00229	0.05066	0.08006	19.156	1.43E+19

Качественный анализ расчётных данных для роев землетрясений в регионе исследования показал:

1. Логарифм удельной плотности энергии сейсмических волн линейно возрастает с увеличением магнитуды
2. Объём очага роя не демонстрирует аналогичной зависимости.
3. Потенциальная энергия сейсмических волн роя определяется преимущественно объёмом очага и в меньшей степени зависит от плотности энергии.
4. Выявлена обратная связь между температурой очага роя и энергией сейсмического события.
5. Рост коэффициента объёмного теплового расширения αv_{sw} с увеличением температуры согласуется с экспериментальными данными и отражает особенности термоупругого поведения пород.
6. Одновременное воздействие температуры в очаге роя и давления приводят к частичной компенсации их влияния на объёмные деформации. В этом случае αv_{sw} - интегральный параметр термоупругих процессов.

Таким образом, на основе современных сейсмологических наблюдений продемонстрирована применимость модифицированной методики расчета физико-механических параметров в очагах роев землетрясений [3-8], что подтверждает универсальность подхода.

Расчёты показали, что деформация в очагах роев и эффективные напряжения возрастают с увеличением температуры в очаге роя, а объёмный модуль упругости роя снижается. При оценке касательных напряжений в очаге роя соответствуют характерным уровням напряжённости в очагах крупных тектонических нарушений. Для региона Северного Тянь-Шаня для роевых скоплений землетрясений выявлены устойчивые обратные связи между магнитудой, энергией сейсмических волн и модулем сдвига, с одной стороны, и температурой, и эффективными напряжениями – с другой.

Выводы. Для региона Северного Тянь-Шаня подтверждается правомерность применимости модифицированной методики расчета физико-механических параметров в очагах роев землетрясений для конкретного диапазона магнитуд.

Установлена устойчивая обратная зависимость между температурой в очаге роя и магнитудой землетрясения, а также энергией сейсмических волн.

Полученные результаты являются научно-практическим подтверждением оценок физико-механических параметров для сейсмических событий других магнитуд и согласуются с ранее опубликованными данными, что подтверждает универсальность предложенного подхода.

Выявленные закономерности имеют важное значение для интерпретации сейсмических процессов и условий в формировании роев землетрясений в регионе исследования.

Литература

1. Тулиани Л.И. Сейсмичность и сейсмическая опасность: на основе термодинамических и реологических параметров тектоносферы. М.: Научный мир. 1999. 216 с.
2. Курскеев А.К. Землетрясения и сейсмическая безопасность Казахстана. Алматы. 2004. 504 с.
3. 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.
4. Лютикова В.С., Литовченко И.Н. Исследование связи между физическими параметрами очаговых зон роев землетрясений // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Сб. материалов XIV Междунар. конф. молодых ученых и студентов. Бишкек. 2022. С. 81-86.
5. Лютикова В.С., Литовченко И.Н. Методика и технология расчета термодинамических и реологических параметров в очаговых зонах землетрясений // Современные техника и

технологии в научных исследованиях. Сб. материалов XVI Междунар. конф. молодых ученых и студентов. Бишкек. 2024. С. 351-358.
6. Литовченко И.Н., Лютикова В.С. Современный этап активизации роев землетрясений в регионе северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий, и термодинамические параметры роев землетрясений // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Материалы докл. Шестой Всерос. тектонофиз. конф., приуроченной к 300-летию Российской академии наук. М.: ИФЗ РАН. 2024. С. 204-207.
7. Litovchenko I.N., Lyutikova V.S. Thermodynamic parameters of earthquake swarms // Papers of the VI International Conference on GIS and Geoinformation Zoning for Disaster Mitigation (GIZ). Almaty. 2025. P. 260-261.
8. Litovchenko I.N., Lyutikova V.S. Thermodynamic parameters of earthquake Swarms // Новости науки Казахстана. 2025. № 3. С. 81-90. https://doi.org/10.53939/1560-5655_2025_3_81.
9. Горбунова Е.А., Шерман С.И. Вероятность сильных (M≥7.5) землетрясений в зонах разломов Центральной Азии (тектонофизический анализ) // Геодинамика и тектонофизика. 2016. 7 (2). С. 303-314. https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-2-0208
10. Региональный каталог (Каталог данных ННЦСНиИ МЧС РК).

УДК 550.34

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИПОЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗА 25 ЛЕТ НА ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОФИЛЯ МТЗ «TIPAGE-ALAI»

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

В данной работе представлен результат сопоставления региональной геоэлектрической модели по профилю «TIPAGE-Alai» и гипоцентров сейсмических событий для оценки распределения сейсмичности по глубине на примере Центрального Тянь-Шаня. Область исследования находится вдоль 73.4° в.д. и ограничена 39°-40.5° с.ш. Для магнитотеллурического профиля «TIPAGE-Alai» рассмотрены сейсмические события за 25 лет с 2000 до 2025 гг. и была сделана соответствующая выборка гипоцентров сейсмических событий для сравнения их распределения с геоэлектрическими объектами-проводниками и изоляторами.

Ключевые слова: гипоцентр, землетрясение, геоэлектрическая модель, МТЗ, Тянь-Шань, Памиро-Алайская горная система.

Введение. В работах [1, 2] была выявлена взаимосвязь аномалий электропроводности, скоростных характеристик и режима сейсмичности литосферы Центрального и Северного Тянь-Шаня. Исследования региональных геоэлектрических моделей продолжились в работах [3-6]. Для дальнейшего анализа было решено выбрать зону Южного Тянь-Шаня в районе зоны сочленения с Памиром. Данная область представляет интерес как для геологов [7-11], так и для геофизиков [12-18]. Основной целью исследования является построение комплексной геомодели на основе составления геоэлектрических особенностей разреза и распределения гипоцентров землетрясений и сопоставление границ раздела геоэлектрических аномалий для региональной геоэлектрической модели вдоль профиля «TIPAGE-Alai» (73.4° в.д.). Рассматриваемый объект, Алайская впадина – это межгорная впадина в пределах Памиро-Алайской горной системы на юге Кыргызстана, сложенная аллювиальными и пролювиальными отложениями, на юге и местами в средней части осложнено моренно-холмистыми грядами. Протягивается с запада на восток между Алайским и Заалайским хребтами на 150 км. Ширина - от 8 до 25 км, площадь - около 1700 км^2. Высота - от 2240 м на западе до 3536 м на востоке [19].

Методы и способы получения данных. Основой комплексной геолого-геофизической модели является глубинный (до 80 км) геоэлектрический разрез, построенный после интерпретации данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Профильная съемка МТЗ выполнялась в 2013 г. с использованием канадской аппаратуры Phoenix MTU-5 [20] в комплекте с неполяризующимися электродами, электрическими диполями [21] и тремя индукционными датчиками МТС-50, ориентированные по сторонам света по буссоли. Проводились измерения 5 составляющих электромагнитного поля. После чего проводилась обработка по стандартной методике [22] с помощью соответствующих программ – SSMT-2000 и MT-Corrector [23], затем качественная интерпретация и инверсия – Rodi-Mackie [24], для получения геоэлектрической модели. Итоговая модель представлена в работе [25].

Для решения поставленной задачи привлекаются каталоги сейсмических событий Международного сейсмологического центра (ISC) и Национального центра информации о землетрясениях NEIC Геологической службы США (USGS), зарегистрированных на территории Республики Кыргызстан вблизи профиля МТЗ «TIPAGE-Alai» за 2000-2024 гг. [26, 27]. Поскольку профиль является изогнутым и координаты эпицентров определяются с некоторой погрешностью, то можно рассмотреть землетрясения, произошедшие в области,

ограниченной с юга 39°, с севера 40.5° с.ш., с запада 72.9° в.д. и с востока 73.9° в.д. (рисунок 1).

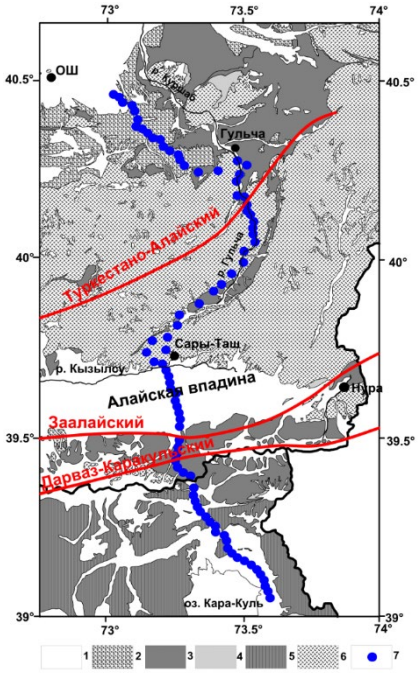


Рисунок 1 – Геологическая карта в районе профиля «TIPAGE-Alai». Отложения: 1 – позднечетвертичные, 2 – неоген-плейстоценовые, 3 – меловые и палеогеновые, 4 – юрские, 5 – триасовые и палеозойские Северного Памира, 6 – палеозойские Тянь-Шаня; 7 – пункты МТЗ-МВЗ по профилю «TIPAGE-Alai». Красные линии – основные разломы. Черные линии – государственные границы [19]

Результаты. В выборку за период 2000-2024 гг. попало 892 землетрясения для рассматриваемой территории. Их пространственное положение показано на рис. 2. Совместный анализ профильного геоэлектрического разреза и распределения поля гипоцентров сейсмических событий выполнен в программе Surfer. Подтвержденные специалистами ISC землетрясения условно разделены на три класса с энергетическими классами 7.24<K<8; 8<K<11; 11<K<16.

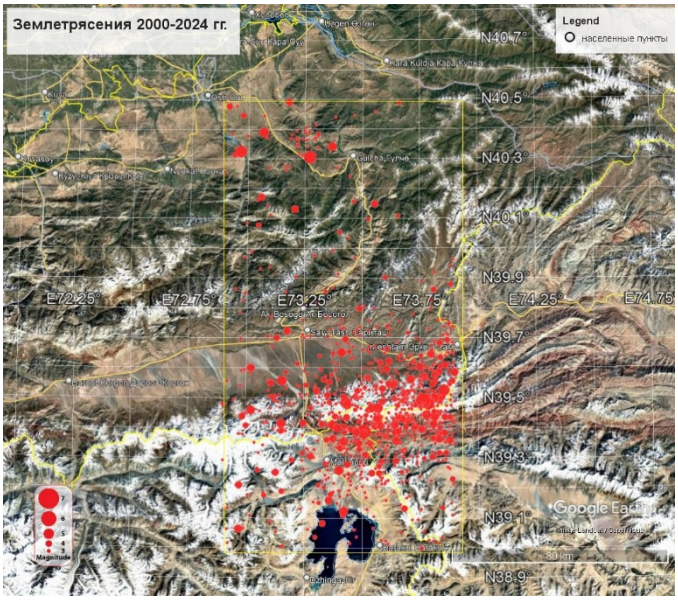


Рисунок 2 – Пространственное распределение гипоцентров землетрясений (2000-2024 гг. по данным Международного сейсмологического центра ISC) вблизи профиля «TIPAGE-Alai» (73.4°±0.5° в.д. и 39°-40.5° с.ш.), построенное в Google Earth

На рисунке 3 показана проекция эпицентров землетрясений на геоэлектрический профиль «TIPAGE-Alai». К сожалению, автоматические решения локации землетрясений по глубине с устойчивыми значениями (0, 10, 30 и 40 км) являются условными, так как используют усредненную скоростную модель, и могут быть ошибочными с погрешностью до 5 км. Поэтому следует обратить внимание на уникальные эпицентральные значения. В южной части разреза (в районе оз. Кара-Куль), где выделяется проводник на глубинах от 15 до 30 км, гипоцентры стараются оконтурить его, т.е. преимущественно не попадают в центр тела с минимальными значениями геоэлектрического сопротивления. Под Заалайским хребтом, где выявляется субвертикальная проводящая зона, соответствующая Главному Памирскому надвигу (ГПН), сосредоточено множество высокоэнергетических землетрясений. Низкоэнергетические землетрясения либо находятся у поверхности, либо в основном в северной части профиля под Алайской впадиной, где определяется мощная субвертикальная проводящая зона, достигающая глубины 100 км и имеющая несколько ответвлений в самой верхней части разреза до глубин 5-10 км. Глубокофокусные очаги (от 40 до 70 км) не имеют четкой дифференциации по величине сопротивления. В целом, можно сказать, что гипоцентры землетрясений тяготеют к зонам изоляторов. Более глубокофокусные землетрясения появляются ближе к южной части профиля, что обусловлено приближением к зоне взаимодействия Памира и Тянь-Шаня. В северной части разреза присутствует изолятор, погружающийся на глубину до 30 км под Туркестано-Алайским разломом. В него попадает около 20 эпицентров сейсмических событий. На границе двух аномалий наблюдается скопление слабоэнергетических землетрясений.

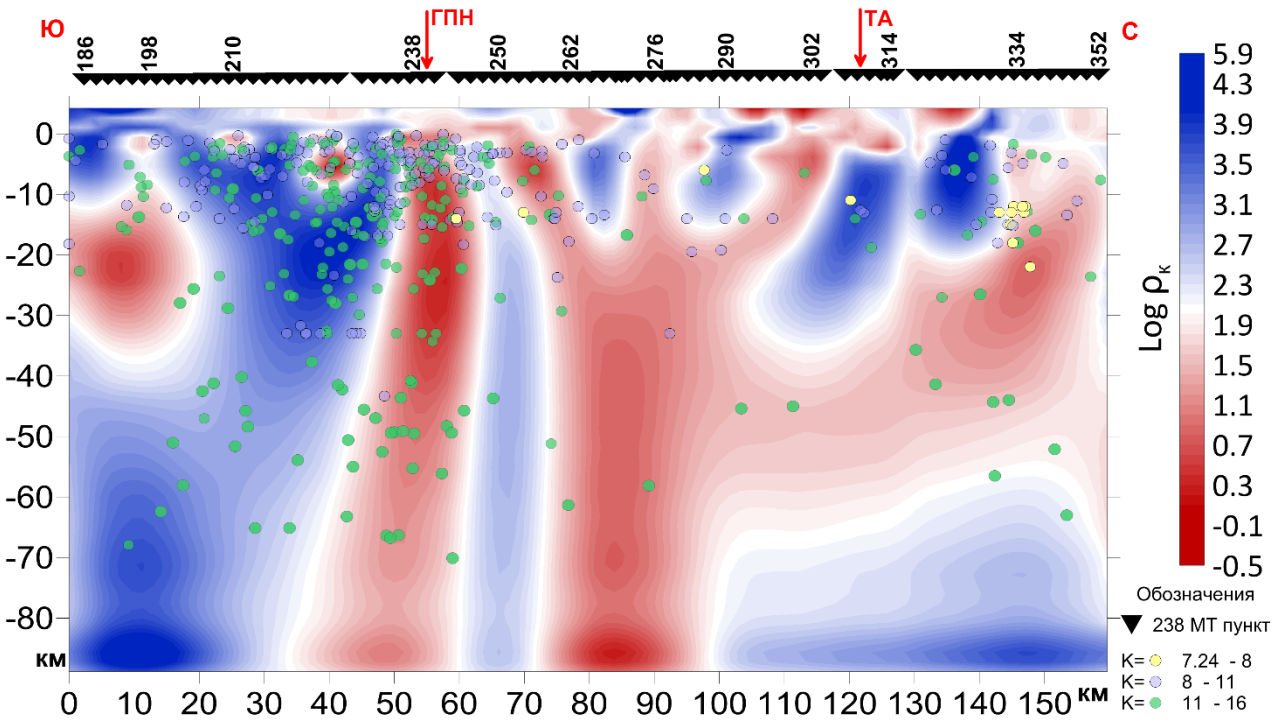


Рисунок 3 – Глубинное распределение эпицентров землетрясений (2000-2024 гг.) в проекции по профилю «TIPAGE-Alai» (73.4°±0.5° в.д. и 39°-40.5° с.ш.), построенное в Surfer по данным Международного сейсмологического центра ISC и NEIC (К – энергетический класс). ГПН – Главный Памирский надвиг (Заалайский на рисунке 1), ТА – Туркестано-Алайский разлом

Выводы. Результат сопоставления относительного расположения гипоцентров землетрясений позволяет выявить взаимосвязь распределения сейсмичности и контуры геоэлектрических аномалий, наблюдаемых в построенной модели «TIPAGE-Alai». Можно

сделать заключение, что скопление гипоцентров находится вблизи глубинных зон деформаций и тяготеют к границам разделов между геоэлектрическими аномалиями. Преимущественно все гипоцентры рассматриваемых сейсмических событий располагаются преимущественно на глубинах не ниже 40 км, за исключением нескольких, не показанных на модели, для которых глубина определена в ~225 км в южной части профиля.

Работа ведется в рамках выполнения государственного задания НС РАН по темам 1025032800006-1-1.5.1 и 1052032800041-4-1.5.1.

Литература

1. Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. Взаимосвязь аномалий электропроводности, скоростных характеристик и режима сейсмичности литосферы Центрального Тянь-Шаня // Литосфера. 2015. № 5. С. 81-89.
2. Рыбин А.К. Геоэлектрические неоднородности земной коры Северного Тянь-Шаня и распределение сейсмичности // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2010. № 2. С. 225-237.
3. Баталев В.Ю., Баталева Е.А. Взаимосвязь между геоэлектрическими характеристиками литосферы Тянь-Шаня и распределением гипоцентров сейсмических событий // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы докл. Шестого Междунар. симп.: к 35-летию Научной станции РАН и 15-летию Международного научно-исследовательского центра - геодинамического полигона. Бишкек: НС РАН. 2015. С. 139-142.
4. Непеина К.С., Баталева Е.А. Особенности распределения гипоцентров землетрясений на геоэлектрических моделях в сейсмоопасных районах Тянь-Шаня // Проблемы геокосмоса: Материалы 13-ой междунар. школы-конференции. СПб: Изд-во ВВМ. 2021. С. 270-278.
5. Непеина К.С., Юнусов А.И. Проявление глубинных структур литосферы Тянь-Шаня в современных геодинамических процессах // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы LII Тектонического совещ. М.: ГЕОС. 2020. С. 107-111.
6. Непеина К.С. Распределение гипоцентров землетрясений на геоэлектрических моделях (на примере профиля МТЗ «Сон-Куль») // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Сб. материалов XIV Междунар. конф. молодых ученых и студентов. Бишкек: НС РАН. 2022. С. 111-115.
7. Coutand I., Strecker M.R., Arrowsmith J.R., Hilley G., Thiede R.C., Korjenkov A., Omuraliev M. Late Cenozoic tectonic development of the intramontane Alai Valley, (Pamir-Tien Shan region, central Asia): An example of intracontinental deformation due to the Indo-Eurasia collision // Tectonics. 2002. V. 21. No. 6. 1053. DOI: 10.1029/2002TC001358.
8. Yang W., Dupont-Nivet G., Jolivet M., Guo Z., Bougeois L., Bosboom R., Zhang Z., Zhu B., Heilbronn G. Magnetostratigraphic record of the early evolution of the southwestern Tian Shan foreland basin (Ulugqat area), interactions with Pamir indentation and India–Asia collision // Tectonophysics. 2015. V. 644-645. P. 122-137. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.01.003.
9. Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В. Структуры Алайской и Кичи-Каракольской впадин и обстановки новейших деформаций в их горном обрамлении (Южный Тянь-Шань) // Литосфера. 2020. 20 (6). 771-790. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-6-771-790.
10. Джумабаева А.Б., Байкулов С., Абдрахматов К.Е., Патыняк М., Ландграф А., Эроусмит Р., Стрекер М. Новые данные по палеосейсмологии на территории Алайской впадины (Юго-Западный Тянь-Шань) // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2022. №1 (19). С. 36-46.
11. Леонов М.Г., Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Матюков В.Е., Щелочков Г.Г. Тектоническое строение и эволюция Гиссаро-Алая и Памира // Геотектоника. 2017. № 6. С. 37-57. DOI: 10.7868/S0016853X17060054.
12. Матюков В.Е. Новые геофизические данные о глубинной структуре зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня // Наука и новые технологии. 2012. № 7. С. 20-24.
13. Леонов М.Г., Рыбин А.К., Матюков В.Е., Баталев В.Ю., Щелочков Г.Г. Гиссаро-Алай и

Памир: сравнительная геодинамика и взаимоотношение // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. IV тектонофиз. конф в ИФЗ РАН. Материалы докл. всерос. конф. с междунар. участием. Т. 1. М.: ИФЗ РАН. 2016. С. 129-138.
14. Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Морозов Ю.А. Лунина О.В., Мазукабзов А.М., Никитин А.В. Мезозойско-кайнозойские внутригорные впадины Тянь-Шаня и Западного Забайкалья: сравнительная характеристика и корреляция событий статья 1. Постановка вопроса. Внутригорные впадины Гиссаро-Алая и Центрального Тянь-Шаня // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. № 3. 826. DOI: 10.5800/GT-2025-16-3-0826.
15. Sass P., Ritter O., Ratschbacher L., Tympel J., Matiukov V.E., Rybin A.K., Batalev V.Y. Resistivity structure underneath the Pamir and Southern Tian Shan // Geophysical Journal International. 2014. V. 198. No. 1. P. 564-579. DOI: 10.1093/gji/ggu146.
16. Zubovich A., Schöne T., Metzger S., Mosienko O., Mukhamediev S., Sharshebaev A., Zech C. Tectonic interaction between the Pamir and Tien Shan observed by GPS // Tectonics. 2016. V. 35. No. 2. P. 283-292. DOI: 10.1002/2015TC004055.
17. Рыбин А.К., Матюков В.Е., Баталев В.Ю., Баталева Е.А. Глубинная геоэлектрическая структура и сейсмичность Памиро-Алайской зоны // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. Бишкек: НС РАН. 2015. С. 208-217.
18. Матюков В.Е. Глубинное строение зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня по данным магнитотеллурических зондирований // Дис. … канд. физ.-мат. наук. Бишкек. 2013. 139 с.
19. Изучение глубинного строения Тянь-Шаня и окружающих областей по комплексу геофизических методов для выяснения взаимосвязи переноса вещества-энергии в земной коре и верхней мантии с пространственно-временным распределением сейсмичности: Отчет о НИР (годовой). Бишкек: НС РАН. 2014. 99 с.
20. Fox L. Satellite-Synchronized 3-D Magnetotelluric System / U.S. Patent № 6 191 587 B1. 2001.
21. Лосихин Л.Н., Матюков Е.К., Пазников В.А., Петров П.П., Тимонин Г.Н. Неполяризующийся электрод для наземной геофизической электроразведки / Патент на полезную модель. RU 123979 U1. 2013.
22. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог-МГУ. 1997. 161 с.
23. Колосов Н.А. Программа просмотра, редактирования и построения гладких сплайн-аппроксимаций частотных зависимостей компонент тензора импеданса (“MT-Corrector”) / Свидетельство на программу для ЭВМ. RU № 2005612195. 2005.
24. Rodi W.L., Mackie R.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // Geophysics. 2001. V. 66. P. 174-187.
25. Rybin A.K., Bataleva E.A., Nepeina K.S., Matyukov V.E. Volumetric and spatial segmentation of the Tien Shan lithosphere according to geophysical data // Geodynamics & Tectonophysics. 2021. 12 (3). P. 508-543. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0537.
26. Каталог ISC-GEM Earthquake Catalogue, International Seismological Centre (2025). https://doi.org/10.31905/d808b825. Дата обращения 14.10.2025.
27. Каталог NEIC. Центр Данных Геологической службы США (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/).

УДК 550.3

ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА ОБСЕРВАТОРИИ «МЕМАМБЕТЦУ» В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА КАМЧАТКЕ МАГНИТУДОЙ 8.8

Рябова С.А.[1,2]
ryabovasa@mail.ru
[1] Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия
[2] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

В работе представлены результаты анализа геомагнитных вариаций в период землетрясения на Камчатке 29.07.2025 г. и его афтершоков. С помощью данных обсерватории «Мемамбетцу» исследована интенсификация вариаций геомагнитного поля, приуроченная к сильному мегаземлетрясению на Камчатке 29.07.2025 г. и его афтершокам. Выделяются длиннопериодные и короткопериодные аномалии, которые можно интерпретировать как результат распространения трех типов волн, генерируемых землетрясениями: сейсмических волн Релея, атмосферных внутренних волн, возбужденных в эпицентре землетрясения, и медленных магнитогидродинамических волн, обусловленных трансформацией атмосферных волн в нижней ионосфере.

Ключевые слова: геомагнитное поле, вейвлет-анализ, аномалия.

Введение. Как известно, мегаземлетрясения, подобные произошедшему на Камчатке 29.07.2025 г. и имевшего магнитуду M=8.8 происходят не часто. Большая мощность события способна возбуждать не только сейсмические, но и атмосферные волны. Последние, в свою очередь, могут воздействовать на ионосферу, позволяя следить за перераспределением выделившейся при землетрясении энергией и даже оценивать ее величину [1].

В настоящей работе посредством измерений на магнитных станциях проводится анализ и интерпретация специфических вариаций геомагнитного поля на станции «Мемамбетцу» в период землетрясения на Камчатке 29.07.2025 г. и его афтершоков.

Землетрясение магнитудой 8,8 произошло 30 июля 2025 г. в 11:24:52 по местному времени (23:24:52 UT, 29 июля) у восточного побережья полуострова Камчатка. Землетрясение произошло в результате неглубокого взбросового сброса на границе зоны субдукции (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/executive). Это было самое мощное землетрясение, зарегистрированное в мире со времен землетрясения Тохоку 2011 года.

Аппаратура и методика обработки. При анализе последствий основного толчка землетрясения на Камчатке 29 июля 2025 г. магнитудой 8.8 и его сильных афтершоков привлекались данные, полученные в результате инструментальных наблюдений, выполненных на обсерватории «Мемамбетцу». Использовались цифровые ряды данных с одноминутной дискретизацией.

В качестве основного метода исследования геомагнитных вариаций был выбран вейвлет-анализ, показавший, в частности, свою эффективность при анализе геомагнитных вариаций [2–4]. Вейвлет-анализ позволяет выявить временные свойства изучаемого сигнала, а также получить информацию о том, в какой момент времени появились те или иные компоненты сигнала [5, 6].

Результаты и обсуждение. На первом этапе выполнения настоящих исследований была проанализирована геомагнитная обстановка в период, включающий время основного толчка землетрясения на Камчатке 29 июля 2025 г. Анализ величины трехчасового геомагнитного планетарного Kp-индекса в момент основного толчка и максимального значения Kp-индекса (Kp_{max}) за период с 18:00 UT 29 июля 2025 г. по 9:00 UT 30 июля 2025 г.,

а также величины геомагнитного ap-индекса в момент основного толчка и максимальной величины ap-индекса (ap_{max}) в период за с 18:00 UT 29 июля 2025 г. по 9:00 UT 30 июля 2025 г. показал, что в период основного толчка землетрясения на Камчатке магнитное поле было невозмущенным. В ходе визуально-сопоставительного анализа и оценки вейвлет-когерентности было получено, что в период землетрясения записи геомагнитных вариаций искажены вариациями магнитного поля, вызванными источниками солнечного происхождения, за исключением восточной горизонтальной компоненты магнитного поля.

С помощью данных обсерватории «Мемамбетцу» исследована интенсификация вариаций геомагнитного поля, приуроченная к землетрясению на Камчатке 29.07.2025 г и его афтершокам. Выделяются как длиннопериодные, так и короткопериодные аномалии, которые можно интерпретировать как результат распространения трех типов волн, генерируемых землетрясениями: сейсмических волн Релея, атмосферных внутренних волн, возбужденных в эпицентре землетрясения, и медленных магнитогидродинамических волн, обусловленных трансформацией атмосферных волн в нижней ионосфере.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий» (№ 125012700798-8) и в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Литература

1. Шалимов С.Л. Атмосферные волны в плазме ионосферы. М.: ИФЗ РАН. 2018. 390 с.
2. Рябова С.А., Шалимов С.Л. О геомагнитных и ионосферных вариациях после сильного извержения вулкана Шивелуч 2023 г. // Физика Земли. 2024. № 4. С. 111–122. DOI: 10.31857/S0002333724040089.
3. Adhikari B., Khatiwada R., Chapagain N.P. Analysis of geomagnetic storms using wavelet transforms // Journal of Nepal Physical Society. 2017. Vol. 4. No. 1. P. 119−124.
4. Riabova S.A. Study of the multifractality of geomagnetic variations at the Belsk Observatory // Doklady Earth Sciences. 2022. Vol. 507. No. 2. P. 299–303. DOI: 10.1134/S1028334X22700489.
5. Meyer Y. Wavelets: Algorithms and applications. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics. 1993. 134 p.
6. Riabova S. Application of wavelet analysis to the analysis of geomagnetic field variations // Journal of Physics Conference Series. 2018. Vol. 1141. DOI: 10.1088/1742-6596/1141/1/012146.

УДК 528.28:551.57

ДАННЫЕ ГНСС КАК ИСТОЧНИК ИССЛЕДОВАНИЯ ТРОПОСФЕРНОЙ ВЛАЖНОСТИ

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

Параметры тропосферной задержки (ZTD, ZHD, ZWD) и суммарное влагосодержание тропосферы (PWV/IWV) по ГНСС наблюдениям, позволяют получать ценную и достоверную информацию об изменчивости тропосферы над исследуемой территорией. Для трех ГНСС станций, расположенных в различных географических и климатических условиях, была проведена оценка суммарного влагосодержания тропосферы (PWV). На близко расположенных станциях (23 км с разницей по высоте около км) коэффициент корреляции PWV составил 0.828. Третья самая удаленная станция на высоте более 4 км, демонстрирует значительно более низкие значения PWV, что обусловлено снижением содержания влаги в атмосфере с ростом высоты над уровнем моря и иными климатическими условиями. Так же имеется закономерная взаимосвязь между изменениями PWV и выпавшими осадками: за 3–24 часа перед осадками наблюдается накопление водяного пара в атмосфере, после достижения максимальных значений PWV снижается за счет конденсации влаги и ее выпадения в виде осадков. Что создает предпосылки для исследования пространственно–временного распределения и многолетней изменчивости тропосферной влажности в сложной горной местности Кыргызстана.

Ключевые слова: гнсс, gnss, ztd, зенитная тропосферная задержка, iwv, pwv, суммарное влагосодержание.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС, GNSS) широко используются для высокоточного позиционирования и мониторинга современных движений земной поверхности. Однако точность ГНСС измерений ограничивается рядом источников погрешностей, из которых один из наиболее значимых – это влияние атмосферы Земли. В вакууме космического пространства радиосигналы GNSS распространяются со скоростью света, тогда как при прохождении через атмосферные слои, в частности через ионосферу и тропосферу, их скорость уменьшается из–за рефракции в среде. Это приводит к дополнительным задержкам сигнала и, как следствие, к погрешностям при определении расстояния между спутником и приемником.

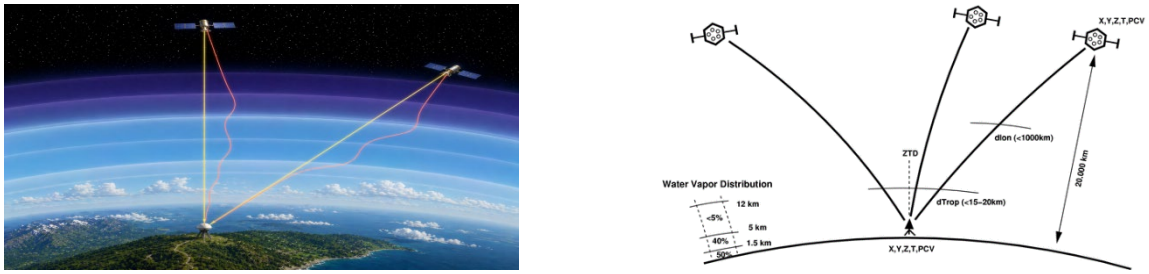
В отличие от ионосферной задержки, которую можно значительно уменьшить с помощью двухчастотных наблюдений, тропосферная задержка не зависит от частоты сигнала и должна оцениваться при обработке ГНСС данных. Неточности в моделировании тропосферной рефракции могут приводить к погрешностям в определении координат от первых до десятков сантиметров, также параметры тропосферной задержки демонстрируют сильную корреляцию с вертикальной компонентой ГНСС станции [1–2]. Рассчитанные значения тропосферной задержки используются не только для повышения точности определения местоположения, но и представляют самостоятельный интерес для метеорологических и климатических исследований [3].

Тропосфера — это нижний плотный слой газовой оболочки Земли, содержащая 80% всей массы воздуха и почти весь водяной пар. Газовый состав тропосферы: азот ~78%, кислород ~21%, аргон и углекислый газ <1%. Толщина тропосферного слоя и влажность постепенно уменьшаются к полюсам: на экваторе достигает 16–18 км и 3–4% влажности, в средних широтах 10–12 км, на полюсах 8–10 км и ~0% влажности. Температура же понижается на 0,65 °C на каждые 100 м подъема, также с высотой уменьшается и плотность воздуха. В

тропосферном слое происходят основные погодные явления – образование облаков, циклоны, антициклоны, атмосферные фронты и осадки.

Тропосфера обладает рефракционными свойствами, и её влияние на распространение сигналов ГНСС спутников практически не зависит от частоты сигнала. Следовательно, сигналы на частотах L1, L2 и L5 подвергаются одинаковой задержке при прохождении через тропосферу. В результате этой задержки измеренное расстояние между спутником и приемником оказывается немного больше, чем истинное расстояние. Величина задержки зависит от состояния атмосферы и длины пути сигнала в тропосфере. Таким образом, при малых углах возвышения спутника, когда сигнал проходит через более толстый слой атмосферы, тропосферная задержка максимальна. И наоборот, для спутника, расположенного в зените непосредственно над приемником, задержка принимает минимальное значение.

Для моделирования тропосферных эффектов в ГНСС используется задержка сигнала в зенитном направлении и называется зенитной тропосферной задержкой (ZTD, Zenith Tropospheric Delay) [4]. Она представляет собой дополнительные миллиметры, которые ГНСС сигнал проходит через тропосферу по сравнению с его распространением в вакууме, и является основным параметром, оцениваемым при обработке ГНСС наблюдений (рисунок 1).



(а) (б)

Рисунок 1 – Рефракция ГНСС сигнала в слоях атмосферы и схематическое представление зенитной тропосферной задержки [3]

Зенитную тропосферную задержку можно рассчитать в таких программах как GAMIT/GLOBK (программа для расчета среднесуточной высокоточной позиции) [5], PRIDE PPP–AR (программа расчета позиции методом PPP) [6].

Для оценки качества результатов, полученных в обеих программах, выполнено сравнение рассчитанных значений ZTD с финальными тропосферными продуктами Международной службы ГНСС (International GNSS Service, IGS [7]), поскольку финальные продукты IGS отличаются наивысшим качеством и внутренней согласованностью. Коэффициент корреляции между временными рядами ZTD составил 0,98–0,99 (рисунок 2). Максимальные расхождения между значениями ZTD, полученными в программных пакетах GAMIT/GLOBK и PRIDE PPP–AR, и соответствующими продуктами IGS находились в диапазоне 13–26 мм, а среднеквадратическое отклонение составило 2.1–2.7 мм. Это свидетельствует о высокой точности моделирования тропосферной задержки и возможности использования полученных данных для последующих метеорологических и климатических исследований.

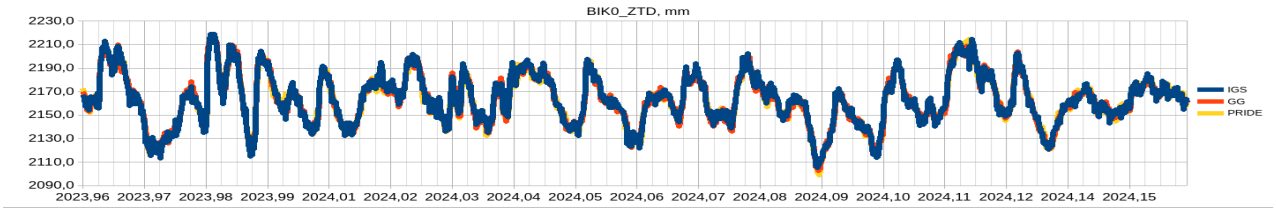


Рисунок 2 – Графики ZTD для одной станции, полученные из программ GAMIT/ GLOBK (красный), PRIDE PPP–AR (желтый) из финальных продуктов IGS (синий)

Зенитная тропосферная задержка состоит из «сухой» и «влажной» составляющих:

- «Сухая» составляющая — гидростатическая зенитная задержка (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD). ZHD составляет примерно 80–90 % от ZTD, легко и достаточно точно моделируется, зависит от давления над станцией и от того на какой широте и высоте расположена ГНСС станция (рисунок 3б).
- «Влажная» составляющая — влажная зенитная задержка (Zenith Wet Delay, ZWD). ZWD обуславливается наличием водяного пара в тропосфере и составляет оставшиеся 10–20 % от ZTD, тяжело моделируется, зависит от температуры и влажности над ГНСС станцией и от того, на какой широте она расположена (рисунок 3в).

На основе влажной зенитной задержки может быть рассчитано суммарное влагосодержание, в англоязычных источниках обозначается как IWV (Integrated Water Vapor) либо же PWV (Precipitable Water Vapor). Суммарное влагосодержание представляет собой количество водяного пара, содержащееся в вертикальном столбе над ГНСС станцией площадью поперечного сечения в 1 м^2, простирающемся от поверхности Земли до верхней границы тропосферы. Численно параметр PWV (IWV) выражается в миллиметрах и соответствует толщине слоя жидкой воды, который образовался бы в случае полной конденсации всего водяного пара в этом столбе тропосферы (рисунок 3г). Этот показатель используется для изучения пространственно–временной изменчивости тропосферной влаги и ее долгосрочные климатические тенденции.

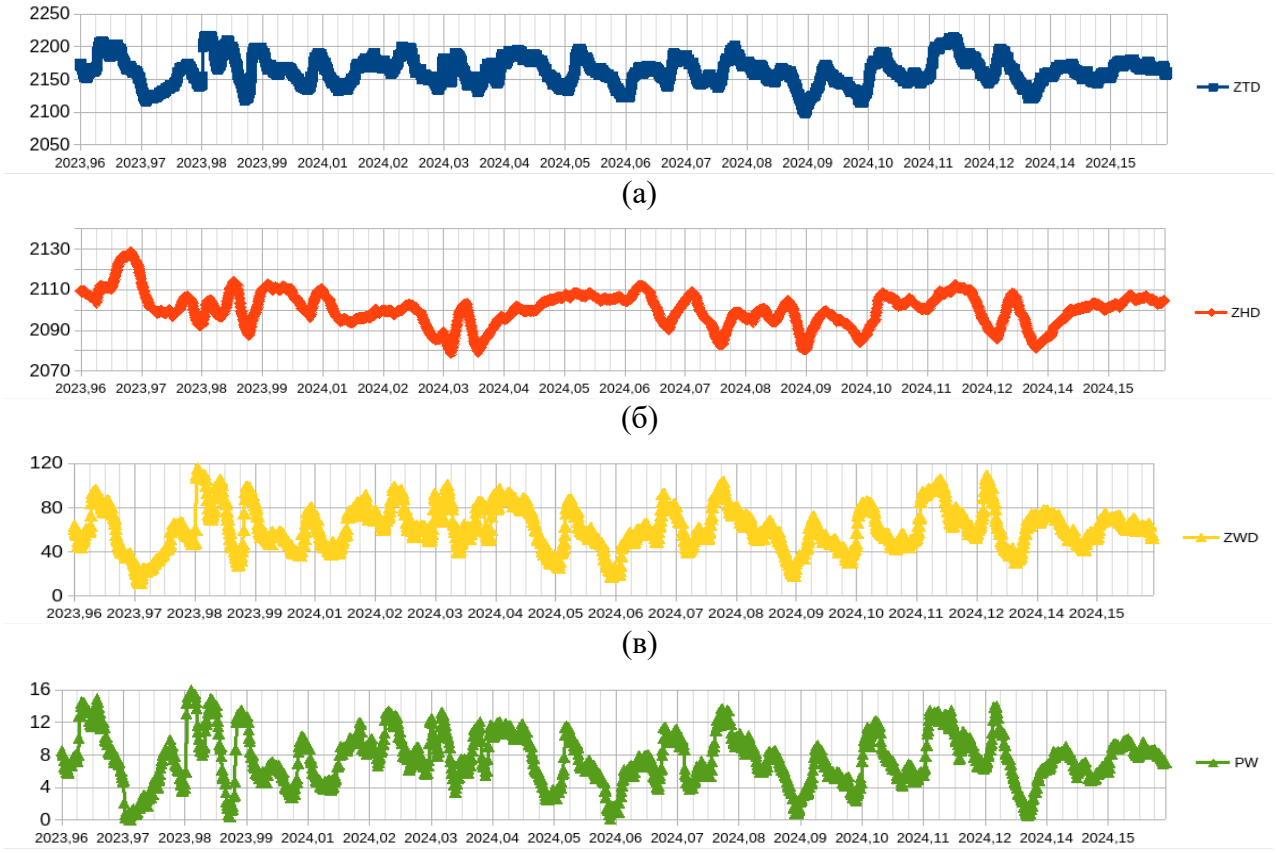


Рисунок 3 – Графики: (а) ZTD; (б) ZHD; (в) ZWD; (г) PWV

Параметры ZTD, ZHD, ZWD и PWV (IWV), полученные с помощью ГНСС, позволяют получать ценную и достоверную информацию о климатической изменчивости, коррелируют с тенденциями изменения температуры, характером осадков и крупномасштабными

климатическими колебаниями. Это отражает научную ценность ГНСС данных и применяется в климатических исследованиях ГНСС–метеорологии [9–10].

Далее рассматривается, как параметр PWV (IWV) меняется в зависимости от расположения ГНСС станций.

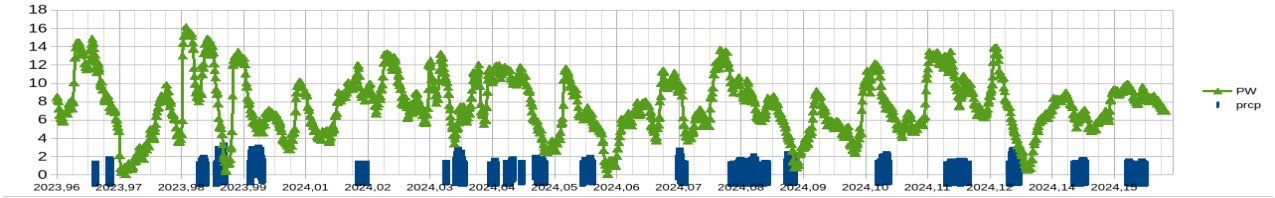
Для трех ГНСС–станций (BIK0, POL2, KMTR) были проанализированы временные ряды суммарного влагосодержания тропосферы PWV (IWV), полученные по данным ГНСС–наблюдений за период 72 дня, и сопоставлены с данными осадков ближайших метеорологических станций из архивных метеорологических сводок [11].

ГНСС станция BIK0 расположена в городе Бишкек на высоте 744 м. В 23 км от нее в предгорной местности на высоте 1714 м расположена станция POL2. И самая удаленная станция KMTR (более 300 км) расположена в высокогорье на высоте 4158 м (рисунок 4).

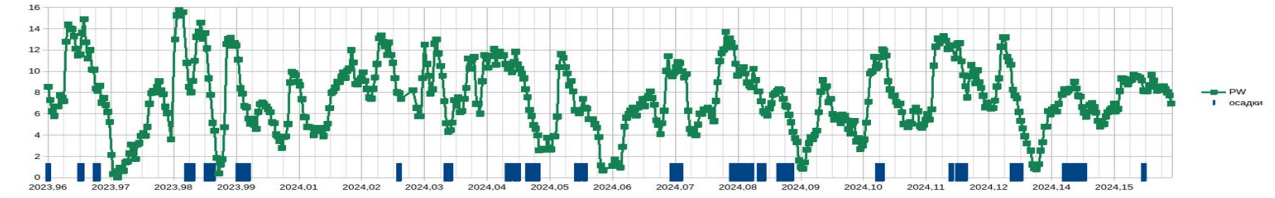


Рисунок 4 – Расположение ГНСС станций BIK0, POL2, KMTR

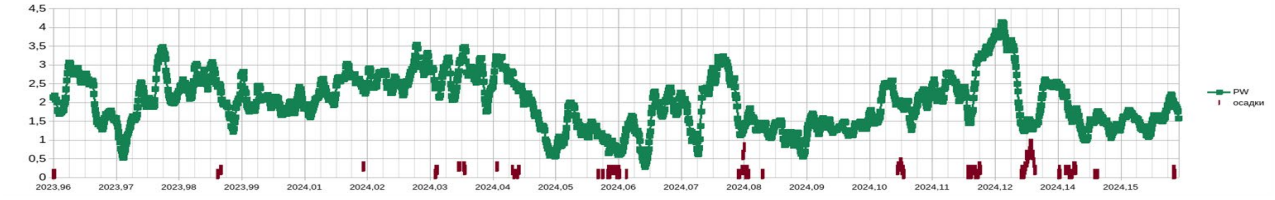
Значения суммарного влагосодержания тропосферы PWV (IWV) для станций BIK0 и POL2 за исследуемый период составляют порядка 0.05–16.2 мм, коэффициент корреляции между временными рядами составляет 0.83. Это обусловливается близким расположением станций, сходством сезонной изменчивости атмосферной влажности несмотря на различия в рельефе местности и высоте. Климат над станцией KMTR более засушлив, PWV составляет 0.05–4.22 мм (рисунок 5).



BIK0



POL2



KMTR

Рисунок 5 – Графики суммарного влагосодержания тропосферы PWV над ГНСС станциями BIK0, POL2, KMTR и выпавшие осадки (столбики)

Согласно графикам (рисунок 5) перед выпадением осадков наблюдается накопление атмосферной влаги, сопровождающееся увеличением значения PWV. После достижения локального максимума интенсивность водяного пара начинает снижаться, и осадки регистрируются через 3–24 часа после него. Следовательно, динамику PWV можно рассматривать как индикатор подготовки атмосферы к образованию осадков и использовать для мониторинга метеорологических явлений.

Полученные результаты подтверждают возможность использования измерений PWV, полученных с помощью ГНСС, для изучения содержания влаги в тропосфере и мониторинга процессов образования осадков. Так же Научная станция РАН с 1994 года обслуживает более 300 ГНСС пунктов на территории Кыргызстана, что создает предпосылки для исследования пространственно–временного распределения и многолетней изменчивости тропосферной влажности в сложной горной местности Кыргызстана.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований по теме «Исследование современных движений земной коры Тянь-Шаня и прилегающих территорий методами наземной и космической геодезии» (АААА-А20-120102190010-5).

Литература

1. Fang P., Bevis M., Bock Y., Gutman S., Wolfe D. GPS meteorology: Reducing systematic errors in geodetic estimates for zenith delay // Geophysical Research Letters. 1998. Vol. 25. No. 19. P. 3583–3586. DOI: 10.1029/98GL02755.
2. Tregoning P., Boers R., O'Brien D., Hendy M. Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1998. Vol. 103. No. D22. P. 28701–28710. DOI: 10.1029/98JD02516.
3. Guerova G., Jones J., Douša J., Dick G., de Haan S., Pottiaux E., Bock O., Pacione R., Elgered G., Vedel H., Bender M. Review of the state of the art and future prospects of the ground–based GNSS meteorology in Europe // Atmospheric Measurement Techniques. 2016. Vol. 9. No. 11. P. 5385–5406. DOI: 10.5194/amt–9–5385–2016.
4. Yao Y., Xu C., Zhang B. et al. Development and evaluation of the refined zenith tropospheric delay (ZTD) models // Satellite Navigation. 2021. Vol. 2. Article 24. DOI: 10.1186/s43020–021–00052–0.
5. Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK: Release 10.7. MIT, 2018a. 54 p.
6. Geng J, Chen X, Pan Y, Mao S, Li C, Zhou J, Zhang K (2019). PRIDE PPP–AR: an open–source software for GPS PPP ambiguity resolution // *GPS Solutions. 2019.* 23(91). 1–10. DOI:10.1007/s10291–019–0888–1.
7. The International GNSS Service (IGS) [Электронный ресурс]. 2026. Режим доступа: https://igs.org/wg/troposphere/#data (24.04.2026).
8. Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System // Journal of Geophysical Research. 1992. Vol. 97. No. D14. P. 15787–15801.
9. Ding J., Chen J., Tang W., Song Z. Spatial–Temporal Variability of Global GNSS–Derived Precipitable Water Vapor (1994–2020) and Climate Implications // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. No. 14. Article 3493. DOI: 10.3390/rs14143493.
10. Jin S., Park J.–U., Cho J.–H., Park P.–H. Seasonal variability of GPS–derived zenith tropospheric delay (1994–2006) and climate implications // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2007. Vol. 112. No. D9. Art. D09107. DOI: 10.1029/2006JD007772.
11. rp5.ru: Расписание погоды [Электронный ресурс]. 2026. Режим доступа: https://rp5.ru/ (24.04.2026).

УДК 550.34

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ И МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ГРАДИЕНТНОЙ УСТАНОВКИ

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

В рамках исследования геодинамических процессов на режимном пункте, на территории Научной станции Российской академии наук в г. Бишкек, в октябре 2023 г. была сформирована система сейсмического мониторинга на основе многоканальной сейсморегистрирующей градиентной установки. Основная задача мониторинга заключается в определении направления распространения сейсмического поля и в обработке данных с целью вычисления энергетических характеристик по трем компонентам X, Y, Z. В 2025 г. была проведена работа по усовершенствованию градиентной установки, с помощью внедрения современных трехкомпонентных сейсмодатчиков GS-ONE фирмы Geospace. Также необходимо было доработанную систему сейсмического мониторинга оптимизировать к существующему измерительному тракту аппаратуры. Цель данного исследования – проведение сравнительного эксперимента между регистрируемыми сигналами от действующей и модернизированной систем сейсмического мониторинга. Приводится описание анализа результатов проведенного эксперимента.

Ключевые слова: система сейсмического мониторинга, многоканальная сейсморегистрирующая градиентная установка (МСГУ), трехкомпонентный сейсмодатчик GS-ONE.

Введение. Изучение сейсмического поля тесно связано с изменением напряженно деформационного состояния в литосфере. Сейсмическое поле отражает стадии активизации напряжений: от мелких трещин (высокие частоты) к крупным разрывам (низкие частоты). Система сейсмического мониторинга на основе МСГУ позволяет осуществлять длительную регистрацию сейсмического сигнала. Градиентная установка улавливает волны, приходящие на разные датчики в разное время, поступательные движения почвы во фронте волны дают информацию о ее скорости, что позволяет вычислить пространственные производные сейсмического поля. Именно благодаря вычислению пространственных производных становится возможным решить систему уравнений для определения вектора фазовой скорости, и соответственно, направления прихода волны от источника сейсмического сигнала.

Система сейсмического мониторинга на основе МСГУ. Разработанная в НС РАН градиентная установка включает семь блоков сейсмических датчиков, расположенных вблизи земной поверхности в соответствии со схемой (рисунок 1, а). Размеры установки охватывают крайне малый объем среды равный 1 м^3. Каждый трехкомпонентный сейсмоприемник состоит из трех сейсмических датчиков, двух горизонтальных (X, Y) и одного вертикального (Z), закрепленных на общем основании [1]. В качестве сейсмических датчиков используются датчики скорости смещения GS–20DS фирмы Geospace (рисунок 1, б). Под трехкомпонентным сейсмоприемником понимается устройство регистрации всех трех компонент сейсмического поля (S_x, S_y, S_z, где S – смещение) в одной точке. Регистрация данных производится кадрами по всем каналам, с частотой дискретизации 1 кГц. Сигналы от семи блоков сейсмических датчиков, что соответствует 21 измерительному каналу, поступают через блок соединения сигналов на входы аналого-цифрового преобразователя-регистратора Е-502. Для минимизации максимального времени задержки выборки сигнала между измерительными каналами выбирается максимально возможная частота преобразования АЦП, равная 2 МГц.

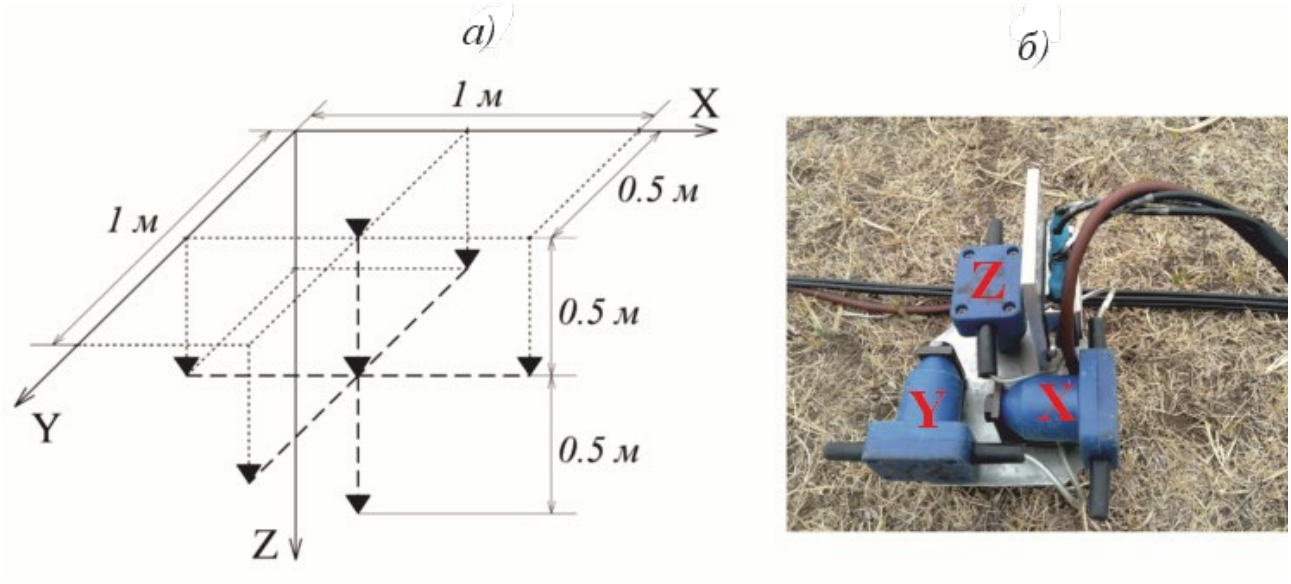


Рисунок 1 – Общий вид трехкомпонентной градиентной установки регистрации высокочастотного сейсмического сигнала (а) и блок сейсмических датчиков GS–20DS (б). Плоскость XY соответствует дневной поверхности, ось Z направлена вниз; ▼ - трехкомпонентные сейсмоприемники; расстояние между парой ближайших сейсмоприемников по каждой из осей координат равны

Программное обеспечение МСГУ необходимое для регистрации сейсмического поля и последующей обработки зарегистрированных данных состоит из трех программ:

1) программа регистрации сигналов - ***x502_Registrator*** [2], на основе данной программы выполняется, регистрация сигналов, с возможностью их визуализации в режиме реального времени, а также настройка параметров и режимов работы измерительных каналов;

2) с помощью второй программы - ***ExpDataProc_x64.exe*** [3], производится просмотр и предварительная обработка данных регистрации сигналов измерительных датчиков;

3) на базе третьей программы, реализованной в программной среде **MATLAB**, выполняется математическая фильтрация зарегистрированных данных по направлению распространения сейсмического поля [4, 5].

Техническое улучшение системы сейсмического мониторинга на основе МСГУ. В полевых условиях использование сейсмоприемников GS–20DS сопровождается рядом ограничений. Главным недостатком является открытая конструкция, требующая дополнительной защиты соединительных линий, что снижает общую надежность оборудования. Кроме того, физический износ датчиков ограничивает точность регистрируемых сигналов. Возникает необходимость замены сейсмодатчиков GS–20DS на современные трехкомпонентные сейсмодатчики. Обновление МСГУ, должно достигаться заменой блоков сейсмоприемников, на более современные, улучшенные сейсмодатчики без изменения структуры аппаратной части.

На основе проведенного сравнительного анализа различных типов сейсмоприемников, учитывающего их технические параметры, стоимость, эксплуатационных условий были приобретены трехкомпонентные сейсмодатчики GS-ONE [6] (рисунок 2, а). Новые датчики GS-ONE соответствуют следующим базовым требованиям:

- наличие аналогового выхода для совместимости с применяемым модулем аналого-цифрового преобразователя E-502. Это позволяет реализовать последовательное считывание сигналов и обеспечивает многоканальную синхронизацию при сборе данных;
- регистрация сейсмических колебаний по трем взаимно перпендикулярным осям в едином корпусе;

- по частотным характеристикам новые сейсмодатчики не уступают существующим.

При выборе новых сейсмоприемников, обеспечивалась полная совместимость с действующей системой сейсмического мониторинга, сохранились и улучшились параметры чувствительности, а также учитывались особенности монтажа и условия эксплуатации. Конструкция геофона обеспечивает регистрацию колебаний по трем взаимно перпендикулярным осям в едином корпусе. Сейсмодатчик GS-ONE обладает чувствительностью, примерно в четыре раза превышающей чувствительность ранее применяемых геофонов GS-20DX. Доработанная градиентная установка включает семь трехкомпонентных сейсмодатчиков GS-ONE (рисунок 2, б), расположенных вблизи земной поверхности в соответствии со схемой (рисунок 1, а), изображенной выше.



Рисунок 2 – Внешний вид трехкомпонентных сейсмоприемников GS-ONE

Основное техническое переоснащение заключалось в упрощении конструкции МСГУ, усилении надежности конструкции сейсмоприемников, улучшении эксплуатационных характеристик и качества получаемых с ее помощью сейсмических данных. Новые сейсмоприемники GS-ONE полностью совместимы с существующей конфигурацией МСГУ и не требуют существенной переработки ее регистрирующей части и программного обеспечения.

Совместный сейсмический мониторинг. Проведено несколько экспериментов с новой аппаратурой, в частности новая модификация МСГУ с середины декабря 2025 г. была установлена вблизи действующей МСГУ для проведения совместного сейсмического мониторинга. В рамках данного эксперимента необходимо было, оценить качество регистрируемых сигналов и дать оценку эффективности применения новой градиентной установки для исследования современных геодинамических процессов. Для проведения совместных сейсмических мониторинговых работ каждая МСГУ была оснащена отдельной, индивидуальной, идентичной аппаратной частью; блоком соединения сигналов, модулем аналого-цифрового преобразователя Е-502, блоками питания, внешним персональным компьютером. Регистрация данных производилась кадрами по всем каналам, с частотой дискретизации 1 кГц.

Сравнительный анализ сигналов первичных данных и техногенной помехи. Представлены зарегистрированные сейсмические шумы разными МСГУ, время регистрации составляет 10 минут (рисунок 3).

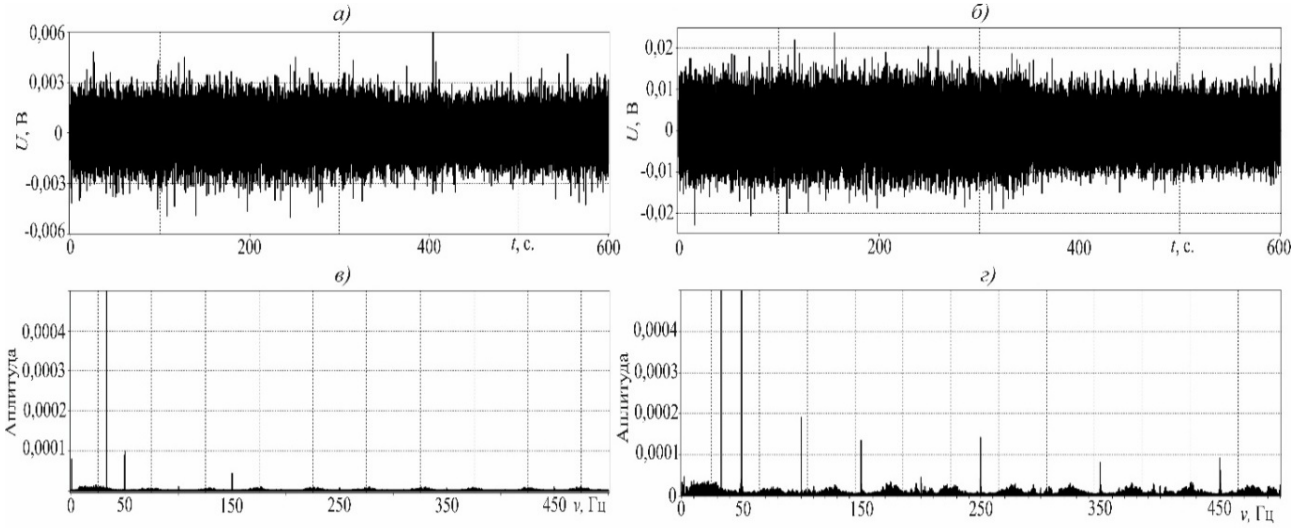


Рисунок 3 – Сигнал, зарегистрированный *действующей* МСГУ: а) – сигнал с датчика «Х», в) – и его спектр; сигнал, зарегистрированный *доработанной* МСГУ: б) – сигнал с датчика «Х», г) – и его спектр

Видно, что зарегистрированные фоновые шумы и их спектры имеют сходный характер и небольшие отличия по амплитуде. Более четкая и детализированная запись сигналов, с помощью геофонов GS-ONE, дает возможность улавливать слабые высокочастотные сигналы от сейсмического поля эндогенного происхождения.

На рисунке 4 приведен пример сравнения техногенной помехи, зарегистрированной одним из каналов действующей и новой МСГУ.

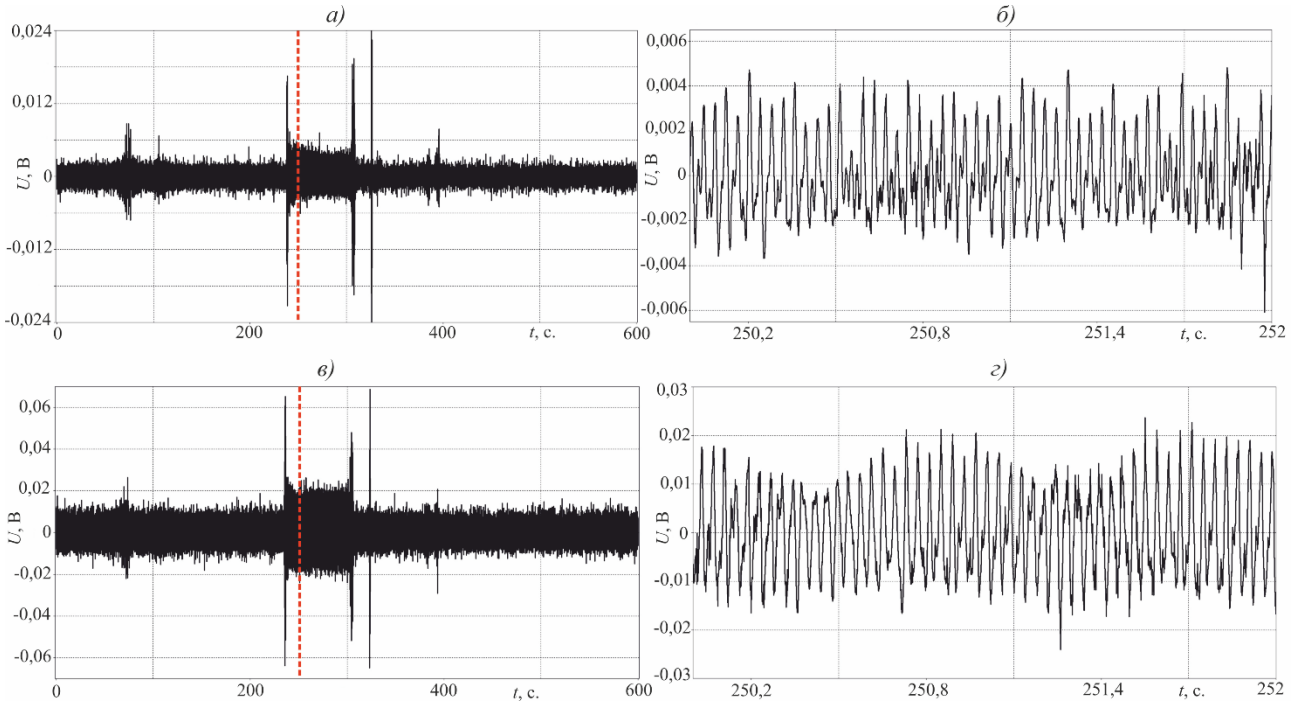


Рисунок 4 – Пример техногенной помехи, зарегистрированной во время работы дизельного генератора *действующей* МСГУ (а), с правой стороны показан увеличенный фрагмент (б); пример техногенной помехи, зарегистрированной во время работы дизельного генератора *новой* МСГУ (в), с правой стороны показан увеличенный фрагмент (г)

Зарегистрированные сигналы имеют аналогичные волновые формы (рисунок 4, а, в), вместе с тем более высокая чувствительность геофонов GS-ONE позволяет более точно

прописать регистрируемый сигнал. Для детального анализа были приведены фрагменты в увеличенном масштабе по времени (рисунок 4, б, г).

Для рассмотрения зарегистрированных сигналов приведен пример сейсмического события, из регионального сейсмического каталога Научной станции РАН, по данным сети KNET (https://doi.org/10.7914/SN/KN). На рисунке 5 приведены примеры сигналов от сейсмического события, произошедшего 19 марта 2026 г. 04:17 (+6 UTC) на территории с. Белогорка с магнитудой 2,75, зарегистрированного одним из каналов действующей и новой ГУ.

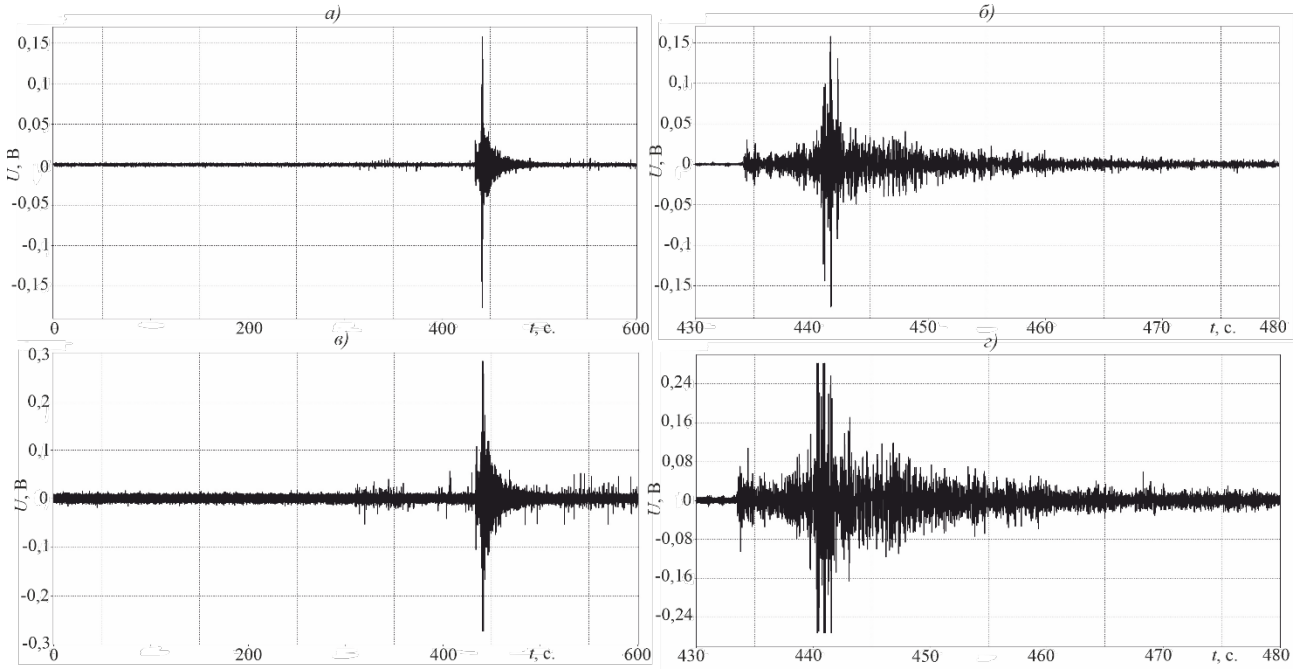


Рисунок 5 – Пример сигнала от сейсмического события, зарегистрированного на измерительном пункте НС РАН *действующей* МСГУ (а), с правой стороны подробнее показано событие (б), изображенное с левой стороны; пример сигнала от сейсмического события, зарегистрированного на измерительном пункте НС РАН *новой* МСГУ (в): с правой стороны подробнее показано событие (г), изображенное с левой стороны

Сигналы схожи между собой идентичны по форме (рисунок 5, а, в), однако датчики на новой аппаратуре характеризуются более высокой амплитудой регистрируемого сигнала, позволяя прописать более детально сигнал от сейсмического события (рисунок 5, б, г).

Результат обработанных данных, полученных от совместного сейсмического мониторинга. На рисунке 6 приведен пример сравнения результатов, обработанных данных за пять суток с 1 по 5 января 2026 г., полученных разными МСГУ. Для сопоставления полученных энергетических характеристик по компоненте X графики представлены в разном (рисунок 6, верхние графики) и в одинаковом (рисунок 6, нижние графики) масштабе по амплитуде. На каждом графике представлены две кривые, одна из которых (обозначена пунктирной линией), показывает результат обработанных данных, зарегистрированных при помощи *новой, усовершенствованной* градиентной установки, а сплошной линией обозначены результаты обработанных данных, полученных при помощи *действующей* градиентной установки, применяемой для сейсмического мониторинга.

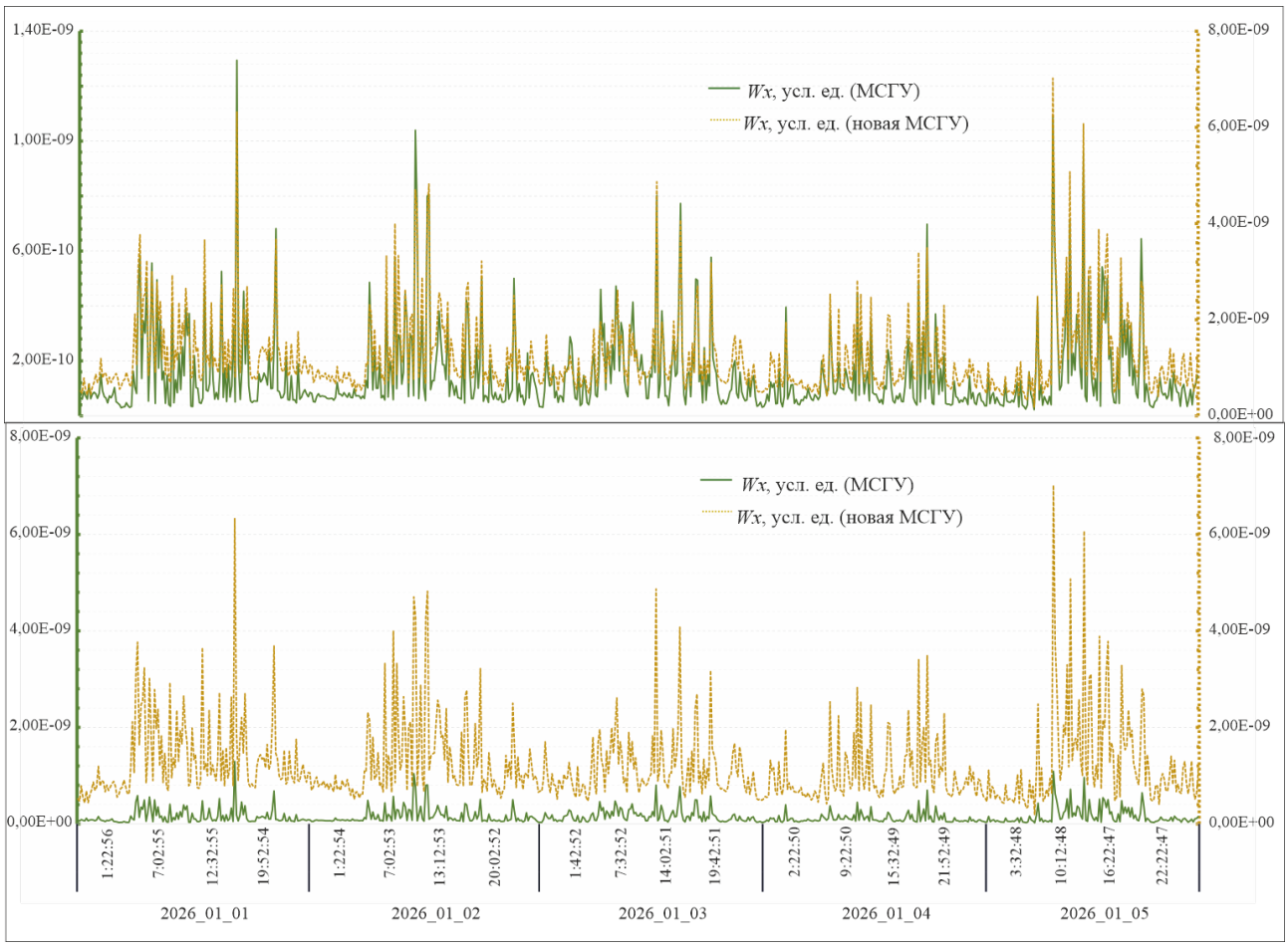


Рисунок 6 – Результат обработки энергетической характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения, Wx – энергетические характеристики сейсмического поля, вычисляемые по компонентам вектора смещения Sx: верхний рисунок – графики представлены в разном масштабе по амплитуде; нижний рисунок – графики представлены в одинаковом масштабе по амплитуде

На рисунке 6 (верхние графики) обработанные данные с разных МСГУ показывают совпадение формы энергетических характеристик регистрируемого сейсмического сигнала. На нижних графиках, представленных на рисунке 6, обработанные записи с датчиков GS-ONE дают возможность получить более высокое значение энергетической характеристики сейсмического поля, по сравнению с обработанными данными записей сигналов с датчиков GS-20DX. Анализ полученных данных показал, что сигналы, полученные от разных геофонов, характеризуются хорошим совпадением по форме, что указывает на их высокую взаимную корреляцию.

Заключение. Применение современных геофонов позволяет повысить эксплуатационные показатели аппаратуры, упрощая развертывание на измерительных пунктах, делая ее надежнее при применении в полевых условиях. По результатам проведенного эксперимента можно отметить, что применение новых геофонов GS-ONE в доработанной системе сейсмического мониторинга на основе МСГУ, позволяет повысить качество регистрируемых слабых высокочастотных сейсмических сигналов. Более высокая чувствительность новых геофонов GS-ONE позволяет улавливать слабые высокочастотные сигналы, что позволяет точнее определять природу эндогенных сейсмических полей.

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. Программа регистрации сигналов сейсмоакустического поля x502_Registrator. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2024690867, 18.12.2024.
3. 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.
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.
5. Стасенко Л.В. Методика обработки данных системы сейсмического мониторинга на основе трехкомпонентной градиентной установки // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2025. Т. 26. № 2. С. 87-95.
6. Коломейцев Д.В. Выбор современных сейсмоприемников для многоканальной сейсморегистрирующей градиентной установки // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов XVII Междунар. конф. молодых ученых и студентов, г. Бишкек, 23-25 апреля 2025 г. Бишкек: НС РАН. 2025. С. 326-331.

УДК 550.348(470.6)

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА OBSPY ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РОЕВ СЛАБЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Темникова З.В.
temnikovazv@gsras.ru
Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба РАН",
г. Обнинск, Россия

Работа посвящена отработке методики исследования роев слабых землетрясений с использованием современного программного инструментария. На основе анализа классических работ по теории классификации [1, 5] обоснован выбор меры различия для иерархического кластерного анализа. Предложен подход, включающий построение огибающих сейсмических записей, вычисление матрицы коэффициентов взаимной корреляции, преобразование её в матрицу несходства и последующую иерархическую кластеризацию с построением дендрограмм. Реализация выполнена с использованием библиотеки ObsPy для обработки сейсмических данных и средств SciPy для кластерного анализа. Методика апробирована на данных сейсмических событий Северного Кавказа.

Ключевые слова: рои землетрясений, иерархический кластерный анализ, ObsPy, Jupyter Notebook, корреляция, матрица несходства, дендрограмма.

Введение. Перед сейсмологами в задачах региональной сейсмичности часто стоит задача исследования фрагментов записей сейсмических событий, предположительно входящих в рой. Рои отражают особенности геофизических процессов, происходящих в земной коре при ее структурообразовании.

В работе [2] высказано мнение, что землетрясения, объединяющиеся в рой, представляют собой генетически однородную группу событий и вызваны, вероятно, одной внешней причиной растрескивания среды на всех иерархических уровнях. Рои землетрясений - это особый вид проявления сейсмической активности, когда за достаточно короткое время, в одном и том же месте, на ограниченной площади, происходит большое количество землетрясений, как правило, малых магнитуд.

Можно предположить, что общий генезис таких событий должен проявиться в значимом подобии сейсмических записей событий, входящих в рой. На этом предположении основывается настоящее исследование.

Ранее в ряде работ по распознаванию природы событий по цифровым записям установлено [3], что классификация событий по форме огибающих записей может иметь высокую эффективность для разделения событий на группы, в том числе на взрывы и землетрясения, а также рои, особенно если записи предварительно отфильтрованы в наиболее информативных полосах частот. При выборе метода классификации сейсмических событий руководствовались общими представлениями классификации событий с использованием иерархического кластерного анализа, изложенными в работе [1].

При выборе инструмента для исследования роев землетрясений необходимо учитывать специфику задачи. Существующие программные решения, широко применяемые в мировой практике, зачастую оптимизированы для иных целей. Например, системы сбора и обработки данных в реальном времени, такие как **SeisComP**, или интерактивные пакеты для визуального анализа, такие как **GeoTool** и **Pyrocko**, являются мощными инструментами для оперативного определения параметров землетрясений, ручного анализа форм волн и детального изучения отдельных событий. Их основной функционал направлен на решение задач мониторинга и локации в условиях ограниченного времени или на интерактивную работу сейсмолога-

аналитика.

Однако для задач настоящего исследования, связанных с **кластеризацией и статистическим анализом больших групп слабых событий**, эти подходы имеют существенные ограничения. Работа с каждым событием вручную в GeoTool при выборке в несколько десятков или сотен землетрясений становится чрезвычайно трудоемкой и субъективной. SeisComP, будучи ориентированным на потоковую обработку, не предоставляет гибких встроенных инструментов для пакетного вычисления матриц взаимной корреляции и проведения иерархического кластерного анализа на исторических (архивных) данных.

В этой связи принципиально иной подход предлагает библиотека **ObsPy**. Разработанная для языка Python и внедряемая также Геологической службой США (USGS), ObsPy не претендует на роль системы обработки потоков данных в реальном времени. Её преимущество заключается в предоставлении исследователю **программной среды, позволяющей гибко автоматизировать вычисления**. ObsPy содержит все необходимые модули для реализации поставленной задачи: от загрузки данных с архивных серверов до специализированных функций кросс-корреляции в модуле obspy.signal и инструментов для визуализации. Таким образом, функционал ObsPy полностью соответствует целям настоящей работы, позволяя перейти от интерактивного анализа единичных событий к автоматизированному статистическому исследованию их совокупностей.

Ключевым преимуществом ObsPy является его тесная интеграция с интерактивной вычислительной средой **Jupyter**. Jupyter — это интерактивная цифровая среда, в которой ученый может объединить программный код, данные, графику и текст в одном документе. Как справедливо отмечает Перкель в журнале Nature [6], Jupyter стал *de facto* стандартом для специалистов по обработке данных. В контексте нашего исследования использование Jupyter выходит далеко за рамки простого редактора кода. Он позволяет создавать так называемые **«вычислительные нарративы» (computational narratives)** — живые документы, которые органично объединяют в себе все этапы научного изыскания:

1. **Программный код:** Написанные на Python скрипты, реализующие все 6 шагов нашего алгоритма — от фильтрации до кластеризации.
2. **Результаты вычислений:** Промежуточные и итоговые данные, включая матрицы коэффициентов корреляции.
3. **Визуализацию:** Все графические материалы, представленные в статье (сейсмограммы, огибающие, матрицы корреляции, дендрограммы), генерируются непосредственно в процессе исполнения кода.
4. **Пояснительный текст:** Научное описание, методология, комментарии к коду и интерпретация полученных графиков.

Такая структура документа несет в себе ряд важных преимуществ для данного исследования:

- **Воспроизводимость:** Любой другой исследователь, получив наш Jupyter notebook и исходные данные, сможет в точности повторить все этапы анализа и убедиться в достоверности полученных результатов. Это соответствует современным стандартам открытой науки.
- **Прозрачность:** Методика обработки данных становится максимально прозрачной. Читатель Jupyter notebook видит не только конечный результат, но и точную последовательность действий и параметры (например, тип фильтра или метод кластеризации), которые к этому результату привели.
- **Интерактивность:** В процессе разработки методики среда Jupyter позволяет быстро менять параметры и тут же видеть, как это влияет на результат кластеризации, что существенно ускоряет отработку методики.

Таким образом, выбор связки **ObsPy + Jupyter** обусловлен не просто удобством, а стремлением сделать исследование максимально строгим, воспроизводимым и методически проработанным.

Итак, целью настоящей работы являлась отработка методики исследования роев с помощью программного продукта для сейсмологов **«ObsPy»** [4]. Алгоритм содержит следующие этапы:

1. Загрузка данных о событиях из файла all.arrival.
2. Для каждого события загрузка волновой формы из файла .mseed.
3. Применение полосовой фильтрации.
4. Построение огибающих волновых форм.
5. Сохранение огибающих в формате .npz.

Для наших целей, огибающие трансформированных записей станции «Кисловодск», отфильтрованные в полосе частот 1–2 Гц, были построены с помощью преобразования Гильберта, реализованного в ObSpy,

Приведем программный код

```
import os
import numpy as np
from obspy import UTCDateTime, read
from obspy.signal.filter import envelope
from obspy.core.event import Catalog, Event, Origin, Arrival, Pick, WaveformStreamID
import matplotlib.pyplot as plt

…
# Вычисление огибающей
data_envelope = envelope(stream[0].data)
```

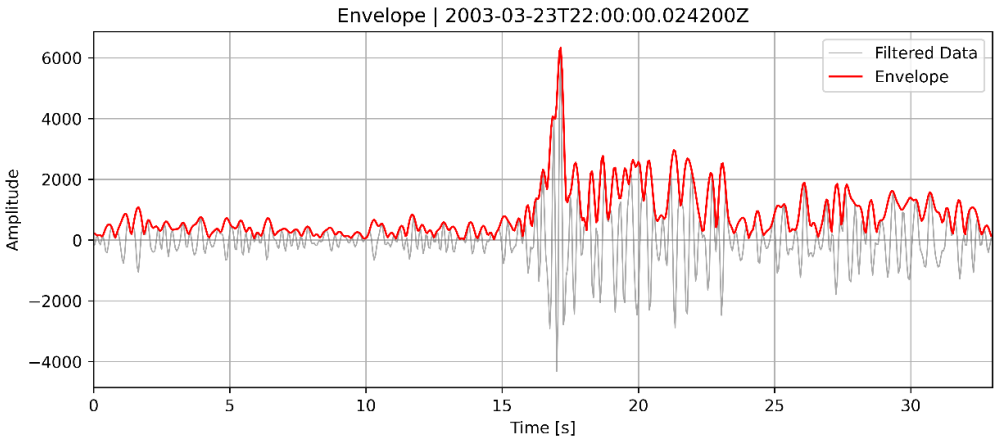


Рисунок 1 − Пример фильтрованной записи и ее огибающей

Вычисление корреляции. Вычисление коэффициентов взаимной корреляции реализовано в нашей программе на языке Python с использованием модуля obspy.signal.cross_correlation [4]. Для каждой пары событий выполняются следующие операции:

1. Загрузка огибающих из файлов .npz, полученных на предыдущем этапе.
2. Извлечение фрагментов фиксированной длины.
3. Нормализация фрагментов (центрирование и приведение к единичной дисперсии).
4. Вычисление коэффициента корреляции Пирсона для каждой пары нормализованных фрагментов.

Коэффициент корреляции Пирсона для двух фрагментов S_1 и S_2 вычисляется по формуле:

$$r_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(s_{1i} - \overline{s_1})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(s_{1i} - \overline{s_1})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}}$$

где s_{1i} и s_{2i} — значения огибающих в i-й момент времени, $\overline{s_1}$, и $\overline{s_2}$ — средние значения, n — число отсчетов во фрагменте.

Векторная реализация этой формулы использует матричное умножение нормализованных данных, что обеспечивает эффективное вычисление матрицы корреляции $R=\{r_{ij}\}$ для всего набора событий.

В функции compute_correlation_matrix:

```
# Центрируем данные (вычитаем среднее)
data_centered = data_matrix - data_matrix.mean(axis=1, keepdims=True)

# Вычисляем нормы (стандартные отклонения)
norms = np.sqrt(np.sum(data_centered**2, axis=1))

# Нормализуем
data_normalized = data_centered / norms[:, np.newaxis]

# Матрица корреляции = произведение нормализованных матриц
corr_matrix = np.dot(data_normalized, data_normalized.T)
```

Преобразование корреляции в меру различия. Для проведения иерархического кластерного анализа необходима не мера сходства, а **мера различия (несходства)** между объектами. Согласно фундаментальному принципу, сформулированному в [1, с. 147], мера различия должна быть **монотонно убывающей функцией** от меры сходства. Это требование обеспечивает сохранение порядка следования объектов по степени их близости при переходе от корреляции к расстоянию.

В классической работе по иерархическим стратегиям [5, с. 1] коэффициент корреляции рассматривается как одна из основных (i,j)-мер, что обосновывает возможность его использования в качестве исходной характеристики для построения матрицы расстояний. Авторы также упоминают возможность использования корреляции в форме $(1-r)$ в иерархических стратегиях [5, с. 3].

В настоящей работе анализ проводится по **огибающим** сейсмических записей. Огибающая, в отличие от исходного сигнала, нечувствительна к фазе колебаний: два сигнала, находящиеся в противофазе, дают идентичные огибающие. Следовательно, знак корреляции теряет физический смысл, и важна только абсолютная величина $|r|$, характеризующая степень подобия форм.

Таким образом, для перехода к мере различия выбрано преобразование:

$$D_{ij}=1-|r_{ij}|$$

где D_{ij} — мера несходства между i-м и j-м событием.

Данное преобразование:

1. Является монотонно убывающей функцией от $|r|$, удовлетворяя требованию Айвазяна [1, с. 147].
2. Является естественным обобщением $(1-r)$, упоминаемого Lance и Williams [5, с. 3], для случая, когда знак корреляции не важен.
3. Даёт значения в диапазоне [0,1], где 0 соответствует максимально сходным событиям ($|r|=1$), а 1 — полностью несходным ($|r|=0$).

Иерархический кластерный анализ. Полученная матрица несходства D_{ij} подаётся на вход процедуры иерархической кластеризации. В соответствии с общей теорией классификации [1, гл. 8], агломеративный алгоритм последовательно объединяет наиболее близкие объекты в кластеры, используя матрицу расстояний для определения близости между ними.

Для пересчета расстояний при объединении кластеров используется общая рекуррентная формула, предложенная Lance и Williams [5, с. 2]:

$$d_{hk}=\alpha_i d_{hi}+\alpha_j d_{hj}+\beta d_{ij}+\gamma|d_{hi}-d_{hj}|$$

где d_{hi} и d_{hj} — расстояния от кластера h до объединяемых кластеров i и j, d_{ij} — расстояние между i и j, а коэффициенты $\alpha_i,\alpha_j,\beta,\gamma$ определяют конкретный метод связи.

Ранее подобные работы, выполнявшиеся в устаревших системах для кластеризации, использовали методы одиночной связи (single linkage), полной связи (complete linkage), метод средней связи (average linkage / UPGMA). Для роев метод одиночной связи не рекомендуется, т.к. **не способен выделять компактные группы**, так как ему достаточно одной близкой пары, чтобы объединить разнородные события. Метод полной связи (complete linkage) создает компактные, хорошо отделенные кластеры с примерно равным диаметром. Поэтому для роев этот метод подходит, если мы ожидаем, что события внутри роя образуют плотное ядро, и важно, чтобы случайные похожие события из разных роев не объединялись. Также можно использовать метод средней связи (average linkage / UPGMA) — не так чувствителен к выбросам, как complete, и не так склонен к цепочкам, как single. Если структура, роя не идеально сферическая, average linkage даст наиболее устойчивый результат. Благодаря ObsPy, появилась возможность использовать **метод Уорда (Ward's method).**

Метод Уорда (Ward's method) минимизирует внутриклассовую дисперсию и стремится создавать компактные, сферические кластеры. Этот метод особенно эффективен для сейсмологических данных, где ожидается, что события в пределах одного роя имеют близкие характеристики. В сейсмологии успешно применяется для анализа **кластеров горных ударов и индуцированной сейсмичности.**

Реализация выполнена с использованием библиотеки scipy.cluster.hierarchy [7]. Матрица расстояний преобразуется в компактную форму функцией squareform, после чего применяется функция linkage с параметром method='ward'.

Визуализация результатов осуществляется с помощью функции dendrogram, которая строит дендрограмму — древовидную диаграмму, наглядно отображающую иерархию объединения событий в кластеры [1, с. 254-255]. Вертикальная ось дендрограммы соответствует значениям матрицы несходства D_{ij}, что позволяет оценить уровни, на которых формируются устойчивые кластеры, и выбрать порог для выделения групп событий.

Результаты. Для выделения сейсмических роев были использованные записи событий из района юго-восточной части Ставропольского края в 42-47 км к северо-западу от г. Моздок, вблизи русла р. Кура. В этом районе ранее неоднократно отмечались рои слабых землетрясений в 2001, 2003, 2008 гг. В феврале, ноябре и декабре 2024 г сетью региональных станций Северного Кавказа в этом районе зарегистрировано около 60 событий, эпицентры которых располагались вблизи уже выделенных роев. Для их классификации применен изложенный ранее алгоритм. Были подобраны сейсмограммы станции «Кисловодск» KIV, расположенной в районе Северного Кавказа соответствующие роям 2003 и 2008 гг., а также записи, за 2024 г., записи которых необходимо было классифицировать.

На рисунке 2 показана матрица несходства, полученная преобразованием $Dij=1-|rij|$. В отличие от матрицы корреляции, здесь все близкие к нулю значения (тёмные тона) соответствуют парам событий с высоким сходством, а близкие к единице (светлые тона) — парам с низким сходством.

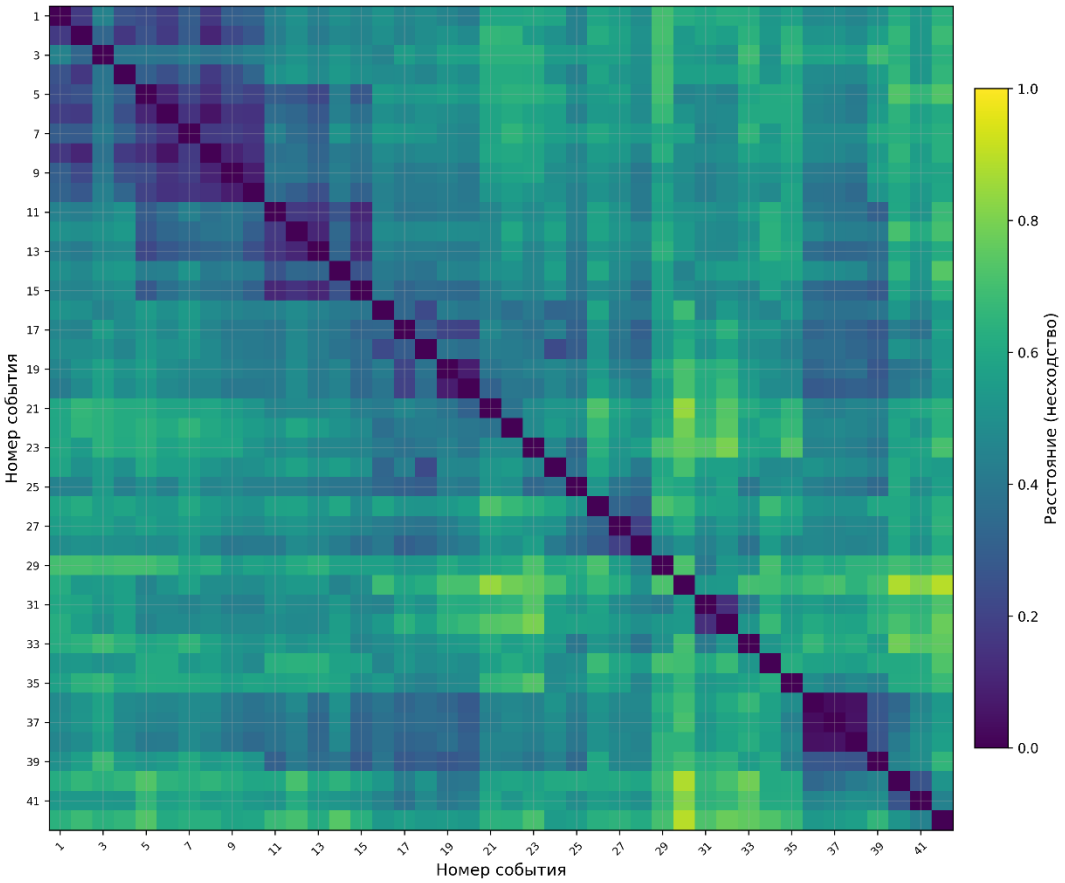


Рисунок 2 − Пример матрицы несходства по Айвазяну для событий из района Северного Кавказа, зарегистрированных станцией KIV

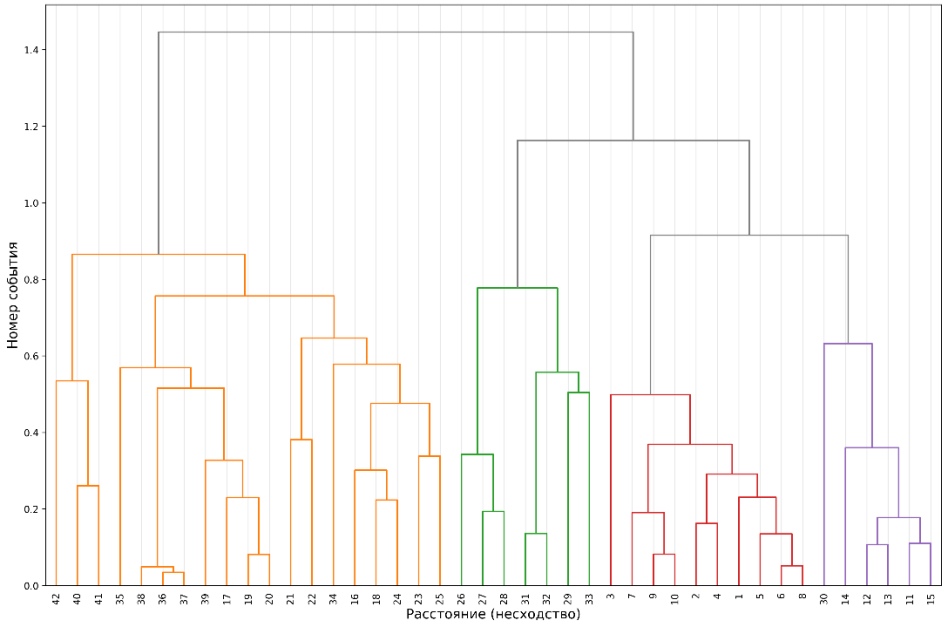


Рисунок 3 − Дендрограмма, построенная по матрице несходства методом Уорда

На рисунке 3 представлена дендрограмма, построенная по матрице несходства методом Уорда. На дендрограмме чётко выделяются несколько кластеров, соответствующих группам событий с высоким уровнем сходства. Анализ временных меток событий в выделенных кластерах подтверждает, что они соответствуют роевым последовательностям — события в

каждом кластере происходят в ограниченный промежуток времени и на ограниченной площади.

Таким образом, использование разработанного на основе ObsPy алгоритма иерархического кластерного анализа (метод полной связи) позволяет исследовать особенности записей сейсмических роев, произошедших в одном районе, но в разные временные интервалы. Непохожесть волновых форм с большой долей вероятности связана возможно с разными глубинами происхождения роев.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00609-26) 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» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/, http://www.gsras.ru/unu/).

Литература

1. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / Под ред. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика. 1989. 607 с.
2. Солоненко Н.В., Солоненко А.В. О природе афтершоковых последовательностей и роев землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Докл. АН СССР. 1986. Т. 290. № 1. С. 85–88.
3. Chernobay I.P., Gabsatarova I.P. Source classification in the Northern Caucasus // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1999. Vol. 133. P. 183–201.
4. Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., Megies T., Behr Y., Wassermann J. ObsPy: A Python Toolbox for Seismology // Seismological Research Letters. 2010. Vol. 81. No. 3. P. 530–533.
5. Lance G.N., Williams W.T. A general theory of classificatory sorting strategies. 1. Hierarchical systems // Computer Journal. 1967. Vol. 9. P. 373–380.
6. Perkel J.M. Why Jupyter is data scientists' computational notebook of choice // Nature. 2018. Vol. 563. P. 145–146. DOI: 10.1038/d41586-018-07196-1
7. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. 2020. Vol. 17. P. 261–272.
8. ObsPy Development Team. ObsPy Documentation [Online]. 2026. URL: https://docs.obspy.org (дата обращени я: 03.03.2026).

УДК 550.3:519.246.8:53.088:551.24

ГЕОДЕФОРМАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ПОДЗЕМНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ НА ТЕРРИТОРИИ НИЦ "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ" – ИФВЭ

Фаттахов Е.А.
fea@ifz.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

На базе НИЦ "Курчатовский институт" – ИФВЭ после длительного перерыва удалось возобновить геодеформационные наблюдения в подземной обсерватории. На глубине 15 метров установлен штольневый наклономер, прецизионные датчики температуры и струнный деформометр. Обеспечена возможность удаленного доступа к регистрируемым сигналам в реальном времени. Наряду с приливными вариациями наклонов, регистрируются телесейсмические события и локальные эффекты, возникающие при прохождении сейсмических волн. Обнаружены аномальные вариации наклонов неизвестного происхождения, требующие дальнейшего изучения.

Ключевые слова: Геофизическая обсерватория Протвино, наклономер штольневый, прецизионные измерения наклонов земной поверхности и температуры, земные приливы, мониторинг ответственных объектов, геодинамический мониторинг, обработка геофизических рядов.

Введение. Систематические наблюдения за наклонами и деформациями земной поверхности в подземной обсерватории Протвино были начаты в 1965 году. Первоначально планировалось, что эти наблюдения явятся составной (геофизической) частью системы комплексного геодеформационного мониторинга особо ответственного объекта – Ускорителя элементарных частиц [1, 2].

В начале 2021 года, в связи с ухудшением гидрогеологической обстановки и резкого увеличения влажности в измерительных помещениях, приборы были извлечены для проведения профилактических мероприятий и осуществления работ по вентиляции подземных помещений.

В 2024-2025 гг. в связи с реализацией проекта исследования по регистрации геодеформаций в подземной обсерватории Протвино, наблюдения были продолжены и дополнены новыми видами мониторинговых измерений. Ниже приведены первые результаты этих наблюдений и предварительные оценки обнаруженных аномалий во временном ходе регистрируемых параметров.

Помимо этого, ведутся работы чтобы включить измерения, проводимые в подземной обсерватории в единую базу данных, в рамках проекта по созданию планетарной лазерной интерферометрической сейсмоакустической обсерватории.

Наклономерные наблюдения в геофизической обсерватории ИФЗ РАН на территории НИЦ "Курчатовский институт" – ИФВЭ. Обсерваторские наблюдения проводятся в специально оборудованном лабораторном помещении на глубине 15 м под землей на территории НИЦ "Курчатовский институт" – ИФВЭ. Конструкция подземной части состоит из 3 штреков длиной 20 м (рисунок 1). В настоящее время измерения проводятся в СЗ и в С-Ю штреках, где установлены наклономер НШ, струнный деформометр, геофон и прецизионные датчики температуры. Блок управления наклономером НШ и регистрирующая аппаратура на основе цифровых преобразователей Zetlab 220, во избежание влияния на прибор, вынесены на поверхность.

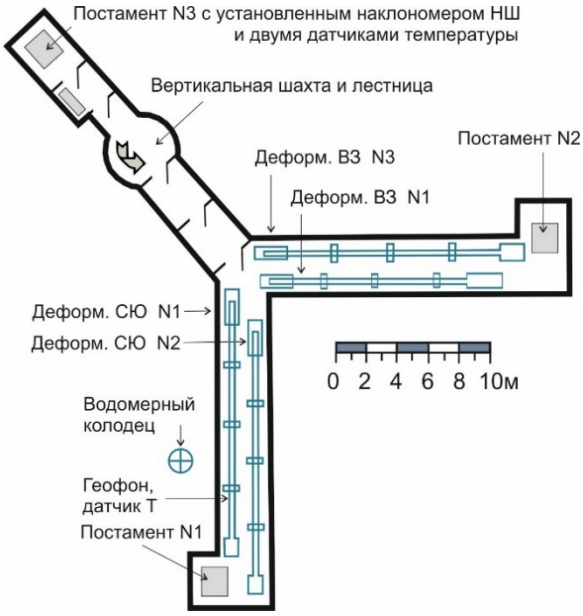


Рисунок 1 – Конструкция геофизической обсерватории ИФЗ РАН в г. Протвино. На постаменте N3 установлен наклономер НШ и прецизионные датчики температуры; в южном штреке около постамента N3 установлены геофон и прецизионный датчик температуры

Необходимость заглубления наклономерных и деформометрических наблюдений под землю обусловлена очень сильным воздействием окружающих техногенных и экзогенных шумов на прецизионные наблюдения. Погружение приборов на глубину 15 метров позволяет точность наблюдений соизмерять с чувствительностью прибора [3, 4]. Благодаря этому, при обработке ранее накопленных в обсерватории данных удалось получить целый ряд приоритетных научных результатов [1, 5, 6].

Наибольшую научную ценность при геодинамическом мониторинге имеют временные ряды большой длительности. Прекращение функционирования хорошо оснащенных научных полигонов, проработавших много лет (как это случилось, например, с Гармским геодинамическим полигоном в Таджикистане [7, 8]), – это всегда большая потеря научной информации. Поэтому возобновление наблюдений в геофизической обсерватории ИФЗ РАН в г. Протвино – важная научная задача, приоритетность которой подчеркивается существенным прикладным значением геодинамического мониторинга на территории особо ответственного (ядерного) объекта.



Рисунок 2 – Слева показан наклономер, установленный на постаменте N3 в С-З штреке. Справа показан блок электроники, который установлен наверху в здании

Под землей (рисунок 2) в С-З штреке обсерватории, на постаменте N3 установлен наклономер НШ [9, 10]. Стоит заметить, что целесообразность установки в обсерватории именно этого типа приборов обусловлена одновременно двумя обстоятельствами. С одной стороны, капитальная конструкция штреков обеспечивает эффективное подавление внешних шумов, что позволяет эксплуатировать в обсерватории высокочувствительные приборы. Более того, только научные приборы высочайшего класса, к числу которых относится и НШ, позволяют реализовать предоставленные возможности в полной мере.

С другой стороны, исключительные характеристики НШ (наклономер штольневый) могут быть реализованы лишь при проведении наблюдений в особо спокойных условиях, с минимальным фоном шумов и помех. Конструкция геофизической обсерватории ИФЗ РАН – это одно из немногих сооружений такого типа в пределах Восточно-Европейской платформы, которое обеспечивает необходимые для НШ условия наблюдений.

На рисунке 3 показаны результаты измерений по каналам С-Ю и В-З. В самом начале сигнала очень хорошо проявляется период «стабилизации» маятника, который занял примерно 10 дней. Далее сигнал вышел на плато. Сильные помехи, сдвиги, возникшие в результате записи землетрясений, которые были обнаружены в сигналах были удалены.

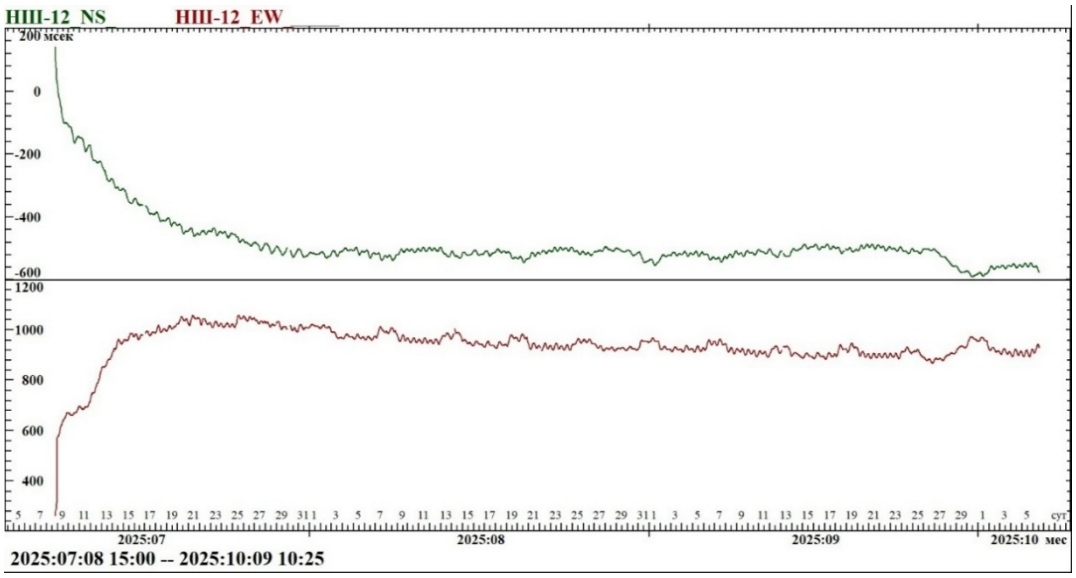


Рисунок 3 – Результаты наклономерных измерений в штреке С-З. Сверху канал С-Ю, снизу канал В-З

В данных любых долговременных наблюдений, приводящихся в полевых условиях, всегда присутствуют аномалии и дефекты различного рода. Причины их появления крайне разнообразны и зависят как от внешних воздействий на контролируемую систему и измерительный тракт, так и от нештатной работы аппаратуры [11]. Не свободны от таких аномалий и наклономерные измерения [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Практикам хорошо известно, что содержательный анализ данных режимного мониторинга возможен только после первичной обработки сигналов, в ходе которой необходимо выявить и устранить все дефекты данных. Примеры таких аномалий в данных НШ приведены на рисунке 4. Архитектура системы первичной обработки данных примерно соответствует конструкции, реализованной при режимных наблюдениях в Баксанской Нейтринной Обсерватории (БНО) [18]. Первичные данные с регистрирующего компьютера загружаются в облако, откуда они автоматически скачиваются на обрабатывающий компьютер. Частота регистрации задана равной 10Гц. С одной стороны, при такой частоте объем получаемых данных адекватен возможностям каналов передачи данных, с другой – обеспечивается возможность подключения в будущем дополнительных датчиков, для которых актуальна более высокочастотная запись (по сравнению с датчиками наклонов и

температуры). Кроме того, при избыточно высокочастотной регистрации обеспечивается более высокое качество первичной обработки дефектов, так как их идентификация и диагностика причин брака становятся более точными. Это, в свою очередь, позволяет корректировать такие дефекты наиболее оптимальным способом [20].

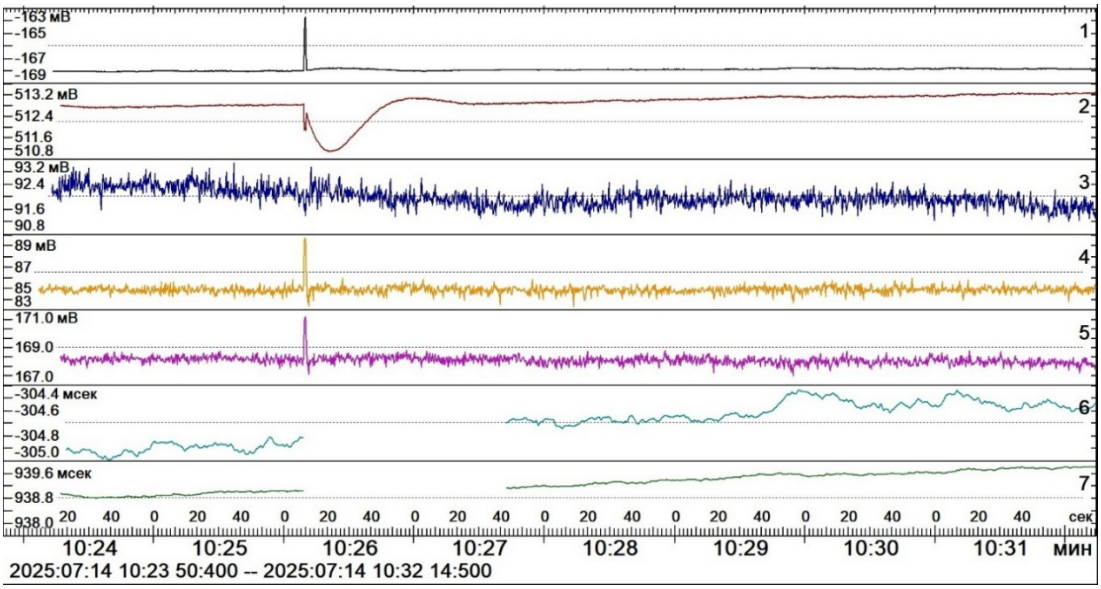


Рисунок 4 – Аномалия в данных НШ на каналах СЮ (кривая 1) и ВЗ (кривая 2). Аномалия также присутствует в данных двух датчиков температуры в СЗ штреке, где установлен НШ (кривые 4 и 5), но отсутствует в данных датчика Т в южном штреке (кривая 3). Кривые 6 и 7 показывают изменения наклонов после редукции аномального фрагмента

Пример аномалии в данных НШ и одновременно на двух каналах температуры показан на рисунке 4. Одновременное появление дефектного сигнала сразу на нескольких каналах позволяет предположить, что его происхождение связано с эффектами в электронике. Заметим, что датчик температуры, расположенный в южном штреке (кривая 3) никакой реакции, не продемонстрировал. Более аккуратная диагностика причин таких аномалий станет возможна после добавления в систему регистрации дополнительных служебных каналов, прежде всего для отслеживания напряжений питания. Однако вне зависимости от точной причины дефекта, необходимость его устранения на всех каналах, где наблюдается аномалия, несомненна.

Программный пакет ABD позволяет удобно реализовать аналогичное версионирование временных рядов [21]. Впервые такой подход был реализован на практике в 2001-2003гг при обработке данных скважинных наблюдений на Камчатке. В настоящее время он применяется при работе с текущими данными геодинамического мониторинга в БНО, на Камчатке и в других регионах [22]. Этот же принцип взят за основу при работе с текущими наблюдениями в обсерватории Протвино. Исходные (неочищенные) ряды сохраняются в базе с первичными данными, а очищенные ряды загружаются в «чистовую» базу данных, которая и используется для анализа изменений наклонов и других контролируемых параметров.

Заключение. Обсерватория Протвино представляет собой уникальное в плане защищенности от внешних помех подземное сооружение, где возможна установка приборов предельно высокой чувствительности. Наклономерные и деформометрические наблюдения в обсерватории с использованием прецизионных приборов проводились непрерывно с 1965 по 2015 г., однако затем были приостановлены. В настоящее время эти наблюдения возобновлены с использованием новых технических средств, обеспечивающих многоканальную высокочастотную регистрацию как полезных сигналов, так и служебных параметров, характеризующих состояние аппаратуры и обсерватории.

Ключевым условием получения достоверной информации о динамике деформационных процессов является эффективное метрологическое обеспечение измерений. Опыт прецизионного мониторинга показывает, что в зарегистрированных сигналах регулярно обнаруживаются эффекты, обусловленные колебаниями температуры в пункте регистрации и другими подобными факторами. Можно сделать вывод, что наряду с усилиями по обеспечению долговременной стабильности условий, в которых работает измерительная и регистрирующая аппаратура, а также характеристик самой этой аппаратуры, не менее важно обеспечить постоянный всесторонний контроль состояния как аппаратуры, так и той среды, где она работает. Для этого необходимо вести непрерывную регистрацию так называемых служебных параметров – температуры, влажности, питающих напряжений в ключевых точках, и т.д.

В настоящее время в обсерватории Протвино проходит опытную эксплуатацию разработанная специально для этих целей система контроля температурного режима. Разрешающая способность электронных термометров достигает 0,0004ºС. Для оценки долговременной стабильности характеристик этой системы применяется специальная методика измерений с дублированием датчиков. Первые полученные с ее помощью результаты показывают правильность выбранного подхода и соответствие технических характеристик системы заложенным требованиям.

Возобновление геодинамических наблюдений в обсерватории Протвино после длительного перерыва открывает новую страницу в ее истории. Модернизированная в соответствии с современными техническими возможностями система регистрации и накопления данных открывает широкие возможности для подключения различных приборов и датчиков. В настоящее время контроль современного напряженно-деформированного состояние верхних слоев земной коры осуществляется комплексом приборов геодинамического мониторинга в составе прецизионного наклономера и горизонтального деформометра. Получаемые данные загружаются в облако, что позволяет контролировать ход измерений в режиме реального времени. Проведение наблюдений в высокозащищенном от внешних воздействий лабораторном комплексе, располагающемся в платформенной области, открывает широкие возможности для проведения методических и метрологических экспериментов, нацеленных на повышение точности измерений и качества получаемых данных, и будет способствовать поиску новых геодинамических эффектов.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-642) и договора на выполнение НИР “Создание планетарной лазерной интерферометрической сейсмоакустической обсерватории”.

Литература

1. Латынина Л.А., Кармалеева Р.М. Деформографические измерения. М.: Наука. 1978. 154 с.
2. Латынина Л.А., Боярский Э.А., Васильев И.М., Сорокин В.Л. Наклономерные наблюдения на подмосковной станции Протвино // Физика Земли. 1997. № 11. С. 86–95.
3. Кузьмин Ю.О. Физические основы современной геодинамики // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 2. С. 5–58. DOI: 10.21455/GPB2023.2-1.
4. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика индуцированных разломов // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 3. С. 5–65. DOI: 10.21455/GPB2023.3-1.
5. Кармалеева Р.М. Некоторые результаты измерений деформаций земной поверхности в асейсмичном районе // Физика Земли. 1997. № 3. С. 32–38.
6. Кармалеева Р.М. О временных вариациях амплитуд земноприливных волн по данным деформографической станции «Протвино» // Физика Земли. 1999. № 5. С. 89.
7. Нерсесов И.Л., Сидорин А.Я., Журавлев В.И. и др. Прогноз землетрясений методом глубинного электрического зондирования земной коры с использованием МГД-генератора «Памир-1» // Доклады АН СССР. 1979. Т. 245. № 1. С. 55–58.
8. Штейнберг В.В. Время и судьбы. М.: Дрофа Плюс. 2008. 624 с. EDN QKGULV.

9. Алешин И.М., Иванов С.Д., Корягин В.Н., Кузьмин Ю.О., Передерин Ф.В., Широков И.А., Фаттахов Е.А. Оперативная публикация данных наклономеров серии НШ на основе протокола SEEDLINK // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53. № 3. С. 31–41. DOI: 10.21455/si2017.3-3.
10. Кузьмин Ю.О., Фаттахов Е.А., Широков И.А. Анализ долговременной стабильности регистрации наклонов параллельными приборами, установленными на едином постаменте // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 4. С. 57–67. DOI: 10.21455/si2020.4-4.
11. Дещеревский А.В. Проблема качества данных при режимном геофизическом мониторинге: кто виноват и что делать? // Наука и технологические разработки. 2024. Т. 103. № 3. С. 3–26. DOI: 10.21455/std2024.3-1.
12. Кузьмин Ю.О. Параметрические эффекты в современной геодинамике // Физика Земли. 2025. № 4. С. 216–236. DOI: 10.31857/S0002333725040153.
13. Кузьмин Ю.О. Современные объемные деформации разломных зон // Физика Земли. 2022. № 4. С. 3-18. DOI: 10.31857/S0002333722040068.
14. Кузьмин Ю.О. Геодинамическая эволюция Центральной Азии и современная геодинамика Копетдагского региона (Туркменистан) // Физика Земли. 2021. № 1. С. 144-153. DOI: 10.31857/S0002333721010051.
15. 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. DOI: 10.21455/gpb2018.2-6.
16. 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. DOI: 10.21455/GPB2023.4-6.
17. Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Фаттахов Е.А. Комплексная методика описания и фильтрации экзогенных эффектов в данных мониторинга, учитывающая вид наблюдений и дефекты экспериментальных данных // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98. № 2. С. 25–60. DOI: 10.21455/std2019.2-2.
18. Кузьмин Ю.О., Собисевич А.Л., Гравиров В.В., Дещеревский А.В., Каменев О.Т., Кузьмин Д.К., Лиходеев Д.В., Медведев В.Н., Петров Ю.С., Преснов Д.А., Фаттахов Е.А. Новый этап геодеформационных наблюдений в подземной геофизической обсерватории «Протвино» ИФЗ РАН // Геофизические процессы и биосфера. 2025. Т. 24. № 4. С. 38-55. DOI: 10.21455/GPB2025.4-3.
19. Гравиров В.В., Дещеревский А.В., Кузьмин Ю.О., Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Широков И.А. Развитие систем прецизионных наклономерных наблюдений в условиях подземной обсерватории // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58. № 1. С. 29–52. DOI: 10.21455/si2022.1-2.
20. Глухов В.Е., Дещеревский А.В. Поиск, систематизация и алгоритмы коррекции аппаратурных дефектов в данных Камчатской сети наклономерных наблюдений за 2010–2019 гг. // Сейсмические приборы. 2025. Т. 61. № 2. С. 50–94. DOI: 10.21455/si2025.2-4.
21. Дещеревский А.В., Журавлев В.И., Никольский А.Н., Сидорин А.Я. Технологии анализа геофизических временных рядов. Часть 1. Требования к программе обработки // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 1. С. 61-82. EDN: VLPCPF
22. Гравиров В.В., Собисевич А.Л., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Канониди К.Х., Дещеревский А.В., Пузич И.Н. Северокавказская геофизическая обсерватория: новые аппаратурные комплексы и результаты // Сейсмические приборы. 2025. Т. 61. № 3. С. 77-99. DOI: 10.21455/si2025.3-5.

УДК 550.84:543.27

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРТАТИВНОГО РАДОНОВОГО МОНИТОРА FYCDY-30 В ИНСТИТУТЕ СЕЙСМОЛОГИИ (СОДЕРЖАНИЕ РАДОНА В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ И В ВОЗДУХЕ)

Хасанова Г.И., Юсупов В.Р., Сагдуллаева К.А., Назаров С.Х., Ризакаева М.А.
gulhayo2026@gmail.com; valijon.yusupov@gmail.ru; sarvarnazarov570@gmail.com; madyyrizakaeva@gmail.com
Институт сейсмологии АН Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

В данной статье описываются конструктивные особенности, принцип работы и практическое применение портативного радонового монитора FYCDY-P30 для измерения концентрации радона в воздухе, грунтовых водах и почве. С учетом радиоактивных свойств радона и его негативного воздействия на здоровье человека, научно объясняется важность использования данного устройства. Выброс радона на поверхность через грунтовые воды тесно связан с геологической структурой, тектонической активностью и сейсмологическими процессами. Поэтому мониторинг концентрации радона широко используется в сейсмологии в качестве геохимического индикатора.

Ключевые слова: радон, радиоактивный газ, альфа-излучение, радоновый прибор, Бк/м^3, калибровка.

Введение. Портативный радоновый прибор Fycdy-P30 предназначен для определения и оценки концентрации газообразного радона в воздухе. Прибор отображает результаты измерений в цифровом виде и представляет количество радона в единицах Бк/л (Беккерель/литр). Радон (Rn-222) – инертный радиоактивный газ, образующийся в земной коре при распаде изотопов урана и радия. Выход радона на поверхность Земли через грунтовые воды тесно связан с геологическим строением, тектонической активностью и сейсмологическими процессами [1, 2]. По этой причине мониторинг концентрации радона широко используется в качестве геохимического индикатора в сейсмологии. Радон – это радиоактивный газ без цвета, запаха и вкуса. Он естественным образом встречается в земной коре. Поскольку радон находится в газообразном состоянии, он легко попадает в воздух из почвы, воды и горных пород. Радон может накапливаться в более закрытых помещениях – в домах, подвалах, шахтах и на нижних этажах. Он быстро распространяется на открытом воздухе, но может накапливаться до опасного уровня в закрытых помещениях.

Нахождение радона в воздухе. Радон – радиоактивный газ, который содержится в воздухе в очень небольших количествах. На открытом воздухе содержание радона очень низкое, потому что он быстро рассеивается. В среднем наружный воздух содержит около 5-15 Бк/м^3 радона. Однако в закрытых помещениях может накапливаться больше радона. Уровни радона, как правило, особенно высоки в подвалах, на чердаках, в домах с плохой вентиляцией и в горных районах. Радон поступает из почвы в комнату через трещины в фундаменте здания, через полости вокруг труб и строительных материалов [5, 6]. Присутствие радона в воздухе не определяется органами чувств человека, так как он бесцветен и не имеет запаха. Поэтому определить его можно только с помощью специальных измерительных приборов.

Подземная гидросфера, простирающаяся на глубину до 30 км, играет важную роль в процессах, происходящих в земной коре. Академик В.И. Вернадский неоднократно подчеркивал связь между химическим и газовым составом подземных вод и физико-механическими процессами в водных породах [9].

В 1984 году в Институте сейсмологии Закировым Тохиром Закировичем была подготовлена диссертационная работа: “Особенности распределения концентрации радона в

подземных водах отдельных сейсмически активных зон Узбекистана (в связи с поиском предвестников землетрясений)". Целью данного исследования является выявление особенностей распределения радона в подземных водах Ташкентского и Ферганского артезианских бассейнов и изучение характера изменения концентрации радона с течением времени в зависимости от сейсмичности региона [9].

В настоящее время работа, проводимая в Институте сейсмологии, является продолжением этого исследования: количество радона в воздухе и в подземных водах измеряется с помощью нового портативного прибора Radon Monitor Fycdy-P30.

Основная часть. В результате радиоактивного распада урана богатые ураном и торием минералы в земной коре (гранит, фосфатные породы) являются источником радона. Эти породы выделяют газ радон в процессе разложения. Радон в подземных водах и почве является одним из наиболее важных геохимических индикаторов и используется для обнаружения химических и физических изменений, предшествующих землетрясениям.

В процессе подготовки землетрясения порода подвергается значительным упругим деформациям. Распространяясь в окружающую среду, эти деформации, в свою очередь, влияют на протекание физико-химических и гидродинамических процессов, проявляющихся в изменении уровня грунтовых вод, расхода, химического, газообразного и радиоактивного состава воды.

Трещины и полости в земной коре позволяют газу радону выходить в воду или в слои воздуха. Уровень радона может быть высоким, особенно если в скалах много трещин.

Концентрация радона повышается из-за открытия или расширения подземных трещин и микротрещин [6, 7]. Радон обычно находится в форме свободного газа и выделяется из горных пород в грунтовые воды [8].

Перед землетрясением концентрация радона увеличивается, а затем возвращается к норме.

В настоящем исследовании проводится научный анализ, связанный с сейсмологическими процессами, на основе значений радона в подземных водах, измеренных Институтом сейсмологии. Рабочий процесс определения содержания радона с помощью прибора Portable Radon Monitor Fycdy-P30 в грунтовых водах из сейсмологической скважины, расположенной в Институте сейсмологии Академии наук Республики Узбекистан, отражен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Рабочий процесс по определению содержания радона в пробах грунтовых вод с помощью портативного радономера Fycdy-P30

На рисунке 1 показан образец грунтовых вод в бутили из Института сейсмологии, подключенный к прибору через шланг и фильтр. Второй шланг подключается к прибору

через влагоудерживающий силикагель и фильтр. Время анализа – 60 минут. Полученные результаты хранятся в приборе и распечатываются в виде чека. В приборе также была проанализирована проба дистиллированной воды. Оказалось, что образец дистиллированной воды тоже содержит элемент радон 0,2539 Бк/л. По результатам измерений было установлено, что объемная активность радона в воде равна 0,2539 Бк/л. Полученный результат значительно ниже допустимых норм, установленных для радона, что свидетельствует о том, что проба дистиллированной воды радиологически безопасна.

Результаты работы портативного радономера при изучении подземных вод из сейсмологической скважины Института сейсмологии Академии наук Республики Узбекистан представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Количество радона в грунтовых водах из сейсмологической скважины

Дата:	Образец	T, ºC	H	P, kPa	V, ml
21.01.2026	0.4952	31.3	44.5	95.4	150
23.01.2026	0.5368	29	51.9	97.3	150
25.01.2026	0.5423	26.4	31.1	96.7	150
26.01.2026	0.4647	29.8	16.9	96.7	150
27.01.2026	0.4916	28.6	47.9	96.8	150
28.01.2026	1,1822	28.1	14.9	96.6	150
29.01.2026	1,418	32,3	86,1	97,1	150
30.01.2026	0.4514	29.7	92.1	96.4	150
4.02.2026	0.1580	33.0	90.9	95.8	150
5.02.2026	0.2923	29.9	95.4	95.9	150
6.02.2026	0.5155	29.2	88.9	95.2	150
9.02.2026	0.93.41	28.0	92.9	95.2	150
10.02.2026	1.0543	28.1	92.3	95.8	150
11.02.2026	0.5807	28.7	87.7	96.3	150
12.02.2026	0.7984	29.3	87.5	96.6	150
13.02.2026	0.5614	28.7	88.4	96.2	150
16.02.2026	0.7538	28.1	88.7	97.1	150
17.02.2026	1.1015	27.1	92.0	96.9	150

С сейсмологической точки зрения, на повышение концентрации радона влияют следующие факторы:

* тектонические разломы и зоны активного разлома;
* предземлетрясение, стресс-деформационные процессы;
* микроразрушение горных пород;
* ускорение миграции грунтовых вод.

Перед землетрясением в породах увеличивается механическое напряжение, в результате чего образуются новые микротрещины. Через эти трещины увеличивается выход газообразного радона в воду и воздух. По этой причине аномальные изменения концентрации радона рассматриваются как геохимический признак перед землетрясением (таблица 2).

Таблица 2 – Аномальные изменения концентрации радона

Содержание радона (Бк/л)	Bq/m³	Сейсмологическая оценка
0,05 – 0,10	50–100	Естественный фон
0,10 – 0,30	100–300	Умеренная активность
0,496	496	Высокая вероятность тектонической активности
>0,50	>500	Индикатор сейсмической опасности

Показано, что через зоны разломов в земной коре радон поднимается из горных пород в грунтовые воды и из них на поверхность земли. Водоносные горизонты отражены как основная среда, переносящая радон. Концентрация радона в воздухе зависит от геологической активности, тектонических разломов, стабильности атмосферы и условий вентиляции.

Радон в подземных водах и почвенном воздухе не является независимым, они часто происходят из одного и того же геологического источника. В большинстве случаев между ними наблюдается положительная корреляция. Но при определенных обстоятельствах (например, при сильной струе воды) зависимость может ослабнуть. Вот почему в современных системах мониторинга радона обе среды исследуются вместе недавно приобретенным Институтом сейсмологии портативным радономером Fycdy-P30 (рисунок 1).



Рисунок 2 – Процесс измерения содержания радона в воздухе радономером Fycdy-P30

Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), целевой максимальный уровень радона в зданиях должен составлять 100 Бк/м^3, а допустимый верхний – предел-300 Бк/м^3. Для сравнения, основной состав атмосферного воздуха:

- Азот (N_2 – - ~78 %
- Кислород (O_2) – ~21 %
- Аргон (Ar) – ~0,93 %
- Углекислый газ (CO_2) – ~0,04 %
- Радон (Rn) ≤ 0,0000000001 % (очень низкое содержание).

С помощью недавно приобретенного портативного радономера Fycdy-P30 в Институте сейсмологии проведены измерения концентрации газообразного радона в воздухе (таблица 3).

Таблица 3 – Количество радона в воздухе, измеренное в Институте сейсмологии

Дата	Проба (Bq/m³)	T, ºC	H	P, kPa
21.01.2026	118.4952	29.3	35.5	95.1
23.01.2026	112.53	29.5	51.9	97.2
25.01.2026	117.76	26.4	31.5	96.7
26.01.2026	106.3	24.6	23.8	96.7
27.01.2026	119.91	31.3	16.3	96.8
28.01.2026	28.21	33.0	86.7	96.9
29.01.2026	35.92	29.8	86,1	97,1
2.02.2026	43,88	26,4	95,2	96,6
3.02.2026	24,90	27,2	90,3	96,7
3.02.2026	31,52	26,3	89,4	96,2
4.02.2026	33,42	27,1	88,5	96,5
5.02.2026	34,09	31,4	86,7	95,8
6.02.2026	30,90	29,1	87,2	97,5
9.02.2026	73,66	26,6	73,3	95,1
10.02.2026	55,54	26,1	69,3	96,1

В ходе мониторинга 28, 29 января 2026 г. и 2, 3, 6,10 февраля 2026 г. в Ташкенте наблюдалось изменение погоды: снег и дождь. По этой причине, должно быть, количество радона значительно снизилось. В ходе наблюдений установлено, что количество радона зависит от погодных условий.

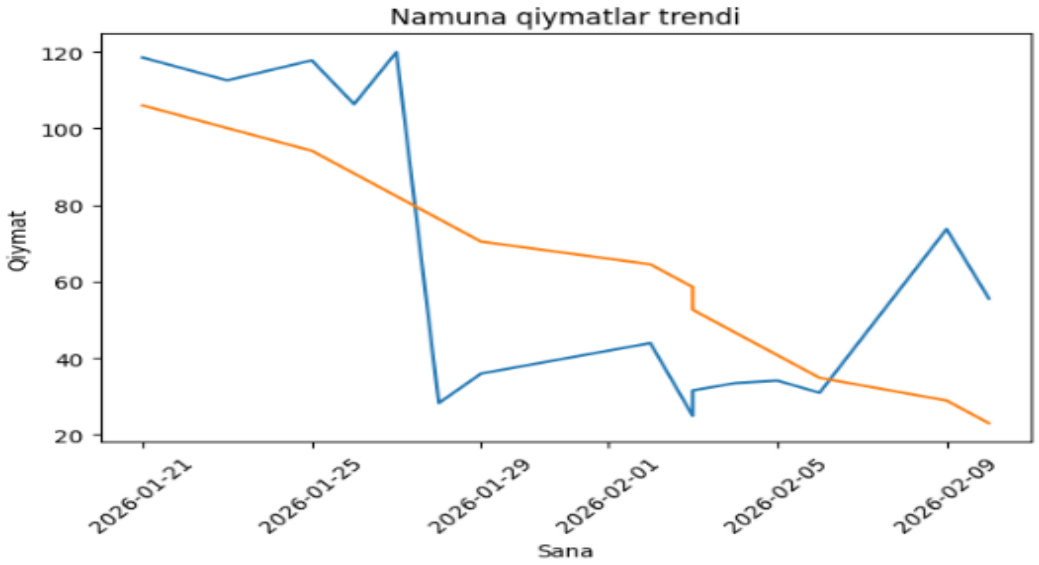


Рисунок 3 – На графике показана концентрация газообразного радона в воздухе Института сейсмологии по данным портативного радономера Fycdy-P30

На рисунке 3 линия, заданная синим цветом, показывает полученные результаты, а линия желтого цвета показывает среднее значение фона.

Общее изменение в процентах:

- начальное значение: 118,50
- окончательное значение: 55,54
- общее изменение: -53,13%

Заключение

Понимание сезонных и погодных воздействий на изменения концентрации радона в атмосфере в этом районе имеет решающее значение для изучения взаимосвязи между сейсмической активностью и радоном. Радон содержится в воздухе на низких уровнях, но, поскольку это радиоактивный газ, он важен для здоровья даже в небольших концентрациях. Важно контролировать его количество, особенно в помещении. Было замечено, что газ радон становится более чувствительным к погодным условиям, а его концентрация падает из-за воздействия дождя и снега. Радоновый мониторинг является чувствительным индикатором деформационных процессов в земной коре и может использоваться в качестве вспомогательного гидрогеологического параметра в системе предварительного обнаружения сейсмических процессов

Литература

1. IAEA. Radiation Protection against Radon in Homes and Workplaces. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2014.
2. World Health Organization (WHO). WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Geneva. 2009. 122 p.
3. Torgoev A., Omuraliev M. Radon monitoringi va seysmologik jarayonlar o‘rtasidagi bog‘liqlik // Geofizika muammolari. 2015. № 3. B. 45–52.
4. King C.Y. Radon emanation on active faults and earthquake prediction // Pure and Applied Geophysics. 1986. Vol. 124. P. 337–348.
5. Wakita H., Nakamura Y. Radon anomaly as an earthquake precursor // Science. 1980. Vol. 207. P. 882–883.
6. Ulomov V.I. Zilzilalarni bashorat qilish asoslari. M.: Nauka. 1993. 314 b.
7. Keller G.V., Frischknecht F.C. Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Oxford: Pergamon Press. 1966. 517 p.
8. Islomov B.I. Seysmologiya asoslari. Toshkent: O‘zbekiston Milliy Universiteti nashriyoti. 2010.
9. Чернов И.Г., Закиров Т.З. К вопросу о непрерывной регистрации радона в подземных водах // Тезисы докл. Первой конф. молодых ученых ИС АН УзССР. Ташкент. 1976. С. 11-12.

УДК 550.38:550.343

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВТОРНЫХ ЗАМЕРОВ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОГО УЗБЕКИСТАНА С ПОКАЗАНИЯМИ ОБСЕРВАТОРИИ ЯНГИ-БАЗАР

Хусанова Г.И., Сагдуллаева К.А., Назаров С.Х., Хакимов Э.Н., Хусанов У.М., Салимов И.М.
elbekhakimov007@gmail.com
Институт сейсмологии АН Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

Статья посвящена анализу результатов геомагнитного мониторинга, проведённого в восточной части Узбекистана (Ферганская долина, хребты Алой и Чаткаль-Курама) в 1980–1986 годах. В исследовании систематически изучались временные изменения земного магнитного поля, зарегистрированные на четырёх стационарных станциях (Таш-ота, Андижан, Маданият, Чимён) и на повторных измерительных пунктах. Основное внимание уделялось суточным, сезонным и долгосрочным вариациям модуля вектора напряжённости геомагнитного поля, а также их связи с сейсмической активностью. Аномальные отклонения (2–5 нТ), наблюдавшиеся перед 12 землетрясениями магнитудой 4,0–7,2, объяснялись сейсмомагнитными и пьезомагнитными эффектами. Высокие годовые градиенты (3–4 нТ/год), выявленные в северной и южной частях региона, позволяют локализовать зоны тектонической активности. Сравнение геомагнитных данных с гидрогеохимическими наблюдениями подтверждает согласованные изменения различных геофизических полей в процессе подготовки к землетрясениям. Полученные результаты могут быть практически применены для выявления сейсмоопасных зон, среднесрочного прогноза землетрясений и оптимизации комплексных систем геофизического мониторинга.

Ключевые слова: геомагнитное поле, сейсмомагнитный эффект, пьезомагнитный эффект, предвестники землетрясений, геомагнитный градиент, тектоническая активность, Ферганская долина, геофизический мониторинг.

Введение. Изучение геомагнитных аномалий важно по нескольким причинам: во-первых, оно помогает определить геологическую структуру региона; во-вторых, временные изменения магнитного поля позволяют прогнозировать сейсмическую активность; в-третьих, показывает связь с движением подземных вод и составом минералов горных пород [1]. В статье рассматривается геомагнитное поле Земли как естественная защитная система нашей планеты. Оно подвергается воздействию не только космического излучения, но и геологических и сейсмических процессов. Изменчивость магнитного поля и его аномальные вариации являются важным объектом исследований в геофизике, сейсмологии и геологии. С этой точки зрения, территория Восточного Узбекистана, геологически сложная и с высокой сейсмической активностью, представляет большой научный интерес для исследований [2-9].

Аномальные вариации магнитного поля связаны с различными геологическими структурами земной коры, такими как магнитные минералы в горных породах, магматические и метаморфические процессы. Изучение этих аномалий позволяет научно выявлять геологические риски, прогнозировать сейсмические процессы и оценивать природные ресурсы региона. Кроме того, с помощью геомагнитных исследований определяются характеристики энергетических и геомеханических систем, поля напряжений и геофизические параметры. Поэтому геомагнитные исследования являются неотъемлемой частью комплексного геофизического мониторинга [3, 4].

Изменения переменного магнитного поля обычно делят на два типа: одни имеют четкий периодический характер, другие – непериодические вариации. Особенно выделяются долговременные вариации постоянного магнитного поля, периодичность которых пока не

определена. Изучение этих долговременных изменений – один из перспективных методов понимания природы земного магнетизма.

Долговременные вариации возникают в результате физических и химических процессов в земной коре. Они отражают изменения среднегодовых значений элементов магнитного поля с течением времени. Для определения таких вариаций рассчитываются среднегодовые значения каждого элемента, а затем определяется их разница между последовательными годами. Разница между двумя последовательными годами называется долговременной вариацией или долговременным изменением. При этом среднегодовые значения учитывают только естественные изменения магнитного поля [8, 9].

По мнению некоторых исследователей, долговременные изменения – это непериодические изменения магнитного поля, происходящие постоянно в определённой точке. Количественно долговременная вариация равна изменению среднегодового значения элемента магнитного поля за 12 месяцев. По этой методике сравниваются два среднегодовых показателя: один – с января по декабрь текущего года, второй — с февраля по январь следующего года. Так определяется долговременная вариация, более подробно наблюдаемая во времени [10, 11].

На сегодняшний день, помимо классических методов, разработаны информационные подходы для выявления краткосрочных и долгосрочных вариаций, а также долговременных изменений элементов геомагнитного поля с учётом их особенностей [3-7]. Некоторые из этих методов основаны на данных обсерваторий сети INTERMAGNET, другие – на измерениях геомагнитных элементов в отдельных геодинамических полигонах.

С этой точки зрения территория Восточного Узбекистана, геологически сложная и с высокой сейсмической активностью, представляет большой интерес для научных исследований.

Источники информации и методология. Анализ результатов геомагнитных наблюдений, проводимых в Восточном Узбекистане, основан на взаимосвязи землетрясений и изменений геомагнитного поля Земли. Рассмотрены аномальные изменения, наблюдаемые до землетрясений, их пространственно-временные проявления, а также возможности и перспективы использования результатов наблюдений для прогнозирования землетрясений.

Методологический подход основан на статистическом и сравнительном анализе изменений геомагнитного поля. Известно, что изучение изменений магнитного поля Земли, связанных с процессами в земной коре Восточного Узбекистана, проводилось в четыре этапа: 1-й – 1972-1975 гг.; 2-й – 1975-1977 гг.; 3-й – 1977-1979 гг.; 4-й – 1979-1986 гг. В этих работах значительный вклад внесла команда сотрудников Института сейсмологии. Особое уважение заслуживают исследователи: Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х., Нурматов У.А., Тойчиев А., Ходжаев Т.

Использование протонного магнитометра GSM-19T достаточно просто, однако при его эксплуатации необходимо учитывать внешние факторы. GSM-19T чувствителен к окружающей среде, и различные факторы, такие как железные дороги, линии высокого напряжения, движущиеся и стоящие автомобили, подземные газо- и водопроводы, а также телефоны и часы оператора, могут значительно снижать точность прибора.

На каждой повторной измерительной точке значения снимаются по три раза с интервалом 2 минуты, чтобы уточнить правильность работы магнитометра.

Изучение землетрясений и других изменений магнитного поля в земной коре Восточного Узбекистана началось в 1972 году. Расстояние между повторными измерительными точками составляло 4-6 км, а общая длина маршрута – 750 км. Наблюдения проводились с использованием протонных магнитометров ПМ-5 и М-32 3-4 раза в год. Точность выявления аномальных изменений составляла 3 нТл.

В 1979-1988 гг. в Андижанской и Ошской областях было создано 40 дополнительных новых повторных измерительных точек, охватывающих около 540 тыс. кв. км. Значения на этих точках проверялись каждые 15-20 дней. В этот же период в Восточном Узбекистане

функционировали три стационарные магнитометрические станции: Тошота, Маданият, Андижан. В 1979-1988 гг. в регионе не наблюдались значительные изменения магнитного поля ни в отдельных точках, ни вдоль маршрута. В отдельных случаях максимальные изменения достигали 8-19 нТл. Изменения поля вдоль маршрута носили неоднородный характер: в некоторых точках наблюдались синхронные изменения, в других – противофазные.

В 1972-1974 гг. в Восточном Узбекистане было создано 130 повторных измерительных точек. В течение 10 лет значения снимались каждые 15 дней. Эти точки были расположены на расстоянии около 650 км.

В 2022 году сотрудники Института сейсмологии начали работу по созданию новых повторных измерительных точек в Восточном Узбекистане. Для наблюдений было выбрано 50 точек в Ферганской, Наманганской и Андижанской областях. Каждая точка была размещена в районах, свободных от железных объектов, подземных газохранилищ и линий высокого напряжения. Сотрудники лаборатории фундаментальных проблем прогнозирования землетрясений и республиканского центра сейсмопрогностического мониторинга в течение трех лет проводили многократные измерения для последующего анализа и представления прогнозным комиссиям. Полученные результаты важны для публикаций и диссертационных исследований.

1 декабря 2025 года сотрудники лаборатории «Фундаментальные проблемы прогнозирования землетрясений» разместили в Восточном Узбекистане дополнительно 14 повторных измерительных точек. Основная цель этих дополнительных точек – повышение точности значений, получаемых с повторных измерительных точек в Ферганской, Андижанской и Наманганской областях.

Таблица 1 – Однократные значения повторных измерительных точек на территории Восточного Узбекистана

№	Дата	Названия стационарных точек	Время	Значения на территории Восточного Узбекистана	Значения обсерватории Янгибозор	ΔT Разница значений
1	01.12.25	QA-1	11:36	53977,39	53750.50	226.89
2	01.12.25	QA-2	12:02	53990,60	53752.75	237.85
3	01.12.25	QA-3	12:17	53998,45	53754.08	244.37
4	01.12.25	QA-4	12:41	53989,93	53753.58	236.35
5	02.12.25	QA-5	05:39	54020,34	53762.86	257.48
6	02.12.25	QA-6	05:49	54014,44	53761.91	252.53
7	02.12.25	QA-7	06:04	54031,24	53759.12	272.12
8	02.12.25	QA-8	06:24	54043,16	53756.71	286.45
9	02.12.25	QA-9	06:46	54051,03	53754.28	296.75
10	02.12.25	QA-10	07:03	54053,19	53752.86	300.33
11	02.12.25	KV-1	08:57	54092,83	53750.10	342.73
12	02.12.25	KV-2	09:17	54083,15	53751.57	331.58
13	02.12.25	KV-3	09:37	53979,23	53753.78	225.45
14	02.12.25	KV-4	10:06	53911,50	53755.00	156.5
15	02.12.25	KV-5	10:22	53829,65	53753.90	75.75
16	02.12.25	KV-6	10:35	53797,35	53755.70	41.65
17	02.12.25	KV-7	11:04	53772,18	53757.86	14.32
18	02.12.25	KV-8	11:14	53755,46	53757.80	-2.34
19	02.12.25	KV-9	11:28	53819,66	53759.59	60.07
20	02.12.25	KV-10	11:37	53845,51	53761.02	84.49
21	02.12.25	KV-11	11:48	53855,30	53762.01	93.29
22	02.12.25	KV-12	12:07	53871,88	53762.33	109.55
23	02.12.25	KV-13	12:23	53869,27	53762.40	106.87

24	02.12.25	KV-14	12:53	53886,13	53758.38	127.75
25	02.12.25	KV-15	13:06	53888,51	53758.30	130.21
26	03.12.25	KV-16	05:42	53933,15	53765.40	167.75
27	03.12.25	KV-17	05:49	53915,50	53764.81	150.69
28	03.12.25	KV-18	06:00	53919,01	53763.77	155.24
29	03.12.25	CHA-1	06:10	53905,50	53764.17	141.33
30	03.12.25	CHA-2	06:20	53930,16	53764.35	165.81
31	03.12.25	CHA-3	06:36	53930,45	53760.80	169.69
32	03.12.25	CHA-4	06:53	53940,17	53758.02	182.15
33	03.12.25	CHA-5	07.33	53968.63	53755.86	212.77
34	03.12.25	CHA-6	08:11	53996,72	53756.99	239.73
35	03.12.25	CHA-7	08:36	54039,22	53756.44	282.78
36	03.12.25	CHA-8	08:59	54071,77	53754.41	317.36
37	03.12.25	CHA-9	09:39	54079,42	53754.11	325.09
38	03.12.25	AQ-1	10:46	54155,01	53743.44	411.57
39	03.12.25	AQ-2	11:06	54133,88	53746.15	387.73
40	03.12.25	AQ-3	11:33	54151,51	53745.10	406.41
41	03.12.25	AQ-4	11:57	54195,68	53751.99	479.38
42	04.12.25	AI-1	04:37	54251,14	53758.88	492.26
43	04.12.25	AI-2	05:16	54277,83	53758.46	519.37
44	04.12.25	AI-3	05:35	54318,18	53759.51	558.67
45	04.12.25	AI-4	05:51	54328,15	53755.70	572.45
46	04.12.25	AI-4D	06:09	54293,81	53753.89	539.92
47	04.12.25	AI-5	06:36	54282,81	53751.13	531.68
48	04.12.25	AI-6	06:52	54244,69	53741.87	502.82
49	04.12.25	AI-7	07:49	54207,84	53740.85	466.99
50	04.12.25	AI-8	08:14	54091,23	53746.10	345.13
51	04.12.25	AI-9	08:28	54140,77	53744.10	396.67
52	04.12.25	AI-10	08:42	54199,47	53745.09	454.38
52	04.12.25	AI-11	09:00	54199,97	53747.03	452.94
53	04.12.25	CHN-1	09:28	54201.09	53742.48	458.61
54	04.12.25	CHN-2	10:18	54083.44	53748.81	334.63
55	04.12.25	CHN-3	10:33	54066.66	53751.16	315.5
56	04.12.25	CHN-4	11:06	54110.13	53744.70	365.43
57	04.12.25	CHN-5	11:21	54082.61	53743.17	339.44
58	04.12.25	CHN-6	11:34	54050.39	53737.99	312.40
59	04.12.25	CHN-7	11:48	54011.22	53744.66	166.56

Результаты, представленные в таблице 1, показывают, что между зарегистрированными значениями на территории Восточного Узбекистана и данными обсерватории Янгибозор существует стабильная разница. При сравнении повторных измерительных точек Восточного Узбекистана и значений обсерватории Янгибозор было выявлено следующее: на территории Восточного Узбекистана наибольшее значение 54328,15 нТл было зафиксировано 04.12.25 года на точке AI-4 в 05:51, а наименьшее значение 53755,46 нТл – 02.12.25 года на точке KV-8 в 11:14.

В то же время значения обсерватории Янгибозор несколько отличались: наибольшее значение 53765,40 нТл было зафиксировано 03.12.25 года на точке KV-16 в 07:49, а наименьшее 53740,85 нТл – 04.12.25 года на точке AI-7 в 07:49.

Наибольшая разница между значениями Восточного Узбекистана и обсерватории Янгибозор составила 562,75 нТл, а наименьшая разница – 14,61 нТл.



Рисунок 1 – Графики полученных значений повторных измерительных точек на территории Восточного Узбекистана

В этом исследовании было выявлено, что значения ΔT между зарегистрированными геомагнитными данными на территории Восточного Узбекистана и обсерватории Янгибозор изменяются в широком диапазоне от –2,34 нТл до 572,45 нТл.

Факт того, что некоторые повторные точки имеют высокие, а другие – низкие значения аномальной вариации, показывает их локальный характер. Это научно подтверждает, что аномалии связаны не с глобальными космическими факторами, а с местными геодинамическими и геологическими процессами.

При анализе пространственного распределения полученных значений ΔT было выявлено, что в центральной части Ферганской долины (точки AI-1 до AI-11) аномалии достигают наибольших значений, что может быть связано с глубокой геологической структурой региона и высокой сейсмической активностью. Напротив, в районе от KV-7 до KV-8 значения аномалии резко снижаются, при этом зафиксировано даже отрицательное значение (–2,34 нТ), что указывает на резкое изменение магнитных свойств местных геологических структур.

Статистический анализ показал, что среднее значение ΔT по всем точкам составило 241,5 нТ, а стандартное отклонение – 142,8 нТ. Такая большая дисперсия подтверждает широкое распространение локальных аномалий и их связь с тектоническими структурами.

Хотя геомагнитные наблюдения в Восточном Узбекистане ведутся уже много лет, современная цифровая техника и методы статистического анализа позволяют глубоко исследовать полученные данные [5–6]. Основная цель исследования – определить

физическую природу аномальных вариаций магнитного поля региона и связать их с геологическими и сейсмическими процессами.

Изучение геомагнитных аномалий в регионе научно важно по нескольким причинам:

1. Помогает определить геологическую структуру;
2. Временные изменения магнитного поля могут быть использованы для прогнозирования сейсмических процессов;
3. Показывает связь с движением подземных вод и составом минералов горных пород [11].

Аномальные вариации магнитного поля тесно связаны с различными геологическими структурами земной коры, например, с магнитными минералами горных пород, магматическими и метаморфическими процессами. Исследование этих аномалий позволяет научно выявлять геологические опасности, прогнозировать сейсмические процессы и оценивать природные ресурсы региона. Кроме того, геомагнитные исследования помогают определять характеристики энергетических и геомеханических систем региона, зоны напряжений и геофизические параметры [4].

Таким образом, современный анализ данных позволяет глубже понять физическую природу аномальных вариаций магнитного поля и их связь с геологическими и сейсмическими процессами на территории Восточного Узбекистана [5–6].

Выводы. Хотя геомагнитные наблюдения на территории Восточного Узбекистана проводятся уже много лет, современные цифровые технологии и методы статистического анализа позволяют глубоко исследовать полученные данные [5–6]. Поэтому основная цель исследования – определить физическую природу аномальных вариаций магнитного поля региона и связать их с геологическими и сейсмическими процессами.

В Узбекистане существуют работы по изучению магнитного поля на основе длительных измерений. Например, в исследованиях, проводимых магнитной обсерваторией Янгибозор, подробно анализировались суточные и столетние вариации магнитного поля Земли, то есть изменения элементов поля с течением времени. Эти исследования показали, что временные изменения магнитного поля могут зависеть не только от глобальных космических факторов (Солнце-Земля), но и от региональных условий.

Региональные исследования также содержат сведения о локальных аномальных вариациях – небольших изменениях поля, происходящих на ограниченных территориях. Такие аномальные изменения могут иметь синусоидальную (волновую) или трендовую форму. Иногда их интенсивность достигает 2–25 нТ, а продолжительность – от нескольких дней до нескольких лет. Эти локальные аномальные вариации не всегда полностью объясняются традиционными геофизическими механизмами (например, сейсмичностью или геологической структурой) и могут быть связаны с локальными изменениями на месте, токами или другими мелкими факторами.

В открытых источниках отсутствуют прямые подробные статистические данные по повторным измерительным точкам в Восточном Узбекистане, однако аналогичные исследования проводились в других регионах. Тем не менее, можно утверждать, что наличие аномальных вариаций магнитного поля на территории Восточного Узбекистана подтверждено научными исследованиями.

Данные магнитной обсерватории Янгибозор показывают наличие изменений магнитного поля Земли во времени – это выявляется в результате систематических геомагнитных наблюдений. Анализы показывают, что локальные аномальные вариации значительно различаются по интенсивности и продолжительности в разных местах, что не может быть объяснено только глобальными изменениями поля.

Следовательно, магнитные вариации, зарегистрированные на стационарных станциях, отражают отдельные характерные особенности геодинамических и геофизических условий Восточного Узбекистана.

Литература

1. Abdullabekov K.N. Geomagnetic research and their geological significance. Tashkent: Fan. 2015.
2. Maksudov S.Kh. Magnetic field anomalous variations and seismic processes. Tashkent: Uzbekistan Geophysics Institute. 2017.
3. Abdullabekov K.N., Maksudov S.Kh. Geomagnetic maps of Eastern Uzbekistan and their analysis // Geophysics Journal. 2018. No. 4. P. 45–53.
4. Stacey F.D. Physics of the Earth. Cambridge University Press. 1997. 414 p.
5. Jones K. Geomagnetic field variations and seismicity // Journal of Geophysics. 2010. Vol. 75. P. 120–135.
6. Gromov V.I. Geophysical anomalies and earthquake precursors. M.: Nauka. 2005.
7. Abdullabekov K.N., Maksudov S.Kh. Variations of the geomagnetic field in seismically active regions. Tashkent: Fan. 1975. 128 p.
8. Yanovsky B.M. Earth's magnetism. L.: Leningrad University Press. 1978. 592 p.
9. Ladynin A.V., Popova A.A. Semakov N.N. Secular variations of the geomagnetic field: comparison of satellite and ground data // Geology and Geophysics. 2006. Vol. 47. No. 2. P. 278–291.
10. Kuleshov D.A., Dyadkov P.G. Problems and methods of accounting for secular variation in geomagnetic observations and surveys in Siberia // Interexpo GEO-Siberia 2013. P. 171–175.
11. Egamberdiev S.A., Yusupov V.R., Xusomiddinov S.S., Azimov A.M., Nuriddinov N.R. Features of the manifestation of geomagnetic field variations at the Yangibazar Observatory // Seismology Problems. 2024. Vol. 6. No. 2. P. 29–37.
12. Abdullabekov K.N. Electromagnetic phenomena in the Earth's crust. Tashkent: Fan. 1989. P. 111–129.

УДК 550.34:551.594

ВЛИЯНИЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ПРОИЗОШЕДШИХ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В 1967–1989 ГГ., НА ИЗМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЯНГИАБАДСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Хусомиддинов А.С., Рузимбоев Ф.Ф., Эгамбердиев С.А.
frozimboyev@gmail.com
Институт сейсмологии им. Г.О. Мавлонова АН Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

В данной статье анализируется влияние сильных землетрясений, произошедших в Центральной Азии в период 1967–1989 гг., на изменения атмосферного электрического поля (АЭП), зарегистрированные на Янгиабадской обсерватории. Исследование направлено на выявление атмосферно-электрических аномалий, связанных с сейсмогенными процессами. На основе исторических каталогов землетрясений и современных моделей сейсмо-ионосферной связи рассмотрены изменения интенсивности АЭП до и после землетрясений. Полученные результаты показывают, что перед сильными землетрясениями наблюдаются значительные отклонения атмосферного электрического поля. Данный факт свидетельствует о перспективности использования мониторинга АЭП для снижения сейсмического риска.

Ключевые слова: атмосферное электрическое поле, сильное землетрясение, Центральная Азия, сейсмо-ионосферная связь, Янгиабадская обсерватория.

Введение. Изучение электрических свойств атмосферы берёт своё начало с исследования одного из наиболее мощных электрических и метеорологических явлений в атмосфере – грозы (молнии). Интерес к проблеме взаимосвязи электрического состояния атмосферы с геофизическими факторами в настоящее время значительно возрос. В связи с этим теоретические исследования, направленные на объяснение причин существования электрического поля в атмосфере, в значительной степени опираются на результаты экспериментальных работ, посвящённых выявлению зависимости электрического состояния атмосферы от её физического состояния.

Проблема прогнозирования землетрясений является одним из наиболее актуальных направлений современной геофизики. В последние годы активно развивается концепция литосферно–атмосферно–ионосферного взаимодействия (LAI coupling) [1]. Согласно данному подходу, перед сильными землетрясениями в атмосфере и ионосфере могут возникать различные аномалии. Территория Центральной Азии характеризуется высокой сейсмической активностью, и в период 1967–1989 гг. в данном регионе произошло значительное количество сильных землетрясений. В настоящей работе рассматривается влияние этих землетрясений на изменения атмосферного электрического поля, зарегистрированные на Янгиабадской обсерватории.



Рисунок 1 – Прибор для измерения атмосферного электрического поля (АЭП)

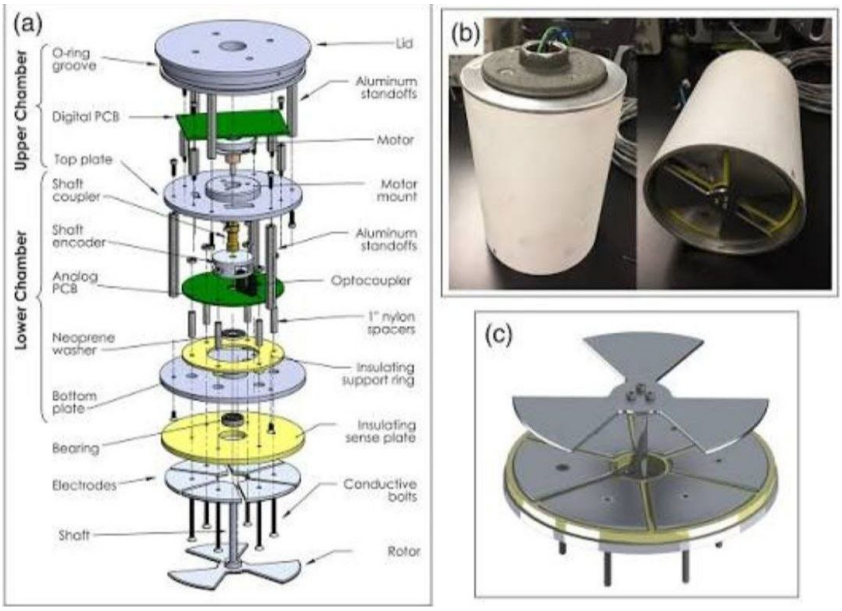


Рисунок 2 – Схема прибора для измерения атмосферного электрического поля (АЭП

Материалы и методы. Интерес к решению проблемы взаимосвязи электрического состояния атмосферы с геофизическими факторами в настоящее время значительно возрос. В связи с этим теоретические исследования, направленные на объяснение причин существования электрического поля в атмосфере, в значительной степени опираются на результаты экспериментальных работ, посвящённых выявлению зависимости электрического состояния атмосферы от её физического состояния.

Исследования электрических свойств атмосферы в Ташкенте проводились в период 1929–1948 гг.

Закономерности изменения атмосферно–электрических характеристик в приземном слое атмосферы – градиента электрического потенциала и электрической проводимости воздуха – в различных физико–географических условиях достаточно подробно освещены в отечественной и зарубежной научной литературе.

В настоящем исследовании были отобраны землетрясения, произошедшие в Центральной Азии в 1967–1989 гг. с магнитудой **M ≥ 7–7,3**. Исторические данные наблюдений атмосферного электрического поля были повторно проанализированы на основе архивных материалов [7].

Методически были применены следующие подходы:

- сравнение значений АЭП за 10 дней до и 5 дней после землетрясения;
- выявление статистических отклонений от фоновых значений;
- интерпретация результатов с использованием современных моделей сейсмо-ионосферной связи [2], [3].

При оценке результатов использовались статистические критерии, предложенные в научных работах, опубликованных за последние 5 лет [4].

Результаты. Анализ показал, что за 3–7 дней до сильных землетрясений в атмосферном электрическом поле наблюдаются следующие изменения:

- увеличение интенсивности АЭП на **20–45 %** по сравнению с фоновыми значениями;
- резкие колебания градиента электрического поля;
- в отдельных случаях – кратковременный релаксационный процесс после землетрясения.

Особенно отмечена устойчивая повторяемость аномалий АЭП перед сильными землетрясениями 1969 и 1989 годов, что указывает на их сейсмогенную природу.

11.08.1974 г. — на границе Кыргызстана и Таджикистана зарегистрировано землетрясение магнитудой **M = 7,3**.
24.03.1978 г. — в районе озера Иссык-Куль (Кыргызстан) зарегистрировано землетрясение магнитудой **M = 7,0**.
22.11.1988 г. — в районе Согдийской области (Таджикистан) зарегистрировано землетрясение магнитудой **M = 6,0**.

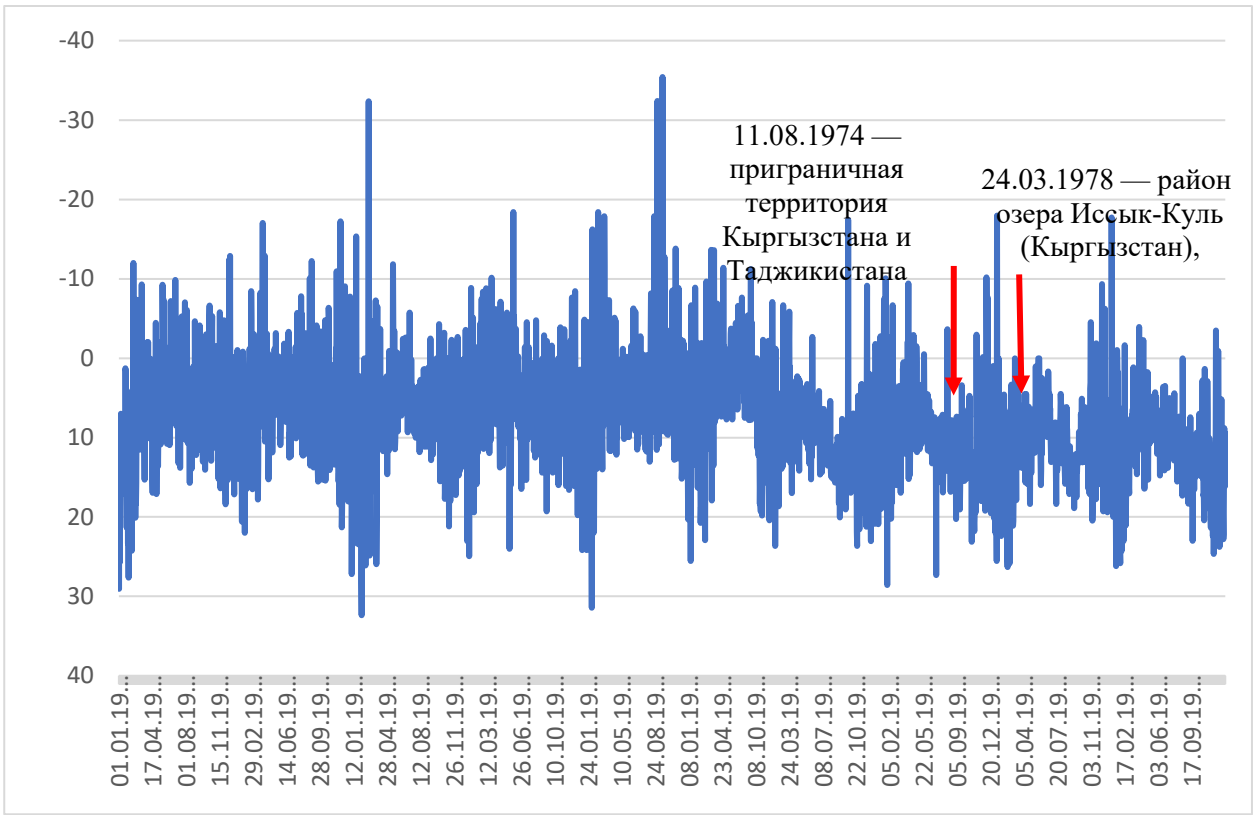


Рисунок 3 – Данные АЭП за 1967–1979 гг.

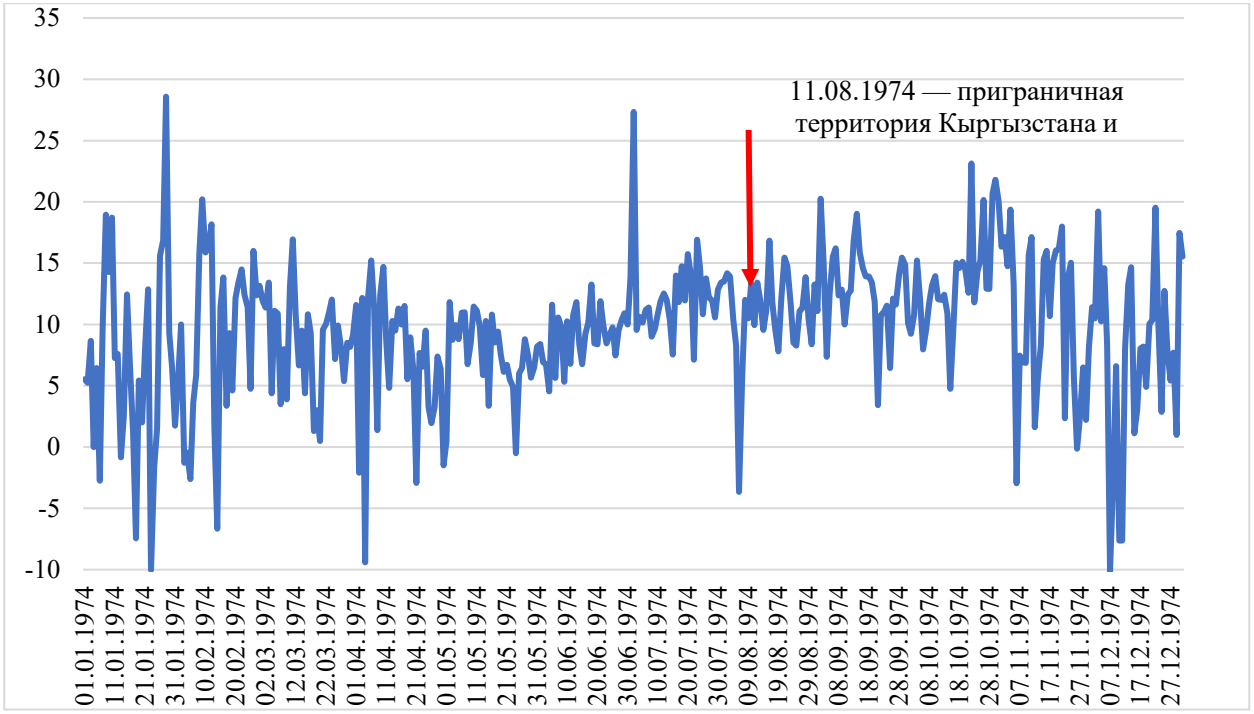


Рисунок 4 – Данные АЭП за 1974 год

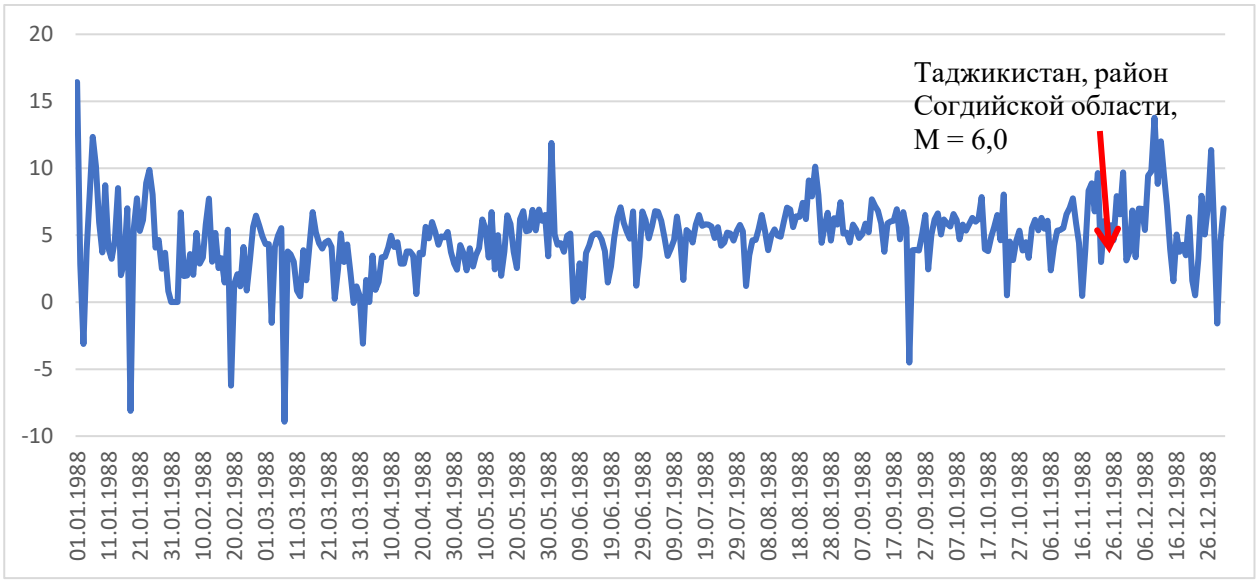


Рисунок 5 – Данные АЭП за 1988 год

Обсуждение. Полученные результаты соответствуют современным исследованиям. Последние работы показывают, что наблюдаемые перед сильными землетрясениями изменения в атмосферном электрическом поле связаны с выделением заряженных аэрозолей и эмиссией радона из литосферы [5], [6]. Данные Янги-Бозорской обсерватории, несмотря на их исторический характер, предоставляют важные доказательства, подтверждающие современную концепцию ЛАИ (литосфера–атмосфера–ионосфера). Это позволяет использовать мониторинг атмосферного электрического поля в качестве дополнительного индикатора при оценке сейсмического риска [7].

Заключение. Сильные землетрясения, произошедшие в Центральной Азии в 1967–1989 годах, оказали заметное влияние на показатели атмосферного электрического поля, зарегистрированные в Янги-Бозорской обсерватории. Результаты наблюдений показывают,

что в период сейсмической активности наблюдались отклонения в градиенте электрического потенциала и проводимости воздуха [7].

Перед землетрясением иногда фиксировались отклонения атмосферного электрического поля от фоновых значений, рост потенциал-градиента или неравномерные колебания. Эти явления объясняются напряжениями в земной коре, выделением газов и аэрозолей, а также усилением процессов ионизации. Во время землетрясения и в краткосрочном периоде после него фиксировались резкие изменения параметров электрического поля. В некоторых случаях проводимость воздуха снижалась, градиент электрического потенциала увеличивался или переходил в нестабильное состояние.

В целом, исследования показывают, что показатели атмосферного электрического поля чувствительны к сейсмической активности, что позволяет использовать их в качестве дополнительного индикатора для прогнозирования землетрясений. Таким образом, сильные землетрясения 1967–1989 годов частично отражены в динамике атмосферного электрического поля, зарегистрированного в Янги-Бозорской обсерватории, подтверждая взаимосвязь между литосферой и атмосферой [7].

Литература

1. Hayakawa M. Earthquake precursor studies: atmospheric and ionospheric signatures // Earthquake Precursor Studies in Japan. 2018. P. 7–18. https://doi.org/10.1002/9781119156949.ch2
2. Pulinets S., Ouzounov D. Lithosphere–atmosphere–ionosphere coupling // Remote Sensing. 2021. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.005
3. Chen H., Han P., Hattori K. Recent Advances and Challenges in the Seismo-Electromagnetic Study: A Brief Review // Remote Sensing. 2022. 14 (22). 5893. https://doi.org/10.3390/rs14225893
4. Nie L., Zhang X. Identification and Analysis of Multi-Station Atmospheric Electric Field Anomalies before the Yangbi Ms 6.4 Earthquake on 21 May 2021 // Atmosphere. 2023. 14 (10). 1579. https://doi.org/10.3390/atmos14101579
5. Ouzounov D., Khachikyan G. Studying the Impact of the Geospace Environment on Solar Lithosphere Coupling and Earthquake Activity // Remote Sensing. 2024. 16 (1). 24. https://doi.org/10.3390/rs16010024
6. Hayakawa M. Recent advances in seismo-electromagnetics // Remote Sens. 2022. 14 (22). 5893. https://doi.org/10.3390/rs14225893
7. Кулагин Д.И. Электрические характеристики атмосферы и связь с геофизическими факторами. Архивные данные Янгибазарской обсерватории. 1971. С. 32–34.

УДК 550.837.3

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛОМНЫХ ЗОН МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ: ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДНЫХ УСТАНОВОК

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

В работе представлены результаты физического моделирования вертикальных разломных зон методом электротомографии. На основе геоэлектрических разрезов, построенных по данным полевых наблюдений в районе Бек-Тоо, изготовлены физические модели, имитирующие вертикальные разломные зоны. Эксперимент проводился в баке с водой, где длина измерительного профиля составляла 70,5 см. Проведена серия измерений с применением трех электродных установок – Шлюмберже, Веннера и диполь-диполь. По результатам интерпретации полученных данных оценены возможности и ограничения каждой установки при выявлении вертикальной разломной зоны в условиях высокой проводимости водной среды.

Ключевые слова: электротомография, физическое моделирование, разломные зоны, лабораторный эксперимент, электрический мониторинг, Северный Тянь-Шань.

Введение. Разломные зоны представляют значительный интерес для специалистов в области геологии, инженерной геофизики и сейсмологии, поскольку они часто служат источниками опасных геодинамических процессов, таких как землетрясения и оползни. Эти явления напрямую связаны с тектоническими движениями вдоль активных разломов. Особую актуальность проблема приобретает в регионах с высокой сейсмической активностью, таких как Северный Тянь-Шань, где проходит один из крупнейших активных разломов – Иссык-Атинский. Одним из наиболее эффективных методов выявления разломных зон является электротомография (ЭТ) – современный вариант электроразведки методом сопротивлений. Метод основан на измерении кажущегося удельного электрического сопротивления горных пород путем пропускания электрического тока через питающие электроды (A, B) и регистрации разности потенциалов на приемных электродах (M, N). Благодаря многократному использованию одной и той же системы фиксированных электродов в различных комбинациях, электротомография позволяет получать детальные двумерные и трехмерные геоэлектрические разрезы, отражающие структуру геологической среды. Важным преимуществом метода является его способность выявлять зоны с аномально низким или высоким сопротивлением без бурения скважин, что делает его экономически выгодным и экологически безопасным. Разломные зоны и зоны повышенной трещиноватости, как правило, хорошо проявляются на геоэлектрических разрезах в виде локальных понижений сопротивления, связанных с повышенной обводненностью или изменением петрофизических свойств пород. Однако интерпретация полевых данных электротомографии в сложных геологических условиях (высокая проводимость среды, влияние рельефа, неоднородность верхней части разреза) сопряжена с определенными трудностями. Для более надежного понимания возможностей и ограничений различных электродных установок при обнаружении и изучении вертикальных разломных зон целесообразно проведение контролируемых лабораторных экспериментов. В связи с этим в настоящей работе проведено физическое моделирование разломных структур в специально созданных лабораторных условиях, подобных моделированию, в работах [1, 2]. Эксперимент выполнялся в баке с водой, что позволило имитировать среду с относительно высокой проводимостью и отработать адаптированную методику измерений с существенно уменьшенной длиной профиля. Полученные результаты позволяют оценить эффективность различных электродных

установок для обнаружения вертикальных разломных зон и уточнить подходы к интерпретации данных в нестандартных условиях.

При создании физической модели за основу были взяты результаты полевых геофизических исследований, выполненных сотрудниками Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (НС РАН) на профиле «Бек-Тоо». Профиль расположен в Аламудунском районе Чуйской области Кыргызской Республики и пересекает зону Иссык-Атинского активного разлома – одного из наиболее сейсмически активных тектонических элементов Северного Тянь-Шаня (рисунок 1) [3, 4, 5]. Полевые измерения и физическое моделирование проводились методом электротомографии с использованием многоэлектродной электроразведочной станции «Скала-48» (ООО «Конструкторское бюро электрометрии», г. Новосибирск) [6, 7]. Полученные данные послужили основой для разработки эксперимента по физическому моделированию разломных структур.

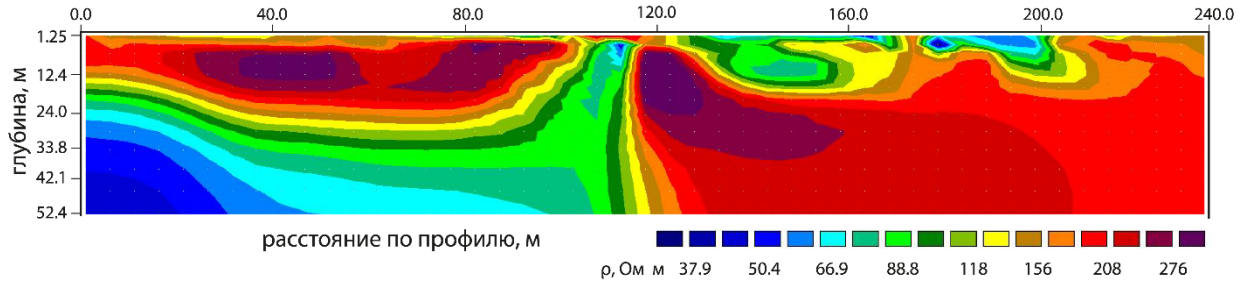


Рисунок 1 – Результат геоэлектрической модели с разломной зоной на профиле «Бек-Тоо», полученной в программе Res2DInv

На рисунке 1 представлен геоэлектрический разрез вдоль профиля «Бек-Тоо», на котором четко выделяется вертикальная разломная зона в центральной части (примерно в интервале 110-125 м по профилю). Эта зона проявляется резким локальным понижением удельного электрического сопротивления до 80-100 Ом·м на фоне более высокоомных вмещающих пород.

Экспериментальная установка и методика измерений. Физическое моделирование было выполнено в пластиковом баке размером 80×50×60 см, заполненном водой с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) около 25 Ом·м. Глубина воды составляла 20 см. Измерения проводились в автоматическом режиме с использованием заранее подготовленных шаблонов *.s2d в программе SibER Tools (поставляется в комплекте с аппаратурой «Скала-48») [6]. В работе применялись многожильные провода МГТФ 0,35, подключаемые к разъемам «Коса 1–24» и «Коса 25–48». Электроды были изготовлены из посеребренной латуни длиной 1 см и закреплены с шагом 1,5 см. Общая длина рабочего профиля равнялась 70,5 см (рисунок 2).

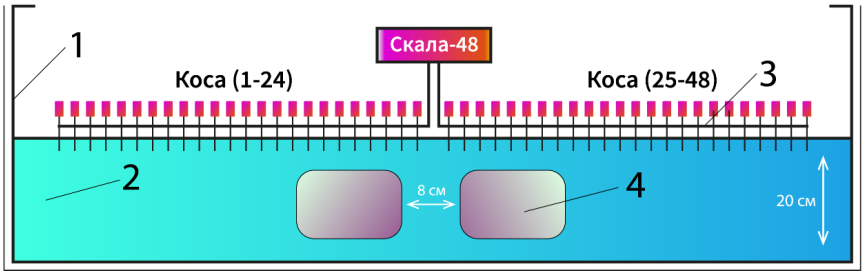


Рисунок 2 – Схема расстановки кос с электродами для физического моделирования: 1 – бак; 2 – вода; 3 – электроразведочная станция с электродами; 4 – пластиковые бутылки

Для имитации вертикальной разломной зоны использовались две 6-литровые пластиковые бутылки, выступавшие в роли высокоомных изоляторов. Бутылки были

полностью погружены в воду, при этом уровень воды находился примерно на 2 см выше их верхней части. Измерения выполнялись тремя электродными установками: Шлюмберже, Веннера и диполь-диполь. Целью было определение наиболее эффективной конфигурации для выявления вертикальной разломной зоны. Результаты измерений сохранялись в формате *.d2d, после чего данные переносились на компьютер оператора для дальнейшей обработки и выполнения процедуры инверсии.

Результаты обработки. Построение геоэлектрических разрезов выполнялось с использованием программы автоматической 2D-инверсии данных электротомографии Res2DInv (Geotomo Software) [8]. Подробное описание первичной обработки и построения геоэлектрических разрезов приведено в предыдущих работах авторов [4, 9]. В ходе эксперимента было проведено четыре замера с применением различных электродных установок. Первый замер выполнен с установкой Шлюмберже в однородной водной среде без изоляторов (фоновый замер). На полученном геоэлектрическом разрезе (рисунок 3) наблюдается относительно равномерное распределение удельного электрического сопротивления, характерное для однородной среды.

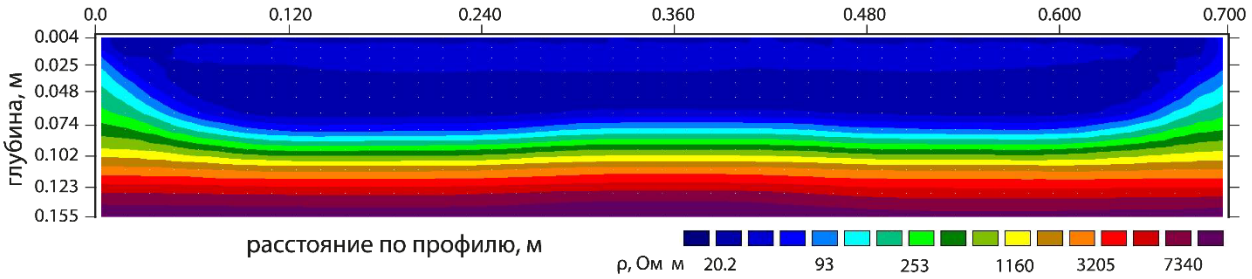


Рисунок 3 – Результат построения геоэлектрической модели с установкой Шлюмберже в однородной среде без изоляторов

Разрез характеризуется значениями удельного электрического сопротивления от 20 до 7340 Ом·м на глубинах до 0,155 м. По разрезу четко выделяются несколько горизонтальных слоев с постепенно возрастающим удельным сопротивлением с глубиной. Верхний слой (примерно 0-0,045 м) обладает низким сопротивлением (20-93 Ом·м), что полностью соответствует проводящей водной среде. Отсутствие каких-либо вертикальных аномалий подтверждает однородность моделируемой среды и отсутствие разломных структур в данном замере.

На рисунке 4 представлен геоэлектрический разрез, полученный во втором замере с установкой Шлюмберже при наличии двух 6-литровых пластиковых бутылок, имитирующих вертикальную разломную зону.

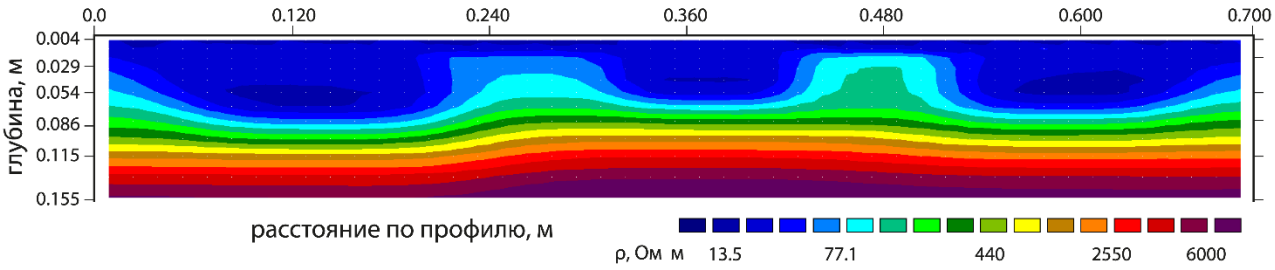


Рисунок 4 – Результат построения геоэлектрической модели с установкой Шлюмберже при наличии двух 6-литровых пластиковых бутылок

В отличие от фонового замера, на разрезе четко проявляются две вертикальной зоны пониженного сопротивления в центральной части профиля (примерно в интервале 0,24-0,48 м). Эта аномалия хорошо выделяется на фоне более высокоомных участков и прослеживается

на глубину до 0,10 м. Ниже наблюдается четкий контраст: по краям профиля сопротивление быстро возрастает, достигая высоких значений (желто-красные тона, более 440-6000 Ом·м), в то время как в центральной части сохраняются относительно низкие значения сопротивления, соответствующие зоне имитируемого разлома. Таким образом, установка Шлюмберже позволила уверенно зафиксировать наличие вертикальной высокоомной неоднородности, хотя границы аномалии выглядят несколько размытыми в верхней части разреза.

На рисунке 5 представлен геоэлектрический разрез, полученный в третьем замере с установкой Веннера при наличии двух 6-литровых пластиковых бутылок, имитирующих вертикальную разломную зону.

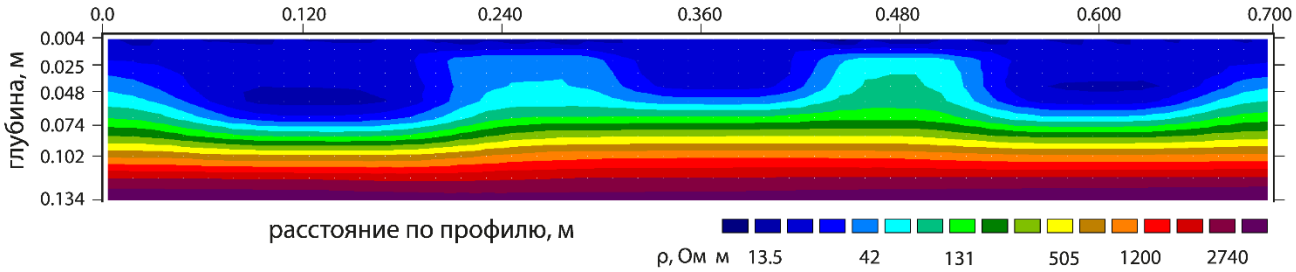


Рисунок 5 – Результат построения геоэлектрической модели с установкой Веннера с теми же изоляторами

По сравнению с установкой Шлюмберже (рисунок 4) разрез характеризуется заметно меньшей глубинностью исследования. Вертикальная аномалия, связанная с имитаторами разломной зоны, выражена слабее и прослеживается на меньшую глубину. Центральная часть профиля (примерно 0,24-0,48 м) выделяется областью относительно пониженного сопротивления, однако контраст между зоной «разлома» и вмещающей средой существенно ниже. Верхняя часть разреза (0-0,05 м) представлена низкоомной водной средой (значения около 13,5-42 Ом·м). С глубиной сопротивление постепенно возрастает, достигая максимальных значений 1200-2740 Ом·м в нижней части разреза. При этом вертикальная аномалия все же прослеживается, однако ее границы значительно более размыты по сравнению с установкой Шлюмберже. Таким образом, установка Веннера в условиях проведенного эксперимента продемонстрировала меньшую чувствительность и меньшую глубинность при обнаружении вертикальной высокоомной неоднородности по сравнению с установкой Шлюмберже.

На рисунке 6 представлен геоэлектрический разрез, полученный в четвертом замере с использованием установки диполь-диполь при наличии двух 6-литровых пластиковых

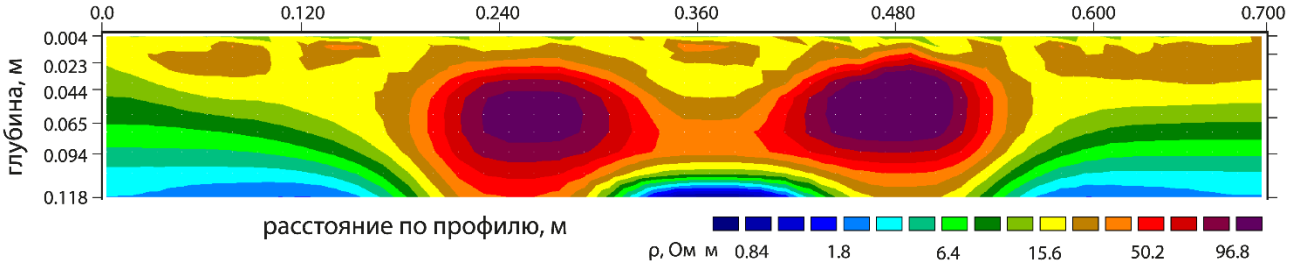


Рисунок 6 – Результат построения геоэлектрической модели с использованием установки диполь-диполь при наличии двух 6-литровых пластиковых бутылок

Данный разрез существенно отличается от предыдущих. На нем наиболее четко и контрастно выделяются две отдельные высокоомные аномалии, соответствующие расположению пластиковых бутылок. Аномалии имеют округлую, почти овальную форму и

хорошо прослеживаются на глубину до 0,09-0,10 м. Центральная часть каждой аномалии характеризуется высокими значениями удельного электрического сопротивления (темно-фиолетовые тона, более 50-96,8 Ом·м), в то время как окружающая водная среда показывает крайне низкие значения сопротивления (от 0,84 до 6,4 Ом·м). Границы аномалий выражены резко и имеют высокую контрастность. По сравнению с установкой Шлюмберже установка диполь-диполь обеспечила более четкое отображение высокоомных объектов и лучшую вертикальную разрешающую способность в приповерхностной части. Однако общая глубинность исследования оказалась меньше.

Заключение. По результатам четырех серий измерений установлено, что все исследованные электродные установки (Шлюмберже, Веннера и диполь-диполь) в той или иной степени позволяют выявлять вертикальные высокоомные неоднородности в условиях высокой проводимости среды. Наиболее эффективной оказалась установка Шлюмберже, которая обеспечила наилучшее сочетание контрастности изображения и приемлемой глубинности исследования. Установка Веннера продемонстрировала меньшую чувствительность и заметно меньшую глубинность по сравнению со Шлюмберже. Установка диполь-диполь обеспечила наилучшую контрастность и четкость границ аномалий, однако обладала несколько меньшей глубинностью. Полученные результаты подтверждают возможность применения электротомографии в адаптированном варианте для изучения разломных структур в условиях водной среды. Проведенное физическое моделирование позволило оценить разрешающую способность различных электродных установок и может служить основой для дальнейшей оптимизации методики полевых исследований в сложных геологических условиях сейсмоактивных регионов.

Автор выражает свою благодарность инженеру ГМТЗ ЛГМИ Лосихину Л.Н. за помощь в проведении эксперимента.

Работа выполнена в рамках государственного задания 1025032800006-1-1.5.1 Научной станции РАН в г. Бишкеке.

Литература

1. Калганов А.С., Оленченко В.В. Физическое моделирование электрометрического контроля утечек из бассейна продуктивных растворов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 2. № 1. С. 294-298. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-1-294-298. EDN COYPFO.
2. Шапаренко И.О., Неведрова Н.Н., Карин Ю.Г. Физическое моделирование разломных зон сейсмоактивных районов по данным электротомографии // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2023. Т. 2. № 4. С. 68-72. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-2-4-68-72. EDN WSQMXM.
3. Абдрахматов К.Е., Джумабаева А.Б. Сегментация Иссык-Атинского разлома (Северный Тянь-Шань) // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2014. № 1 (3). С. 24-30. EDN YRRLFP.
4. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Забинякова О.Б., Непеина К.С. 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.
5. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Забинякова О.Б., Непеина К.С. 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.
6. Аппаратура электроразведочная многоэлектродная «Скала»: Руководство по эксплуатации. 2019. 14 с. [Электронный ресурс]. URL: https://kbelectrometry.ru/catalog/skala-48k12/ (дата обращения: 19.02.2025).
7. Панин Г.Л. Многоэлектродная аппаратура методов сопротивлений «Скала-48» // Инженерная и рудная геофизика – 2008. Материалы конф. Геленджик. 2008. 2 с.
8. Loke M.H. RES2DINV, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method // Geoelectrical Imaging 2D & 3D GEOTOMO SOFTWARE. Malaysia. January 2009.

9. Юнусов А.И. Исследования методом электротомографии в районе месторождения «Чон-Туз» (Кочкорская впадина) // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Сб. материалов XV Междунар. конф. молодых ученых и студентов, г. Бишкек, 26–28 апреля 2023 г. Бишкек: НС РАН. 2023. С. 232-236. EDN FNOQBB.

УДК 550.343:550.38

ПОВТОРНЫЕ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ ТАШКЕНТА И ФЕРГАНЫ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМОГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Юсупов В.Р.
valijon.yusupov@mail.ru
Институт сейсмологии АН Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

В работе представлены результаты повторных магнитометрических наблюдений, выполненных в 2025 году на геомагнитных пунктах Ташкентского и Ферганского геодинамических полигонов. На каждом пункте проведено четыре цикла измерений магнитного поля Земли, данные которых проанализированы относительно первичных значений Янгибазарской магнитной обсерватории. Значения первого цикла приняты за нулевой уровень, что позволило оценить относительные изменения магнитного поля в последующих циклах наблюдений. Выявленные вариации магнитного поля проанализированы в контексте сейсмогеодинамических процессов региона. Результаты исследований визуализированы в виде графиков и карт пространственно-временного распределения магнитных вариаций. Показано, что повторные магнитометрические наблюдения являются эффективным инструментом для изучения геодинамического состояния и оценки сейсмотектонической активности исследуемых территорий.

Ключевые слова. магнитное поле Земли, магнитометрические наблюдения, геодинамический полигон, повторные измерения, сейсмотектонические процессы, Ташкентский полигон, Ферганский полигон, Центральный Кызылкум.

Введение. Изучение вариаций магнитного поля Земли является важным направлением геофизических исследований, позволяющим получать информацию о глубинных процессах, протекающих в земной коре. Особый интерес представляют повторные магнитометрические наблюдения, которые дают возможность выявлять пространственно-временные изменения геомагнитного поля и анализировать их связь с тектоническими и сейсмическими процессами [1].

Регионы Узбекистана, в том числе Ташкентский, Ферганский и Центрально-Кызылкумский районы, характеризуются сложным геодинамическим строением и повышенной сейсмотектонической активностью. Несмотря на это, отдельные территории, в частности Центральный Кызылкум, остаются недостаточно изученными в силу ранее существовавшей разреженной сети наблюдений. Крупные землетрясения второй половины XX века подтверждают высокую степень тектонической напряжённости и актуальность комплексных геофизических исследований в данном регионе [2, 3].

В связи с этим проведение плановых повторных магнитометрических измерений на геодинамических полигонах приобретает особое значение. Использование методов повторного поля и сопоставление данных со стационарными магнитными обсерваториями позволяет более надёжно фиксировать малые изменения магнитного поля и оценивать их возможную корреляцию с процессами деформации земной коры. Настоящая работа направлена на анализ результатов магнитометрических наблюдений 2025 года и оценку их информативности для изучения сейсмогеодинамического состояния исследуемых регионов [4, 5].

Методика исследования. Повторные магнитометрические измерения проводились в 2025 году на геомагнитных пунктах Ташкентского и Ферганского геодинамических полигонов. На каждом пункте выполнялись четыре цикла измерений, при этом данные первого

цикла принимались за «нулевой» уровень для оценки относительных изменений магнитного поля в последующих наблюдениях.

Измерения выполнялись с использованием высокоточных магнитометров с применением методов повторного поля и стационарных наблюдений. Повторные маршруты позволяли контролировать точность измерений и фиксировать малые вариации магнитного поля, минимизируя влияние внешних и техногенных факторов.

Обработка данных включала сопоставление результатов каждого цикла с первичными измерениями Янгибазарской магнитной обсерватории. На основе полученных данных рассчитывались относительные изменения магнитного поля для каждой точки, а результаты визуализировались на графиках и картах пространственно-временного распределения вариаций.

Анализ данных позволял выявлять закономерности изменений магнитного поля в контексте тектонической и сейсмической активности региона. Сопоставление магнитометрических наблюдений с историей землетрясений и геодинамическими особенностями территории давало возможность оценить зоны повышенной деформации и потенциальные сейсмогеодинамические связи.

Результаты исследования. В ходе повторных магнитометрических наблюдений на геомагнитных пунктах Ташкентского и Ферганского геодинамических полигонов в 2025 году выявлены изменения магнитного поля Земли на уровне отдельных точек и маршрутов. Значения первого цикла были приняты за «нулевой» уровень, что позволило оценить относительные вариации в последующих циклах. Максимальные изменения на отдельных пунктах достигали порядка 100–150 нТл, что соответствует умеренным аномалиям магнитного поля региона.

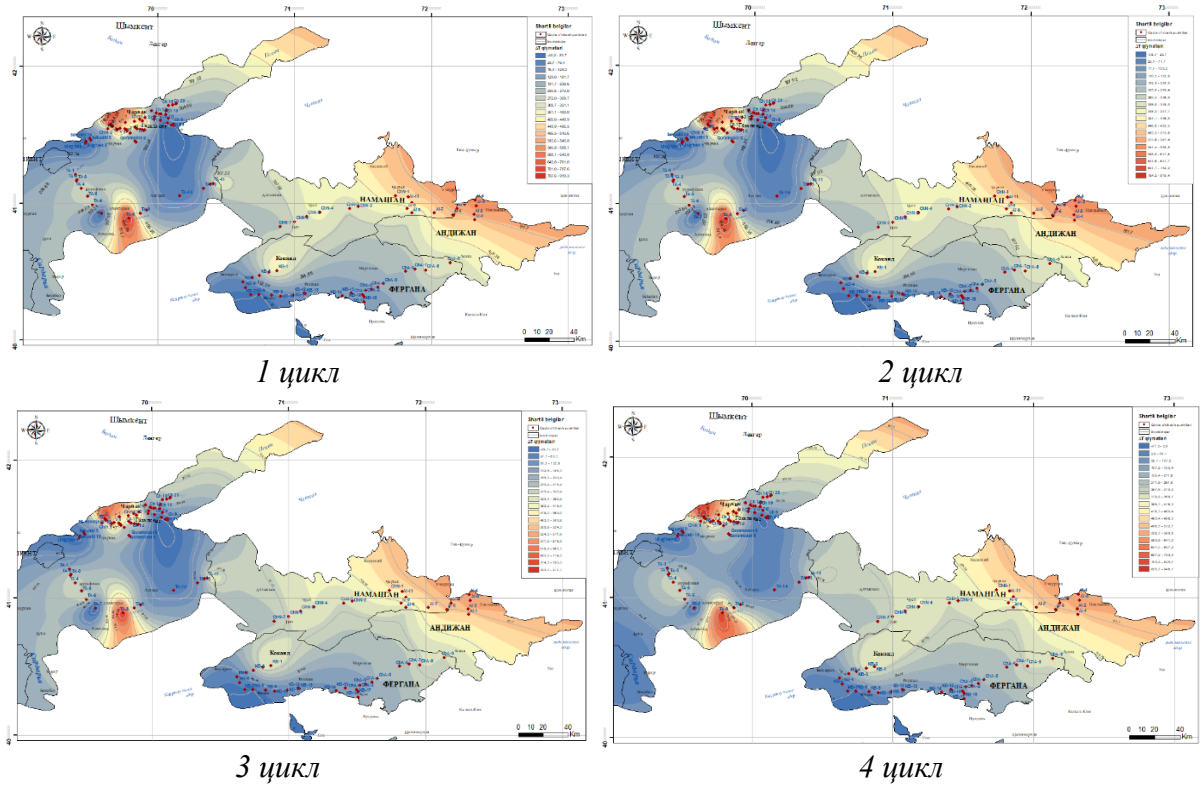


Рисунок 1 – График изменений магнитного поля Земли в 4 циклах в 2025 г. на геодинамических полигонах Ташкента и Ферганы (В.Р. Юсупов, 2025)

Сравнение результатов с первичными данными Янгибазарской магнитной обсерватории показало, что пространственно-временные изменения магнитного поля имеют

локальный характер и не связаны с крупными региональными магнитными аномалиями. Визуализация данных на картах (рисунок 1) продемонстрировала, что на некоторых участках наблюдается постепенное нарастание или снижение величины магнитного поля в течение 2025 года.

Анализ полученных данных позволил выявить возможные связи магнитных вариаций с сейсмогеодинамическими процессами региона. В районах Центрального Кызылкума, где ранее фиксировались значительные землетрясения (1976 и 1984 гг.), наблюдались более выраженные локальные изменения магнитного поля, что может отражать накопление напряжений в земной коре.

Длительный мониторинг и применение методов повторного поля подтвердили эффективность повторных измерений для изучения пространственно-временных параметров магнитного поля. Полученные результаты дают возможность использовать магнитометрические наблюдения для оценки геодинамического состояния территории и прогнозирования зон повышенной тектонической активности.

Обсуждение результатов. Повторные магнитометрические наблюдения на геодинамических полигонах Ташкента и Ферганы показали наличие локальных изменений магнитного поля Земли величиной до 100–150 нТл. Эти вариации, выявленные при сравнении с «нулевым» уровнем первого цикла, имеют преимущественно локальный характер и не связаны с крупными региональными аномалиями. Сопоставление с историческими данными о землетрясениях Центрального Кызылкума показывает, что участки с более выраженными магнитными вариациями совпадают с зонами повышенной тектонической активности, что указывает на возможную связь изменений магнитного поля с накоплением напряжений в земной коре.

Использование методов повторного поля, контрольных маршрутов и стационарных наблюдений обеспечило высокую точность результатов и минимизацию влияния внешних факторов. Полученные данные позволяют оценивать пространственно-временную динамику геофизических полей и демонстрируют, что повторные магнитометрические измерения являются эффективным инструментом для анализа геодинамического состояния региона и потенциальных зон сейсмического риска.

Выводы

1. Повторные магнитометрические наблюдения на геодинамических полигонах Ташкента и Ферганы в 2025 году показали наличие малых, но достоверных изменений магнитного поля Земли, отражающих пространственно-временную динамику геофизических процессов.
2. Значения первого цикла измерений эффективно использовались как «нулевой» уровень для оценки относительных вариаций, что позволило выявить локальные аномалии магнитного поля без влияния крупных региональных факторов.
3. Анализ данных показал возможную связь выявленных магнитных вариаций с сейсмогеодинамическими процессами, особенно в районах Центрального Кызылкума, характеризующихся высокой тектонической активностью.
4. Использование повторных маршрутов и методов повторного поля в сочетании с данными стационарных наблюдений подтвердило эффективность метода для изучения пространственно-временных параметров магнитного поля и оценки геодинамического состояния регионов.

Литература

1. Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х. Вариации геомагнитного поля сейсмоактивных районов. Ташкент: Фан. 1975. 128 с.
2. Yusupov V.R., Yadigarov E.M. Regional variation of the geomagnetic field in Uzbekistan // International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences. 2019. Vol. 9 (1). P. 60-66.

3. Abdullabekov K.N., Yusupov V.R. Some Results of the Study of Variations of Electromagnetic Fields Caused by Different-Rank Seismogeodynamic Processes and the Mode of Operation of Man-Made Objects // International Journal of Magnetics and Electromagnetism. 2020. Vol. 6 (1).
4. Maksudov S.Kh., Abdullabekov K.N., Tuichiev A.I., Yusupov V.R. Geomagnetic Field Variations Caused by the Processes Occurring at Different Depths in the Earth's Crust and Upper Mantle // Physics of the Solid Earth. 2021. Vol. 57. No. 3. P. 295–308.
5. Yusupov V., Soloviev A., Sidorov R. Studying diurnal and secular variations of the Earth's magnetic field using data from Yangibazar magnetic observatory (Uzbekistan) // Russian Journal of Earth Sciences. 2022. Vol. 22. Iss. 6. P. 1-14. https://doi.org/10.2205/2022ES000815

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ОПАСНОСТИ

УДК 551.58

CLIMATE DATA ANALYSIS OF DROUGHT TRENDS IN KAKUMA REFUGEE CAMP (1950–2022)

Abalo J.A.[1], Orunbaev S.Z.[2]
ja3290@bard.edu
[1] Bard College at Annandale, Annandale, Kenya
[2] American University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan

A study of the droughts in the Kakuma Refugee Camp used monthly rainfall data obtained from Climatic Research Unit Time Series data between 1950 and 2022 and three analyses were performed to compare the total amount of rainfall received in a given year, how rain was distributed over the different seasons and how many wet and dry years there have been and the relationships between these variables in their effects on water scarcity and floods. This study analysed the Kakuma rainfall data using Excel spreadsheets for calculations and graphs for visualization of the results, and the average rainfall values were included in their graphic presentation. Rainfall data collected from Kakuma shows high year-to-year variability. In several years, the number of dry years was similar to the number of wet years. and there have been changes in the rainfall trends over the 50 years of data. Therefore, the variability of the amount of yearly rainfall will make it more likely that there will be an increase in the frequency and duration of droughts and, therefore, that there will be less water available for, and decrease food security and the ability of residents of the Kakuma Refugee Camp to live their livelihood. The results of the study can be used to develop long-term forecasts of rainfall for water management and drought preparedness for arid environments, like the Kakuma Refugee Camp.

Keywords: Drought variability, Rainfall trends, Water scarcity, Climate variability, Kakuma Refugee Camp, Drought preparedness.

Introduction. Areas that have historically received relatively little rainfall are beginning to see the effects of climate change now and will continue to do so in the future. The Kakuma Refugee Camp receives its entire water supply from rainwater and relies on this same water source for livestock and small-scale farming throughout the camp's entirety. As climate change makes rainfall more irregular, we can expect the number of people suffering from drought and water shortage to continue to increase due to an increase in the number of times irrigated crops will not be produced throughout the year. A long-term study of increased rainfall, if conducted, will give us a better indication of whether or not the number of droughts in this area is likely to increase over the long term (See IPCC, 2021).

Many semi-arid regions of Africa are adversely impacted by climate change, one of which is Turkana County. The rainfall is minimal in these areas (including Turkana County), so even small changes in volumes of precipitation may result in significant reductions of water availability for both drinking and food production in the area. Refugee camps typically do not have many natural resources and are almost completely dependent on external assistance; therefore, the consequences of rain volatility on security of water, sanitation, health and nutrition in these communities will be greater than in other areas of the country. For this reason, it is necessary to monitor the rainfall trends observed in Kakuma to enhance research related to climate change, to improve humanitarian planning, and improve risk management procedures.

At this point in time, the implications of global climate change are understood to have an impact on the earth's environment as a whole and will produce negative effects for both developed and developing worlds alike. However, in areas that currently experience severe weather already, the potential for change caused by climate change will be exponentially greater than in places where climate change has not yet caused any adverse effects. For example, if the amount of rain received in Turkana County changes, the amount of water available for humans and animals will almost certainly

be affected, resulting in corresponding changes in the amount of livestock or crops produced. Long-term migration of human and animal populations could occur in the future if water and pasture resources continue to decline over successive years.Thus, it is essential to understand the long-term averages of precipitation for the humanitarian and scientific community due to the nature of the habitats and the refugee camps in these areas making them especially vulnerable to the negative effects of climate change and to the high rate of dependence on aid in these areas. Patterns of resource use can assist NGOs, the government, and other organisations to plan for emergencies and ensure that food distribution and water distribution is managed effectively. Collecting and evaluating long-term averages of precipitation will allow those who develop policy for drought and flooding to have more reliable data with which to develop procedures, policies, and systems to reduce the negative effects caused by extreme weather.

Historical records of rainfall can be used to educate community members about the need for water conservation and to develop seasonal planning for agricultural production.

Research Aim of the study is to analyse the rainfall trends and drought risk in the Kakuma refugee camp from 1950-2022. Research Question: Has rainfall in Kakuma changed over time? Do rainfall changes increase drought risk for people living in the camp?

Study Area. Kakuma Refugee Camp is located in the Turkana District of Northwest Kenya and it is situated in a predominantly desert-like environment characterized by having a semi-arid climate due to experiencing overall higher temperatures than average but receiving much less rainfall than average from year to year (this is primarily due to having only a few important seasonal rainfall events). Due to the lack of rain in the Kakuma Refugee Camp and almost no natural sources of water or infrastructure, it is one of the world's most impoverished and neglected areas. When it opened in 1992, the camp started providing a home to tens of thousands of people displaced by violence, war and chaos, with South Sudan, Somalia, Ethiopia and the Democratic Republic of the Congo being major contributors. Due to continuing conflict in these countries, as time goes on there will continue to be many people coming to find a place to live in the camp.

Due to the increased number of displaced persons, Kakuma Refugee Camp will continue to experience a local resource shortage (land, water and flora & fauna). The region surrounding Kakuma receives relatively low annual rainfall, typically below 500 mm per year. annually, with an average temperature of over 30C (86 F) indicating that drinking and cooking will continue to suffer from decreased availability from evaporation rates due to the warm climate.

In Kakuma, there are generally two distinct times of year where rain typically falls; March to May - referred to as Long Rains - and late October to early December - referred to as short or little rains. Outside of these periods there is usually not enough precipitation for Kakuma to survive. Should either Long Rains or Short Rains fail to provide adequate precipitation to the people of Kakuma, this could result in severe drought. Therefore, any variation in the timing, intensity or duration of rain can have a large effect on the quality and quantity of life in Kakuma.

Qualifying as one of Earth's voids, Kakuma has a significant level of exposure to the climate-induced stressors associated with it. It consists primarily of sandy soils poor in capacity to retain moisture following precipitation events, which leads to highly susceptible soil conditions due to the rapid evaporation of water loss and runoff. The vegetation cover is sparse in this area and has been severely diminished due to overgrazing of nearby land and surrounding areas have been exposed to this environmental condition thus heightening the risk of desertification. With a continuing influx of newly arriving residents creating an increasing burden on the already strained natural resources of this area; it is inevitable that both environmental factors and social factors will dramatically increase the risk of drought occurring in this region.

Natural drought must be made worse by social factors, such as population pressures and the overexploitation of wells, and water resource conflict. Local community practices such as firewood collection and overgrazing contribute to environmental stresses.

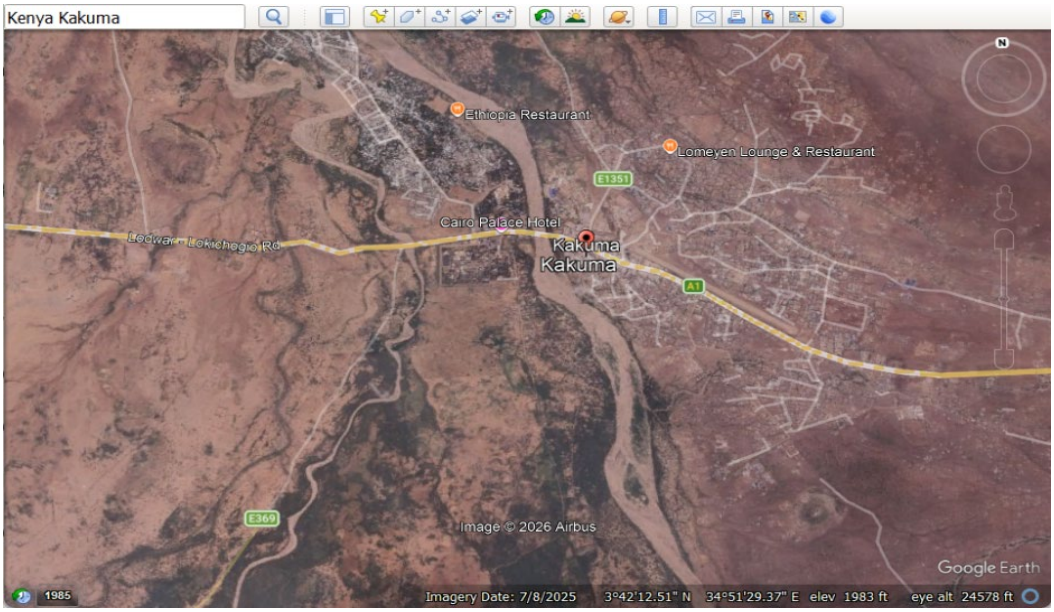


Figure 1 – Location of Kakuma Refugee Camp in Turkana County, Kenya

Data Source. The rainfall data were taken from the CRU TS global climate dataset produced by the Climate Research Unit. Therefore the dataset has provided long-term monthly rainfall observations from the year of 1950-2022.

CRU TS has been used many times as a source of data by researchers examining the climate due to its high quality, consistency and trustworthiness when compared to other historical datasets for climatological (climate) data sources. The datasets used by researchers will provide access to and allow them to compare all of the rainfall data from 1987 through today with over 70 years of historical climate data to identify large-scale, climatic change trends versus newer rainfall data for the current year. Additionally, analysts can use these datasets to assess whether the recent drought events have been caused by natural variation or represent a change in the overall climate.

Data Processing. Monthly rainfall values for Kakuma were extracted using Google Earth Pro. In Excel: Monthly data were converted to yearly totals, Seasonal averages were calculated, Years were classified as wet or dry

The average annual rainfall over the long term was calculated based on the entire period from 1950-2022 as represented in the previous calendar year. A period of wet years has been defined as having above average rainfall, while dry years are defined as having below average rainfall. This classification allows us to clearly identify dry periods (drought) as well as wet periods (above average rainfall). The long and short rainy seasons have been treated separately to determine the individual contributions of each season to total annual rainfall.

Long-term climate datasets are crucial for recognizing trends that aren't apparent over shorter durations. Long-term climates can also be analyzed more clearly than the monthly or seasonal totals once a year has already passed. An example of this can be demonstrated with rainfall data, as will be discussed in the following paragraphs.

The purpose of this study was to illustrate how long term averages can be used to identify anomalies. It was done primarily using Microsoft Excel, to perform the calculations, as well as to create tables and charts to visually depict the results of the rainfall data. In addition, data cleaning was used in order to identify any potential outliers or invalid values from the dataset. The systematic way in which this data was analyzed leads to greater confidence in the findings of this study and the data presented here and provides a means of determining the basis for the conclusions reached.

Statistical Analysis

- Graph comparison
- Average rainfall calculation
- Trend observation over time

These methods help identify drought patterns. To analyze the past trends in annual rainfall, a linear regression trendline was applied to all our seasonal rainfall graphs in order to determine if rainfall amounts have increased, decreased or remained the same over periods of time. Additionally, for each decade of data, we compiled a list of the number of dry years occurring as a means to see if drought has been occurring at an increasing rate recently. This is an example of a basic statistical technique that allows for the easy visual interpretation of long-term rainfall trends.

In climate research, linear regression analysis (large) is often employed to ascertain trends in climate behaviour on a temporal basis; for example, if the regression line has a positive slope, then it is assumed that rain has been on the increase and if the slope is negative then rain has been on the decrease.

In combination with large, simple descriptive statistics such as mean, range and standard deviation can assist in quantifying the variability in rainfall. Decadal comparisons can also be of use when trying to assess whether or not the frequency of droughts has increased over the last few decades compared to prior decades. Together these approaches can give visual evidence and numerical evidence of climate variability within Kakuma.

Results. The total yearly precipitation graph shows considerable fluctuation between years of total rain for any given site. Occasionally, total rainfall received in one year will significantly exceed the amount received in prior years, while on some occasions, total precipitation received for one year will be less than the amounts received in earlier years. The high variability in precipitation received from year to year suggests that this site will not receive a consistently predictable volume of rainfall. Given the high number of years in which total precipitation received has been low, the site may experience a period of extreme drought.

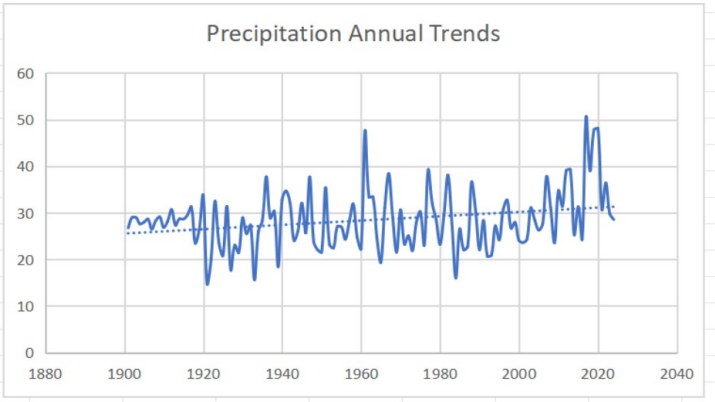


Figure 2 – Annual precipitation

From the graph below, it can be seen that every calendar year has dry years after successive wet years. Average monthly precipitation's variability of total precipitation over time confirms this variability in total precipitation patterns (i.e., high variability) has affected food crop and water supply planning for municipalities dependent on this precipitation production of food crops and a sufficient quantity of drinking water. The amount of precipitation received in a calendar year, below an average of 100 mm per month, increases the likelihood of food insecurity and compromised economic well-being of households within that calendar year.

In figure 2: In the period between 1980 and 2000, there was an increase in rainfall within Kakuma, which may be attributed to the warming of the Indian Ocean, which normally brings moisture to the region of East Africa. This, however, did not mean that there was stability, as there were extreme changes, some years being wet while others were dry, making it unstable, which still led to drought conditions.

The long-rain season is usually when Kakuma's primary supply of water is received. Graphs demonstrate that in certain years, the long-rains have abundant amounts of precipitation (strong) compared to other years, where the long rains have less than average amounts of precipitation, or where they arrive after their scheduled time (late). When the long-rains fail, or arrive late, the annual total precipitation levels are drastically reduced. This has a significant effect on agriculture, pasture

development, and access to water at the camp. The unpredictable nature of long-rains is a major determinant of having a drought risk.

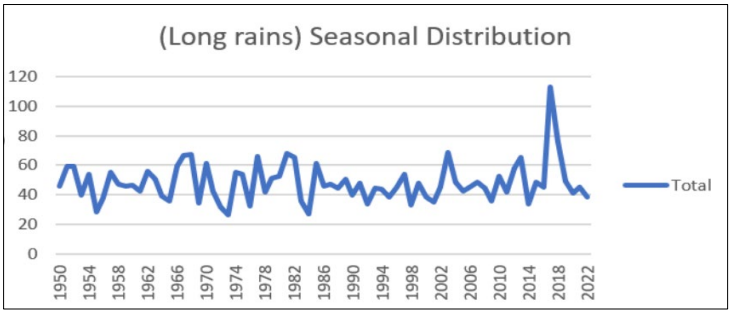


Figure 3 – Long rains (March - May)

Long rain seasons make up the highest proportion of yearly rainfall (by far), meaning that if this type of rainfall has a poor season, it will not be able to compensate in full with good short rains. Thus, the success of agricultural production is highly dependent on the performance of the March to May rainy season. Delayed starts to the rainy season will reduce the crop growing time and the unpredictability of when the rains start will affect how farmers decide to plant their crops and how much food they will be able to grow. Because of this, determining drought potential via total rainfall amounts alone does not account for how reliable the rainfall will be in terms of time.

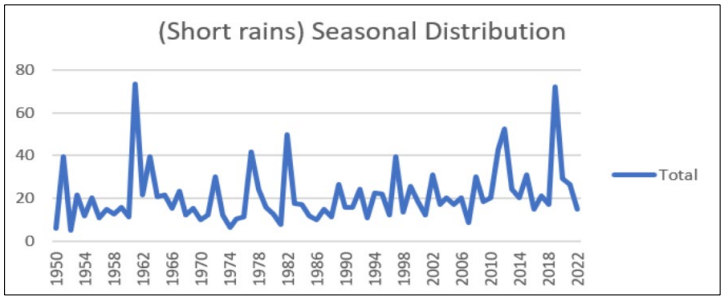


Figure 4 – Short rain months (October-December)

The charts display the total precipitation received during the short rain cycle. Generally, the short rains are important for providing communities with enough water to recover from previous long dry periods. The amount of rainfall received in an individual year from all sources is typically quite large, but the amount of short rain received within an individual year does vary greatly from year to year and may even be zero in some of those years. The chance of having a drought is much greater during those years that have both weak long rains and weak short rains than during any year that has either good long or good short rains. The variability in weather patterns at Kakuma indicates that the moisture cycle for Kakuma provides unreliable amounts of moisture.

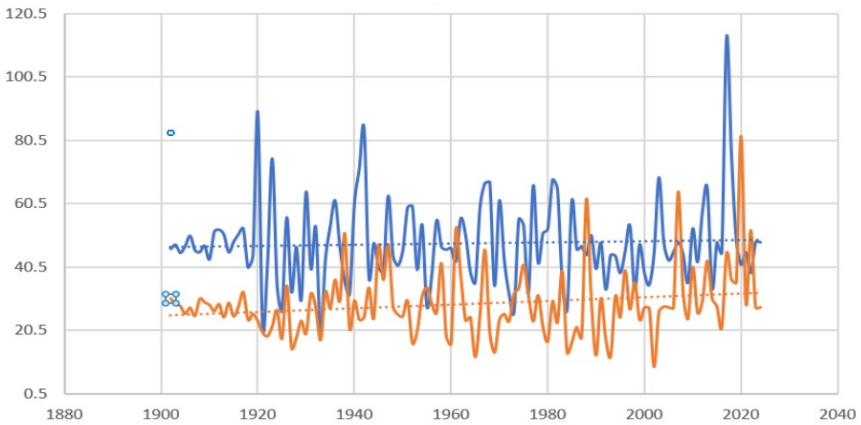


Figure 5 – Wet and Dry years in Kakuma refugee camp

The Graph showing Wet and Dry Years shows more frequent occurrences of Dry Years in the past several decades. This indicates an increase in Drought Stress within Kakuma. Fewer Wet Years equate to decreased amounts of Water, increased pressures on Food Systems, and increased Humanitarian Requirements.

Over the past several decades there has been a noticeable rise in drier years which has been leading to an increase in the frequency of drought conditions. This is likely connected to long-term, regional climate changes that are impacting areas of East Africa. The communities of Kakuma will have to adapt to a future where dry years will occur far more frequently than wet years. The increase in drought duration has had an adverse effect on household resilience, leading to an increased reliance on food assistance and less time spent as valued participants in their communities. A prolonged period of drought can also lead to long-term negative effects on health, education, and economic opportunity while living in a refugee camp.

Summary of Precipitation Patterns: There is a high level of fluctuations in terms of rain in Kakuma. The amount of annual rain has a very wide range in the amount of rain and some years there are much less than average amounts of rain causing a larger chance of a drought happening. The larger percentage of rain in Kakuma is received during the long rains which occur from March through May and not receiving rain during the long rainy season means lower rainfall in Kakuma because of inconsistent timing and also very low quantities of rainfall. In addition to receiving very little rain in the long rainy season, very weak amounts of short rain in the months of October to December causes the higher probability of drought. The trends regarding the total number of wet years and the total number of dry years for the last several decades are showing that we have much more frequent dry years over the last several decades than ever before. As such, the trend lines regarding the amount of precipitation are indicating very unpredictable rainfall in addition to a trend of increasing risk of a drought in Kakuma.

Discussion. Results indicate similarities with reports on regional climate change showing increased variability in precipitation for East Africa. New Climate System Modelling predicts that extreme events caused by Climate Change (such as droughts) will become increasingly frequent in the future. This will reduce the amount of resources available to refugees and increase the competition for scarce water resources between refugees and the host community. As a result, long-term Adaptation to Climate Change Strategy needs both social (Sustainability) and ecological (Sustainability) components. Inclusion of Climate data in Humanitarian Planning will also diminish the long-term risk of Vulnerability to Climate Change for Refugee populations.

The rainfall variability that happens in Kakuma is similar to what happens in other parts of East Africa due to climate change. This has made the regions susceptible to drought. Due to climate change, droughts in Eastern Africa have become frequent occurrences (2017 Ongoma & Chen). People living in Kakuma will likely experience increased food insecurity related to altering rainfall patterns, resulting in a greater reliance on outside help from entities such as UNHCR and less access to clean drinking water and sufficient food.

Potential Policy Options. The results suggest that improved collection mechanisms for water should be put into place; construct additional tanks for water storage; grow crops that can tolerate aridity; and create sophisticated management systems that allow for adequate monitoring and assessment of the level of risk. Also, it will require partnerships between the Kenyan Government, aid agencies and climate scientists to reduce the effects of climate change in Kakuma, which has a very high degree of variability due to climate change, in order to improve the long term viability of refugees from future negative impacts from dry periods or drought.

Additional Discussion and Recommendation. From the findings of this research, it can be concluded that droughts in the Kakuma area are not only natural phenomena, but there are also other social and human influences that have exacerbated the effects of droughts in the area. For example, the fact that there are too many people in the area, the fact that people depend on external sources of food and water, and the fact that people are exploiting natural resources in excess have put the people in the area in a very vulnerable state in terms of droughts. For example, the fact that there are many refugees in the area has exacerbated the effects of droughts in the area because there is a need for water, land, and grazing.

The effects of the drought, although minor, can be mitigated. This can be achieved, for instance, by the development of more water storage tanks, which can mitigate the effects of the drought resulting from the lack of water due to poor rainfall received during the rainy season. Being aware of the need to conserve water and the effects of drought, as well as the need to prevent over-grazing of the area near the camp, can mitigate the effects of drought. The actions of the members of the community can mitigate the effects of drought, although minor, for instance, by the development of the stored water for use by the community for both domestic and agricultural purposes.

Another important measure which needs to be taken is the early warning systems. The local authorities, the aid organizations, and the climate change experts need to work together and have the ability to track the rainfall in real time. This would help them forecast the drought before it even occurs. This would help them send food and water aid before the drought occurs, and the pressure would not be so high on the families. The use of technology, like sending alerts via mobile phones for the people, informing them about the expected rainfall or drought, would greatly help.

Another thing is the issue of community participation. The refugees can be encouraged to plant trees which can help in preventing erosion, provide an area for the collection of water, and also provide an area of safety for crops during the time of drought. This can help in reducing the amount of aid the refugees are receiving. It would be vital for the government, as well as other non-governmental organizations, and other stakeholders such as international organizations, to come up with a plan which can help in the long term, focusing on the issue of drought as well as the management of water.

Kakuma Refugee Camp is an area which is highly vulnerable to the effects of climate change, and steps can be taken, as well as policies, to help the people in the camp access the needs which the harsh weather is presenting.

Conclusion. Rainfall in Kakuma between 1950 and 2022 shows high variability and increasing frequency of dry years. The rising unpredictability of weather patterns increases drought risk which also endangers water supplies and food security and refugee camp resident livelihoods.

The construction of long-term resilience needs three essential steps which require the improvement of water storage facilities and the establishment of early warning systems and the application of climate information for humanitarian missions. Future studies should integrate climate data with socio-economic information to enhance understanding of vulnerability and develop effective adaptation methods for arid refugee areas.

References

1. Climatic Research Unit, University of East Anglia. (n.d.). CRU TS dataset documentation and access portal. https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.08/ge

2. Harris I., Osborn T.J., Jones P., & Lister D. 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
3. IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/
4. Ongoma V., & Chen H. (2017). Temporal and spatial variability of temperature and precipitation over East Africa. Meteorology and Atmospheric Physics. https://doi.org/10.1007/s00703-017-0501-2
5. UNHCR. (2023). Climate risks and environmental pressures in refugee settlements. United Nations High Commissioner for Refugees. https://www.unhcr.org

УДК 551.583

CLIMATE VARIABILITY AND CYCLONE IMPACTS ON LIVELIHOODS IN COASTAL BANGLADESH: EVIDENCE FROM THE BENGAL DELTA

Das T.K.[1], Orunbaev S.Z.[2]
dastapos8@gmail.com
[1] BRAC University, Dhaka, Bangladesh
[2] American University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan

The Bengal Delta, the world's largest river delta, is highly prone to cyclones due to its geographical settings, low-lying area, large population density, and climatic hazards. This study analyzes long-term climate variability and cyclone impacts on livelihoods in the coastal regions of Bangladesh, focusing on Sarankhola, Koyra, and Dacope. Monthly climate data from 1901–2024 were examined for trends in temperature, precipitation, diurnal temperature range, and vapor pressure. The results indicate a significant increase in mean temperature and fluctuations in precipitation patterns. Several extreme climate anomalies coincide with major cyclones. These climatic changes have substantial implications for agriculture, fisheries, and local livelihoods in coastal communities. The study highlights the importance of strengthening early warning systems and community-based adaptation strategies to reduce disaster risk in the Bengal Delta. More than 35 million people are exposed to natural hazards.

Keywords: climate variability, cyclone impacts, livelihoods, coastal Bangladesh, Bengal Delta.

Introduction. Climate variability and climate change are important global phenomena. The coastal regions of Bangladesh are geographically important for studying natural hazards because these areas are vulnerable due to different types of natural hazards (cyclones, storm surges, and floods) [1]. More than 35 million people live in coastal Bangladesh. They are very much exposed to different kinds of natural hazards (IPCC 2022) [2].

The objective of this study is to analyze long-term climate variability and assess its potential relationship with cyclone hazards in the coastal regions of Bangladesh. The research questions include: What are the long-term trends in temperature, precipitation, vapor pressure, and diurnal temperature range in the Bengal Delta? Are there significant climate anomalies associated with major cyclone events? How have climate trends affected vulnerable coastal livelihoods? What implications do these trends have for future cyclone risk?

Study Area. The geographic location of the study area is the coastal regions of Bangladesh. Bangladesh is in South Asia. The latitudes are between 20.5667°N and 26.6333°N and longitudes 88.0167°E and 92.6833°E. The coastal region of Bangladesh is situated in the southern part of Bangladesh, which is located on the coast of the Bay of Bengal. Its latitudes are between 20.5667°N and 23.4333°N, and the longitudes 88.0000°E and 91.8333°E. The coastal regions of Bangladesh are 19 districts (Khulna, Shatkhira, Bagerhat, Barisal, Noakhali, Bhola, Cox's Bazar, and others). The specific areas of the study areas include, Dacope (22.6049° N, 89.5199° E), Koyra (22.3516° N, 89.2859° E), and Sarankhola (22.3129° N, 89.8480° E). The elevation range of these areas is approximately 0 to 5 meters above sea level due to these coastal regions being exposed to the different climatic hazards such as cyclones, tidal surges, salinity, and so on. These regions are characterized by estuaries, tidal rivers, low-lying floods, cyclone-prone, deltaic plains, and salinity prone areas. Moreover, these areas play crucial roles for local people's livelihoods, such as agriculture, fish farming, fishing, and mangrove-based livelihood, including fishing and collecting crabs, honey, and goal leaves (nipa palm leaves) from forests. Meanwhile, these regions are highly exposed and experience different types of natural hazards due to the tropical monsoon climate [3]. More specifically, tropical cyclones form over the Bay of Bengal.

These areas have a historic atmospheric significance. The annual temperature is very high in the area and ranges between 25°C and 28°C, with high humidity and a significant amount of substantial annual rainfall, which are the reasons for the formation of tropical cyclones and tidal surges. This area has an atmospheric importance because this region is a disaster-prone area, including cyclone, tidal surges, flooding, salinity, and prone areas.

Data Source. Monthly climate data were obtained from the Climatic Research Unit Time Series dataset (CRU TS v4.09) [4], which provides gridded climate observations at a spatial resolution of 0.5° × 0.5°. Meanwhile, the Climatic Research Unit Gridded Time-Series (CRU TS) is a well-known and recognized data set for analyzing climate data (table 1). Here, the CRU TS version 4.09 has been used for analyzing climate data. This version is the most updated version. In addition, the CRU TS version stations' observations change through annual updating.

Summary of data and analytical methods used in the study:

Time period: 1900-2024

Variables:

- Mean temperature
- Precipitation
- Vapor pressure
- Diurnal temperature

Methods:

- Trend analysis
- Moving average smoothing
- Climate anomaly calculation

Data Processing. The Google Earth Pro software has been used to process data sources. Microsoft Excel application has been used to prepare climate data. The different types of graphs and trend analysis graphs have been built using climate data. There is some aggregation between monthly and annual trend analysis. The seasonal graphs have been prepared for climate data analysis (summer seasons: March to June). There are some anomaly calculations to find out maximum and minimum climate data variations. There are also some periodic data anomalies.

Statistical Analysis. The linear graphs have been used for annual and seasonal trend analysis. Meanwhile, moving averages are used for trend analysis. R^2 were also used trendline to provide further explanation of the climate data.

Temperature Trends. Figure 1, figure 2, and figure 3 show annual temperature anomalies in the study areas of Dacope, Koyra and Sarankhola. The results show that the temperature trend has gradually increased over time, although short-term fluctuations with occasional falling are also seen. Meanwhile, a notable increase in temperature was recorded around 15 November, reaching around 26.4°C, the same year a devastating cyclone hit the coastal regions. Moreover, several other cyclone events were recorded in different years, including Rashmi (October, 2008), Aila (25 May, 2009), Giri (October, 2010), Mahasen (May, 2013), Komen (July, 2015), Roanu (21 May, 2016), Mora (30 May, 2017), Fani (April, 2019), Bulbul (October, 2019), Amphan (May, 2020), Yaas (May, 2021), Midhili (2023), and Remal (May, 2024). These data suggest that major cyclone events in the coastal regions, including Dacope, Koyra, and Sarankhola, often coincide with periods of climate anomalies, indicating a possible relationship between rising temperature trend and increased climate related natural hazards [5].

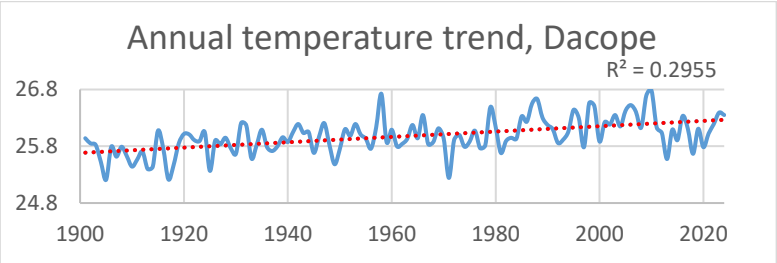


Figure 1 – Annual temperature for Dacope

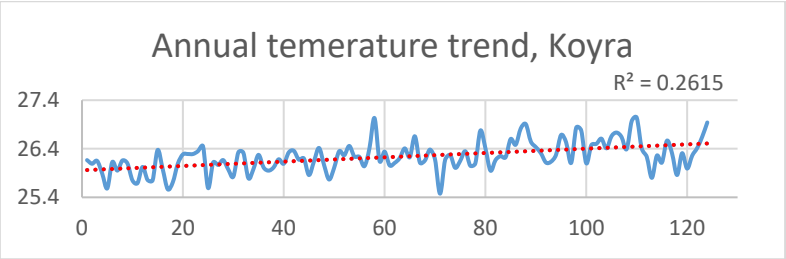


Figure 2 – Annual temperature Trend for Koyra

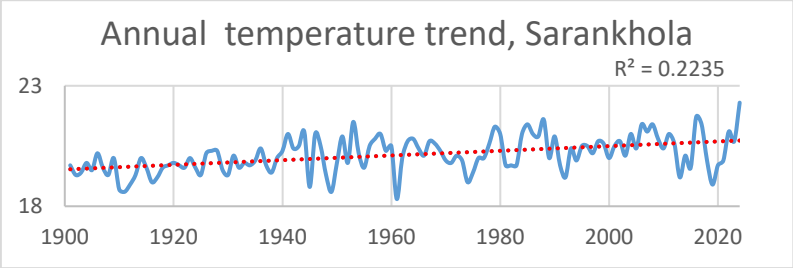


Figure 3 – Annual temperature Trend for Sarankhola

Figure 4, figure 5, and figure 6 illustrate the monthly temperature anomalies in the study areas of Dacope, Koyra and Sarankhola. The results display a gradual increase in the temperature trend over the study period.

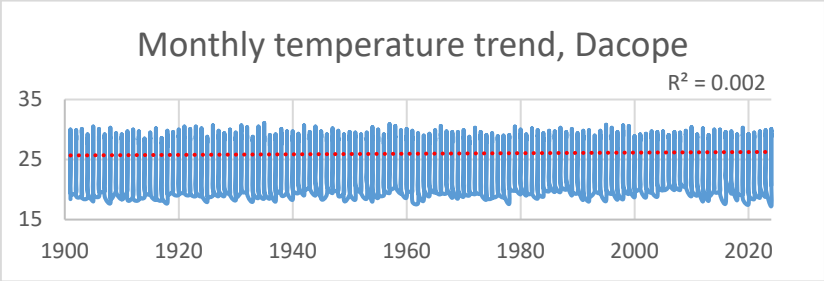


Figure 4 – Monthly temperature trend for Dacope

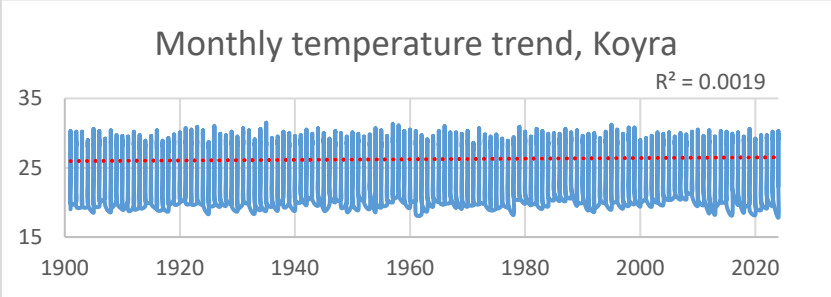


Figure 5 – Monthly temperature trend for Koyra

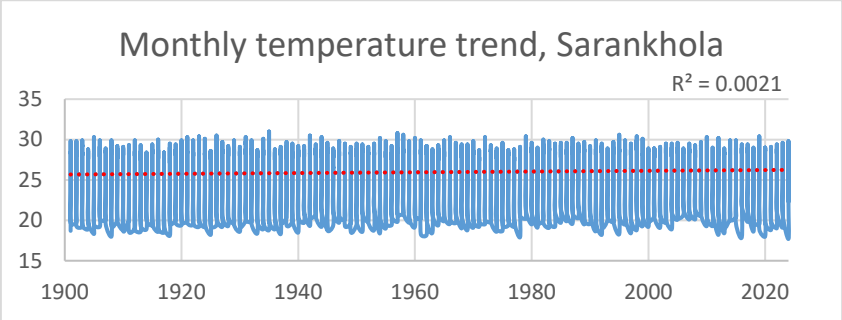


Figure 6 – Monthly temperature trend for Sarankhola

Seasonal temperature trends. Figure 7, figure 8, and figure 9 show seasonal (March-June) temperature anomalies in the study areas Dacope, Koyra, and Sarankhola. This season is particularly important, because it is associated with formation of natural hazards such as cyclones in the coastal areas. The result shows that several cyclone events occurred during periods of climate anomalies in different years. For example, on May 25, 2009, cyclone Aila hit the region among other cyclones.

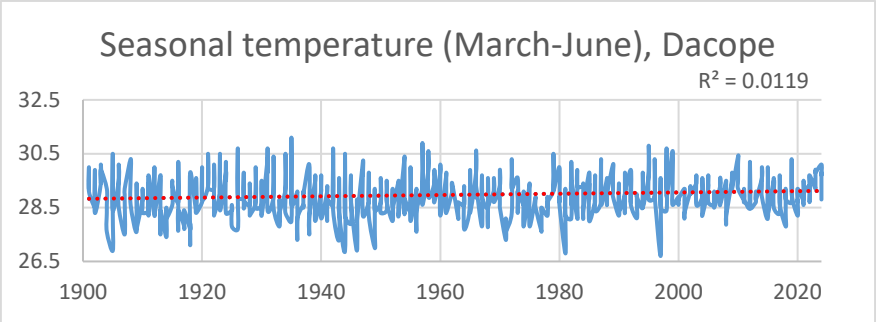


Figure 7 – Seasonal temperature trend

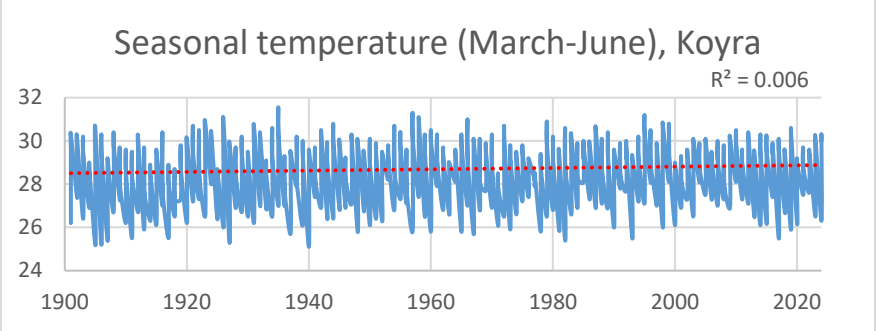


Figure 8 – Seasonal temperature trend (March-June) for Koyra

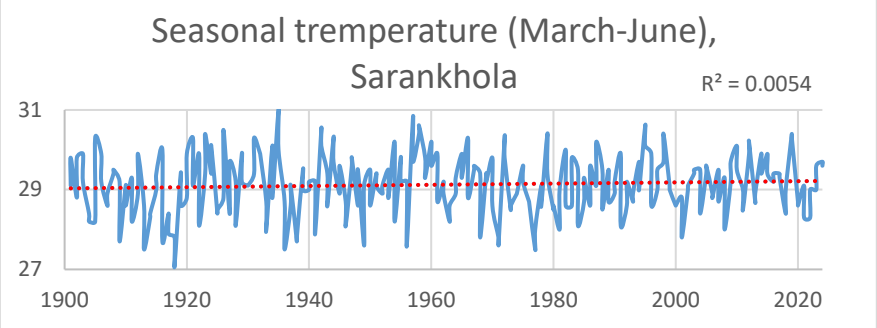


Figure 9 – Seasonal temperature trend (March-June) for Sarankhola

Precipitation Trends. Figure 10 shows that annual precipitation in Dacope is increasing, whereas the precipitation increased in 2007 (204 mm), and the cyclone Sidr formed during that particular time period due to anomalies of precipitation. Therefore, a devastating cyclone named Sidr occurred at that time. The storm surged and hit the area. It damaged local people's lives. Over 400 people died in one area of Sarankhola due to the cyclone. It also damaged agricultural land and crop fields. It influenced crop production and livelihood. In 1913, the annual precipitation increased to 212.59 mm, but then it decreased, whereas the precipitation slightly decreased in 2009 (142.23 mm), and the cyclone events (e.g., Aila) occurred during that period due to climate anomalies. Therefore, the saline water entered agricultural land, and crop fields were damaged due to this. Moreover, it has a long-term effect on crop production and livelihood. Overall, annual precipitations are declining.

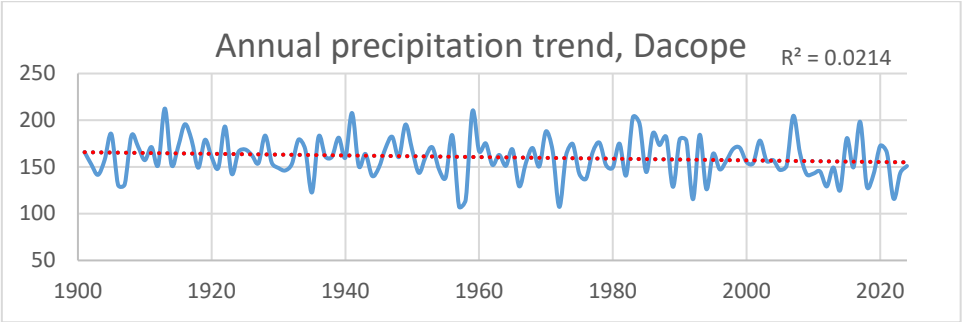


Figure 10 – Annual precipitation trend for Dacope

Figure 11 illustrates the monthly precipitation trend of Dacope, which exhibits substantial variability over the study period. The data shows numerous anomalies, with precipitation levels frequently increasing and decreasing. In 1900, monthly precipitation was recorded at 393.6 mm. Subsequently, precipitation decreased, followed by intermittent increase and decrease, eventually reaching a peak of 910.5 mm in 1961. Overall, significant fluctuations are recorded throughout the period from 1900 to 2024. During periods of climatic anomalies, several cyclone events occurred. One of the most devastating cyclones was Sidr, which struck the coastal region of Bangladesh in 2007, affecting the study areas of Dacope, Koyra and Sarankhola.

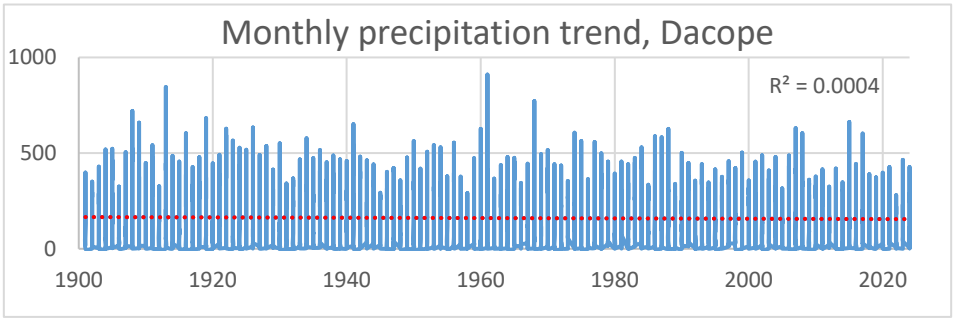


Figure 11 – Monthly precipitation trend for Dacope

The seasonal precipitation (March-June) graph (figure 12) shows the historical seasonal precipitation trend of Dacope, Bangladesh. The seasonal trend line indicates a decreasing trend and there are lots of anomalies in the trend line. In 1961, the seasonal precipitation was very high – 910.5 mm. But then the seasonal precipitation was declining. In 2007, the seasonal precipitation was 208.2 mm, and we found that a devastating Cyclone Sidr occurred during this time.

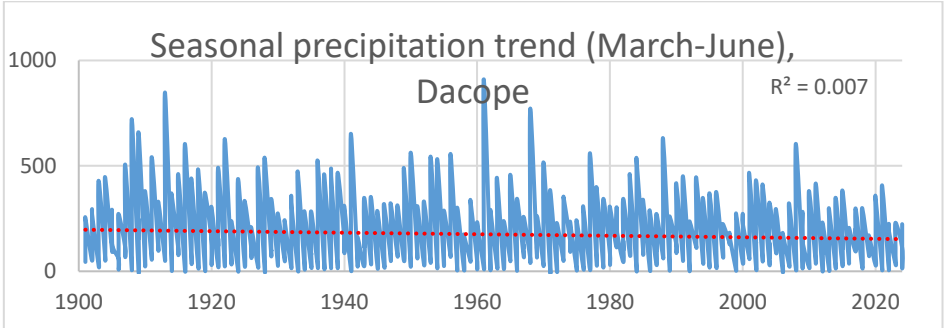


Figure 12 – Seasonal precipitation (March-June, summer) trend for Dacope

Figure 13 shows annual precipitation anomalies of Koyra. There are noticeable ups and downs each year over the period with rainfall dropping close to 110 mm and rising above 200 mm, while the dotted red trend line is almost flat. The trend line indicates no meaningful increase or decrease over the long term. Meanwhile, the precipitation remains fairly stable, averaging around 150-170 mm. Moreover, a devastating Cyclone Sidr formed in 2007 due to anomalies of precipitation. Therefore,

the cyclone damaged local people's lives, damaged crop field and animals in coastal area of Bangladesh, including Koyra.

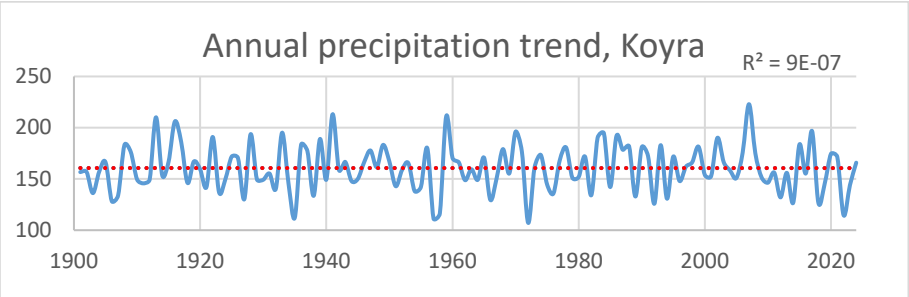


Figure 13 – Annual precipitation trend for Koyra

Figure 14 shows the monthly precipitation trend, which is significant over the chosen period. In 1901, monthly precipitation was recorded at 389.2 mm. Then it began to increase from 1902, reaching a peak of 936.3 mm in 1913. After this peak precipitation declined, followed by periods of both decrease and increase, indicating a highly variable pattern. During periods of climatic anomalies, several cyclone events occurred. One of the most devastating cyclones was Cyclone Sidr, which struck the coastal region of Bangladesh in 2007, severely affecting the study areas of Dacope, Koyra and Sarankhola. Overall, despite short-term variability, the long-term precipitation trend shows a gradual decrease.

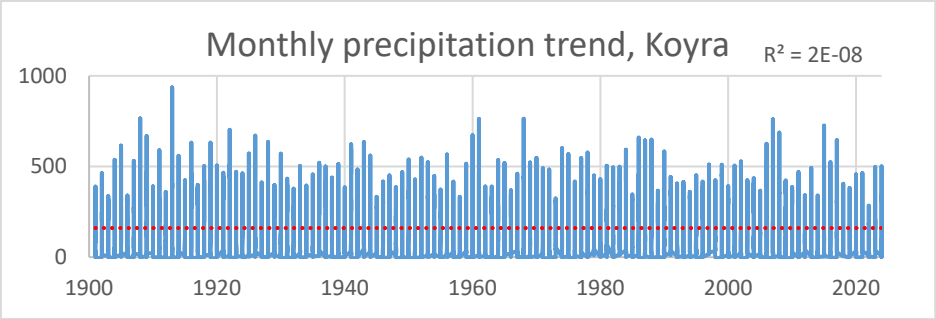


Figure 14 – Monthly precipitation trend for Koyra

Figure 15 illustrates the historical trend of seasonal precipitation (March-June) in Koyra, Bangladesh. The trend line shows significant fluctuations, with notable ups and downs as well as several anomalies over the period. In 1902 the seasonal precipitation was relatively low at 248.1 mm. After that, precipitation began to increase, reaching a peak of 936.3 mm in 1913. Meanwhile, this trend was followed by a decrease in subsequent years. Between 1970 and 2024, several cyclone events were recorded in the region. The data indicated that these cyclone occurrences are associated with anomalies in precipitation patterns. Precipitation appears to be a key variable contributing to natural disasters, often interacting with other environmental factors and variables (temperature, diurnal temperature range, and vapor pressure).

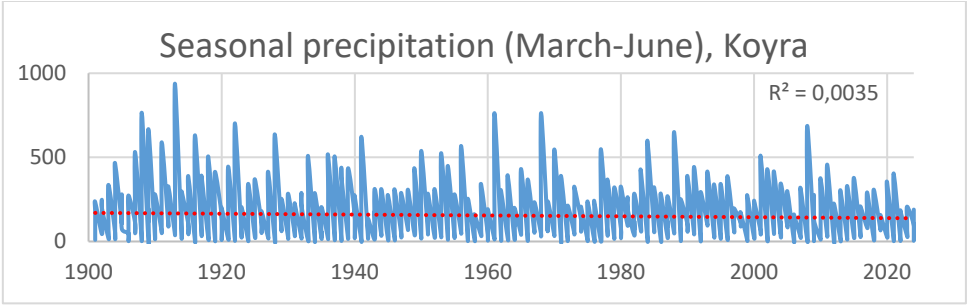


Figure 15 – Seasonal precipitation trend for Koyra

Figure 16 illustrates the annual precipitation anomalies in Sarankhola. The data shows significant year-to-year variability throughout the study period. In 1902, annual precipitation was relatively low at 292.4 mm. Thereafter, precipitation began to increase, reaching a peak of 1001.9 mm in 1913, which was notably higher compared to other years. Following this peak, the precipitation trend exhibited numerous fluctuations, with repeated increase and decrease over time. The dotted red trend line indicates a gradual decline in annual precipitation over the long term. Several cyclone events were recorded during the study period. These events caused substantial damage to local livelihood and property in the coastal regions of Bangladesh, including Sarankhola.

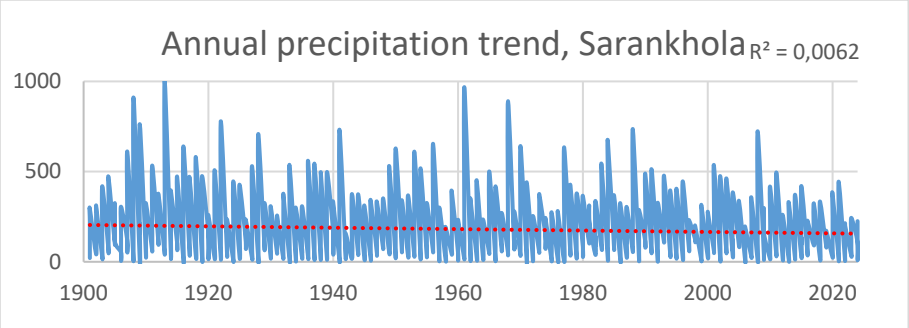


Figure 16 – Annual precipitation trend for Sarankhola

Figure 17 shows monthly precipitation anomalies in Sarankhola. The data reveal clear fluctuations with noticeable ups and downs throughout the study period.

The dotted red line highlights significant variations over time, indicating both increase and decrease in precipitation. In 1901, monthly precipitation was recorded at 460.4 mm. Thereafter, precipitation exhibited a pattern of alternating increase and decrease. However, a notable peak occurred in 1913, when monthly precipitation reached 1001.9 mm. Overall, from 1900 to 2024, precipitation shows considerable variability with intermittent rising and falling trends. Nevertheless, the long-term trend indicates a slight overall decline, with an average of approximately 270-300 mm.

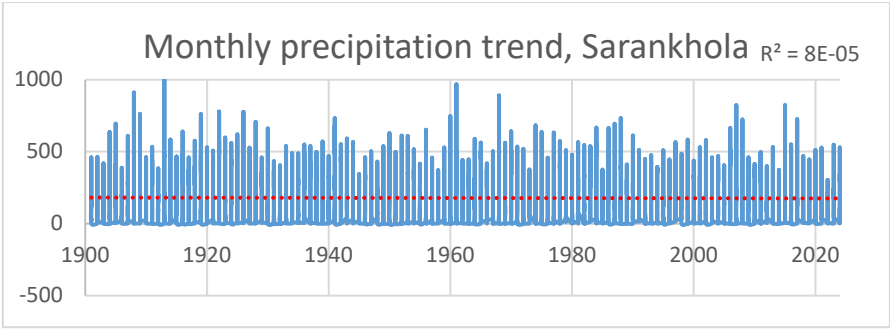


Figure 17 – Monthly precipitation trend for Sarankhola

Figure 18 shows the historical trend of seasonal precipitation (March-June) in Sarankhola, Bangladesh. The trend line highlights significant anomalies, with pronounced fluctuations throughout the study period. Seasonal precipitation was relatively low at 292.4 mm in 1902, while a significant peak of 1001.9 mm was recorded in 1913. From 1900 to 2024, the data show considerable variability with intermittent increase and decrease in precipitation. Despite these fluctuations, the overall trend indicates a gradual decline in seasonal precipitation in the later years.

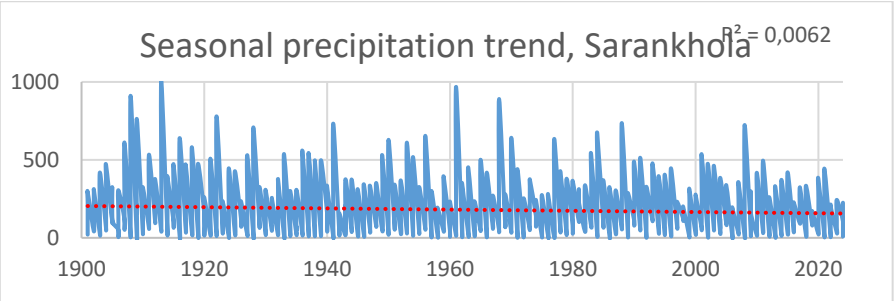


Figure 18 – Seasonal precipitation trend for Sarankhola

Diurnal temperature trends. Figure 19 shows the historical annual diurnal temperature in Dacope, Bangladesh. From 1900 to the 1960s, it remained around 10°C. After the 1960s, it began declining and has continued to do so. The graph (figure 19) shows the change of the annual diurnal temperature trend of Dacope, where there was a cyclone in 2007, and the graph shows the cyclone events occurred during periods of climate anomalies.

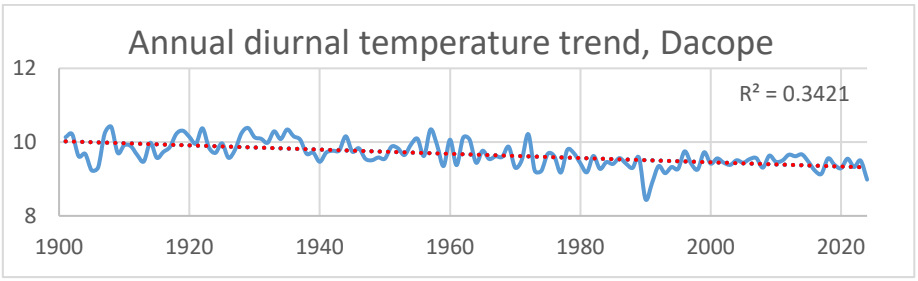


Figure 19 – Annual Diurnal Temperature trend for Dacope

Figure 20 shows that from 1900 until the 1980s, the monthly fluctuations in diurnal temperature were very high. From 2004 to 2016, the monthly diurnal temperature fluctuations were comparatively smoother. But starting after the 1980s it became shorter. After the 1980s, the amplitude of the diurnal temperature fluctuations decreased.

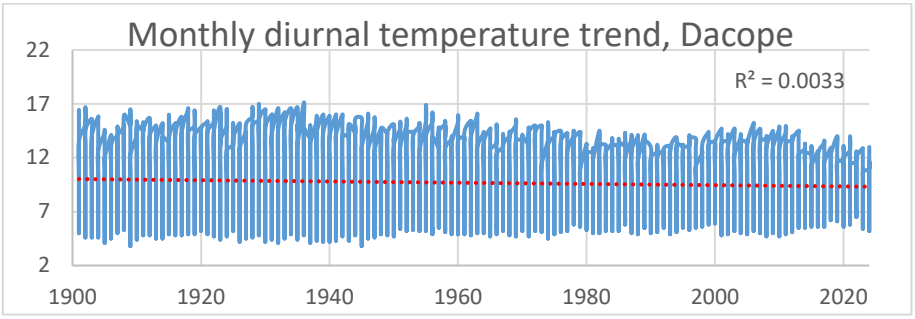


Figure 20 – Monthly Diurnal Temperature trend for Dacope

Figure 21 shows the seasonal fluctuations of diurnal temperature from 1900 to 2024. In 1923, the seasonal diurnal temperature was very high (16.2°C). After that, the seasonal diurnal temperature started to decrease, reaching 11.7°C by 2024.

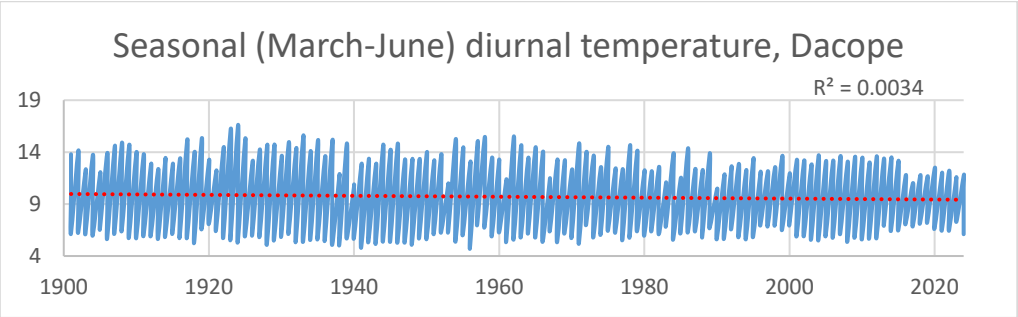


Figure 21 – Seasonal Diurnal Temperature trend for Dacope

Figure 22 indicates the usual historical annual diurnal temperature in Koyra, Bangladesh. It shows from 1900 to the 1960s, and it was around 12°C. But then after the 1960s, it started declining. Still, it is going down. There was a cyclone in 2007, and the graph shows that cyclone events occurred during periods of climate anomalies.

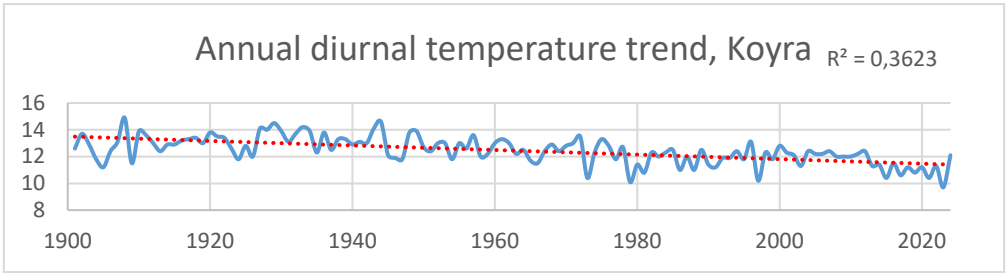


Figure 22 – Annual diurnal temperature trend for Koyra

Figure 23 shows that from 1900 to 1963, the monthly fluctuations of diurnal temperature were very high. However, from around 1963 to 2024, the diurnal temperature trend showed fluctuations that became smaller and more stable over time. This change may have contributed to the development of different climatic events including cyclones across the period.

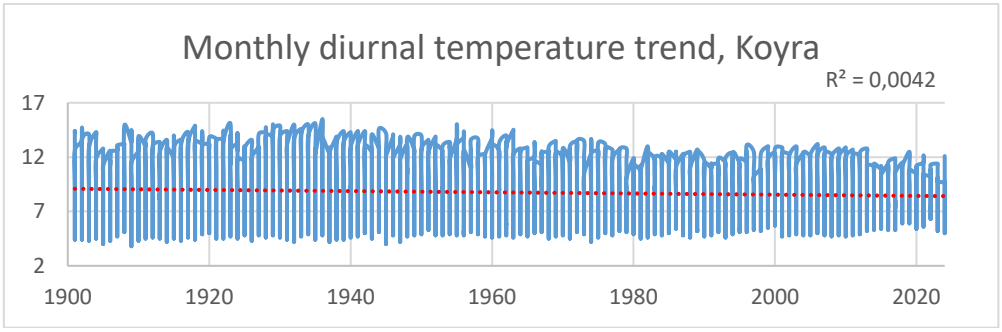


Figure 23 – Monthly Diurnal Temperature trend for Koyra

Figure 24 illustrates the seasonal fluctuations of diurnal temperature in Koyra. In 1924 the seasonal diurnal temperature variation was at its peak (14.2 °C). Following this, a general declining trend is observed, although with some intermittent fluctuations. Several climatic events, including cyclones, were recorded during this period, which may have contributed to these variations.

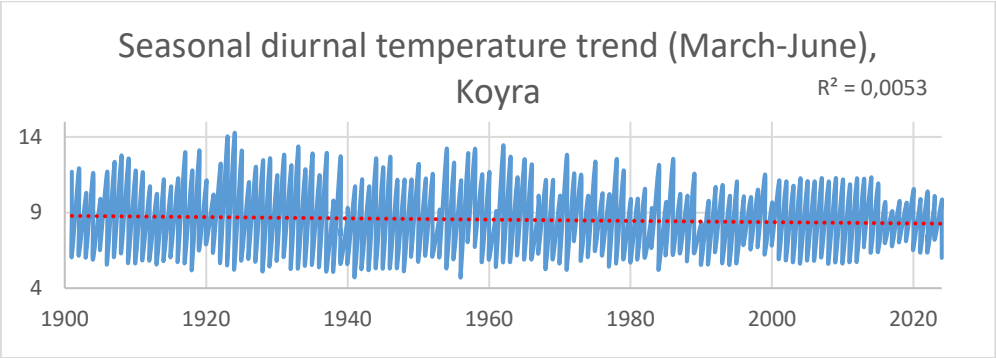


Figure 24 – Seasonal Diurnal Temperature (March-June), Koyra

Figure 25 indicates the historical annual diurnal temperature range (difference between daily maximum and minimum temperatures) in Sarankhola, Bangladesh. The dotted red line shows the diurnal temperature range is gradually decreasing over time. The data fluctuates roughly between 0.85 and 1.25 (most values clustering around 1.1). At the beginning, values are slightly higher and more variable (above 1.1). Meanwhile, the graph shows the values to fluctuate but shows a decline close to 1.0 to 1.1. The diurnal temperature range in Sarankhola shows noticeable variability, but a gradual decrease over the period.

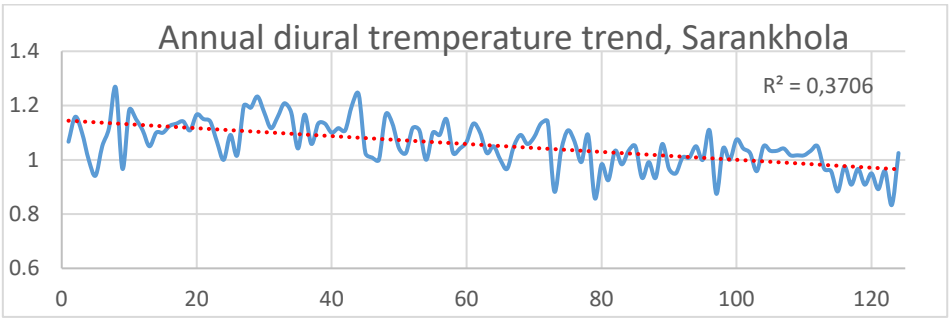


Figure 25 – Annual Diurnal Temperature trend for Sarankhola

Figure 26 describes the variation in monthly diurnal temperature range over time in Sarankhola, Bangladesh. It also refers to the difference between daily maximum and minimum temperatures. The data shows regular fluctuations throughout the entire period. The values range from 4°C to 16°C.

The trend line (dotted red line) shows the diurnal temperature range slightly decreasing over the period. Moreover, the linear equation is y=-0.0005x+9.2101, where the negative grade suggests a regular decline. In addition, the monthly diurnal temperature range in Sarankhola exhibits significant seasonal variation, whereas there is only a very slight and statistically slow decreasing trend over the period.

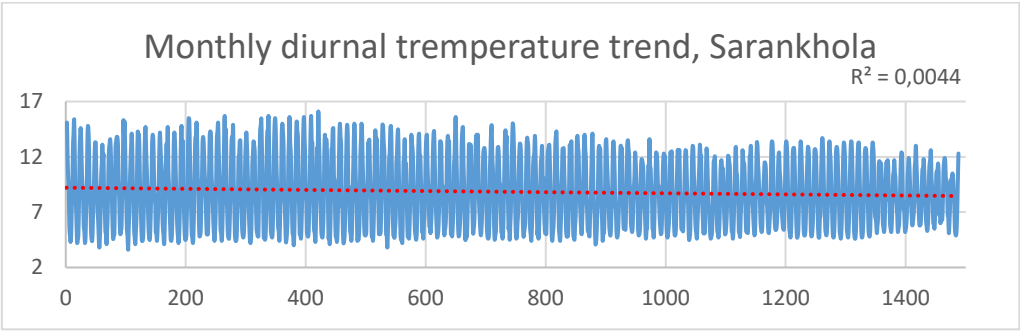


Figure 26 – Monthly Diurnal Temperature, Sarankhola

Figure 27 shows seasonal (March-June) diurnal temperature variations in Sarankhola. The data clearly shows a repeating pattern of raises and falls. It represents the daily diurnal temperature cycle. The temperature varies over time (0-500 units on the X-axis) with values mostly between about 5°C and 14°C. Diurnal temperature peaks reaching around 13-14°C and declining 5-14°C. The dotted red trend line shows average diurnal temperature stays near 8.5-9°C.

Overall, the graph indicates daily temperature fluctuations with slight seasonal influence. Moreover, the graph shows a very low R^2 value (0.0058), and the linear trend equation (y=0.00012x+8.8106) suggests a very slight decrease over time.

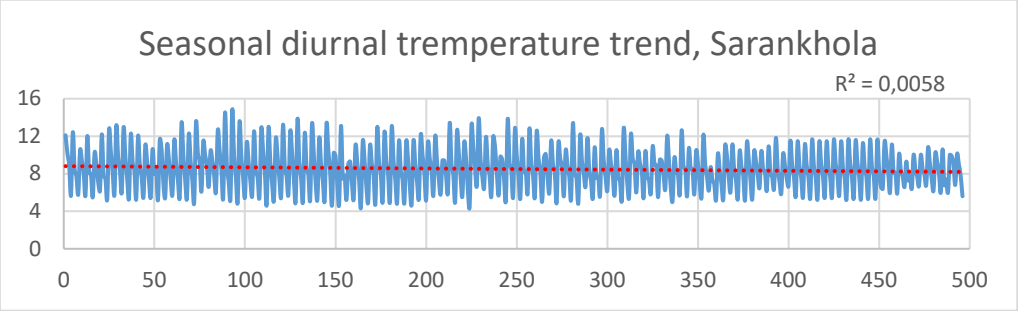


Figure 27 – Seasonal Diurnal Temperature (March-June), Sarankhola

Vapor pressure trends. Figure 28, figure 29, and figure 30 show the anomalies in annual vapor pressure of the study areas (Dacope, Koyra and Sarankhola). The climate data demonstrates that the annual vapor pressure trend has fluctuated considerably since 1903. A remarkable natural hazard occurred in 2007, when Cyclone Sidr hit the region. Sidr occurred during a period of notable climate anomaly, when the vapor pressure reached 25.97°C. Again in 2024, the annual vapor pressure increased to a very high value of 26.62°C, such variations in climate parameters may indicate an increasing livelihood of extreme weather events and potential future natural disasters.

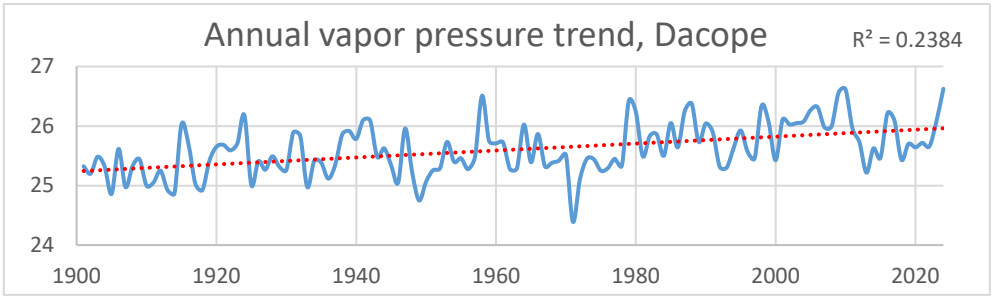


Figure 28 – Annual vapor pressure trend for Dacope

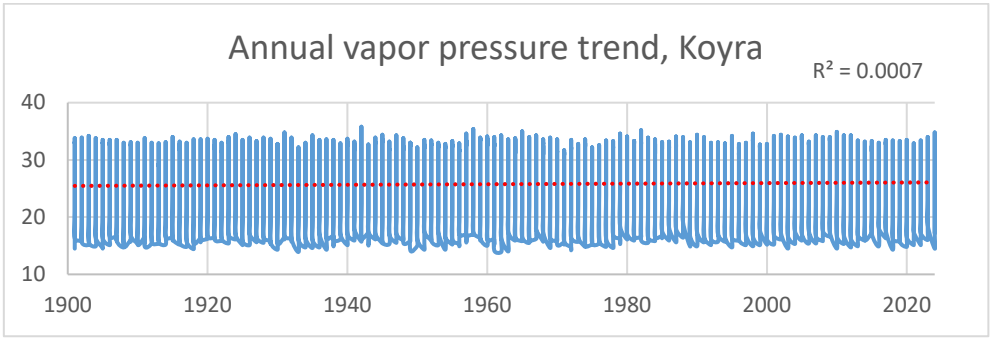


Figure 29 – Annual vapor pressure trend for Koyra

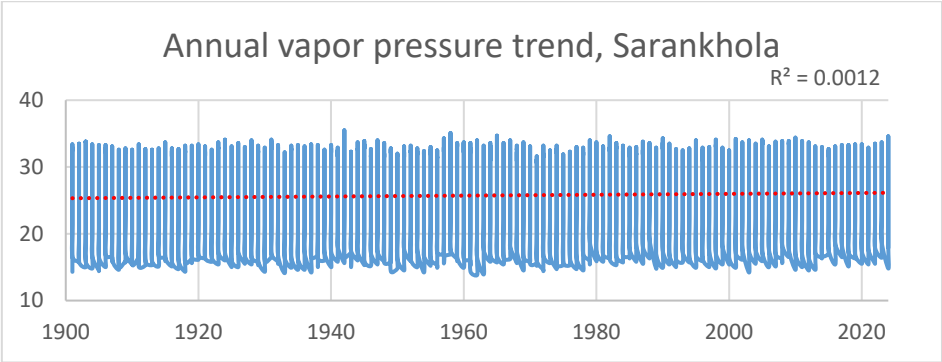


Figure 30 – Annual vapor pressure trend for Sarankhola

The following graphs (figure 31, figure 32, and figure 33) show the monthly vapor pressure trend for the Dacope, Koyra, and Sarankhola areas. These graphs indicate that the trends fluctuate over time, showing both increase and decrease. However, the overall pattern suggests a gradual increase in vapor pressure.

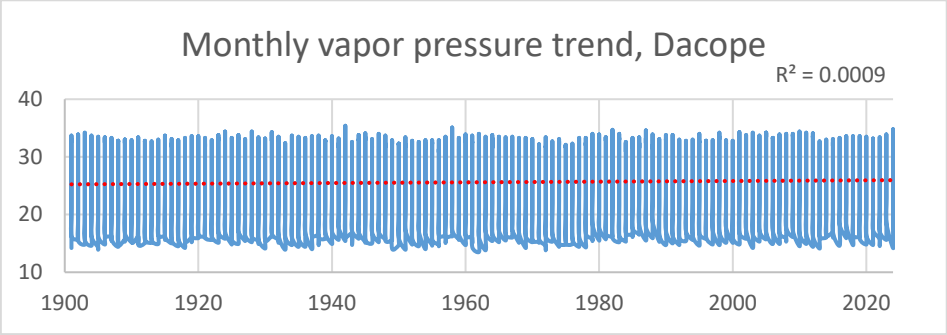


Figure 31 – Monthly vapor pressure trend for Dacope

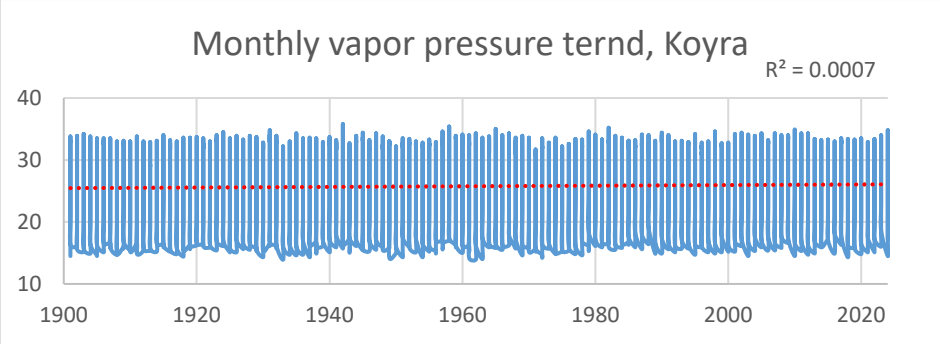


Figure 32 – Monthly vapor pressure trend for Koyra

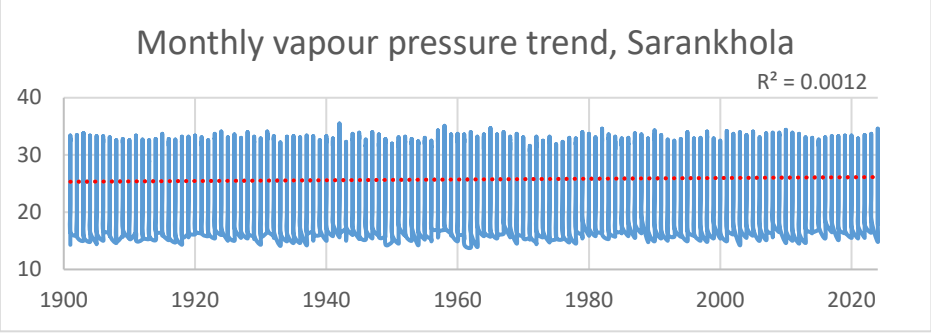


Figure 33 – Monthly vapor pressure trend for Sarankhola

Figure 34, figure 35, and figure 36 show the seasonal vapor pressure trend for the Dacope, Koyra, and Sarankhola areas from 1901 to 2024. In 1901, the seasonal vapor pressure was recorded at approximately 33.1 hPa. Over time, the seasonal vapor pressure exhibited noticeable fluctuations but gradually showed an increasing tendency. By 2024, the values ranged between 31.1 hPa and 34.8 hPa, indicating variability with periods of higher vapor pressure in recent years.

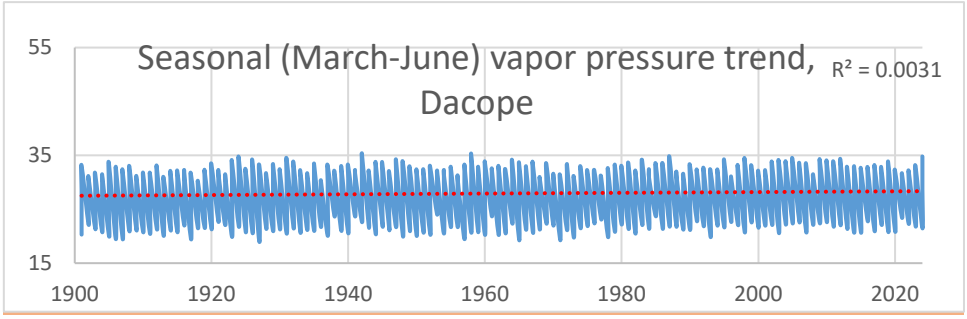


Figure 34 – Seasonal (March-June) vapor pressure trend for Dacope

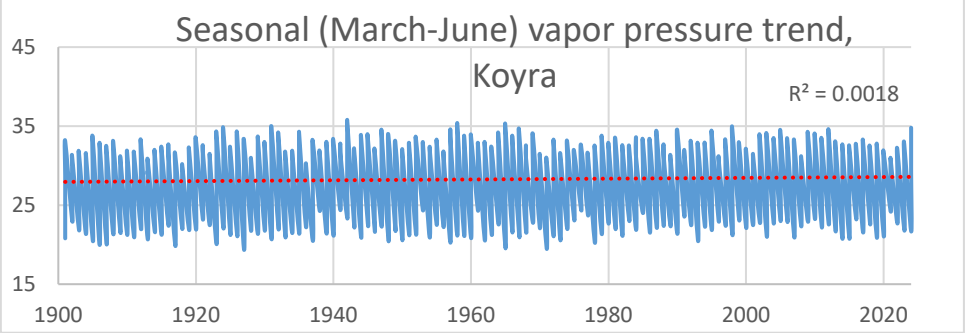


Figure 35 – Seasonal (March-June) vapor pressure trend for Koyra

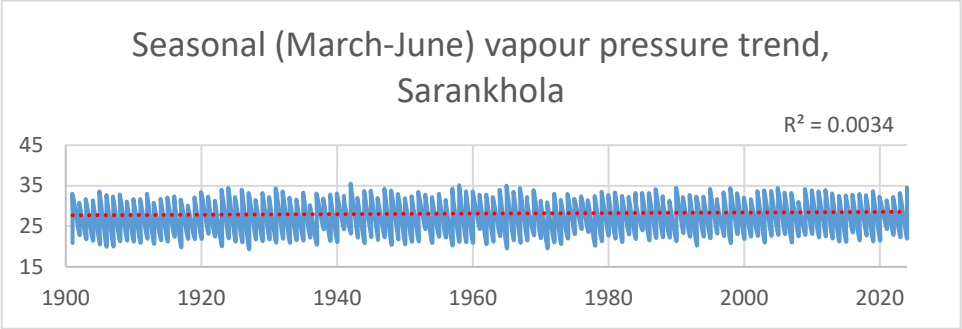


Figure 36 – Seasonal (March-June) vapor pressure trend for Sarankhola

Trend table (temperature, precipitation, diurnal temperature, vapor pressure). Table 2 shows temperature trends for the Dacope, Koyra, and Sarankhola areas from 1901 to 2024. The data indicate that all the temperature types, including annual, monthly, and seasonal temperatures, have increased over time.

Table 2 – Summary of temperature trends (Dacope, Koyra, Sarankhola) (1901–2024)

Variable	**Trends (R2)**	**Period**
Annual Temperature for Dacope, Koyra, and Sarankhola.	Increasing	1901-2024
Monthly Temperature for Dacope, Koyra, and Sarankhola.	Increasing	1901-2024
Seasonal Temperature for Dacope, Koyra, and Sarankhola. (March-June).	Increasing	1901-2024

Table 3 shows precipitation trends for the Dacope, Koyra, and Sarankhola areas from 1901 to 2024. The table indicates that all the precipitation types, including annual, monthly, and seasonal precipitations, have increased over time.

Table 3 – Summary of precipitation trends (Dacope, Koyra, Sarankhola) (1901–2024)

Variable	**Trends (R2)**	**Period**
Annual precipitation trend (Dacope, Koyra and Sarankhola)	Decreasing	1901-2024
Monthly precipitation trend of Dacope, Koyra and Sarankhola	Decreasing	1901-2024
Seasonal precipitation trend of Dacope, Koyra and Sarankhola (March-June)	Decreasing	1901-2024

Table 4 illustrates diurnal temperature for the Dacope, Koyra, and Sarankhola area from 1901 to 2024. The table indicates that all the diurnal temperature, including annual, monthly, and seasonal diurnal temperature has decreased over time.

Table 4 – Summary of Diurnal Temperature trends (Dacope, Koyra, Sarankhola) (1901–2024)

Variable	**Trends (R2)**	**Period**
Annual Diurnal Temperature trend for Dacope, Koyra, and Sarankhola	Decreasing	1901-2024
Monthly Diurnal Temperature trend for Dacope, Koyra, and Sarankhola.	Decreasing	1901-2024
Seasonal Diurnal Temperature trend for Dacope, Koyra, and Sarankhola. (March-June)	Decreasing	1901-2024

Table 5 shows vapor pressure trends for the Dacope, Koyra, and Sarankhola areas from 1901 to 2024. The table indicates that all the vapor pressure, including annual, monthly, and seasonal vapor pressure has increased over time.

Table 5 – Summary of vapor pressure trends (Dacope, Koyra, Sarankhola) (1901–2024)

Variable	**Trends (R2)**	**Period**
Annual vapor pressure trend for Dacope, Koyra, and Sarankhola.	Increasing	1901-2024
Monthly vapor pressure for Dacope, Koyra, and Sarankhola.	Increasing	1901-2024
Seasonal vapor pressure for Dacope, Koyra, and Sarankhola. (March-June).	Increasing	1901-2024

Discussion. Overall, the global temperature has been rising since 1970s and the 1980s. A similar warming trend has been observed in the study region between 1901 and 2024. There is some existing research on the regions, which is very significant for the study on climate change and climate-related risks such as drought. Based on the IPCC (2021) report, in the future Bangladesh may experience natural hazards including cyclone, heavy rainfall, and flooding as a result of the global climate change [6]. Bangladesh is one of the most vulnerable countries to climate change [2]. However, there is no sufficient research on this area and further researches are needed. Therefore, this study aims to contribute knowledge for the area, providing a foundation for future research. There are different kinds of naturals hazards in the region, including cyclones, tidal surges, floods, and droughts. The data shows different changes and anomalies in temperatures, vapor pressure, and precipitation, which are the main drivers of natural hazards such as cyclones, storm surges, flooding.

Due to the climate change and anomalies of different variables, there are negative implications for local livelihood and agriculture [7]. There is loss of life due to different natural disasters every year. During cyclones, saline water enters agricultural land due to strong tidal surges and flooding, which increase salinity in the soil, reducing soil fertility and agricultural productivity. This also creates a barrier to agriculture due to a lack of freshwater.

This study is important, because the data shows that there is a pattern for further devastating cyclones every five years in the regions; therefore, the government should take the necessary initiative to save people's lives and livelihoods by providing early warning messages to local people about forthcoming natural disasters in the region.

Conclusion. The results indicate a long-term warming trend and increasing climate variability in the coastal regions of Bangladesh. These changes may increase vulnerability to cyclone-related hazards and threaten local livelihoods. Strengthening early warning systems and community-based adaptation strategies is therefore essential for improving resilience in the Bengal Delta.

Overall, all four different types of parameters (temperature, vapor pressure, diurnal temperature, precipitation) and the data (graphs and trend analysis) provide clear evidence of climate change, which causes different kinds of natural hazards in the regions. The government, researchers, NGOs, and INGOs should pay attention to climate change and future natural disasters risk, because the anomalies in main climate variables are indicating future natural hazards due to climate change. Nowadays, agricultural patterns are changing the way we cope with natural disasters (e.g., tidal surges, storm surges, cyclones, floods, etc.). The government should take urgent steps to save people's lives and livelihoods, through improving early warning systems and developing climate-sustainable varieties of crops (saline tolerant varieties). In this research, CRU TS data have been used to find climate anomalies associated with climate change. The future research and the researcher may use CRU TS data and other modern data for analysis of climate data through visualization. They should pay attention to the analysis of all the parameters to study climate change, because these parameters are most important to understand climate change for predicting future natural disasters.

References

1. Karim M.F., Mimura N. Impacts of climate change and sea-level rise on cyclonic storm surge floods in Bangladesh // Global Environmental Change. 2008. Vol.18, iss.3. P.490-500.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability // IPCC reports. 2022. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/
3. Living Deltas Hub // Living Deltas Network. URL: https://livingdeltas.org/
4. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Scientific Data. 2020. Vol. 7. Art.no. 109. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3
5. Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years // Nature. 2005. Vol. 436. P.686–688.
6. Intergovernmental Panel on Climate Change 2021: The Physical Science Basis // IPCC. 2021. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/
7. Saha M.K., Biswas A.A.A., Faisal Md. Livelihood vulnerability of coastal communities in context of the climate change: A index-based assessment // World Development Sustainability. 2024. Vol. 4. Art.no.100152.

УДК 551.58

CLIMATE DATA ANALYSIS FOR THE WEST BANK - PALESTINE: LOOKING AT DROUGHT PATTERNS AND HEAT WAVES (1901-2024) USING CRU TS DATA

Dawabsheh D.[1], Orunbaev S.Z.[2]
dana.dawabsheh2@students.alquds.edu
[1] Al-Quds Bard College, West Bank, Palestine
[2] American University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan

This research examines the changes in the West Bank's climate over the last century, from 1901 to 2024. It focuses specifically on droughts and heatwaves using the Climatic Research Unit time series dataset, version 4.09. The West Bank, situated in the central mountain area of Palestine, is highly susceptible to climate change because it relies almost entirely on rainfall for water, which is currently very scarce. Monthly and annual temperature, rainfall, and the length of the summer and winter have been used as the variables in the analysis. In addition, the Mann-Kendall test, Sen's slope method, anomalies, moving average, and linear regression were used for the analysis. The results of the analysis showed that the annual temperature has risen from a mean of 18.45°C before 1980 to 19.30°C in recent times. The length of the summer has risen by 0.0191 months every year at $p < 0.001$. On the other hand, the length of the winter has reduced by 0.0037 months per year at $p = 0.012$. The results show a statistically significant declining trend in annual precipitation at $p = 0.011$ at a rate of 9 mm per century. Moreover, the heatwaves have risen from 2.5% before 1980 to 44.4% in recent years. Furthermore, in the last 40 years, over 60% of the years were 'dry years' ($Z < 0$). Additionally, there is a strong negative correlation of -0.354 between temperature and rainfall. Therefore, it can be concluded that the impact of global warming is intensifying, with both the frequency and severity of drought and heatwaves increasing in the West Bank.

Keywords: climate change, drought trends, heatwaves, precipitation variability, temperature increase, West Bank (Palestine).

Introduction. One of the biggest issues that has impact on our generation and on all aspects of our lives, whether it is the environment, economy, etc., is climate change. The Middle East, including the Palestinian area, is among the regions that are most vulnerable to the effects of climate change, according to various reports from scientific research carried out on climate change. The temperatures there are rising at a faster rate than in other parts of the world and the rain has become unpredictable. In addition, climate variabilities such as heat and drought are on the increase.

Importance of climate variability and change. The question of what makes this issue particularly problematic in the areas like the West Bank lies in how it impacts daily life. Water is in short supply, agriculture is rain-dependent, and the political situation limits the ability to adjust to these realities. When the temperature goes up and the rain gets less predictable, it is necessary to consider how this will affect the ability to grow crops, to have water to drink, and to survive in general.

Why the selected region is important. There are several reasons for choosing the West Bank as the area to study. First and foremost, it is geographically located in the middle of two climate areas – Mediterranean to the west and desert to the east. As a result, this combination makes the region a transitional zone highly sensitive to climate shifts.

Second, agriculture plays a significant role in this region as 80% of agricultural areas are categorized as rainfed areas [1]. However, the problem is that, as revealed by the latest statistics, the total of rainfed agricultural areas has decreased by 38% between 2000 and 2018. This reflects rather a structural shift that a temporary fluctuation, as the region is not capable of supporting such activity anymore [2].

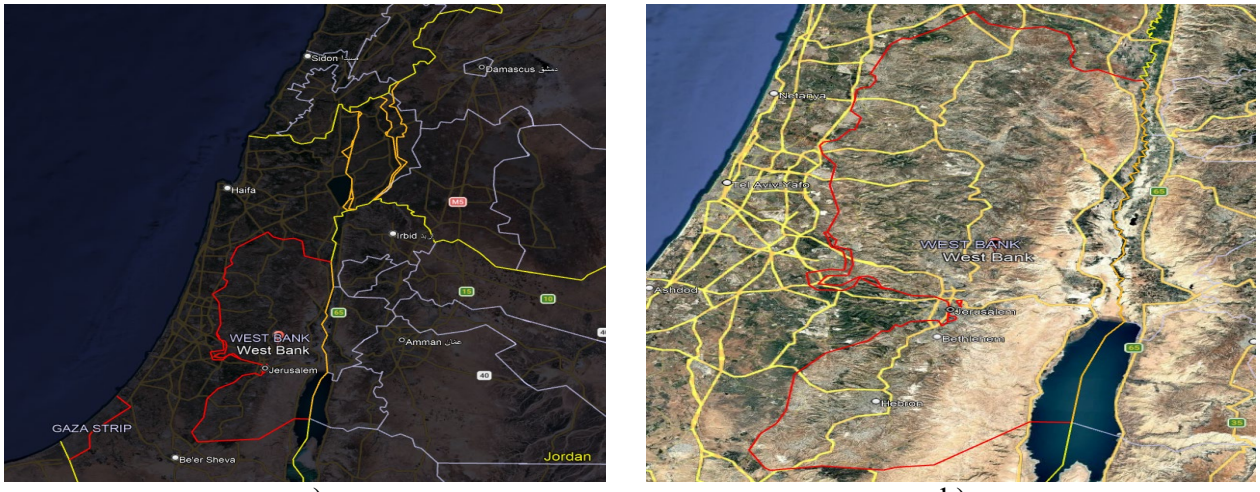
There are three groundwater basins in the West Bank area, but politics dictate how one can access these water basins. A decrease in rainfall in this region, driven by climate change, has resulted

in less water seeping underground to replenish these basins. It is estimated that if rainfall reduces by just 10%, it may result in a reduction of 14% to 24% in the groundwater recharge, and this rate may be as high as 50% in dry areas [3]. There is also a very practical reason why we chose this region, which is that there is currently a lack of data and research on the long-term climate patterns in the West Bank.

Research aim. This research has several specific goals: First, it aims to find out exactly how temperature have changed and by how much and at what rate. Second, it aims to assess the precipitation pattern, because it is very important to find out whether drought is increasing or decreasing.

Research question. By how many degrees has the temperature increased every year since 1901 until today? Is the rate of temperature increase more quickly? What is the trend in rainfall? Are we becoming drier and drier?

Geographic location and elevation range. The focus area of this study is the West Bank, which is located in the center of Palestine and covers about 5,655 km². The West Bank has a variety of terrains with large mountain ranges in the central portion of the country, which rise up to 1,000 m above sea level, and the Jordan Valley located to the east, which is 400 m below the sea level (figure 1a and 1b). This results in two different types of areas within the West Bank; the north-south area of the country receives considerable amounts of precipitation and experiences cooler temperatures, while the eastern region receives significantly less precipitation and is warmer.



a) b)

Figure 1 – Satellite image of the West Bank (Source: Google Earth Pro, 2021) (a), Satellite image of the West Bank (Source: Google Earth Pro, 2023) (b)

Climate type. The climate in the West Bank is considered Mediterranean. This means that it has two seasons which are wet winters and dry summers. The seasons between November and April is winter, where the majority of the rain is received, while hot and dry summers run between May and October.

In terms of temperature, the mountain regions usually have an average annual temperature of around 16°C to 20°C, whereas the Jordan Valley area below exceeds 25°C. Rainfall shows even more variation, as some areas in the east get barely 300 mm a year, while some parts of the central mountains can receive over 700 mm. Nevertheless, one thing is certain: even the wettest regions experience great annual rainfall fluctuation, while some years are rainy years, and other years are dry years. This variability has long been a characteristic of this climate, but it seems to be increasing.

Hydrological importance. In the West Bank, farms make up around 4 to 5 percent of the economy and provide employment for nearly 12% of the labor force [4]. Though those numbers seem small, tending crops shapes daily life of the villages in the West Bank. Olive trees dominate, occupying almost half of the farmland in the West Bank. There are other plants also, such as wheat,

grapevines, almonds, barley, figs, and greens, and the rain feeds just about everything that grows there.

Water resources are limited. The water supply is drawn from one underground water source, referred to as the Mountain Aquifer. The total amount of water that is naturally recharged to this source is estimated to be 679 million cubic meters per year. The issue here is that access to this water is controlled by political arrangements that prevent Palestinians from using it [5]. Climate change is increasing the pressure on a water supply system that was already very fragile. This is because if there is less rainfall, then there will be less water available for recharge. In addition, if the temperature rises, then a significantly larger amount of water will be required for crop production.

One clear sign of is evident in rain-fed agricultural land. By 2018, fields relying only on rainfall had dropped to 929 km², down from 1,515 km² in 2000, which means nearly two out of every five were gone [2]. When land can no longer support cultivation, farmers abundant it or grow plants that need less water. Unfortunately, this is already happening now, this is what the ground looks like today.

Data source. In this study, CRU TS v4.09 climate dataset [6] was used. It has many advantages. First, it provides historical climate data back to 1901. Second, it covers the whole planet. Finally, its resolution of about fifty kilometers per grid square at this latitude, which is fine without being excessive.

From thousands of global weather stations, CRU TS gathers raw numbers before applying math tools to smooth out missing pieces into uniform map-like blocks. In the case of the West Bank, readings were pulled straight from matching squares on that grid, then combined by taking their mean. It does have limits because fine details always slip through such broad networks. However, patterns from years still stand clear enough here.

Variables. The core variables were:

- Temperature (TMP): The average temperature in each year was computed by using the monthly values, which is helpful for monitoring temperature's long-term variation.
- Precipitation (PRE): The twelve monthly values were combined to calculate the total rainfall in each year. Wet times show high numbers, while dry stretches come through with low counts.

Out of the data, two new measures emerged, each one uncovering pattern not obvious at first glance:

- Summer Duration: This is determined by counting how many months are ≥ 25°C. It is not just a spike, it follows how long warmth lingers because duration matters more than extremes here.
- Winter Duration: The winter duration is defined by the number of months in a year that the temperature is ≤ 15°C. That period is critical, because evaporation decelerates then, and some plants depend on those intervals.

Data processing. The West Bank is divided into grid cells for use in this investigation. Monthly data were aggregated into annual and seasonal averages. The temperature and precipitation anomalies were then calculated as Z-scores. The processing of all data was carried out in Excel and Python.

Statistical approach. Data processing and statistical analysis were performed using Python and Microsoft Excel. To prove whether patterns stood out or not, different numerical tools were used:

1. Sen's slope: Sen’s slope quantifies the rate of change of the trend, similar to the number of degrees per year gained. Instead of averaging everything, it lines up all the point-to-point slopes and chooses the median. Even if certain years show extreme anomalies, the final result remains robust, making it a reliable measure of the underlying trend.

2. Linear regression: A simple and clear line drawn through points on a graph. That path showed how things shifted over time, offering one more way to see speed in movement across values.

3. Period comparison: After 1980, average values shifted noticeably compared to the preceding period. Splitting the timeline right there helps us see how numbers changed across eras.

Earlier twentieth-century patterns now stand apart when measured against newer ones. The contrast shows if modern times break from past trends.

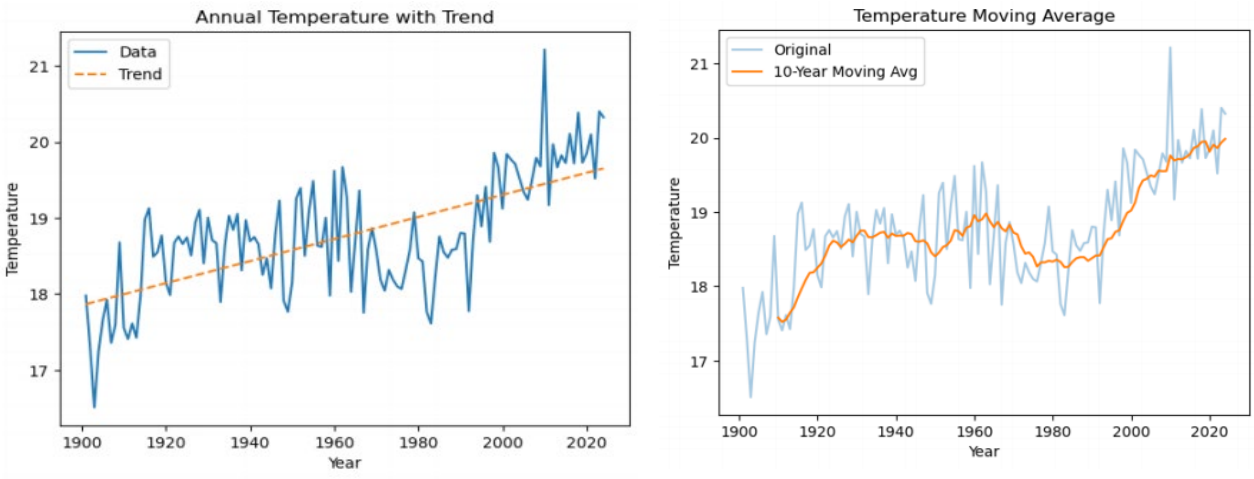
4. Moving average: A 10-year moving average was computed to allow for the smoothing out of any short-term variation and to allow for long-term trend visibility.

5. Anomalies: Temperature and precipitation anomalies were calculated using standardized Z-scores.

Time periods. The dataset has been subdivided for the comparison into: before 1980 (1901-1979, 79 years), and after 1980 (1980-2024, 45 years). This split is not arbitrary either. Climate scientists worldwide are using 1980 as a benchmark year because this is when greenhouse gases began to rise steeply and temperatures began to increase accordingly. It is important to find out whether this was reflected in the West Bank or not.

Temperature changes over time. The temperature readings give a fairly simple picture: temperatures are rising, and the rate of warming is accelerating. In the early 1900s, the yearly average temperature in the West Bank was about 17.5°C; in the latest ten years, it has been continually above 19.3°C – which works out to about 1.4°C warmer for every hundred years, over the 124 years of the data, and the Sen's slope confirmed this rate at 0.0144°C per year (figure 2a).

If the last hundred years is divided into two sections, the acceleration becomes obvious: in 1901-1979 temperatures went up and down, averaging 18.45°C and in 1980-2024 is when warming significantly began to increase. The average temperature went up to 19.30°C, which clearly shows a rise in the more recent years.



a) b)

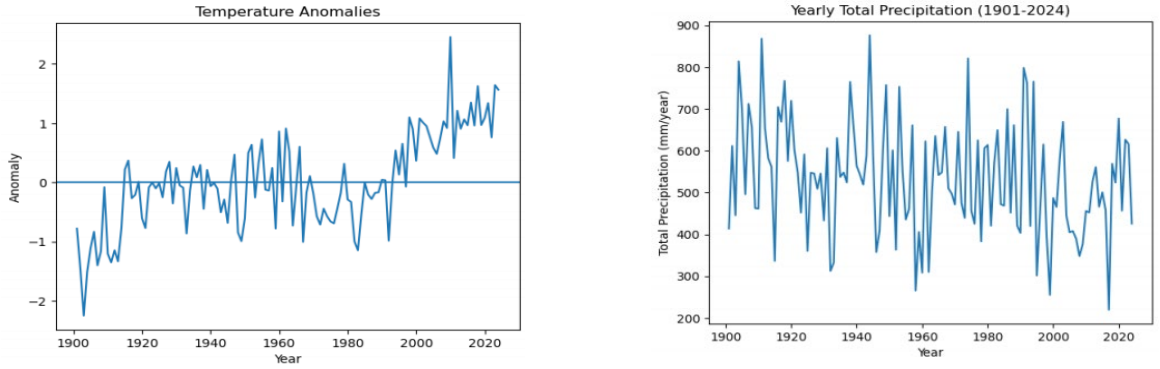
Figure 2 – Temperature trend in the West Bank (1901–2024) (a), Temperature moving average in the West Bank (1901–2024) (b)

It should be borne in mind that 1.4°C per century is notably higher than the global average of approximately 1.1°C (figure 2b). The 10-year moving average figure shows that the temperature exhibits a rise after 1980, as it reaches approximately 20°C by 2020. While the Temperature anomalies (Z-scores) figure shows that the anomalies shifted to a consistently positive state after 1980, as it frequently exceeds +2.0 SD, and in 2016 it exceeds +2.5 SD (figure 3a).

Precipitation patterns. Analyzing rainfall is more difficult because it varies so much each year – some years more than 1000 mm falls, and others less than 300 mm. When yearly rainfall was plotted over the 124 years period, a clear downward trend was identified ($p = 0.011$) – rainfall is going down at around 9 mm per hundred years. The precipitation Sen's slope is -0.947 mm/year, amounting to a reduction of approximately 117 mm over the study period (figure 3b).

However, even with all this variation, there are a number of things that are clear. For example, the periods of drought can be identified, such as the very bad period of the 1920s and 30s, and the long period of drought between 1998 and 2018. This latest dry period is especially worrying as it lasted a long time and had a number of dry years one after the other.

The general downward line is now confirmed as important; the yearly average rainfall has fallen from 550.5 mm before 1980 to 504.6 mm after 1980. This 8.3% fall is a major reduction in the amount of water available (figure 4).



a) b)

Figure 3 – Temperature anomalies in the West Bank (1901–2024) (a), Precipitation trend in the West Bank (1901–2024) (b)

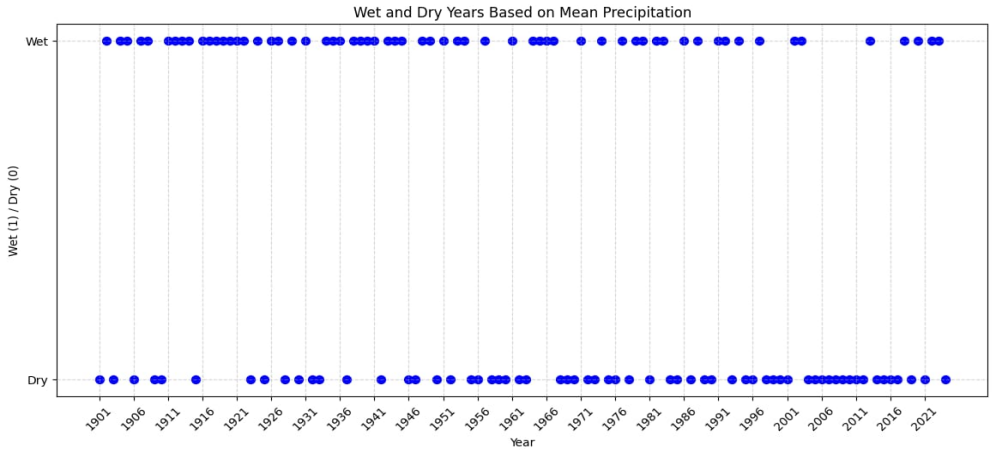
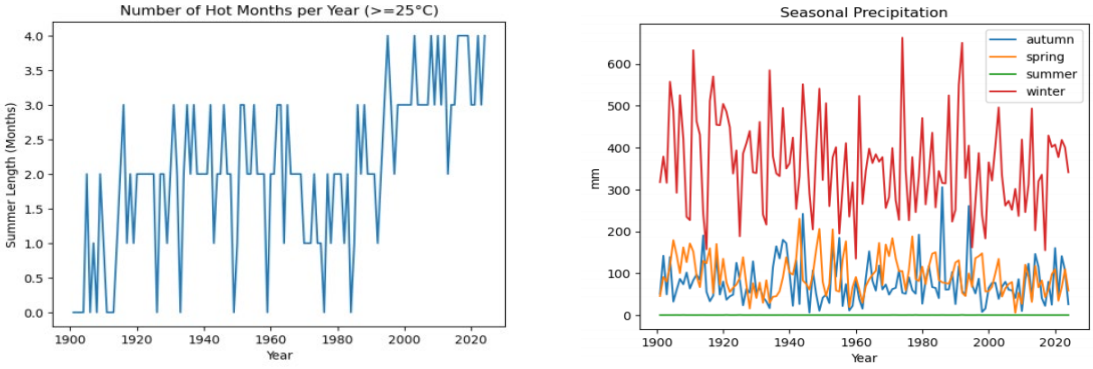


Figure 4 – Hot and dry years in the West Bank (1901–2024)

Summer getting longer. The stats showed – as you can see in the data – that the speed of the rise: 0.0191 months each year, or around 2.4 months in the 124 years covered. This trend is highly statistically significant (< 0.001). Sen's slope: 0.0164 months per year, which backs up the trend (figure 5a).

Considering time: Summer averaged 1.61 months before 1980; and 2.82 months average for summer after 1980.

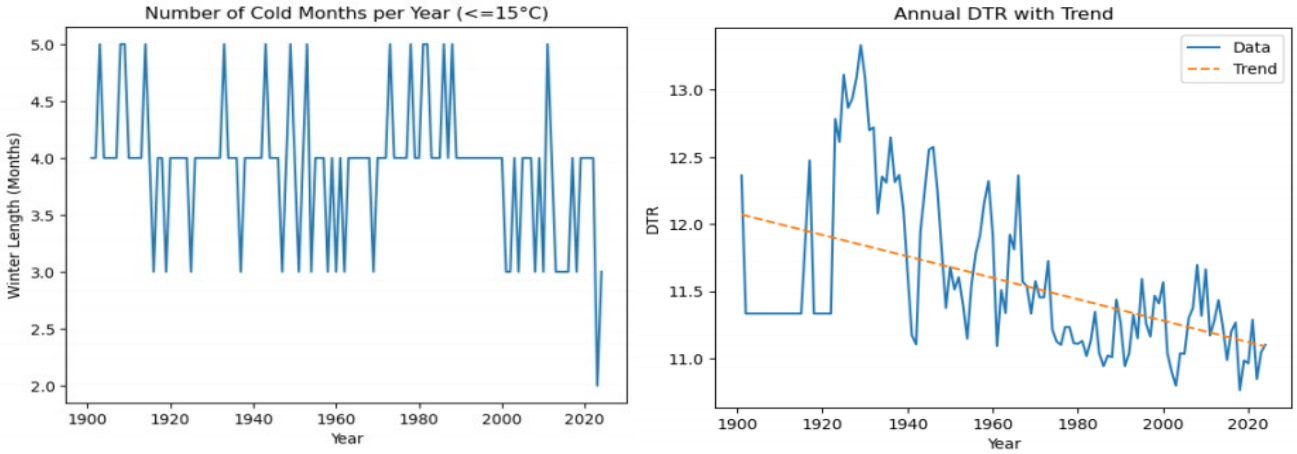


a) b)

Figure 5 – Number of hot months in the West Bank (1901–2024) (a), Seasonal precipitation in the West Bank (1901–2024) (b)

This is an increase of 75%. In other words, roughly an extra 1.2 months of significantly hot weather each summer because there is no rainfall in summer as appears in figure 5b.

Winter getting shorter. Speed of the fall is -0.0037 months per year at p = 0.012 – good proof that this is a genuine trend. Considering time: - Winter averaged 3.99 months before 1980; - 3.82 months average for winter after 1980 (figure 6a).



a) b)

Figure 6 – Number of cold months the West Bank (a), DTR trend in the West Bank (1901–2024) (b)

The drop is not as large as the increase in summer, though it's still important; a shorter winter means less time for water to build up, and changes to when farming happens.

Correlation and DTR. Temperature and precipitation have a statistically negative correlation at r = -0.354 and p < 0.001. This explains why, during the past decade, there has been a consistent rise in the number of years that are warmer and drier. Overall, there is a consistent decline in the diurnal Temperature Range (DTR), with a Sen's slope of -0.00588. This suggests that warming years have more rapid rates of warming at night than during the day (figure 6b).

Before and after 1980. A formal comparison of the two periods showed very clear, statistically significant differences:

- The duration of summer increased by 75%, from 1.61 months to 2.82 months.
- The duration of winter become 4% shorter than the previous years, at 3.82 months compared to 3.99 months.
- Rainfall fell by 8.3%, which is from 550.5 mm to 504.6 mm.

These changes didn't occur slowly across the entire 124 years – they became quicker after 1980. This is in line with the world's general increase in the rate of warming in the latest decades and indicates very strongly that greenhouse gas releases are involved.

Heatwave and compound events analysis. Heatwave years were defined as those where the yearly temperature was over a standard deviation – more than one – from the long-run average (figure 7).

- Heatwave Frequency: Went up from 2.5% (before 1980) to 44.4% (after 1980) – an eighteen times greater amount ($p = 1.80 \times 10^{-8}$).
- Compound Events (Hot and Dry): These years went up four times, from 2.5% to 11.1%.

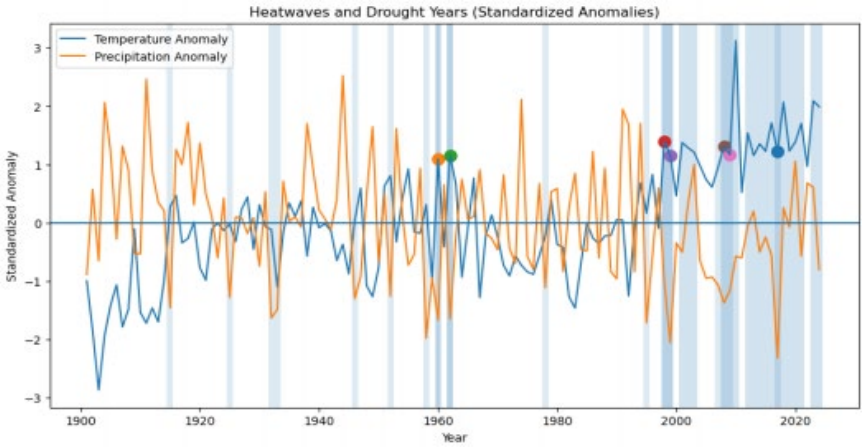


Figure 7 – Heatwaves and drought years in the West Bank (1901–2024)

Table 1 – Summary of key findings

Variable	Change Rate	Shift | Trend Direction	Statistical Significance	Sen's Slope / Key Metric
Summer Length	+0.0191 months/year	Increasing	$p < 0.001$	0.0164 months/year
Winter Length	-0.0037 months/year	Decreasing	$p = 0.012$	0.0 months/year
Annual Temperature	+0.0145 °C/year	Increasing	$p < 0.001$	0.0145 °C/year
Annual Precipitation	-0.88 mm/year	Decreasing	$p = 0.011$	-0.95 mm/year
Heatwave Frequency	2.5% to 44.4%	Increasing	$p = 1.80 \times 10^{-8}$	18-fold increase
Dry Year Frequency	From balanced to >60%	Increasing	Significant shift	Post-1980 clustering
Temperature Anomalies (Z-score)	consistently positive after 1980	-	-	+2.0 to +2.5 SD
10-Year Moving Average (Temper.)	Rising trend post-1980	-	-	~+0.0145 °C/year
Temperature-Precipitation Correlation	Negative correlation	-	$p < 0.001$	$r = -0.354$
DTR	-	Decreasing	-	-0.00588

Discussion. Several factors explain the rapid warming observed in the West Bank. The eastern Mediterranean is a well-documented climate-change hotspot that warms substantially faster than the global average due to complex interactions between sea, land surfaces, and atmospheric circulation. Locally, weakening low-pressure systems have reduced winter storm frequency, resulting in fewer clouds, greater solar radiation, and diminished evaporative cooling. Drier soils further amplify surface heating. Although not examined here, nearby land-use changes – urban expansion, vegetation shifts, and intensified agriculture – may contribute through urban heat-island effects and altered surface albedo. The pronounced acceleration after 1980 aligns with the global surge in greenhouse-gas emissions, marking a clear transition from the slower warming of the early-to-mid twentieth century.

Mediterranean-type climates are inherently variable, yet this analysis reveals a statistically significant decline in annual precipitation ($p = 0.011$) of approximately 9 mm per century. Mean rainfall dropped from 550.5 mm before 1980 to 504.6 mm afterward – an 8.3% reduction consistent with regional climate-model projections. This drying is driven by warmer Mediterranean Sea surface temperatures, altered storm tracks influenced by the North Atlantic Oscillation, and the broader response of the climate system to rising greenhouse-gas concentrations. For the West Bank, where

rainfed agriculture and water supply depend on reliable winter rains, this trend undermines system resilience. The clustering of dry years between 1998 and 2015 signals a shift toward a more persistently arid regime. Reduced frequency of wet years limits groundwater recharge and soil moisture recovery, rendering traditional rainfed farming increasingly unviable.

The observed 75.5% increase in summer length (from an average of 1.61 months to 2.82 months) has far-reaching consequences. Extended warm periods intensify evapotranspiration while shortening the winter recharge window, reducing overall water availability. Many crops, such as olives, require sufficient winter chilling; milder, shorter winters disrupt phenological cycles and lower yields. Heatwave frequency rose dramatically, from 2.5% to 44.4% of years – an 18-fold increase. This heightens risks of heat stress, dehydration, and heatstroke for vulnerable groups, while potentially expanding disease vectors such as mosquitoes.

These findings align closely with existing literature. Previous research has documented nearly 1°C of twentieth-century warming in Palestine with post-1980 acceleration [7], while comparable trends have been reported in the central mountains [2,8]. Regional projections suggest 3.5-7°C warming by the late century under high-emission scenarios [9], and increasing heatwave and drought intensity has been confirmed in other studies [10,11]. By providing a century-long West Bank analysis with explicit attention to seasonal-length changes, the present study strengthens the case for urgent adaptation in water, agriculture, and public-health sectors.

Conclusion. This study reveals a significant warming trend in the West Bank, with an increase of 1.4°C per century ($p < 0.001$). Annual precipitation shows a statistically significant decline of approximately 9 mm per century ($p = 0.011$). Seasonal changes are also evident: summer duration has increased by 0.0191 months per year ($p < 0.001$), while winter has shortened from 3.99 to 3.82 months ($p = 0.012$). Heatwaves have intensified dramatically, increasing nearly 18-fold, and the proportion of "hot and dry" years has risen from 2.5% to 11.1%.

A strong negative correlation ($r = -0.354$, $p < 0.001$) between temperature and precipitation indicates that rising temperatures are associated with declining rainfall. Since 1980, positive temperature anomalies, increased dry-year frequency, and a reduction in diurnal temperature range (DTR) further confirm an accelerating warming trend. These findings align with global climate change patterns but demonstrate heightened local vulnerability.

Recommendations. To address these challenges, integrated adaptation strategies are essential. Water resource management should prioritize rainwater harvesting, aquifer recharge, wastewater reuse, and efficient irrigation systems such as drip technology. In agriculture, adopting drought-resistant crops, adjusting planting schedules, and implementing soil conservation practices (e.g., mulching, minimum tillage) can enhance resilience.

Strengthening research and monitoring is critical, including expanding meteorological networks and developing regional climate projections. Policymakers should mainstream climate resilience into development planning and establish early warning systems for extreme events. International cooperation is also necessary to overcome technical and financial constraints and support data sharing.

Limitations. The study is based on a dataset with a spatial resolution of 0.5° × 0.5°, which may not capture local climatic variability. Additionally, reliance on interpolated data introduces uncertainties, particularly in areas with sparse observational coverage.

Final remarks. The results (table 1) clearly indicate rapid climatic changes in the West Bank, with serious implications for water resources, agriculture, and livelihoods. Immediate and coordinated adaptation efforts are required to mitigate risks and enhance resilience. This study provides a valuable long-term perspective and a foundation for future climate-related research and policy development.

References

1. Food and Agriculture Organization (FAO). WaPOR: Country activities – Palestine. URL: https://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity/country-activities/palestine/en

2. Abu Hammad A.H. Rainfall trends as an indication to climate change since the 19th century in the palestinian central mountains: jerusalem governorate as a case study // Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. 2022. 17 (2). 353-364. https://doi.org/10.26471/cjees/2022/017/200
3. Mizyed N. Climate change challenges to groundwater resources: Palestine as a case study // Journal of Water Resource and Protection. 2018. 10 (2). 215-229. https://doi.org/10.4236/jwarp.2018.102013
4. ANERA. Agriculture in the West Bank and Gaza. 2017. URL: https://www.anera.org/wp-content/uploads/2017/03/AgReport.pdf
5. Konrad-Adenauer-Stiftung. Water Resources and the Mountain Aquifer in the West Bank 2017. URL: https://www.kas.de/en/web/palaestinensische-gebiete/wasser
6. Harris I., Osborn T.J., Jones P., & Lister D. Version 4 of the Climatic Research Unit Time-Series (CRU TS) dataset high-resolution gridded multivariate climate dataset // *Scientific Data. 2020.* 7. 109. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3
7. El-Kadi A.K.A. 20th Century Temperatures of Palestine: Variability, Trend and the Global Warming (1901-2000) // Journal of New Results in Science. 2018. 7 (3). 1-14.
8. Abu Hammad A., Salameh A.M. Temperature analysis as an indicator of climate change in the Central Palestinian Mountains // Theoretical and Applied Climatology. 2019. 138 (3-4). 1909-1923. https://doi.org/10.1007/s00704-018-2561-y
9. Lelieveld J., Hadjinicolaou P., Kostopoulou E., Chenoweth J., El Maayar M., Giannakopoulos C., Hannides C., Lange M.A., Tanarhte M., Tyrlis E., Xoplaki E. Climate change and impacts in the Eastern Mediterranean and the Middle East // Climatic Change. 2012. 114 (3-4). 667-687. https://doi.org/10.1007/s10584-012-0418-4
10. Hochman A., Marra F., Messori G., Pinto J.G., Raveh-Rubin S., Yosef Y., Zittis G. Extreme weather and societal impacts in the eastern Mediterranean // Earth System Dynamics. 2022. 13 (2). 749-777. https://doi.org/10.5194/esd-13-749-2022
11. Zittis G., Hadjinicolaou P., Fnais M., Lelieveld J. Projected changes in heat wave characteristics in the eastern Mediterranean and the Middle East // Regional Environmental Change. 2016. 16 (7). 1863-1876. https://doi.org/10.1007/s10113-014-0753-2

УДК 551.58

GLOBAL DEMAND, LOCAL RISK: CRITICAL MINERALS AND CLIMATE DISASTERS IN THE RANGKUL–MURGHAB REGION

Noyobshoeva A.[1], Orunbaeva S.[2]
n.adolat07@gmail.com
[1] American University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan
[2] International University Kyrgyzstan, Bishkek, Kyrgyzstan

The Rangkul area in the Eastern Pamir of Tajikistan is a high-altitude region rich in critical minerals essential for the global energy transition, including rare earth elements, tungsten, and antimony. As global demand for these materials rises due to advancements in renewable energy and electronics, the region's exposure to climate change and natural hazards presents significant risks (IEA, 2021; World Bank, 2020). This study analyzes climatic trends from 1901 to 2024, highlighting increased temperature variability and a growing frequency of extreme events such as flash floods and landslides (IPCC, 2021). These hazards threaten the physical stability and accessibility of mineral deposits. The paper concludes that effective climate adaptation and disaster risk reduction are vital for securing these strategically important resources.

Keywords: critical minerals, Eastern Pamir, climate change, natural hazards, Rangkul, global demand.

Introduction. The growing global reliance on advanced technologies and clean energy systems has significantly increased the demand for critical minerals [1, 2]. In 2022, the United States Geological Survey published a list of 50 critical minerals considered essential for economic development and technological applications. These minerals- including lithium, rare earth elements (REEs), niobium, tantalum, zirconium, and others- are fundamental to modern industries and are widely recognized as critical on a global scale [3].

Within this framework, the eastern Rangkul–Murghab area of the Pamir Mountains in Tajikistan is of particular interest, as geological evidence indicates the presence of several minerals from the USGS critical list [4]. These include lithium-bearing pegmatites, rare earth elements associated with peralkaline and carbonatite complexes, as well as niobium, tantalum, and zirconium mineralization. Such occurrences suggest that the region hosts components of a critical mineral system consistent with globally important resource types.

These minerals have a wide range of essential applications: lithium is a key component in rechargeable batteries for electric vehicles and energy storage systems; rare earth elements are crucial for permanent magnets used in wind turbines, electronics, and high-efficiency motors; niobium and tantalum are used in high-strength alloys and electronic components; and zirconium plays an important role in nuclear technology and advanced ceramics [2, 3]. Therefore, the Rangkul–Murghab area represents a promising and strategically relevant source of critical minerals, with the potential to support rapidly growing global technological and industrial demand. However, this region is highly sensitive to climate change. Even minor shifts in temperature or precipitation can drastically influence the stability of high-mountain ecosystems and the infrastructure required for mineral extraction [5].

Global demand and importance of the critical minerals. Critical minerals play a key role in the global energy transition. According to the World Bank, the demand for minerals used in clean energy technologies could increase dramatically in the coming decades [3]. Current mining activity and investment in Tajikistan's critical minerals sector are dominated primarily by Chinese companies (especially the Eastern part Rangkul-Murghab region as it is situated on the border with China), which are the most active and established foreign investors in the region. Their strong financial capacity, experience in mountainous environments, and existing operations make them key players in the development of mineral resources in the Pamir region.

Major active investors include:

- Zijin Mining;
- Tibet Huayu Mining;
- Tibet Everest Resources.

These companies are already operating or expanding projects in Tajikistan, particularly in gold, antimony, and polymetallic deposits, and are well-positioned to move into critical minerals such as lithium and rare earth elements.

The Rangkul–Murghab region is important because it contains:

- Rare earth elements used in wind turbines and electronics;
- Tungsten used in industrial and aerospace applications;
- Antimony used in batteries and flame retardants.

For Tajikistan, these resources represent an opportunity for economic development, increased investment, and improved infrastructure. At the same time, international organizations such as the World Bank, UNDP, and GFDRR have highlighted that climate risks must be considered when developing these resources [6-8].

This makes the region important not only locally but also globally, as part of future critical mineral supply systems. For instance, the World Bank's 2021 Climate Risk Country Profile and the GFDRR's 2019 Natural Hazard Risk Assessment highlight the vulnerability of the region's infrastructure to climate-driven disasters. The growing interest from both established and emerging investors could significantly benefit Tajikistan's economy by attracting foreign investment, creating jobs, and improving infrastructure. If managed effectively, the development of critical mineral resources could position the country as an important contributor to global supply chains linked to clean energy and advanced technologies.

Results. The Murghab region experiences an extreme continental climate. Analysis shows significant fluctuations:

Temperature Trends. As illustrated in Fig. 1, for the Rangkul–Murghab region (1901–2024) shows a clear long-term warming trend. In the early 20th century, temperatures were consistently lower, often below −3°C, while in recent decades they have increased, frequently reaching values closer to 0°C.

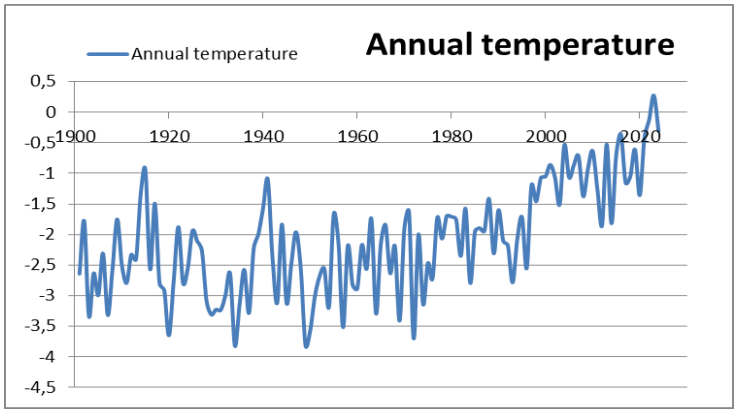


Figure 1 – Annual mean temperature in the Rangkul-Murghab region (1901–2024)

Although there is year-to-year variability, the overall pattern indicates a steady rise in temperature, especially after the 1980s. This warming is important for critical minerals because it can lead to permafrost thaw and glacier melt, which destabilize the ground. As a result, infrastructure used for mineral exploration and extraction may become less stable, increasing environmental and operational risks in the region.

Precipitation a*nd Flooding.* The Fig. 2 trend analysis of the Murghab region (1901-2024) annual precipitation record shows a high level of interannual variation, but in recent decades, a slight upward trend.

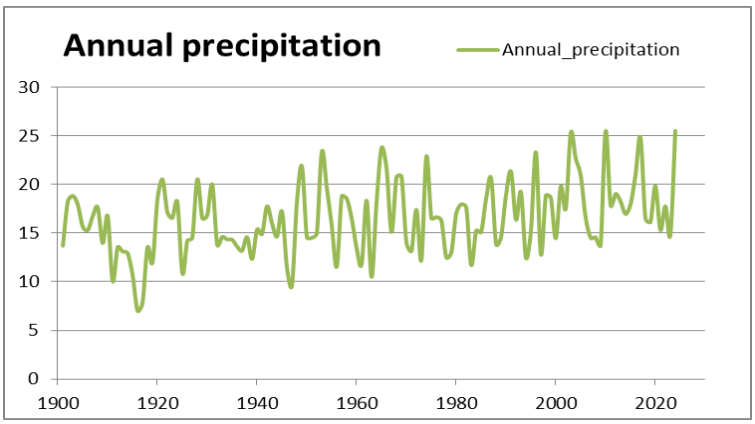


Figure 2 – Annual mean precipitation trends in the Murghab region (1901–2024)

Due to a relatively low level of precipitation, the periods are interrupted by peaks greater than 20-25 mm, which demonstrates an even more disproportionate hydrological regime. This uncertainty implies that the amount of precipitation cannot be constant but dependent on changing climatic conditions, probably connected to larger-scale warming trends. These variations are significant in determining the surface processes, such as erosion, runoff, and sediment transport. They are of specific relevance in the context of critical minerals, where they can reveal as well as redistribute pegmatite-hosted deposits including lithium and rare earth elements. Nevertheless, higher levels of precipitation could also increase the environmental hazards by making slopes unstable, increasing the frequency of landslides, and restricting the safe accessibility of extraction sites.

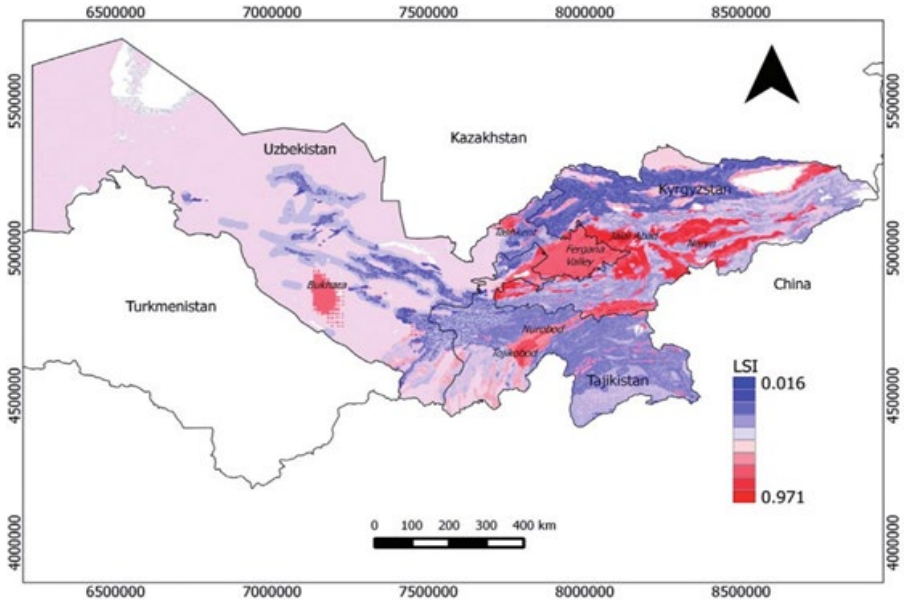


Figure 3 – Landslide susceptibility map of Tajikistan showing areas with very high landslide probability in mountainous regions. Source: Natural Hazards and Earth System Sciences, 2023 [9]

Thus, the precipitation patterns in the Murghab area outline the two-fold role in that it promotes the natural exposure of mineral resources, but at the same time, it predisposes the environmental and operational risks in terms of developing them.

Natural Hazards. Rangkul–Murghab region is a high-risk area with steep terrain, active faults, and zones prone to landslides. These conditions overlap with locations where critical minerals, such as lithium and rare earth elements, are found. Major hazards include landslides, earthquakes, erosion, and slope instability. These hazards can damage mineral deposits by burying them, displacing them, or making access difficult. As the map shows, seismic activity is also significant, and earthquakes can trigger landslides and further destabilize the area. Therefore, while the region has strong potential for critical minerals, natural hazards create serious risks for their extraction.

Conclusion. The Rangkul–Murghab region in the Eastern Pamir highlights a critical balance between global demand and local environmental risk. Rich in essential minerals such as lithium, rare earth elements, tungsten, and antimony, the region has strong potential to contribute to the global transition toward clean energy and advanced technologies.

However, this potential is increasingly threatened by climate change. Long-term data (1901–2024) show rising temperatures, variable precipitation, and more frequent extreme events such as floods and landslides. These changes destabilize permafrost, increase slope instability, and create serious challenges for safe and reliable mineral extraction.

This study demonstrates that while climate processes may help expose mineral deposits, they also significantly increase environmental and operational risks. Therefore, the development of critical minerals in the region must integrate climate adaptation, disaster risk reduction, and sustainable mining practices.

Ensuring resilient and responsible resource development in the Rangkul–Murghab region is essential not only for Tajikistan's economic future but also for the stability of global critical mineral supply chains.

References

1. United States Geological Survey (USGS). 2022. Critical minerals list.
2. International Energy Agency (IEA). 2021. The role of critical minerals in clean energy transitions.
3. World Bank. 2020. Minerals for climate action.
4. Ischuk, A., et al. 2018. Seismic hazard map of Central Asia.
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2021. Climate change 2021: The physical science basis.
6. World Bank. 2021. Climate risk country profile: Tajikistan.
7. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR). 2019. Tajikistan disaster risk profile.
8. United Nations Development Programme (UNDP). 2020. Climate change adaptation in Tajikistan.
9. Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS). 2023. Landslide susceptibility mapping in Central Asia.

УДК 551.5:502(575.2)

CLIMATE CHANGE AND COMPOUND RISKS IN KYRGYZ LEGACY MINING LANDSCAPES: A COMPARATIVE ANALYSIS OF MAILUU-SUU AND AK-TYUZ

Ricciotti E.[1], Pacher S.[1], Orunbaev S.Z.[2]
e.ricciotti@osce-academy.net, s.pacher@osce-academy.net
[1] OSCE Academy in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan
[2] American University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan

This study examines how climate change amplifies environmental risks in the legacy uranium mining sites of Mailuu-Suu and Ak-Tyuz in Kyrgyzstan. Using the Hazard-Exposure-Vulnerability framework, it combines long-term climate data (1945-2024), geospatial analysis, and qualitative field insights. Results show a significant warming trend at both sites, increasing the frequency of temperature extremes, while precipitation trends remain weak. These climatic shifts, together with steep terrain and proximity to transboundary rivers, heighten the risk of landslide-induced mobilization of toxic tailings. Despite similar hazard and exposure profiles, differences in institutional attention and local awareness create uneven vulnerability, underscoring the need for integrated, climate-sensitive risk management strategies.

Keywords: climate change, legacy mining, landslides, transboundary risk, Kyrgyzstan.

Introduction. Climate variability is one of the key risk multipliers of natural hazards in fragile mountain environments. Changes in temperature and precipitation patterns directly influence the stability of slopes, the behavior of rivers, and the frequency of events like landslides and floods. In regions where these natural hazards overlap with socio-technical risks, understanding how climate shapes the local environment becomes not just a scientific question but an urgent one.

This study investigates how climate change amplifies environmental risks in two legacy mining areas in Kyrgyzstan: Mailuu-Suu and Ak-Tyuz. Both locations contain radioactive and toxic tailings situated in geomorphologically unstable terrain and in proximity to transboundary river systems [1–4].

In both these sites, accidents have happened, exposing the surrounding environments and populations to toxic and radioactive waste materials [1, 5]. And climate change may accelerate the risks associated with this already fragile environment; shifts in temperature and precipitation patterns can alter the frequency and intensity of the landslides and floods that threaten the radioactive tailings. Understanding how climate variables have been changing in Mailuu-Suu and At-Tyuz is therefore a necessary step toward understanding the interplay of climate change and socio-technical risk factors. This research therefore compares the two sites with attention to landslide-related threats to mining tailing sites near transboundary rivers.

The central research question is: *how do climatic changes interact with hazards, exposure, and vulnerability in the legacy mining sites of Mailuu-Suu and Ak-Tyuz?* The authors argue that both sites share similar structural risk dynamics (landslide-induced mobilization of waste into transboundary river systems) but differ strongly in the degree of visibility and institutional attention regarding these risks.

Study Area. Climate in Ak-Tyuz and Mailuu-Suu is classified as continental climate, with strong seasonal contrasts [6]. The two locations also share similar geomorphology, with mountains reaching up to 4000m asl and alpine terrain [2]. The seasonal cycle is strongly influenced by mountain hydrology. In winter, large amounts of snow accumulate in the surrounding mountains, storing water that is slowly released as temperatures rise in spring [7]. This, combined with steep slopes, unconsolidated material, and limited vegetation, contribute to an environment where sediment movement processes are active.

The climate of Ak-Tyuz and Mailuu-Suu cannot be understood as a background condition. It plays an active role, among a range of factors, in shaping environmental processes and mediating the interaction between legacy mining infrastructure, rivers and ecosystems surrounding the two locations. The climate-related risks surrounding legacy mining locations in Kyrgyzstan can have a harmful impact on transboundary water and ecosystems and affect health and safety of local communities, pastures and modes of living.

Data and Methodology. This research follows a risk-based approach to investigate how climate change interacts with environmental and human risks. We refer to the Hazard, Exposure, Vulnerabilities (HEV) Framework, by which: *Risk = Hazards × Exposure × Vulnerabilities* [8].

Hazards summarize climate-related processes that may accelerate or trigger disasters. For this study, the hazards for analysis include changes in temperature, variations of precipitation and geospatial analysis of terrain. This study uses the Climatic Research Unit Time-Series dataset (temperature, precipitation) version 4.09 (CRU TS 4.09) [9]. The dataset is considered reliable for long-term trend analysis in regions where direct station data may be sparse. The selected study period for this research is 1945-2024 to align with the opening of the uranium mine in Mailuu-Suu in the mid-1940s, covering the industrial activity and its aftermath.

Exposure describes human settlements and transboundary water systems. GIS-based analysis was used to map tailing sites and their placement in relation to river systems and steep terrain. Slope gradients, river mapping and proximity to human settlements are triangulated to generate a better understanding of the multidimensional risk spectrum.

Vulnerabilities within this study are understood as both physical and social. Physical vulnerabilities include socio-technical instabilities and social vulnerability captures risk awareness of local communities through qualitative field research. Walk-along interviews and informal conversations with local residents were conducted to get a better understanding of risk awareness and knowledge of ongoing programs in the region. In addition, one interview was conducted with a representative of-Suu at the local museum of uranium legacy mining and history.

Following this multi-dimensional approach to 'risk' allows us to conceptualize a complex system of interaction between climatic processes and socio-technical conditions. The mixed methods approach, combining CRU TS data, geospatial analysis, and qualitative insights was due to a shortage of reliable data to assess the tailings management quantitatively [10].

Results. *Temperature Trends.* Analysis of the 1945–2024 climatic records for Mailuu-Suu and Ak-Tyuz reveals a strong and statistically significant warming trend at both sites, accompanied by an increase in abnormally hot years, while precipitation trends remain weak and largely non-significant (Fig. 1).

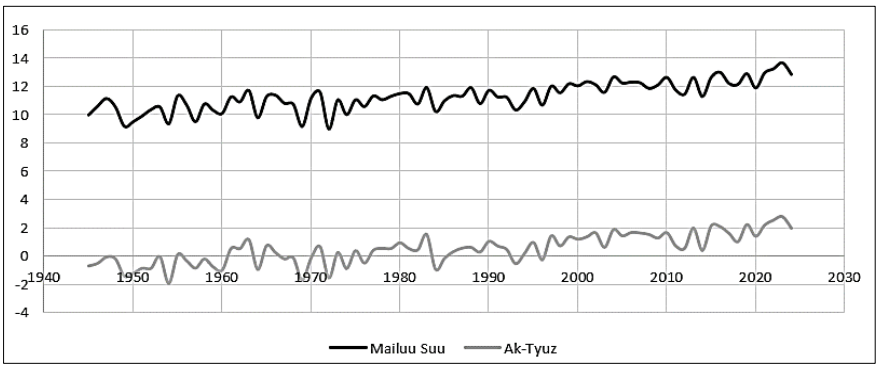


Figure 1 – Annual temperature (°C)

At Mailuu-Suu, mean annual temperature increased at a rate of +0.34°C per decade ($p < 0.001$, $R^2 = 0.62$), corresponding to a total rise of approximately 2.9°C over the observation period. Ak-Tyuz exhibits a nearly identical warming rate of +0.36°C per decade ($p < 0.001$, $R^2 = 0.62$), despite its colder baseline conditions. The consistency of these trends across both sites underline a coherent regional warming signal, rather than localized variability.

Seasonal analysis reveals that warming is significant across all seasons at both locations (Fig. 2 and Fig. 4), with the strongest increases observed in winter (Mailuu-Suu: +0.41°C/decade, Fig. 3; Ak-Tyuz: +0.44°C/decade, Fig. 5; $p < 0.001$ both). Importantly, spring also exhibits very pronounced warming, while summer and autumn show slightly lower, yet significant trends. Independent validation using decadal averages confirms these findings, highlighting warming rates of approximately 0.3–0.4°C per decade, consistent with regression-based estimates.

The shift between early (1945–1984) and late (1985–2024) period is statistically robust. Mean annual temperature increased by +1.35°C at Mailuu-Suu and +1.39°C at Ak-Tyuz ($p < 0.001$ for both), indicating a clear transition to a significantly warmer baseline. This shift is critical, as it directly influences the frequency of exceeding thresholds (below).

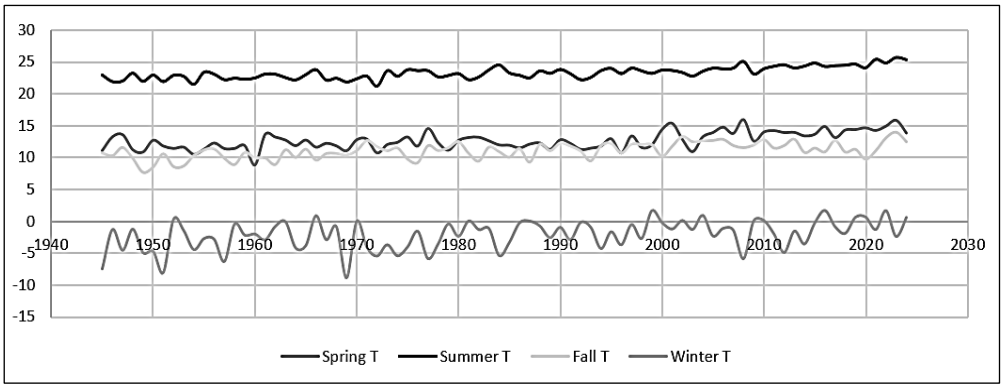


Figure 2 – Seasonal temperature (°C), Mailuu-Suu

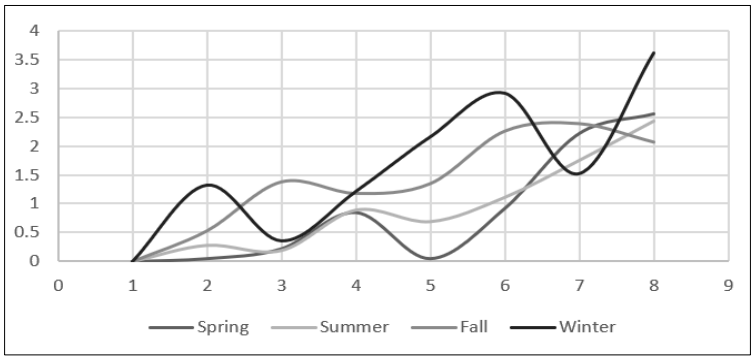


Figure 3 – Comparative temperature increase of season (0° Baseline), Mailuu-Suu

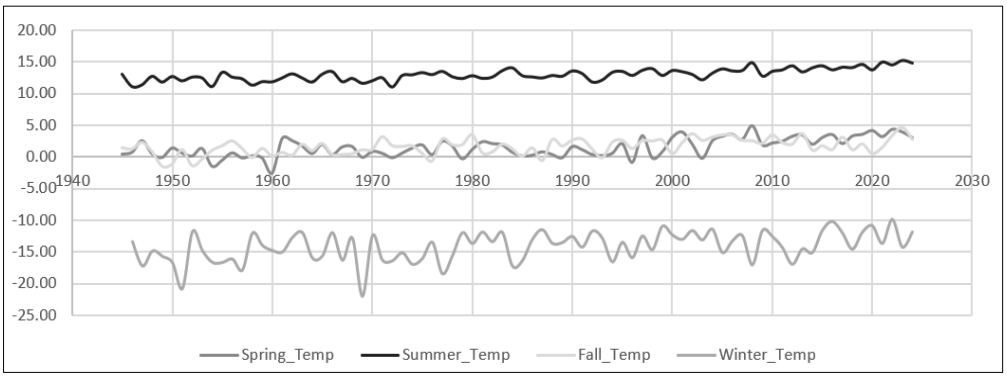


Figure 4 – Seasonal temperature (°C), Ak-Tyuz

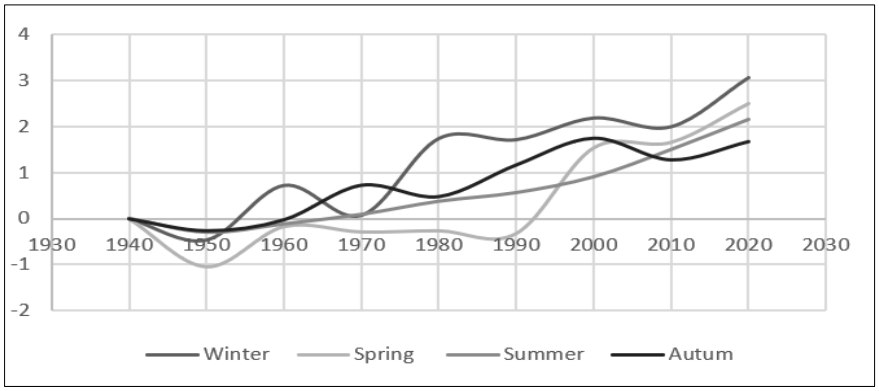


Figure 5 – Comparative temperature increase of season (0° Baseline), Ak-Tyuz

Precipitation Trends. In contrast, precipitation trends are weak and statistically insignificant at the annual scale for Mailuu-Suu and Ak-Tyuz (p=0.941; p=0.702). Seasonal precipitation as well shows limited change, although Ak-Tyuz exhibits modest but significant annual increases in fall ($p = 0.046$) and winter ($p = 0.010$) precipitation (Fig. 6). These results suggest that the dominant climatic driver is temperature increase rather than systematic wetting, though seasonal redistribution of precipitation may play a secondary role. Due to the rough data (monthly precipitation), it is not possible to determine whether or not an increase of extreme precipitation events is occurring more often in correlation with the modest but significant rainfall increase in Ak-Tyuz.

The most striking statistical result concerns the frequency of extreme warming events. Warm years were defined in this study as those in which temperature exceeded the long-term mean by more than one standard deviation ($\mu + 1\sigma$), representing statistically anomalous warm conditions. At Mailuu-Suu, warm years increased from 1 in the early period (1945-1984) to 17 in the late period (1985-2024), while at Ak-Tyuz they increased from 0 to 17 respectively. These changes are highly significant (Fisher's exact test: $p < 10^{-5}$ for both sites, confirming significant shift in the frequency of warming extremes). Moreover, warm extremes are strongly concentrated after 2000, indicating an acceleration in threshold exceedance frequency rather than a gradual increase.

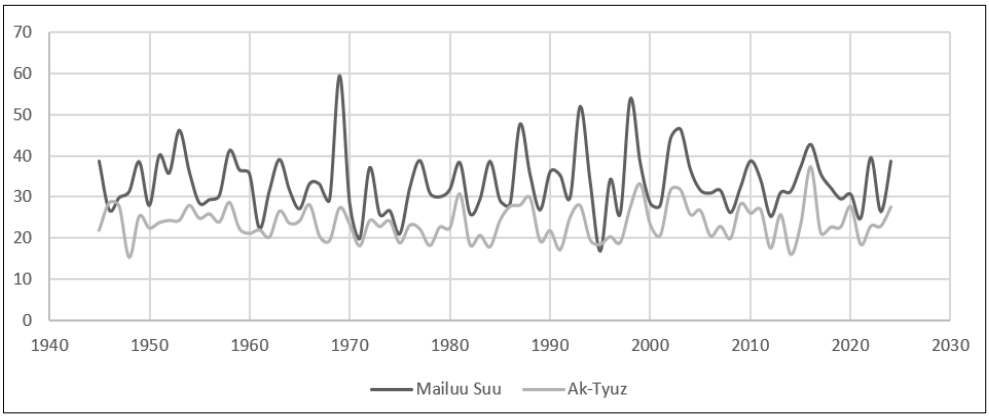


Figure 6 – Annual Precipitation

By contrast, again, wet extremes show no significant change between periods at either Mailuu-Suu or Ak-Tyuz ($p = 0.546$; $p = 1.000$ respectively), reinforcing the conclusion that changes in extreme-event dynamics are primarily temperature-driven.

Compound events, designated as simultaneous occurrences of warm and wet threshold exceedance, remain rare and emerge only in the very recent years. Mailuu-Suu records one such event (2022), while, based on the annual temperature and precipitation means, Ak-Tyuz records two (2016, 2022). The occurrence of these compound events is not statistically significant due to low frequency. However, the recent appearance is notable, particularly the shared event in 2022. Combined with the significant increase in abnormally warm years (above $\mu + 1\sigma$), it can be assumed that compound

events will increase in frequency, which suggests increasing potential for co-occurring climatic stressors.

Geospatial Analysis. Both Mailuu-Suu and Ak-Tyuz show high landslide vulnerability due to their topography. In Mailuu-Suu, tailings are located on relatively flat ground but close to steep slopes (>30°), exposing them to slope instability (Fig. 7a). In Ak-Tyuz, steep alpine terrain surrounds the tailings facilities, with many slopes exceeding critical angles (25-30°) associated with landslides (Fig. 7b). In both cases, the proximity of tailings to steep slopes significantly increases the risk of slope failure [11], especially under conditions of high soil saturation and precipitation [12].

The proximity of tailing sites to river systems represents another critical risk factor. In the event of slope failure, contaminated materials could be mobilised into the river network, facilitating downstream dispersion. The 500 m buffer zone analysis (Fig. 8a and Fig. 8b) further indicates that areas immediately adjacent to the river, including inhabited zones, would be directly exposed to potential contamination, highlighting a significant environmental and human risk.

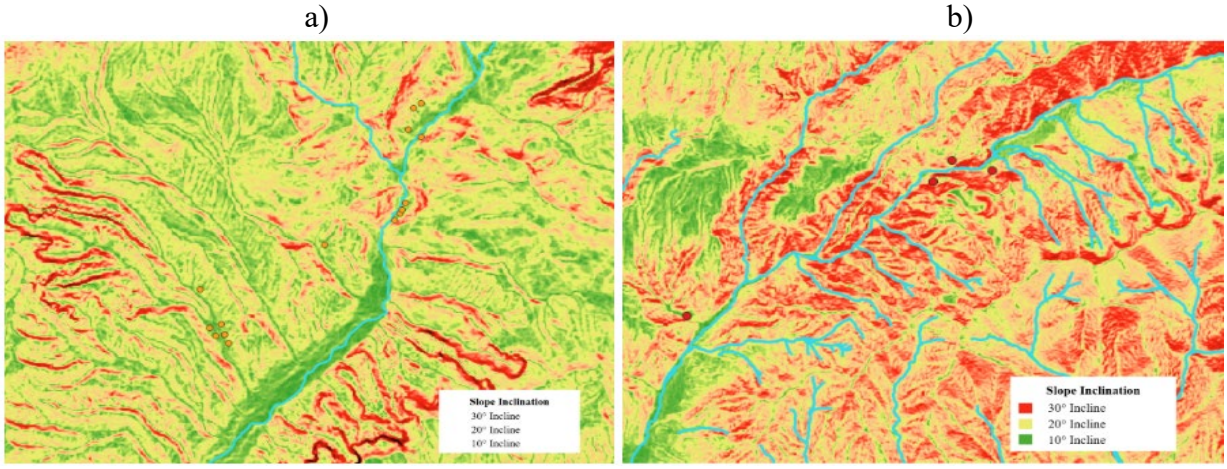


Figure 7 – Slope incline Mailuu-Suu (a) and Ak-Tyuz (b)

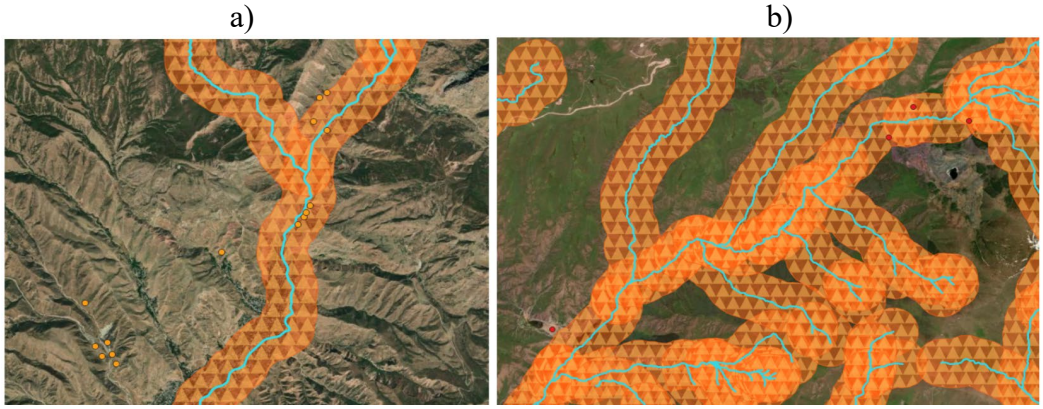


Figure 8 – Mailuu-Suu (a) and Ak-Tyuz (b) river buffer, 500 m

Discussion and comparison. Using the HEV framework, the analysis highlights how climatic changes, combined with slope instability, exposed population, river systems, and varying levels of awareness, translate into differentiated but structurally similar risk profiles across the two sites.

Hazard. Mailuu-Suu and Ak-Tyuz are exposed to a comparable set of climatic and topographic hazards. Both sites show a statistically significant warming trend ($p < 0.001$, $R^2 = 0.62$), indicating persistent and non climatic shifts. This seasonal concentration of warming is crucial because warmer winters reduce the stability and melt characteristics of snowpack and increase the likelihood of mid-winter melt events, while warmer springs accelerate snowmelt and deliver large volumes of water to slopes in a short period of time, a process directly linked to landslide triggering [12]. The most critical finding, however, is the sharp rise in climate extremes. The significant shift of

underscores that anomalously warm years are no longer rare but recurrent features of the climate system.

Despite no clear long-term trend in total annual precipitation, both display high interannual variability. At Mailuu-Suu, the coincidence of peak spring and summer precipitation with rising spring temperatures arguably creates dangerous hydrological conditions, as snowmelt and rainfall combine to saturate soils simultaneously [13]. The insignificant precipitation trends indicate that increasing hazards are driven primarily by changing thermal conditions. For a more comprehensive extreme weather analysis, daily precipitation must be studied in more detail.

The topographic analysis reinforces the climate signal; both locations feature tailing ponds in close proximity to slopes exceeding 30°. Steep terrain acts as a hazard multiplier; combined with climatic changes, it can increase slope instability [12] and threaten the integrity of the radioactive tailings.

Together, the findings suggest that climate change is not inducing new hazards, but present hazards are likely to increase in frequency and intensity and could lead to higher geomorphological instability. Importantly, the "health and environmental risk appraisal (of Ak-Tyuz and Mailuu-Suu) must go beyond the radiological categories of risk assessment because factors such as cross-boundary, socio-economic impacts and possible economic benefits from re-treatment of legacy waste for recovery of valuable constituents must be taken into account" [10].

Exposure. Mailuu-Suu and Ak-Tyuz both illustrate how the close proximity of tailings facilities to rivers creates significant local and transboundary risks. In Mailuu-Suu, where around 22,000 people live near the tailings sites, a landslide-triggered release of radioactive material would affect much of the local population and spread downstream, potentially reaching the Syr-Darya [1] and impacting communities across the Fergana Valley into Uzbekistan.

A similar pattern is evident in Ak-Tyuz, where all tailings facilities are located near the Kichi-Kemin River, making them vulnerable to landslides and earthquakes. The 1964 incident demonstrates the potential consequences: dam failure could contaminate the river valley, expose downstream populations to radiation and toxic elements, and carry waste further into the Chuy River, crossing into Kazakhstan. In both cases, the combination of environmental hazards and river connectivity amplifies human risk exposure and creates significant potential for cross-border impacts and disputes [1, 10]. Therefore, localized slope failure can potentially propagate through the nearby river systems and amplify the spatial extent of risk beyond the immediate sites.

Vulnerability. Mailuu-Suu and Ak-Tyuz differ notably in governance, awareness, and available knowledge despite both facing significant environmental and health risks [14]. Mailuu-Suu benefits from sustained international and national engagement, including monitoring, capacity building, and disaster preparedness efforts by actors such as the OSCE, UNDP, the EU, and the Kyrgyz Ministry of Emergency Situations [15, 16]. This presence could enable faster responses to future contamination events. However, local awareness of long-term radiation risks remains low. In a short field visit in March 2026, informal interviews and observations underlined this lack of awareness. Some tailing facilities of Mailuu-Suu are frequently used by children as a playing field and, despite radioactive contamination warning signs, remains easily accessible.

a) b)



Figure 9 – Child playing on the tailings (a) and Mailuu-Suu river (b)

The local Mailuu-Suu Uranium Legacy History Museum, which opened in 2022, actively promotes civic education of the dangers of radiation [15], yet, based on field interviews and observations, it must be concluded that awareness among local residents is very low [14]. Even though radiation may not pose immediate threats to health, invisible long-term health risks can still be severe. According to the Ministry of Health of the Kyrgyz Republic, cancer rates remain the highest nationally in Mailuu-Suu, with approximately 89 cases per 100.000. This could be accelerated by unintentional consumption of polluted water, as indicated by research conducted by the Institute of Medical Problems [1]. Another study underscores that birth defects correlate with the distance of residence to the radioactive waste facilities, and defect rates are three times higher than in the city of Osh (ibid.).

a) b)



Figure 10 – Public awareness raising. Uranium legacy museum of the city of Mailuu-Suu (a) and visual indicators of erosion in Mailuu-Suu valley

Ak-Tyuz presents a different picture. While the site also poses significant environmental and health risks, it has received considerably less international and institutional attention than Mailuu-Suu. Among the most severe issues remain the questionable stability and maintenance of the tailing facilities. Due to a lack of reliable data, the structural integrity of the dams containing the tailings must be evaluated as vulnerable. Further, Ak-Tyuz lies in a region of high seismic activity and has historically seen earthquakes of a magnitude of up to 8.9. This issue is also reflected in other risk assessments of the area [10,17]. For Ak-Tyuz, research on the implications to human health is weak. These vulnerabilities are especially critical in the context of increasing climatic extremes, because limited awareness and institutional capacity reduce responsiveness to worsening conditions.

Conclusion. Our methodological approach shows that risk in both sites results from the complex interaction of hazard amplification, a high exposure that could amplify these hazards in case of disasters, and uneven vulnerability conditions. Although the exposure remains constant, the changing hazard regime indicates that risky conditions are becoming more frequent. The significant increase in climate extremes acts as a hazard multiplier on existing weaknesses in infrastructure, awareness and slope stability. Both sites show similar risk patterns, particularly in the remobilization of hazardous waste materials into transboundary rivers. Addressing the core risks will require more research as well as improved and permanent monitoring, climate-sensitive planning and strong international cooperation.

References

1. Madykova J. Mailuu-Suu: Cleaning up Central Asia's toxic uranium legacy // Earth Journalism Network. 2020.
2. Havenith H.-B., Torgoev I., Meleshko A., Alioshin Y., Torgoev A., Danneels G. Landslides in the Mailuu-Suu Valley, Kyrgyzstan—Hazards and Impacts // Landslides. 2006, Vol. 3. No. 2. Pp. 137–147.

3. Solodukhin V., Poznyak V. Studying the effect of radioactive wastes at the Ak-Tyuz deposit on radionuclide and elemental composition of water objects of Kichi-Kemin River // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 164. No. 4. Pp. 552–555.
4. Severinenko M., Solodukhin V., Djenbaev B.M., Lennik S., Kabirova G., Zholboldiev B., Levashov M., Zheltov D., Bychenko A. Industrial Facilities of Kyrgyzstan as the Sources of Pollution of the Transboundary Shu River Basin // AIP Conference Proceedings. 2024. Vol. 3020. No. 1.
5. Umwelt Bundesamt. Environmental Impact of Uranium Mining in Central Asia. Umweltbundesamt (German Environment Agency). 2022.
6. Weather Spark. Climate and Average Weather Year Round in Jalal-Abad, Kyrgyzstan. Available at: https://weatherspark.com/y/107778/Average-Weather-in-Jalal-Abad-Kyrgyzstan-Year-Round (accessed March 23, 2026).
7. Piroton, V., Schlögel, R., Barbier, C., Havenith, H.-B. Monitoring the Recent Activity of Landslides in the Mailuu-Suu Valley (Kyrgyzstan) Using Radar and Optical Remote Sensing Techniques // Geosciences. 2020. Vol. 10. No. 5. 1-27.
8. Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. Routledge, 2004. 496 p.
9. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Scientific Data. 2020. Vol. 7. No. 109. Pp. 1–18.
10. Torgoev I., Jakubick A. Assessment of Failure Modes of the Ak-Tyuz Tailing Ponds in Kyrgyzstan in Preparation of Remediation Measures // Merkel B., Schipek M. (eds.). The New Uranium Mining Boom: Challenge and Lessons Learned. Springer. 2011. Pp. 229–238.
11. Dai F.C., Lee C.F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong // Geomorphology. 2002. Vol. 42. No. 3–4. Pp. 213–228.
12. Gariano S.L., Guzzetti F. Landslides in a changing climate // Earth-Science Reviews. 2016. Vol. 162. Pp. 227–252.
13. Wang X., Otto M., Scherer D. Atmospheric triggering conditions and climatic disposition of landslides in Kyrgyzstan and Tajikistan at the beginning of the 21st century // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2021. Vol. 21. Pp. 2125–2144.
14. Olma N. Precarious half-lives: silencing toxic legacies in a former uranium mining town in Kyrgyzstan // Anthropology & Medicine. 2026, Pp. 1–15. https://doi.org/10.1080/13648470.2025.2604007
15. European External Action Service (EEAS). Mailuu-Suu Celebrated Opening of Unique Uranium Legacy Museum. 2022. Available at: https://www.eeas.europa.eu/delegations/kyrgyz-republic/mailuu-suu-celebrated-opening-unique-uranium-legacy-museum_en
16. OSCE Programme Office in Bishkek. Uranium Legacy Remediation Initiatives. 2025. Available at: https://bishkek.osce.org/programme-office-in-bishkek/599769.
17. Umtulov A., Ruskulova G. Needs and challenges in managing tailings by operators in Central Asia (Republic of Kyrgyzstan). UNECE, 2025. Available at: https://unece.org/sites/default/files/2025-07/4c_Mr._Azamat_Umtulov_Needs_and_challenges_KYR_ENG.pdf

УДК 550.311:622.276

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ГАЗА

Кузьмин Д.К.
dimak1292@mail.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

В работе представлена методика оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) одного из подземных хранилищ газа (ПХГ), расположенном в России и созданном в водоносном горизонте. На теоретической базе предшествующих работ автора с коллегами по данному направлению, произведены расчеты вертикальных смещений земной поверхности, а также смоделированы горизонтальные напряжения в окрестности газосодержащего пласта. Представленная методика позволяет оценивать НДС за любой промежуток времени эксплуатации, когда время привязано к данным изменения эффективного давления.

Ключевые слова: моделирование, вертикальные смещения, напряжения, подземное хранилище газа, деформации.

Введение. Известно, что режим эксплуатации любого ПХГ обуславливается цикличным изменением эффективного давления с полугодовым периодом. В весенне-летний период производится закачка газа в хранилище, в осенне-зимний период - отбор. Таким образом, любой график изменения эффективного давления во времени на таких объектах - это, как правило, волновая функция с одинаковыми амплитудами. Соблюдение баланса между увеличением и снижением эффективного давления – важнейшая задача, необходимая для безопасного пользования ПХГ.

Деформации земной поверхности как явления проявляются в виде вертикальных смещений пунктов наземных и спутниковых наблюдений. При закачке газа они положительные, при отборе газа – отрицательные. Градиенты этих смещений во времени позволяют оценивать геодинамическую опасность объектов на земной поверхности, а напряжения, рассчитанные в окрестности пласта, позволяют оценивать его герметичность.

Методика модельной оценки напряженно-деформированного состояния недр, используемая в данной работе, была неоднократно применена на ряде других ПХГ, а также на нефтегазовых месторождениях, а результаты модельных расчетов достаточно точно коррелировались с данными геодезических и геофизических наблюдений [1-9]. В основе модели лежит пороупругое включение, помещенное в среду упругого полупространства, свободного от внешних сил [10-13]. Интенсивность смещений земной поверхности при этом характеризуется выводом НДС недр из состояния равновесия. Увеличение эффективного давления влечет за собой уменьшение пластового давления, происходят флюидо-динамические изменения внутри пласта, которые оказывают влияние на оседания (при отборе газа) или поднятия (при закачке газа) земной поверхности. Поэтому при моделировании на основе вышеописанного формализма использовались данные изменений пластового давления. На амплитуду смещений земной поверхности также влияют и деформационно-прочностные свойства горных пород, однако на большинстве объектов они определяются на основе кернов небольшого количества скважин, и в расчетах используются средние их величины.

Задачу о проведении оценок ожидаемых смещений земной поверхности и герметичности пласта, как правило, ставят на этапе проектирования геодинамических полигонов, на стадии горно-геологического обоснования объекта недропользования. Однако и в дальнейшем, при эксплуатации ПХГ модельные расчеты часто используются как инструмент при анализе и сопоставлении с геодезическими данными наблюдений.

Расчет модельных вертикальных смещений земной поверхности и горизонтальных напряжений в окрестности газосодержащего пласта. В данной работе автором намеренно не раскрывается название, география и геология ПХГ во избежание конфликта интересов с недропользователями данного объекта. Однако в научных интересах чтобы продемонстрировать методику необходимо уточнить некоторые физические свойства горных пород, используемые в расчетах. Коэффициент сжимаемости порового пространства на глубине около 650 м был принят C_p = 1·10^{-3} 1/МПа. Коэффициент пористости, в среднем, m = 0.27. Модельные оседания и поднятия земной поверхности (рисунок 1) были рассчитаны при численно равной величине изменения пластового давления ΔP=±4 МПа за период в течение 2024 года.

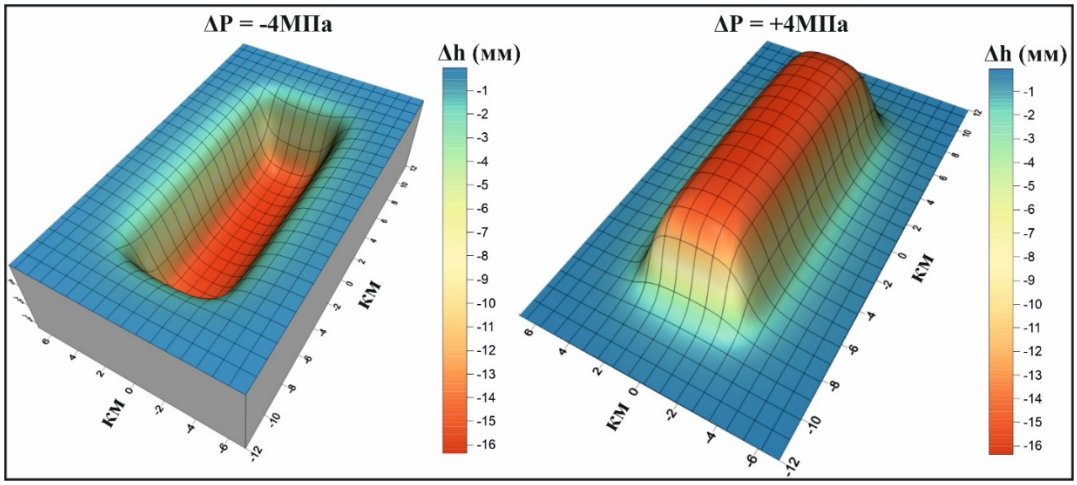


Рисунок 1 – Модельные оседания и поднятия земной поверхности при текущей эксплуатации ПХГ

Как видно из рисунка 1, наблюдаются незначительные вертикальные смещения с максимальной амплитудой 16 мм. При оседаниях и поднятиях земной поверхности с данной амплитудой на ширине порядка 16 км вдоль простирания пласта и 6 км вкрест простирания, относительные деформации будут иметь величины порядка 2-5(·10^{-6}). Такой уровень деформации не является опасным. Порогом опасных деформаций, как известно является порядок 10^{-3} [14-20].

Возникновение пороупругого включения, которое в данном случае является пластом-коллектором, в котором повысилось (или понизилось) пластовое давление, приводит к формированию не только деформаций земной поверхности, но и напряжений. Эти локальные напряжения будут концентрироваться в окрестности пласта и затухать по направлению к земной поверхности. На рисунке 2 смоделированы горизонтальные растягивающие и сжимающие напряжения в окрестности газосодержащего пласта при изменении давления на ΔP=±4 МПа.

Графики модельных горизонтальных напряжений показывают, что максимальные градиенты сконцентрированы на краях модельного источника (пласта). Общий фон напряжений на графиках составляет значения 1.2-1.4 МПа. При этом изменение давления на ΔP=+4 МПа указывает на формирование положительных (растягивающих) напряжений, а при ΔP=-4 МПа - отрицательных (сжимающих).

Широко известно, что в атмосферных условиях порог разрушения известняка на растяжение составляет порядка 2.5-7 МПа в зависимости от глубины залегания. Для приповерхностного залегания известняков (до 100м) этот предел прочности, как правило, принимают на уровне 2.5 МПа. А именно эти породы слагают самую приповерхностную часть геологического разреза, исследуемого в данной работе ПХГ. Как видно из графика на рисунке 2, полученные значения модельных растягивающих напряжений (особенно в приповерхностной зоне) имеют меньшие значения по сравнению с указанным порогом.

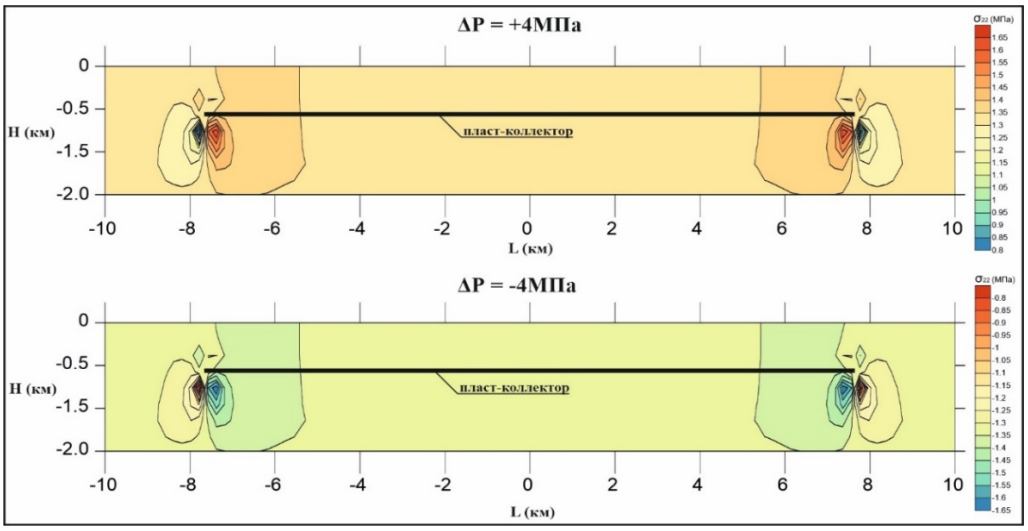


Рисунок 2 – Модельные горизонтальные растягивающие и сжимающие напряжения в окрестности пласта-коллектора ПХГ

Таким образом, по результатам моделирования выявлено, что знакопеременное изменение давления в пласте-коллекторе при эксплуатации данного ПХГ оказывает влияние на напряженно-деформируемое состояние земной поверхности. Однако, полученные расчетные значения вертикальных смещений, деформаций и напряжений позволяют оценить текущий режим эксплуатации как безопасный.

Выводы. Выявленные по результатам моделирования значения вертикальных смещений достаточно малы и не представляют собой опасных деформаций. Опасные деформации на уровне (10^{-4}) на данном участке способны создать смещения с амплитудами порядка 10 см. А такие значения, согласно теории деформированного пласта, в данном случае могут возникнуть при значениях изменения давления ΔP=22 МПа, что в 5.5 раз превышает текущие значения ΔP. При этом следует отметить, что с ростом изменения давления также могут меняться во времени и петрофизические свойства пород. В таком случае можно сказать, что вертикальные смещения могут нарастать по нелинейной зависимости. Также изменение во времени петрофизических свойств пород может индуцировать разломные зоны или зоны повышенной трещиноватости. Однако, чтобы контролировать динамику изменения деформационно-прочностных свойств горных пород во времени, требуется дополнительно проводить лабораторные испытания для конкретных керновых образцов, извлеченных из данных глубин.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Кузьмин Д.К. Математическое моделирование деформационных процессов на газонефтяном месторождении Центральной Азии // Горная промышленность. 2025. № 6. С. 211-215.
4. Жуков В.С., Кузьмин Д.К. Оценка сжимаемости порового пространства коллекторов Увязовского ПХГ // Наука и технологические разработки. 2022. Т. 101. № 3. С. 5-20.

5. Жуков В.С., Кузьмин Д.К. Оценка влияния разработки Чаяндинского месторождения на просадки земной поверхности // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 1. С. 73-84.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Kuzmin D.K., Kuzmin Y.O., Zhukov V.S. Assessment of ground surface subsidence during Chayanda field development with regard to changes in petrophysical parameters of oil and gas reservoirs // Eurasian mining. 2022. № 2 (38). С. 11-15.
10. Кузьмин Ю.О., Никонов А.И. Геодинамическая природа аварийности нефтегазовых скважин и трубопроводных систем // Перспективы развития экологического страхования в газовой промышленности. М.: Газпром. 1998. С. 315-328.
11. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство Экономических Новостей. 1999. 220 с.
12. Кузьмин Ю.О. Проблемные вопросы изучения деформационных процессов в современной геодинамике // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 3. С. 98-107.
13. Кузьмин Ю.О. Тектонофизика и современная геодинамика // Физика Земли. 2009. № 11. С. 44-60.
14. Кузьмин Ю.О. Актуальные вопросы использования геодезических измерений при геодинамическом мониторинге объектов нефтегазового комплекса // Вестник СГУГИТ. 2020. Т. 25. № 1. С. 43-54.
15. Кузьмин Ю.О. Современные объемные деформации разломных зон // Физика Земли. 2022. № 4. С. 3-18.
16. Кузьмин Ю.О. Физические основы современной геодинамики // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 2. С. 5-58.
17. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика индуцированных разломов // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 3. С. 5-65.
18. Кузьмин Ю.О. Параметрические эффекты в современной геодинамике // Физика Земли. 2025. № 4. С. 216-236.
19. Кузьмин Ю.О. Парадоксы аномальных оседаний на длительно разрабатываемых месторождениях нефти и газа // Геофизические процессы и биосфера. 2025. Т. 24. № 2. С. 30-41.
20. Кузьмин Ю.О. Геодинамическая опасность и риски недропользования // Геофизические процессы и биосфера. 2025. Т. 24. № 3. С. 46-60.

УДК 504:711

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА УСТЬ-КАМЕНОГОРСК)

Маулитова Ш.Е., Ишпекбаева А.К., Таукебаев Ж.Ж.
shyrynmaulitova@gmail.com
ТОО «Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований», г. Алматы, Казахстан

В статье рассматривается влияние техногенной нагрузки на развитие урбанизированных территорий на примере города Усть-Каменогорск. Цель исследования – выявление особенностей формирования техногенных факторов в условиях урбанизации и оценка их воздействия на окружающую среду. В ходе исследования был проведён анализ научной литературы, использованы статистические данные и материалы экологического мониторинга. Кроме того, с применением технологий географических информационных систем (ГИС) было проанализировано пространственное распределение техногенной нагрузки. Результаты исследования показали, что основными источниками техногенной нагрузки в городе Усть-Каменогорск являются промышленные предприятия, транспортная инфраструктура, а также накопление бытовых и промышленных отходов. Указанные факторы оказывают значительное влияние на загрязнение атмосферного воздуха, водных ресурсов и почвенного покрова. Полученные результаты позволяют разработать эффективные меры управления, направленные на улучшение экологической ситуации и снижение техногенной нагрузки на урбанизированных территориях.

Ключевые слова: урбанизация, техногенная нагрузка, экологическое загрязнение, урбанизированные территории, Усть-Каменогорск, ГИС-технологии.

Введение. В настоящее время урбанизация является одним из ключевых процессов мирового социально-экономического развития. Интенсивный рост городов сопровождается расширением промышленного производства, развитием транспортной инфраструктуры и активным строительством жилых территорий. Согласно данным Организации Объединённых Наций, в настоящее время более половины населения мира проживает в городах, и, по прогнозам, этот показатель будет продолжать увеличиваться в ближайшие десятилетия [1]. Несмотря на то, что урбанизация способствует экономическому развитию и технологическому прогрессу, она также приводит к росту антропогенной и техногенной нагрузки на окружающую среду.

Научные исследования показывают, что расширение урбанизированных территорий оказывает значительное влияние на изменение природных ландшафтов, загрязнение атмосферного воздуха, ухудшение качества водных ресурсов и деградацию почв [2]. Пространственная структура урабанизационных процессов непосредственно влияет на особенности распределения антропогенной нагрузки и является одним из важных факторов формирования экологического состояния городских территорий [3].

В Казахстане процессы урбанизации в значительной степени связаны с индустриализацией и развитием промышленных центров. Одним из крупнейших индустриальных городов страны является город Усть-Каменогорск, расположенный в Восточно-Казахстанской области. В городе развиты отрасли цветной металлургии, энергетики и машиностроения. Интенсивное развитие промышленного производства способствует экономическому росту региона, однако одновременно приводит к увеличению техногенной нагрузки на окружающую среду.

В связи с этим исследование особенностей формирования техногенной нагрузки в урбанизированных территориях и оценка её воздействия на окружающую среду являются одним из актуальных направлений современных научных исследований.

Цель исследования – выявление основных источников техногенной нагрузки в урбанизированной территории города Усть-Каменогорск и оценка их воздействия на окружающую среду.

Методика и данные. Исследование направлено на выявление особенностей формирования техногенной нагрузки в урбанизированных территориях и оценку её воздействия на окружающую среду. В качестве объекта исследования выбрана урбанизированная территория города Усть-Каменогорск, расположенного в восточной части Казахстана. Город Усть-Каменогорск является одним из крупнейших индустриальных центров страны, где развиты отрасли цветной металлургии, энергетики и машиностроения. Развитие промышленного производства способствовало ускорению процессов урбанизации и увеличению техногенной нагрузки на окружающую среду [4].

В ходе исследования был проведён анализ научной литературы по вопросам урбанизации и техногенной нагрузки. Изучение особенностей антропогенного воздействия на урбанизированные территории является одним из важных направлений современных исследований в области географии и экологии. Пространственное развитие городов может приводить к трансформации природной среды и ухудшению экологической ситуации [2]. Анализ функциональной структуры городов и их пространственной организации позволяет более полно оценить экологические последствия урбанизационных процессов [6].

В качестве исходных данных использовались материалы экологической статистики Республики Казахстан, а также ежегодные отчёты о состоянии окружающей среды Восточно-Казахстанской области [5, 7]. Данные источники позволяют оценить уровень загрязнения атмосферного воздуха, водных ресурсов и почвенного покрова в промышленных городах. Кроме того, в рамках исследования был проведён анализ пространственного размещения промышленных предприятий, транспортной инфраструктуры и объектов размещения бытовых и производственных отходов.

Для определения пространственного распределения техногенной нагрузки были использованы технологии географических информационных систем (ГИС). Методы ГИС позволяют анализировать размещение промышленных предприятий, определять функциональные зоны города и оценивать пространственную структуру источников техногенного загрязнения [3]. В настоящее время ГИС-технологии являются одним из наиболее эффективных инструментов исследования урбанизированных территорий, поскольку позволяют проводить анализ пространственных данных и выполнять картографическое моделирование [8].

Кроме того, в ходе исследования применялись сравнительно-географический, аналитический и картографический методы. Использование данных методов позволяет выявить основные факторы формирования техногенной нагрузки в урбанизированных территориях и комплексно оценить их воздействие на окружающую среду. Применение методов пространственного анализа при изучении процессов урбанизации играет важную роль в оценке экологического состояния городской среды [9].

В результате проведённого анализа установлено, что основными источниками техногенной нагрузки в городе Усть-Каменогорск являются следующие факторы:

– деятельность промышленных предприятий;

– развитие транспортной инфраструктуры;

– накопление бытовых и производственных отходов.

Указанные факторы оказывают комплексное воздействие на экологическое состояние урбанизированных территорий, способствуя загрязнению атмосферного воздуха, ухудшению качества водных ресурсов и деградации почвенного покрова. В связи с этим исследование техногенной нагрузки в урбанизированных территориях является одной из важных научных задач, направленных на обеспечение устойчивого развития городов.

Результаты и обсуждение. Результаты проведённого исследования показали, что интенсивное развитие процессов урбанизации в городе Усть-Каменогорск приводит к значительному увеличению техногенной нагрузки на окружающую среду. Город Усть-Каменогорск является одним из крупнейших индустриальных центров Казахстана, где сосредоточены предприятия цветной металлургии, энергетики и машиностроения. Развитие промышленного производства способствует экономическому росту региона, однако одновременно приводит к усилению антропогенного и техногенного воздействия на окружающую среду [10]. Подобные процессы характерны для городов с развитой промышленной инфраструктурой и оказывают существенное влияние на устойчивость городских экосистем [11].

Урбанизированная территория города Усть-Каменогорск характеризуется выраженной функциональной дифференциацией. В пределах городской территории сформировались промышленные зоны, жилые районы и пригородные территории. Основная часть промышленных предприятий сосредоточена в северной и северо-восточной частях города, где наблюдается высокая концентрация металлургических и энергетических предприятий. Пространственное распределение функциональных зон города представлено на рисунке 1.

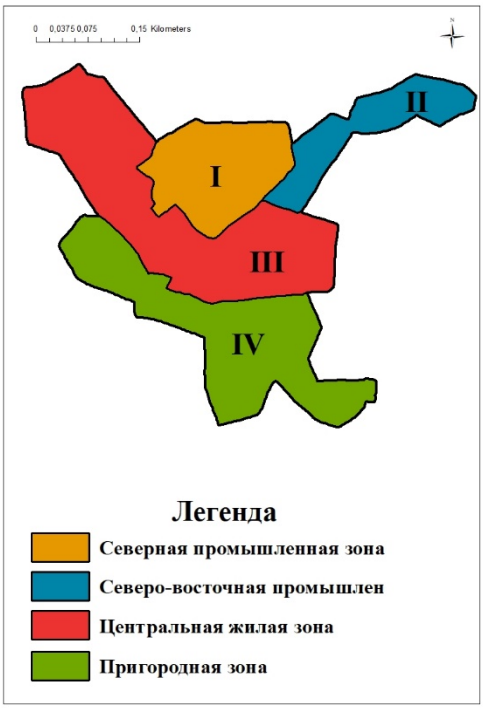


Рисунок 1 – Карта-схема функциональных зон города Усть-Каменогорск

Как видно из карты, промышленные зоны города сформировались преимущественно в местах размещения производственных предприятий. В таких зонах наблюдается высокий уровень промышленных выбросов, что оказывает значительное влияние на качество атмосферного воздуха. Концентрация промышленных предприятий является одним из основных факторов, определяющих экологическое состояние городской среды.

В процессе промышленного производства в атмосферу выбрасываются тяжёлые металлы, пылевые частицы и различные химические соединения. Деятельность металлургических предприятий приводит к увеличению объёма загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух. Подобные загрязняющие вещества способствуют ухудшению качества атмосферного воздуха и негативно влияют на экологическое состояние урбанизированных территорий [12]. Кроме того, деятельность промышленных предприятий оказывает влияние на загрязнение водных ресурсов и почвенного покрова.

Ещё одним важным источником техногенной нагрузки в городской среде является транспортная инфраструктура. В условиях урбанизации количество транспортных средств постоянно увеличивается. Автотранспорт является источником выбросов углекислого газа, оксидов азота и других вредных веществ в атмосферу. Транспортные выбросы способствуют повышению уровня загрязнения атмосферного воздуха и усложнению экологической ситуации в городе [13].

Ещё одним важным фактором формирования техногенной нагрузки является накопление бытовых и производственных отходов. Наличие площадок для хранения отходов и полигонов промышленных отходов приводит к загрязнению почвенного покрова и поверхностных вод. Кроме того, накопление отходов оказывает негативное влияние на устойчивость городских экосистем и способствует ухудшению экологического состояния урбанизированных территорий [14].

В атмосферном воздухе города Усть-Каменогорск выявлены загрязняющие вещества, относящиеся к различным классам опасности. Классы опасности загрязняющих веществ и их вклад в загрязнение атмосферного воздуха представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Классы опасности загрязняющих веществ на территории города Усть-Каменогорск

Класс опасности	**Загрязняющие вещества**	**Доля в загрязнении воздуха, %**
1 класс (чрезвычайно опасные)	бериллий, бензапирен, свинец и др.	бериллий – 3,01
2 класс (высокоопасные)	марганец, хлор, никель, диоксид азота, сероводород, фтор и др.	фтор – 77,7; оксиды азота – 9,22
3 класс (умеренно опасные)	оксид железа, органическая пыль, сернистый ангидрид, оксид углерода и др.	сернистый ангидрид – 1,12
4 класс (малоопасные)	оксид углерода, аммиак и др.	аммиак – 5,87

Как видно из таблицы, среди загрязняющих веществ наибольшую долю составляют соединения фтора (77,7%). Кроме того, значительную долю в структуре загрязнения атмосферного воздуха занимают оксиды азота и аммиак. Данные показатели в значительной степени обусловлены деятельностью промышленных предприятий и функционированием энергетической инфраструктуры города. Подобная ситуация оказывает существенное влияние на качество атмосферного воздуха и экологическое состояние городской среды.

Основными источниками техногенного загрязнения на территории города Усть-Каменогорск являются промышленные предприятия, энергетические объекты, а также площадки хранения отходов. Пространственное распределение основных техногенных объектов, расположенных на территории города, представлено на рисунке 2.

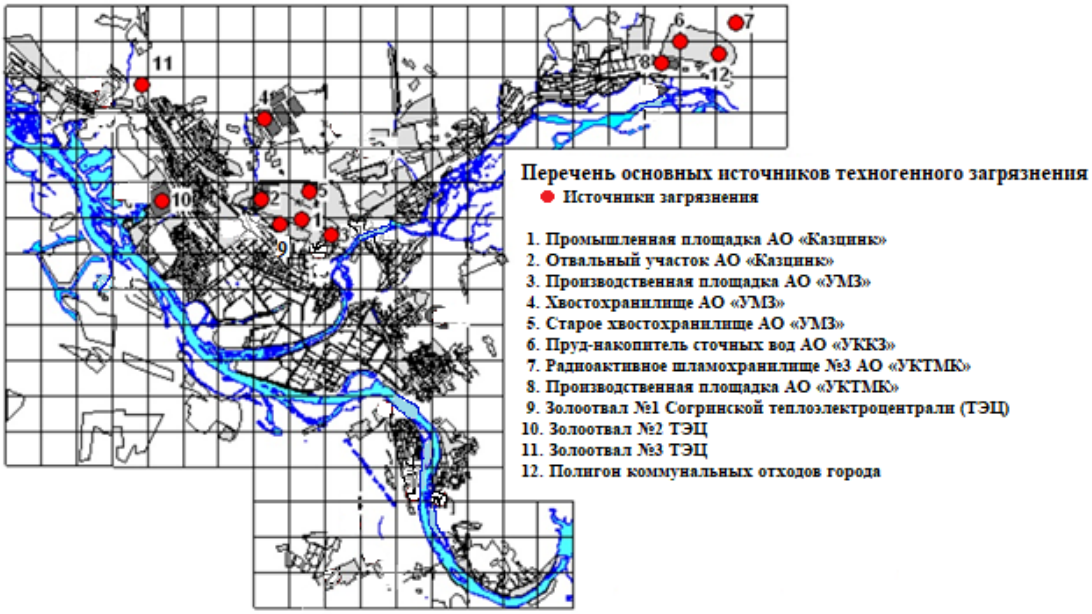


Рисунок 2 – Карта расположения источников техногенного загрязнения в городе Усть-Каменогорск

Как видно из карты, основная часть источников техногенного загрязнения сосредоточена в промышленных зонах города. Особенно высокий уровень экологической нагрузки наблюдается в районах расположения металлургических предприятий и теплоэлектроцентралей. Кроме того, в отдельных частях города размещены площадки хранения бытовых и промышленных отходов, что оказывает дополнительное антропогенное воздействие на окружающую среду.

В целом результаты проведённого исследования показали, что развитие процессов урбанизации и промышленного производства в городе Усть-Каменогорск приводит к увеличению техногенной нагрузки на окружающую среду. Основными факторами, влияющими на экологическое состояние городской среды, являются деятельность промышленных предприятий, развитие транспортной инфраструктуры и наличие площадок хранения отходов. В связи с этим важным направлением является совершенствование системы экологического мониторинга урбанизированных территорий и внедрение эффективных управленческих мер, направленных на снижение техногенного воздействия на окружающую среду [15].

Заключение. Результаты проведённого исследования показали, что техногенная нагрузка в урбанизированных территориях оказывает значительное влияние на состояние окружающей среды и устойчивость городских экосистем. На примере города Усть-Каменогорск установлено, что процессы урбанизации и развитие промышленного производства приводят к увеличению экологической нагрузки.

На основании результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. В урбанизированной территории города Усть-Каменогорск основными источниками техногенной нагрузки являются деятельность промышленных предприятий, развитие транспортной инфраструктуры, а также накопление бытовых и производственных отходов. Данные факторы оказывают существенное влияние на формирование экологического состояния городской среды.

2. Деятельность промышленных предприятий вносит основной вклад в загрязнение атмосферного воздуха. В результате металлургического производства в атмосферу поступают тяжёлые металлы и различные химические соединения, что приводит к ухудшению экологического состояния урбанизированных территорий.

3. Увеличение количества автотранспортных средств в условиях урбанизации способствует повышению уровня загрязнения атмосферного воздуха в городской среде.

Выбросы автотранспорта увеличивают содержание вредных веществ в атмосферном воздухе и оказывают негативное влияние на экологическую ситуацию.

4. Наличие площадок хранения отходов и полигонов промышленных отходов приводит к загрязнению почвенного покрова и водных ресурсов. Данный фактор оказывает негативное влияние на экологическую устойчивость урбанизированных территорий.

5. Анализ пространственного распределения техногенной нагрузки в урбанизированных территориях показал, что наиболее высокий уровень экологической нагрузки наблюдается в промышленных зонах. Это связано с особенностями пространственного размещения промышленных предприятий.

6. Для улучшения экологического состояния городской среды необходимо снижение объёмов промышленных выбросов, развитие эффективной системы управления отходами и совершенствование системы экологического мониторинга. Реализация данных мер позволит обеспечить устойчивое развитие урбанизированных территорий.

Таким образом, исследование техногенной нагрузки в урбанизированных территориях является одним из важных научных направлений, направленных на обеспечение экологической безопасности городов и формирование условий их устойчивого развития.

Литература

1. UN-Habitat. World Cities Report 2022: Envisioning the Future of Cities. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme. 2022. 418 p.
2. Angel S., Parent J. Atlas of Urban Expansion. Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy. 2016. 200 p.
3. Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D. Geographic Information Systems and Science. Hoboken: Wiley. 2015. 540 p.
4. Pacione M. Urban Geography: A Global Perspective. London: Routledge. 2009. 720 p.
5. Batty M. The New Science of Cities. Cambridge: MIT Press. 2013. 504 p.
6. Seto K., Solecki W., Griffith C. The Routledge Handbook of Urbanization and Global Environmental Change. London: Routledge. 2016. 610 p.
7. Alberti M. Advances in Urban Ecology: Integrating Humans and Ecological Processes. New York: Springer. 2008. 366 p.
8. Grimm N., Faeth S., Golubiewski N. Global change and the ecology of cities // Science. 2008. Vol. 319. P. 756–760.
9. Бюро национальной статистики Республики Казахстан. Экологическая статистика Республики Казахстан. Астана. 2023. 250 с.
10. Управление природных ресурсов и регулирования природопользования Восточно-Казахстанской области. Ежегодный отчёт о состоянии окружающей среды. Усть-Каменогорск. 2024. 180 с.
11. Ахметов К. Экология и охрана окружающей среды. Алматы: Казахский университет. 2015. 312 с.
12. Бейсенова А., Самакова А. Экологические проблемы Казахстана. Алматы: Наука. 2012. 280 с.
13. Бейсенова А.С. Физическая география Казахстана. Алматы: Казахский университет. 2014. 352 с.
14. Бекежанов А. Экологические проблемы промышленных регионов. Алматы. 2018. 210 с.
15. Zhang X., Seto K. Urbanization and environmental change: Insights from remote sensing // Environmental Research Letters. 2011. Vol. 6. P. 1–9.

УДК 556:551.324.8:551.311.21

ДИНАМИКА ПРОРЫВООПАСНОСТИ ОЗЕР КЫРГЫЗСТАНА

Мусабаев Д.Н., Ерохин С.А.
dmusabaev042@gmail.com
Институт водных проблем и гидроэнергетики НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

В статье представлены результаты анализа многолетнего мониторинга горных озер Кыргызстана, обладающих различной степенью прорывоопасности. В процессе мониторинга по данным аэровизуальных наблюдений, наземных инженерно-геологических обследований и дешифрирования аэрокосмических фотоснимков, был составлен каталог прорывоопасных озер Кыргызстана, проведена их классификация по типу и генезису плотин озер, определены критерии и категории их прорывоопасности, отражающие устойчивость их плотин и особенности водного режима. По данным наблюдений за 1966–2025 годы выделено восемь групп озер, различающихся по динамике развития и риску прорыва. Установлено, что наибольшая концентрация потенциально опасных озер приходится на Иссык-Кульскую и Чуйскую области. Анализ тенденций в изменении уровня прорывоопасности горных озер позволяет прогнозировать возможность их прорыва и разрабатывать меры по снижению селевой угрозы, обусловленной этими прорывами, что имеет важное значение для обеспечения безопасности населения и инфраструктуры горных районов Кыргызстана.

Ключевые слова: горные озера, прорывоопасность, моренно-ледниковые образования, плотины, мониторинг, каталог озер, селевая опасность, динамика озер, риск прорыва.

Введение. Кыргызстан – страна, известная своим большим количеством горных озер, число которых достигает нескольких тысяч. Существенная часть из них (около 20–30%) представляет потенциальную угрозу прорыва, что делает проблему их изучения и мониторинга крайне актуальной. Прорывы озер обуславливают формирование паводков и селевых потоков, которые угрожают жизни людей, проживающим в горных долинах, разрушают жилые дома и хозяйственные постройки, автодороги, линии электропередач, трубопроводы, размывают и заваливают обломочным материалом земледельческие угодья и пастбища. Поэтому наше изучение горных озер было направлено прежде всего на предупреждение их прорывоопасности. На первый план выступал фактор устойчивости их плотин, а главными критериями типизации озер стали генезис, состав и строение этих плотин. Именно такой подход позволил нам облегчить оценку прорывоопасности горных озер при их аэровизуальном и наземном видах обследования.

Целью представленного исследования является анализ накопленных данных о прорывоопасных озерах Кыргызстана, их классификация и оценка динамики изменения степени опасности с 1966–2025 годах. Особое внимание уделено разработке критериев категоризации озер по уровню прорывоопасности и выявлению пространственных закономерностей их распределения на территории республики.

Систематические исследования прорывоопасных озер на территории республики начались после катастрофического прорыва озера Яшилькуль 18 июня 1966 года, когда масштаб бедствия привел к постановке вопроса о необходимости регулярных обследований высокогорных озер. До этого момента исследование озер было эпизодическим, в рамках работ по изучению селевых потоков. К настоящему времени накопился значительный объем информации по условиям формирования, развития и прорыва горных озер. Появилась необходимость составления каталога прорывоопасных озер Кыргызстана. В 1998 году была заложена его основа [11]. Исследование было основано на комплексном использовании полевых, фондовых и дистанционных данных, собранных за период с 1966 по 2025 годы. Материалы включают результаты аэровизуальных и наземных инженерно-геологических

обследований, данные Государственного агентства по геологии и минеральным ресурсам Кыргызской Республики, Гидрометеорологической службы, Института водных проблем и гидроэнергетики НАН КР, а также отчеты международных исследований, выполненных совместно с учеными из России, Казахстана, Узбекистана и Чехии.

Классификация и типизация прорывоопасных озер. По устойчивости своих плотин и возможности их разрушения и прорыва горные озера разделяются на непрорывоопасные и прорывоопасные. Первых значительно больше, чем вторых. 50-60% озер имеют прочные ригельные плотины из крепких скальных пород, еще 20-30% образовались в глубоких западинах на площади развития древних морен (типа Арабельских сыртов) и также являются устойчивыми. Лишь 20-30% от общего числа озер имеют непрочные плотины, состоящие либо из моренно-ледниковых образований, либо из рыхлообломочных слабосвязанных отложений. Такие плотины могут разрушаться под действием ряда факторов. В этом случае происходят прорывы озер, которые зачастую сопровождаются катастрофическими последствиями для жителей нижерасположенных долин и равнин.

По характеру состава и строения плотин горные озера разделяются на следующие типы:

-непрорывоопасные: 1) тектонические; 2) моренные; 3) ригельные 4) карстовое 5) старичное;

-прорывоопасные: 1) ледниковые; 2) моренно-ледниковые;3) моренно-ригельные 4) моренные; 5) завальные.

В составе некоторых типов прорывоопасных озер выделяются подтипы, отличающиеся друг от друга (внутри типа) по генезису плотин, морфологии озерных ванн, по условиям питания и стока.

1. В составе ледникового типа озер выделяются: термокарстовые и подпружённые озера, озера протаивания и озера внутриледниковых емкостей.

2. В составе моренно-ледникового типа выделяются озера внутриморенных депрессий, присклоновых депрессий и термокарстовых воронок.

3. В составе завального типа выделяются озера завально-обвальные, завально-оползневые и завально-селевые.

За период планомерного изучения горных озер с 1966 по 2025 год было зафиксировано и в той или иной мере изучено 364 озера, которые оценивались как прорывоопасные. При этом изученность озер была очень разнообразной. По характеру изученности озера можно разделить на следующие группы:

1) озера, на которых проводились наземные инженерно-геологические исследования с неоднократным их повторением. Периодичность повторения зависела от активности развития озер и степени их прорывоопасности. Кроме того, такие озера включались в систему аэровизуальных режимных наблюдений, когда такие проводились;
2) озера с однократным наземным инженерно-геологическим обследованием и аэровизуальными наблюдениями;
3) озера с однократным наземным рекогносцировочным обследованием и аэровизуальными наблюдениями;
4) озера, которые исследовались только в процессе аэровизуальных наблюдений.

Таким образом, по каждому озеру, зафиксированному за период изучения озер, имеется более или менее значительная информация. Полученные данные систематизировались в каталоге прорывоопасных озер Кыргызстана, в котором каждое озеро имеет свой номер, привязанный к административной области, в которой располагалось это озеро. Так номера озер Джалалабадской области начинались с буквы Д, Иссык-Кульской области с буквы И, Нарынской – Н, Ошской и Баткенской – О, Таласской – Т, Чуйской – Ч. Обозначения озер перешли в каталог с карт аэровизуальных (с вертолета) наблюдений, на которых еще Жалалабадская область называлась Джалалабадской (поэтому в обозначении озер этой области стоит буква Д, а не Ж), а Баткенская область еще не выделилась из Ошской (поэтому

в обозначении озер Баткенской области стоит буква О, а не Б). Цифры в обозначении озер указывают место озера в каталоге и на карте аэровизуальных наблюдений.

Каждый тип и подтип прорывоопасных озер имеет свои критерии прорывоопасности. Количество критериев и методика их определения изменяется в зависимости от детальности исследования озер. Ниже приводится характеристика наиболее важных критериев прорывоопасности в соответствии с уровнем возможностей исследования горных озер в настоящее время (таблица 1).

На основе критериев прорывопасности определяется категория прорывоопасности. Для оценки степени прорывоопасности каждого озера в каталоге вводится понятие категории прорывоопасности. Первоначально прорывоопасность озер оценивалась по трем категориям (наиболее прорывоопасная – первая) (таблица 1). Однако в последние 5 лет появилась необходимость ввести еще и четвертую категорию, в которую попадают озера, уже прошедшие в своем развитии прорывоопасную стадию. Но они еще сохранили значительный объем воды и при кардинальных изменениях природных условиях (землетрясении, обвале и оползании горных склонов, селевых потоках) могут снова стать прорывоопасными. Категория прорывоопасности озера может изменяться в процессе его развития, а также при изменении природных условий.

Таблица 1 – Критерии категорий прорывоопасности озер различных типов и подтипов

Тип озера	Подтип озера	Категория опасности	Критерии прорывоопасности
Ледниковый	Термокарстовый и подпруживания	1	Внутриледниковый канал стока; очаг выклинивания воды в его устье; просадки ледника вдоль канала стока; увеличение объема озера в десятки и сотни раз в период таяния ледника, прорывы озера в прошлом.
		2	Внутриледниковый канал стока; увеличение объема озера в несколько раз; прорывы озера в прошлом.
		3, 4	Внутриледниковый канал стока.
	Внутриледниковый	1	Мощный ледопад в нижней (концевой) части ледника; прорывы в прошлом; резкие изменения в режиме стока с ледника.
		2	Ледопад в нижней (концевой) части ледника; резкие изменения в режиме стока с ледника.
		3,4	Ледопад в нижней (концевой) части ледника.
Моренно-ледниковый	Внутриморенных и присклоновых депрессий	1	Подземный сток; просадки на теле плотины и вдоль ложбины подземного стока; амплитуда колебания уровня озера до нескольких метров; ледник спадает в озеро уступом; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины; очаг выклинивания в вершине оврага.
		2	Подземный сток; просадки плотины вдоль ложбины подземного стока; амплитуда колебания уровня озера до нескольких метров; эрозионные промоины на внешнем склоне плотины; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины.

		3	Подземный сток; просадки вдоль ложбины подземного канала стока; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины.
		4	Подземный сток.
	Термокарстовые	1	Подземный сток; сформирован канал подземного стока, вдоль которого проседает поверхность плотины; эрозионный овраг в устье подземного канала стока; очаг выклинивания в вершине оврага.
		2	Подземный сток; сформирован канал подземного стока, вдоль которого проседает поверхность плотины; эрозионный овраг в устье подземного канала стока; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины.
		3,4	Подземный сток.
Моренно-ригельный		1	Подземный сток; просадки на теле плотины и вдоль ложбины подземного стока; амплитуда колебания уровня озера до нескольких метров; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины; очаг выклинивания воды в вершине оврага; ледник спадает в озеро уступом; высокая вероятность подъема уровня озера выше скального порога ригеля.
		2	Подземный сток; просадки плотины вдоль ложбины подземного стока; амплитуда колебания уровня озера до нескольких метров, эрозионные промоины на внешнем склоне плотины; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины; высокая вероятность подъема уровня озера выше скального порога ригеля.
		3	Подземный сток; эрозионные промоины на внешнем склоне плотины; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины; малая вероятность подъема уровня озера выше скального порога ригеля.
		4	Подземный сток; малая вероятность подъема уровня озера выше скального порога ригеля.
Моренный		1	Подземный сток; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины; очаг выклинивания подземного канала стока в вершине оврага.
		2	Подземный сток; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины
		3,4	Подземный сток.
	Обвальный	1	Подземный сток; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины; очаг выклинивания подземного канала стока в вершине оврага; выклинивание воды у

Завальный			подножия внешнего склона плотины, возможность переполнения озера.
		2	Подземный сток; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины, возможность переполнения озера.
		3	Подземный сток; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины, возможность переполнения озера.
		4	Подземный сток, возможность переполнения озера.
	Селевой	1	Отсутствие стока; резкий подъем уровня воды в озере и его переполнение.
		2	Подземный сток; объем от первых десятков до нескольких сотен тысяч куб. метров, высокая вероятность переполнения озера.
		3,4	Подземный сток; объем в несколько десятков тысяч куб. метров, малая вероятность переполнения озера.
	Оползневой	1	Отсутствие стока; резкий подъем уровня воды в озере и его переполнение.
		2	Подземный сток; объем в несколько десятков тысяч куб. метров; высокая вероятность переполнения озера.
		3,4	Подземный сток, объем в несколько десятков тысяч куб. метров; малая вероятность переполнения озера.

Из нескольких тысяч горных озер Кыргызстана в настоящее время (2025 год) выделено 373 озера, которые в разные периоды своего развития были отнесены к прорывоопасным и занесены в каталог прорывоопасных озер Кыргызстана. По территории республики они расположены следующим образом: в Джалал-Абадской области – 26 озер; в Иссык-Кульской области – 170 озер; Нарынской области - 18 озер; в Ошской и Баткенской областях - 65 озер; Таласской области – 21 озеро; в Чуйской области – 73 озера.

В каталоге систематизируется информация по изучению прорывоопасных озер. Анализ этой информации позволяет проследить изменения в их развитии, выявить тенденции в процессе развития и спрогнозировать возможность их прорывов в будущем. Одним из вариантов такого анализа стал мониторинг изменений в степени прорывоопасности озер I и II категорий. Результаты этого анализа за 2006–2025 годы показал, что примерно 111 озер в северной части Кыргызстана в разные годы относились к I или II категории опасности. Из них 32 озера уже прорывались, частично или полностью опорожняясь (таблица 2).

Таблица 2 – Распределение по областям прорвавшихся озер, с полным или частичным опорожнением

Область	Количество прорванных озер с полным опорожнением	Количество прорванных озер с частичным опорожнением
Чуйская	8	7

Иссык-Кульская	7	5
Таласская	2	
Нарынская	1	2
Всего	18	14

Группировка озер по характеру развития. Анализ многолетних наблюдений позволил объединить прорывоопасные озера Кыргызстана в **восемь групп** по динамике их изменения и степени устойчивости их плотин. Каждая группа отражает определённый этап или тенденцию в развитии озера — от активных катастрофических прорывов до устойчивого состояния.

1 группа — озера *полного или частичного опорожнения, ежегодно или один раз в 3-5 лет: М*ерцбахера (И-100*), Бузулгансу (Н-14). Всего 2 озера. Озеро Мерцбахера было прорывоопасным* в течении 10 лет наблюдений. Оно сохранит высокую степень прорывоопасности в будущем, по крайней мере еще 10 лет, пока не разработается устойчивый внутриледниковый канал стока в нижней части ледника Южный Иныльчек.

2 группа — *после частичного опорожнения степень прорывоопасности озера остается высокой или очень высокой в последние 3-5 лет, и в случае наполнения оценивается 1-ой категорией прорывоопасности:* Четенды-джеруйское (И-81), Атджаляу (Ч-13), Аксай (Ч-40), Кельукок – верхнее (Н-20*). Всего 4 озера.*

3 группа — *после опорожнения полного или частичного в последние 3-5 лет прорывоопасность озера уменьшается до 3-ей категории. Всего 13 озер. Развитие этой группы* проходит по двум сценариям:

- **3.1.** повышение опасности при активном наполнении из-за **подземного стока** (нарастающая группа): Кольтор-тонское (И-35), Атджайлоо-шамсинское-восточное (Ч-61-б), Зындан-западное (И-167), *Такыртор (Ч-55), Джалпактор-2 (Т-2),* Коморчек-южный (Ч-65);
- **3.2.** постепенная стабилизация и переход к спокойному режиму с помощью **поверхностного стока** (затухающая группа): Бозтери (И-5), Джеламыщ-1 (Ч-6), Суюктор (И-10), Курумды-тонское-западное (И-34*), Терстор-центральное (Н-5), Джалпактор-1 (Т-3), Тезтор (Ч-8)*.

4 группа — озера, перешедшие в устойчивое состояние в последние 3-5 лет 4-ой категории после полного или частичного прорыва: Туюктор-3 (И-33), Чоктал-2 (И-2), Талды (И-77), Туюкжар-западное (Ч-62), Минжилки (Ч-41), Кульджатор (Ч-37*), Кокджарсу (Ч-15),* Кутургансу (Ч-42), Джеламыш-5 (Ч-18), Джеламыш-7 (Ч-38), Челектор (Ч-53*). Всего 11 озер.*

5 группа — озера без прорыва, в течении последних 3-5 и более лет сохраняют признаки устойчиво непрорывоопасного развития, 4-ой категории прорывоопасности: Четкойсу (И-12), Саватор (И-29), Туюктор-2 (И-9), Тамга (И-6) (рис.10), Бозтери (И-5), Сарытор (И-80), Керегеташ-1(И-45), Керегеташ-2 (И-46). *Всего 8 озер.*

6 группа — озера без прорыва, в течении последних 3-5 и более лет сохраняющие признаки невысокой степени прорывоопасности 3 категории. По тенденциям в развитии прорывоопасности в будущем озера 6-ой группы разделяются на 5 подгрупп, где развитие зависит от характера притока, стока и наличие скального ригеля.

- 6.1 — неограниченный приток и подземный сток (опасность растет): Джелеме (Ч-26), Туюк-Шамсинское (Ч-60), Уюктор (И-81), Ирису (Ч-82), Экичат (И-178), Кокайрык (Ч-24), Джиндысу (Ч-21). Всего 7 озер.
- 6.2 — ограниченный приток и подземный сток (медленный рост опасности): Ачикташ (Ч-31), Кашкасу (Н-13), Курчатор (Бешташ) (Ч-29), Кичи-Кызылсу (И-30), Курумды-тонское-восточное (И-174), Курумды-конурленгское-восточное (И-170), Джуукучак (И-177), Чакмак (Т-17), Саватор (Т-19), Саманкель (Н-4), Каракунгей (Н-19), Тюз (И-87). Всего 12 озер.

- 6.3 — неограниченный приток и поверхностный сток (опасность снижается): Чонкаинды-верхнее (Ч-2), Чонкойсу (И-13) (рис.15), Чон-Аксу-1 (И-15), Чон-Аксу-2 (И-16), Интор-1(И-21), Интор-2 (И-22), Телеты (И-26), Айлама (И-27), Карабаткак (И-28), Керегеташ-северный (И-31), Кичи-Кызылсу-1 (И-52), Кичи-Кызылсу-2 (И-53), Арасан-верхнее (И-82), Тогузбулак (И-173), Балачичкан (Т-4), Шекафтар (Т-8), Агнайтор (Т-9), Бешкель (Т-10), Корумтор-восточный (Т-11), Корумтор (Т-12), Аккель (Н-2). Всего 21 озеро.
- 6.4 — ограниченный приток и поверхностный сток (опасность снижается резко): Анырты (Н-7), Курумды (Ч-83), Турасу-верхнее (И-78). Всего 3 озера.
- 6.5 — наличие ригеля из скальных пород в основании платины (опасность минимальна): Чолпоната-западное (И-14), Чолпоната-левое (И-3), Чолпоната-правое (И-4), Чонкаинды-верхнее (Ч-2), Кейдыкучкач (Ч-4), Терстор-восточное (Н-3). Всего 6 озер.

7 группа — озера пока еще без прорыва, в течении последних 5-10 лет сохраняющие признаки высокой степени прорывоопасности 1 и 2 категории: Петрова (И-76), Джарды-Каинды (Ч-1), Чирканак (Т-1), Керегеташ-южный (И-32), Туюкжар-восточное (Ч-63), Текe-Тор (Ч-12), Чонтор-3 (Ч-5), Адыгене-приледниковое (Ч-9-п), Кашкасу (Ч-11), Атджайлоо-шамсинское-западное (Ч-61-а), Кольтор (Ч-101), Чоктал-1 (И-1), Четенды-тоссорское (И-7), Джеруй-1 (И-36), Джеруй – 2 (И-37), Сарычат (И-84), Актерек-восточный (И-115), Зынданцентральное (И-166). *Всего* 18 озер.

8 группа — озера пока без прорыва, но достигшие в своем развитии прорывоопасной стадии в последние 1-3 года: Туюктор (Ч-66), Чонкойсу-восточное-нижнее (И-131), Курумды-восточное (И-172), Каратеке (И-168), Кольтор-тонское-западное (И-175), Каракунгей-верхнее-приледниковое (Н-21), Каракум-верхнее (Н-6), Каракум-приледниковое (Н-18). *Всего* 8 озер.

Выводы. Разделение прорывоопасных озер по динамике их изменения и степени устойчивости их плотин отражает современное состояние их прорывоопасности и позволяет прогнозировать их дальнейшее развитие. Наибольший риск представляют озера 1-й, 2-й, 7-й и 8-й групп, для которых необходимы постоянные наблюдения и мероприятия по предупреждению возможных прорывов.

Литература

1. Айрапетьянц С.Э., Баков Е.К. Морфология ледникового озера Мерцбахера и механизм его катастрофических прорывов // Некоторые закономерности оледенения Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим. 1971. С. 75–84.
2. Глазырин Г.Е., Рейзвих В.Н. К расчёту гидрографа стока при прорыве завальных озёр // Труды САНИГМИ. Вып. 32 (47). Ташкент. 1968. С. 8–12.
3. Ерохин С.А. Гляциальные озёра как гидроэкологические объекты и факторы их прорывоопасности // Вода и устойчивое развитие Центральной Азии. Бишкек: Фонд «Сорос-Кыргызстан». 2001. С. 93–98.
4. Ерохин С.А. Прорывоопасность озера Петрова // Изучение гидродинамики озера Иссык-Куль с использованием изотопных методов. Бишкек: Илим. 2006. С. 132–140.
5. Ерохин С.А. Мониторинг горных озёр Кыргызстана // Снижение риска природных катастроф в горах: Материалы конференции. Бишкек: Salam. 2009. С. 34–40.
6. Ерохин С.А. Оценка возможного расхода прорывного потока при прорыве озера Петрова // Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. Изд. 7-е, с изм. и доп. Бишкек: МЧС КР. 2010. С. 632–648.
7. Ерохин С.А. Оценка устойчивости плотины озера Петрова // Природные ресурсы. 2010. № 1. С. 28–39.
8. Ерохин С.А. Оценка прорывоопасности горных озёр Кыргызстана в 2011 году // Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. Изд. 8-е, с изм. и доп. Бишкек: МЧС КР. 2011. С. 604–606.
9. Ерохин С.А., Загинаев В.В. Станция Адыгене // Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. Изд. 8-е, с изм. и доп. Бишкек: МЧС КР. 2011. С. 607–614.

10. Ерохин С.А., Черны М. Типы морено-ледниковых комплексов как критерии регрессии горно-долинного оледенения Тянь-Шаня // Изменение климата и риски стихийных бедствий в горных районах: Материалы конференции. Душанбе: Контраст. 2011. С. 65–66.
11. Ерохин С.А. Риск прорыва озера Петрова // Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. Изд. 9-е, с изм. и доп. Бишкек: МЧС КР. 2012. С. 622–627.
12. Керемкулов В.А. Морфометрические характеристики и классификация моренных озёр // Селевые потоки. Сб. 9. М.: Гидрометеоиздат. 1985. С. 36–47.
13. Керемкулов В.А., Цукерман И.Г. Модель опорожнения моренного озера через грот // М.: Гидрометеоиздат. 1985. С. 59–70.
14. Кубрушко С.С., Стависский Я.С. Гляциальные озёра в Киргизии и их роль в формировании селей // МГИ. Хроника. Обсуждения. Вып. 32. М. 1978. С. 59–62.
15. Малицкий Н.Г. Справка о некоторых прорывах временных горных озёр в Средней Азии и соседних странах // Известия Среднеазиатского отделения Русского геогр. о-ва. 1929. Т. 19. С. 21–23.
16. Мониторинг, прогноз и подготовка к реагированию на возможные активизации опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики и приграничных районов с государствами Центральной Азии. Бишкек: Текник. 2006. 618 с.
17. Молчанов Л.А. Озёра Средней Азии. Ташкент: Средне-Азиатский гос. университет. 1929. 83 с.
18. Никитин А.М. Морфометрия и морфология озёр Средней Азии // Труды САРНИГМИ. 1977. Вып. 50. С. 4–21.
19. Озёра Тянь-Шаня / Отв. ред. А.В. Шнитников. Л. 1980. 232 с.
20. Пушкаренко В.П., Никитин А.М. Опыт регионального исследования состояния плотин горных озёр Средней Азии и характер формирования прорывных селей // Оползни и сели. Т. 2. М.: Центр междунар. проектов ГКНТ. 1984. С. 17–32.
21. Порядок определения зон паводкового и селевого поражения при прорывах горных озёр на территории Кыргызской Республики. СП КР 22_102: 2001. Бишкек. 2001. 17 с.
22. Рейзвих В.Н., Никитин А.М. К вопросу о географическом распространении и типизации озёр Средней Азии // Сборник работ ТГМО. Вып. 3. Ташкент. 1968.
23. Стависский Я.С., Шатравин В.И. Происхождение и строение гляциальных озёр Киргизии и механизм их прорыва // Селевые потоки. Сб. 8. М.: Гидрометеоиздат. 1984. С. 77–83.
24. Шнитников А.В. Из истории озёр внутреннего Тянь-Шаня // Озёра Казахстана и Киргизии и их история. Л.: Наука. 1975. С. 229–238.

УДК 551.24.035

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ СЕЙСМООПАСНЫХ ЗОН РАЗЛОМОВ НА ПРИМЕРЕ ГОРНОГО КРЫМА

Мягков Д.С.
dsm@ifz.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

В работе представлены результаты численного геодинамического моделирования напряжённо-деформированного состояния коры Горного Крыма, возникающее под действием региональных тектонических сил. В модель вводятся наиболее значимые крупные разломы, в результате расчёта были получены аномалии напряжённого состояния, связанные с формой, концевыми участками и взаимовлиянием разломов. В работе производится варьирование направления региональных сил и их амплитуды. Результаты моделирования сравниваются с особенностями тектонофизических реконструкций напряжённого состояния. Показано, что при северо-западной ориентации наибольшего сжатия тектонического стресса, имеющей место для Горного Крыма, выделяется ряд потенциально сейсмически опасных зон вдоль побережья Крымского полуострова.

Ключевые слова: численное моделирование, геодинамика, тектоника Крыма, напряжённое состояние.

Введение. В текущей работе представлена математическая модель формирования напряжённо-деформированного состояния земной коры Крымского региона за счёт воздействия регионального субмеридионального горизонтального сжатия. Данный регион, является сейсмоактивным, при этом для него получена тектонофизическая реконструкция напряжённого состояния, что придаёт задаче геодинамического моделирования особую актуальность, позволяя верифицировать полученные результаты и уточнить строение НДС, а также определить геодинамический источник нагружения коры. В работе рассматривается нагружение за счёт воздействия регионального тектонического субмеридионального горизонтального сжатия, рассматриваются «классические» варианты ориентации оси максимального горизонтального сжатия – северо-западная и северо-восточная (и промежуточный вариант с меридиональной ориентацией).

Методика и результаты моделирования. Для численного расчёта применялась явная конечно-разностная схема, разработанная Уилкинсом для исследования упруго-пластических тел [1] и усовершенствованная Стефановым [2] для применения в геомеханике. Тела модели рассматриваются как упругопластические. В отличие от классического подхода Уилкинса, в данном подходе берётся более сложная и подходящая для геосреды модифицированная модель Друккера-Прагера-Николаевского [3]. Модели на рисунке 1 состоят из идентичных ячеек размером 100х100 м, общее количество ячеек составляет ~4 млн. Тела модели рассматривались как упрочняющиеся упруго-пластичные с законом пластического течения Друкера-Прагера-Николаевского для коры и Мизеса для мантии [3]. Для коровой части введен параметр «коэффициент дилатансии», равный 0,3 [3]. В алгоритм вводятся искусственные вязкости, которые подбираются индивидуально для каждой задачи таким образом, чтобы по истечении эффективного промежутка времени упругие волны, вызванные воздействием, затухли. Таким образом моделируется квазистатичные процессы. Более подробно методика моделирования и процесс создания цифровой сейсмоплотностной и геомеханической модели по данной методике описан в работе [4].

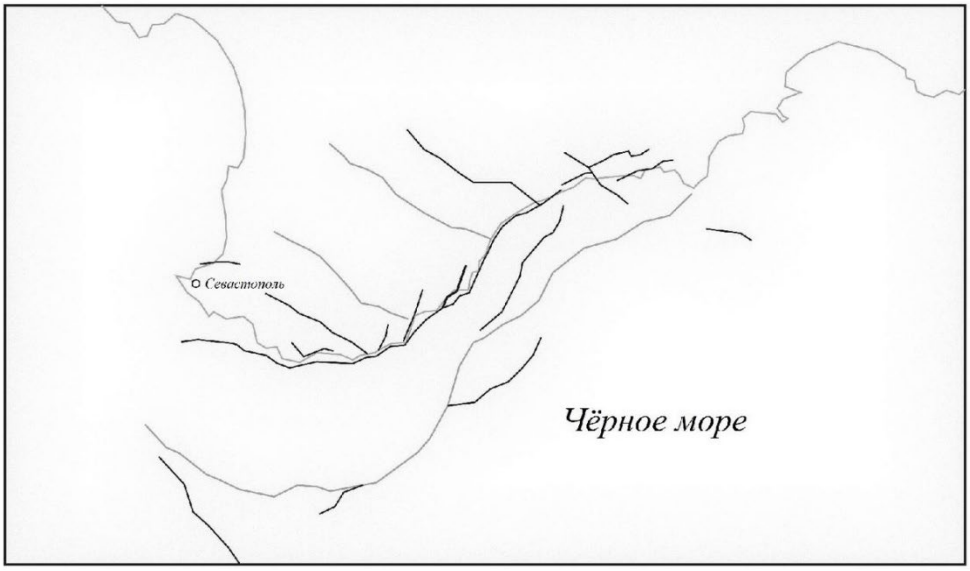


Рисунок 1 – Область моделирования и представленные в модели разломы

Этапы моделирования в целом совпадают с таковыми для модели, представленной в работах [4, 5]. Изначально задаётся гравитационная нагрузка, далее происходит снижение когезии в разломных зона от 25 МПа до 1-3 МПа. Параметры модели и начальные условия соответствуют таковым для задачи в плане. Параметры модели: $\rho = 2.7$ г/см^3, vp = 6.7 км/с, $\nu = 0.25$, $\alpha = 0.05$, Y = 0.25 кбар, V_dil = 0.00. Так как тип напряжённого состояния – плоская деформация, то уровень по глубине можно задать в виде вертикальной компоненты нормального напряжения. Примем: H = 5 км, σ = -1.31666 кбар σzz = -1.35 кбар σh = -1.23 кбар. Девиатор вертикальных напряжений dzz = 0.08 кбар. Для глубины 10 км: H = 10 км, σ = -2.54 кбар σzz = -2.7 кбар σh = -2.46 кбар. При этом девиатор вертикальных напряжений dzz будет равен 0.16 кбар.

Основная нагрузка будет задана в виде значения σyy и σxy. Последнее значение будет определять ориентацию σH, при σxy = 0 сжатие будет субмеридионально. Положим H = 5 км. Далее будет представлено 3 модели, с СЗ, С и СВ ориентацией максимального горизонтального сжатия. Положим σyy = 137 МПа. В модели с СЗ сжатием зададим σxy = 7 МПа. В модели с С сжатием σxy = 0 МПа и в модели с СВ сжатием зададим σxy = -5 МПа. Во всех 3 случаях величина σyy превышает σzz, поэтому региональный тип напряжённого состояния – горизонтальное сжатие. Основные аномалии напряжённого состояния формируют разломы. Геометрия представленных в модели разломов дана на рисунке 1.

Для меридионального сжатия полученное поле давления дано на рисунке 2. Представлен общий вид поля давления для модели, можно выделить следующие закономерности: при субмеридиональном сжатии наиболее существенные подвижки реализуются по разломам северо-западного и северо-восточного простирания. Концентратор напряжений, в соответствии с представлениями механики, находится на концевых участках разломов, а также на контрастных изгибах разломов. Можно выделить области с амплитудными аномалиями близ побережья Крыма в районе городов Ялты и Алушты, где концевые аномалии близлежащих крупных разломов накладываются на аномалии от крупных разломов северо-восточного простирания, параллельных побережью. В частности, особо контрастная аномалия в виде зоны повышенного давления формируется в районе Ялтинского залива.

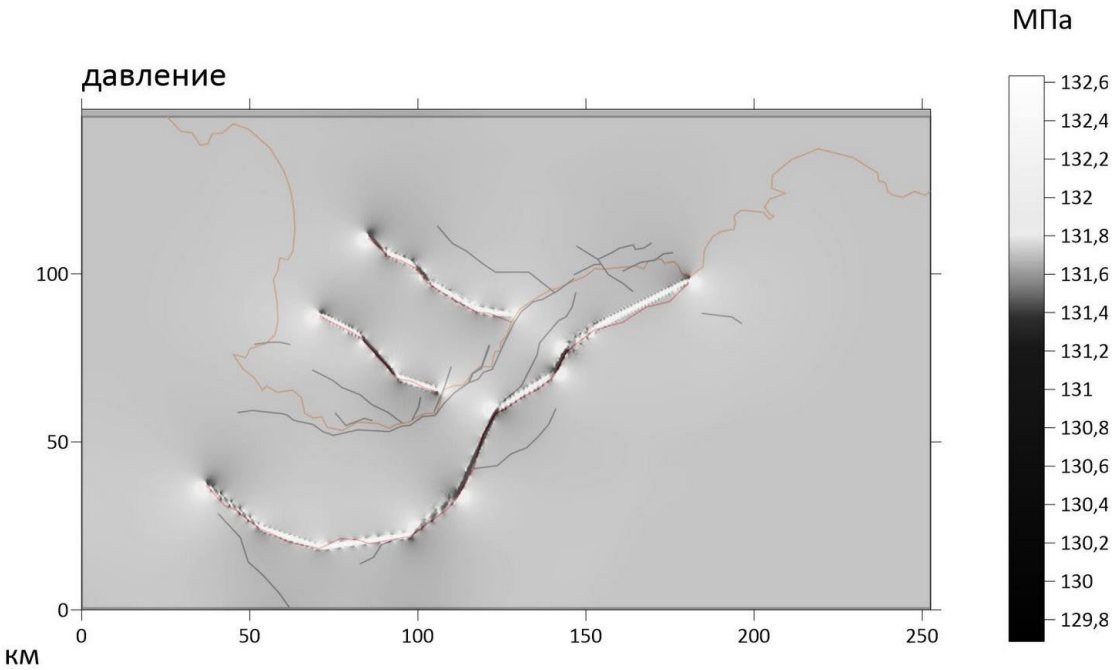


Рисунок 2 – Результаты моделирования: напряжённое состояние (давление) для глубины 5 км. Модель меридионального сжатия

Выводы. Полученные результаты моделирования позволили сопоставить сейсмически опасные области коры, выделенные по данным тектонофизических реконструкций, с аномалиями напряжённо-деформированного состояния. Особо контрастная аномалия в виде зоны повышенного давления формируется в районе Ялтинского залива и близ г. Алушты.

Исследование выполнено в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Уилкинс М.Л. Расчёт упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир. 1967. С. 212-263.
2. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 3. С. 129–142.
3. Николаевский В.Н. Механика геоматериалов и землетрясения // Итоги науки и техники Сер.: Механика деформируемого твердого тела. Т. 15. М.: ВИНИТИ. 1983. С. 817-821.
4. Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В., Мягков Д.С., Ермаков В.А. О генезисе напряжений в коре островной дуги по результатам численного моделирования // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 3. С. 54-73.
5. Мягков Д.С. Изучение особенностей напряжённого состояния коры в области внедрения крупных интрузий методом численного моделирования // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2025. 22. С. 394–402.

УДК 551.24.035

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТРУЗИЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ПРИЛОЖЕНИИ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕКТОНОФИЗИКИ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА

Мягков Д.С.
dsm@ifz.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

В исследовании представлены результаты численного моделирования влияния формирования интрузий различных типов на напряжённо-деформированное состояние земной коры. Рассматриваются интрузии типа даек, лакколитов, транскоровых интрузий и магматических поясов. Показано влияние условий формирования, геометрии и размеров интрузии на генерируемое ею поле напряжений, рассмотрены особенности этого поля, включая зоны концентрации напряжений. Рассчитанный уровень напряжений может достигать десятков и сотен МПа, в зависимости от параметров модели. Представлена модель формирования магматогенных напряжений коры Центрально-Азиатского складчатого пояса, которая имеет выраженную корреляцию с тектонофизическими реконструкциями напряжённого состояния региона.

Ключевые слова: численное моделирование, геодинамика, магматизм, напряжённое состояние.

Введение. В работе представлены численные геодинамические модели нагружения Земной коры при формировании интрузивных тел различной геометрии. Показан механизм возникновения аномального нагружения земной коры при проникновении и формировании интрузий, показаны разнообразные модели для протяжённых интрузий типа дайки и изометричных (лакколит, шток, вторичный очаг). Основной целью исследования является моделирование влияния крупных магматических тел, включая транскоровые интрузии и магматические пояса в целом. Показана зона влияния интрузии на тип напряжённого состояния коры, находящейся изначально в литостатическом напряжённом состоянии. Рассматривается вопрос о происхождении аномальных напряжений горизонтального сжатия Кольского региона, создана численная модель нагружения коры при формировании Хибинского и Ловозёрского интрузивов. Представлена математическая модель формирования напряжённо-деформированного состояния земной коры Центрально-Азиатского складчатого пояса за счёт внедрения интрузий магматических поясов позднего палеозоя-раннего мезозоя. В численной модели представлены магматические пояса девон-юрского возраста, формирование которых связано с действием Алтайской, Селенгинской и Южно-Монгольской вулканических дуг.

Методика моделирования и параметры моделей. Для численного расчёта применялась явная конечно-разностная схема, разработанная Уилкинсом для исследования упруго-пластических тел [1] и усовершенствованная Стефановым [2] для применения в геомеханике. Тела модели рассматриваются как упругопластические. В отличие от классического подхода Уилкинса, в данном подходе берётся более сложная и подходящая для геосреды модифицированная модель Друккера-Прагера-Николаевского [3]. Модели на рисунке 1 состоят из идентичных ячеек размером 500х500 м, общее количество ячеек составляет 300000 - 600000. Тела модели рассматривались как упрочняющиеся упруго-пластичные с законом пластического течения Друкера-Прагера-Николаевского для коры и Мизеса для мантии [3]. Для коровой части, помимо стандартных геомеханических параметров, введен параметр «коэффициент дилатансии», равный 0,3 [3]. В алгоритм вводятся

искусственные вязкости, которые подбираются индивидуально для каждой задачи таким образом, чтобы по истечении эффективного промежутка времени упругие волны, вызванные воздействием, затухли. Таким образом моделируются квазистатичные процессы. Более подробно методика моделирования и процесс создания цифровой сейсмоплотностной и геомеханической модели по данной методике описаны в работе [4].

В исследовании представлены 2 базовые модели – дайка и изометричная интрузия. Схема модели с дайкой представлена на рисунке 1. Рассматривается модель крупной одиночной интрузии с геометрией типа дайки (интрузия по магмопроводящему разлому). Целью исследования является изучение уровня аномальных напряжений в области формирования интрузивного тела, в первую очередь – дополнительного горизонтального сжатия, создаваемого боковыми поверхностями дайки. Задача считается в двумерной постановке, модель строится в плане (см. рисунок 1). При этом тип напряжённого состояния – плоская деформация.

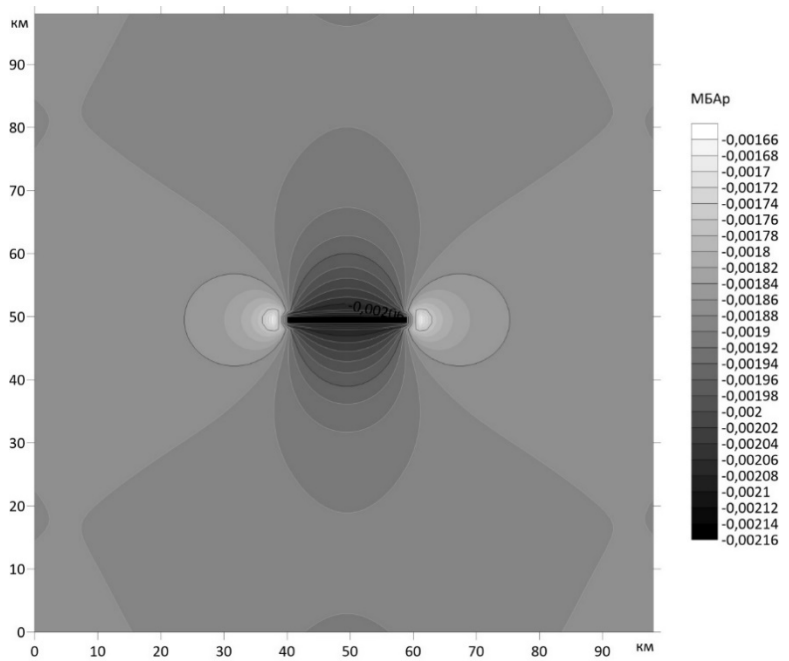


Рисунок 1 – Поле давления в модели с дайкой (глубина 5 км).

Начальные напряжения подобраны для усреднённой континентальной коры и глубины 5 км при высоком уровне давления в очаге (110% от литостатики). Результаты моделирования (для первого инварианта тензора напряжений) представлены на рисунке 1. Можно видеть, что произошла генерация весьма высокого для глубины 5 км уровня касательных напряжений, более 16 МПа близ концевых участков дайки. Зона же активного влияния дайки с уровнем касательных напряжений 8-10 МПа (при фоновом уровне около 6 МПа) простирается на 25 км от плоскости дайки и достигает краёв модели. Более подробно задача о нагружении коры при формировании крупной дайки представлена в статье [5].

Вторая модель, представленная в работе, – модель нагружения земной коры при формировании изометричной интрузии (лакколит, шток, вторичный очаг). Данная модель с изометричной интрузией рассматривается в приложении к проблеме формирования напряжённо-деформированного состояния Хибинского массива. Она сходна с предыдущей и имеет такие же этапы нагрузки, однако область плавления в модели ограничена эллипсом с большой осью, равной 40 км, что соответствует размеру Хибинского массива в широтном направлении. При формировании изометричной интрузии такого размера зона влияния составляет 60-80 км, где уровень аномальных напряжений заметен на фоне литостатики. При давлении магмы 147 МПа (что соответствует глубине очага 40 км при условии, что давление в очаге определяется литостатикой) повышенный уровень давления в 130 МПа наблюдается

даже близ краёв модели на расстоянии 80 км от интрузии (и 100 км от центра интрузии). В самой интрузии касательные напряжения считаются равными нулю, т.к. на последнем этапе расчёта её ячейки находятся в расплавленном состоянии (процесс последующего остывания в данной работе не рассматривается). Касательные напряжения на расстоянии до 20 км от края интрузии находятся в диапазоне 14-17 МПа.

В данной работе также рассматривается проблема генезиса напряжений Центрально-Азиатского складчатого пояса, в первую очередь Алтае-Саянского орогена и сопредельных межгорных впадин, а также примыкающей части Сибирского кратона. В качестве источника нагружения коры рассматриваются магматические пояса девон-юрского возраста: магматический пояс Алтайской дуги (девон – ранний карбон, 381-290 млн. л.), Южно-Монгольской дуги (карбон-триас, 320-203 млн.л.) и Селенгинской дуги (пермь-триас, 295-135 млн.л.). Существование данных дуг связано с субдукцией, происходящей в закрывающемся Палеоазиатском океане и Монголо-Охотском бассейне.

Уровень напряжений близ интрузий связан как с давлением магмы в интрузиях, так с геометрией и взаимным расположением поясов. Так, к северу от западной части Алтайского пояса, наблюдается несколько пониженный уровень напряжений из-за положительной кривизны этого участка (1.38 кбар на 5 км, 2.67 бар на 10 км и 3.98 кбар на 15 км, тогда как к северу от южной части за счёт отрицательной кривизны происходит концентрация напряжений и уровень давления близ интрузии 1.47, 2.84 и 4.3 кбар соответственно). Аналогично для Южно-Монгольской дуги : к югу напряжения понижены и имеют уровень, сходный с полученным для западной части АП, тогда как к северу напряжения концентрируются, достигая, правда, меньших значений (давление – 1.43, 2.75 и 4.05 кбар). Таким образом, при сравнении с тектонофизической реконструкцией, наблюдается достаточно высокая степень корреляции между особенностями поля напряжений модели и результатами, полученными из природных данных. Для орогенов Алтае-Саяна полученное поле напряжений имеет тип «сжатие со сдвигом», тогда как для котловин получено преимущественно сдвиговое поле напряжений или поле растяжения. Общий уровень напряжений (первые десятые кбар) также соответствует данным о сброшенных напряжениях.

Выводы. Для рассмотренных интрузий различных типов показана геометрия зон генерации аномальных напряжений при формировании крупных даек различной длины при вариации уровня давления магмы. Показано, что наиболее обширная зона в области нагружения имеет геодинамический тип «горизонтальный сдвиг». Результаты моделирования показали, что даже единичная интрузия длиной в первые десятки км способна перестроить напряжённое состояние коры на большом от неё удалении. При этом напряжённое состояние в области нагружения может иметь геодинамический тип как горизонтальное сжатие, так и горизонтальный сдвиг, и растяжения, в зависимости от удаления и ориентации интрузии. Таким образом, магматический фактор формирования надлитостатических напряжений должен рассматриваться в качестве одного из основных наряду с тектоническим при создании геодинамических региональных моделей.

Уровень аномальных напряжений для коры Центрально-Азиатского складчатого пояса (первые десятые кбар) сопоставим с общим уровнем напряжений коры внутриконтинентальных орогенов, что означает, что формирование транскоровых интрузий может являться основным механизмом генерации тектонических напряжений Центрально-Азиатского складчатого пояса и южной части Сибирского кратона. Зоны растяжения по данным моделирования оказались приурочены преимущественно к межгорным впадинам, что является дополнительным аргументом в пользу ведущей роли магматического фактора в процессе генерации напряжений ЦАСП.

Исследование выполнено в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Уилкинс М.Л. Расчёт упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир. 1967. С. 212-263.

2. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 3. С. 129–142.
3. Николаевский В.Н. Механика геоматериалов и землетрясения // Итоги науки и техники. Сер.: Механика деформируемого твердого тела. Т. 15. М.: ВИНИТИ. 1983. С. 817-821.
4. Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В., Мягков Д.С., Ермаков В.А. О генезисе напряжений в коре островной дуги по результатам численного моделирования // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 3. С. 54-73.
5. Мягков Д.С. Изучение особенностей напряжённого состояния коры в области внедрения крупных интрузий методом численного моделирования // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2025. 22. С. 394–402.

МЕХАНИКА И МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 336.748.3

ANALYSIS OF EXCHANGE RATE OSCILLATIONS: USD/KGS AND USD/RUB VIA FIRST-ORDER DIFFERENCE EQUATIONS

Shakiraliev E.S.
shakiraliev_e@auca.kg
American University of Central Asia, Bishkek, Kyrgyzstan

This paper applies the framework of first-order difference equations to analyze oscillatory behavior in two currency pairs: USD/KGS and USD/RUB. Using one year of daily closing prices (March 2025 - March 2026) from Investing.com, the observed exchange rate is decomposed into a 30-day rolling trend and a deviation series. The deviations are modeled as a first-order autoregressive process, and the autoregressive coefficient is estimated by the least squares method. For USD/KGS the estimated coefficient equals 0.8513, yielding a shock half-life of approximately 4.3 days, while for USD/RUB the coefficient equals 0.9212, corresponding to a half-life of approximately 8.4 days. Both systems are classified as monotonically convergent without internal oscillations; however, the ruble exhibits substantially higher persistence and chronic exposure to external shocks, while the som demonstrates strong mean-reversion and only episodic volatility. The results confirm that first-order difference equations are an effective tool for separating structural dynamics from stochastic noise in exchange-rate time series.

Keywords: difference equations, exchange rate, oscillations, USD/KGS, USD/RUB, autoregressive model, mean reversion.

Introduction. Exchange rates are among the most closely monitored economic indicators, reflecting macroeconomic fundamentals, monetary policy, and market sentiment. Mathematical modeling of exchange-rate dynamics is important both for academic research and practical risk management. First-order difference equations provide a rigorous yet tractable framework for characterizing oscillatory behavior and mean-reversion in discrete time series [1, 2]. This paper applies that framework to the USD/KGS (US Dollar / Kyrgyz Som) and USD/RUB (US Dollar / Russian Ruble) pairs over the period March 2025 - March 2026, with the goal of quantifying the persistence of shocks and identifying the source of observed fluctuations.

Data and processing. Daily closing prices for both currency pairs were retrieved from the financial platform Investing.com [3]. The dataset covers 28 March 2025 - 28 March 2026. Raw data were processed in Python using the Pandas library [4]: irrelevant columns were removed, records were sorted chronologically, and the dataset was indexed by date.

Methodology. To separate the long-term direction from short-term fluctuations, the observed exchange rate x_t is decomposed as:

$$x_t + T_t + y_t \tag{1}$$

where T_t is the trend estimated as a 30-day rolling arithmetic mean (computed with Pandas), and y_t is the deviation from that trend. The deviation series is modeled as a first-order autoregressive process with error term ε_t representing unmodeled external influences:

$$y_t = ay_{t-1} + \varepsilon_t \tag{2}$$

The coefficient *a* is estimated by the least squares method using NumPy [5]:

$$a = \frac{\sum y_t y_{t-1}}{\sum y_{t-1}^2} \quad (3)$$

The half-life of a shock - the number of periods n for a deviation to shrink to half its initial size - is obtained from $a^n = 0.5$, giving:

$$n = \frac{\ln(0.5)}{\ln(a)} \quad (4)$$

Analysis of USD/KGS. Figure 1 shows the absolute USD/KGS rate (blue line) and it 30-day rolling trend (red line). The trend is broadly flat, indicating overall stability of the Kyrgyz som. A period of more pronounced deviation is visible approximately between June and October 2025.

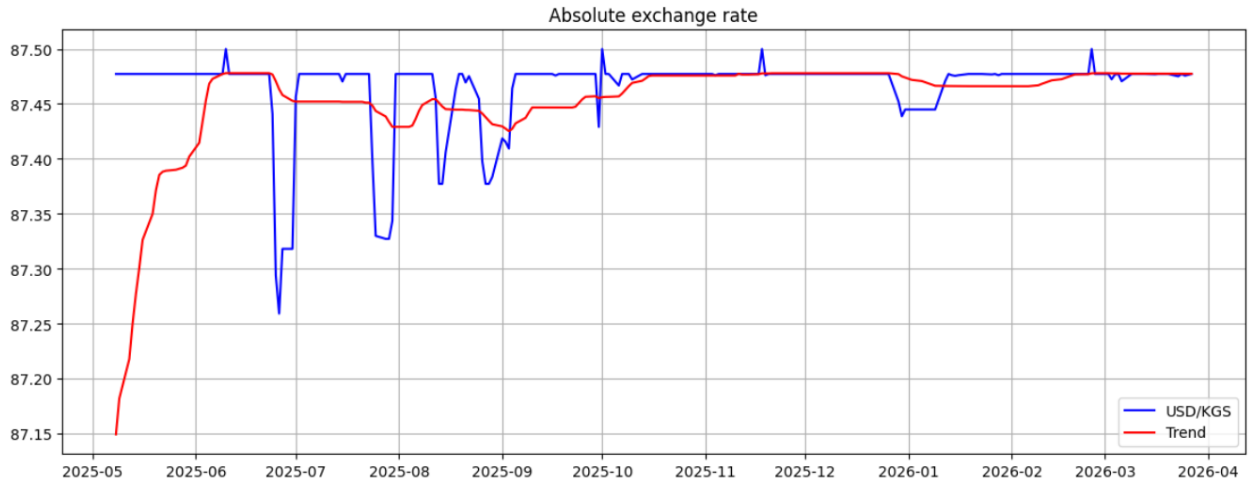


Figure 1 – Absolute exchange rate of USD/KGS, May 2025 - March 2026

Figure 2 isolates the deviation series y_t. Deviations oscillate around the equilibrium y = 0, with the alternating positive-negative pattern concentrated in the June-October 2025 window.

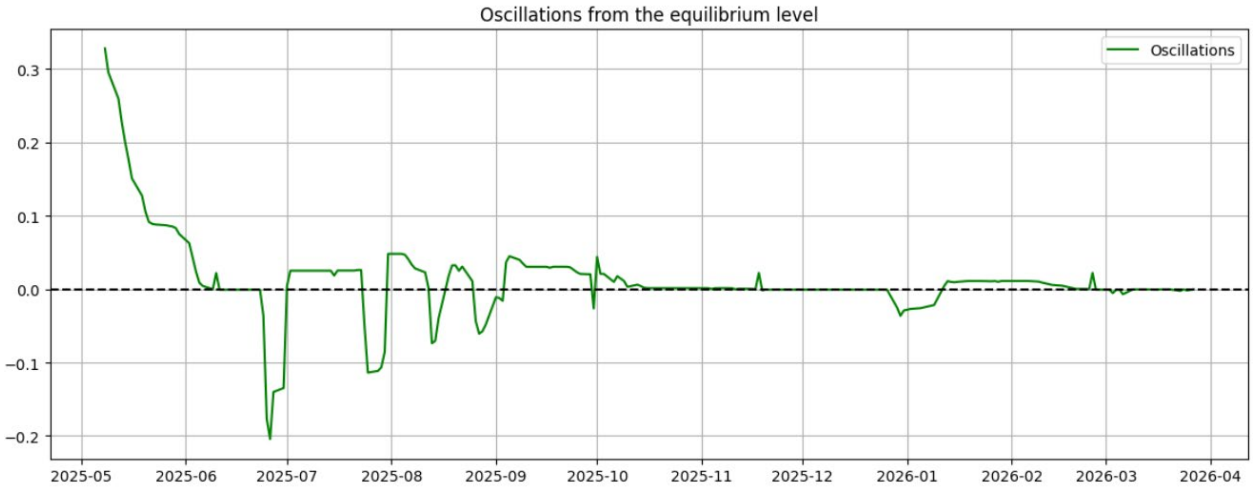


Figure 2 – Deviations from trend (USD/KGS), May 2025 - March 2026

Applying formula (3) to the deviation series yields $a = 0.8513$, so $0 < a < 1$ and the system is monotonically convergent - no proper or improper oscillations exist [1]. Each daily deviation retains 85% of the previous value. The half-life computed from formula (4) is:

$$0.8513^n = 0.5 \rightarrow n \approx 4.3 \; days \quad (5)$$

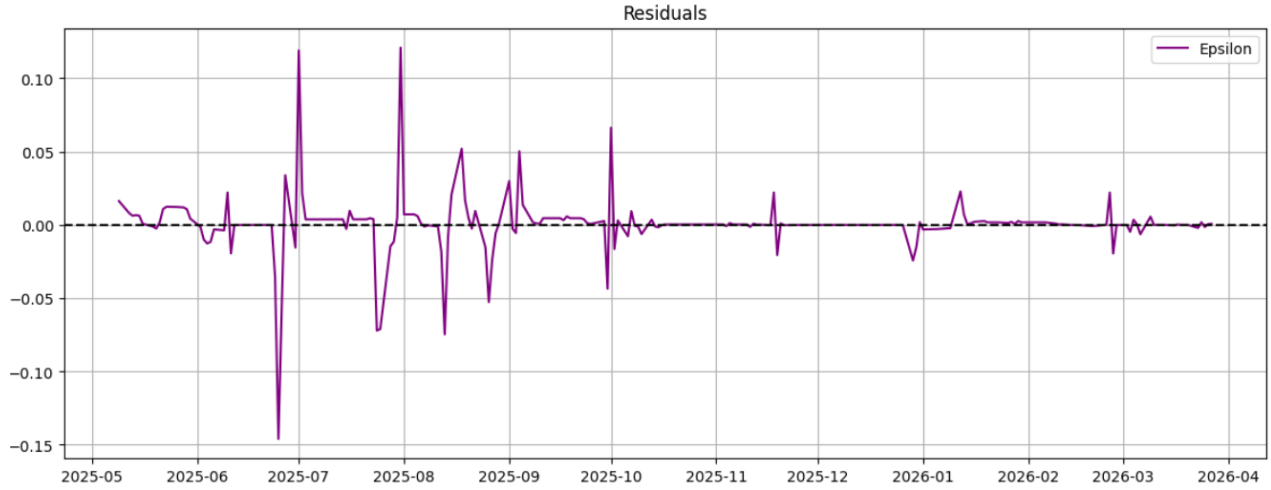


Figure 3 – Residuals ε_t for USD/KGS, May 2025 - March 2026

Figure 3 plots the residuals $\varepsilon_t = y_t - ay_{t-1}$. Significant spikes are almost entirely confined to June-October 2025, confirming that the fluctuations in Figure 2 originate from external shocks rather than internal structural cycles.

Analysis of USD/RUB. Figure 4 shows the absolute USD/RUB rate alongside its 30-day trend. Unlike the flat USD/KGS trend, the USD/RUB trend follows a pronounced curve, indicating persistent directional shifts driven by continuous external pressure.

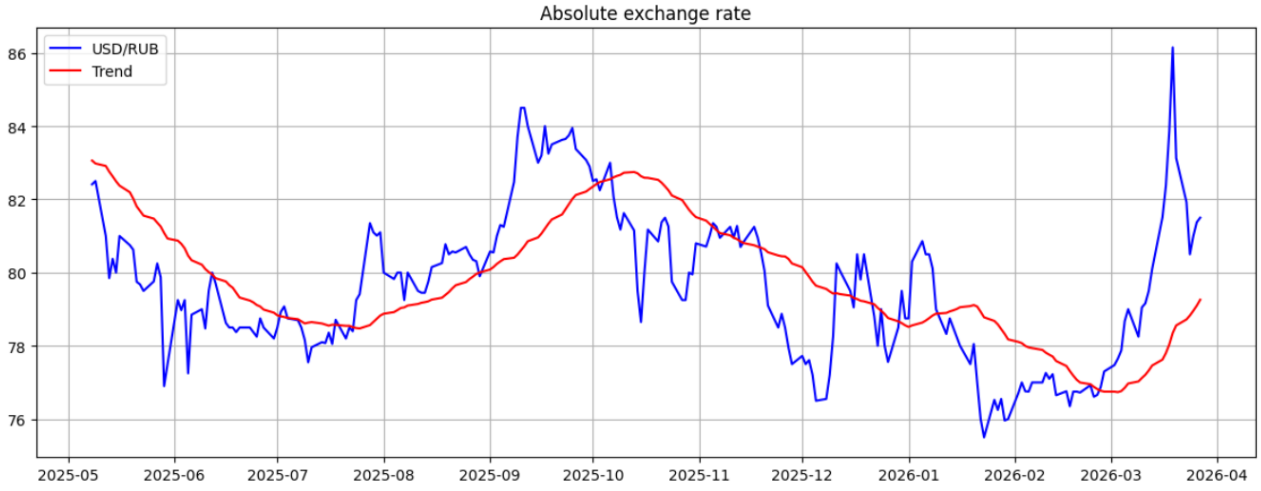


Figure 4 – Absolute exchange rate of USD/RUB, May 2025 - March 2026

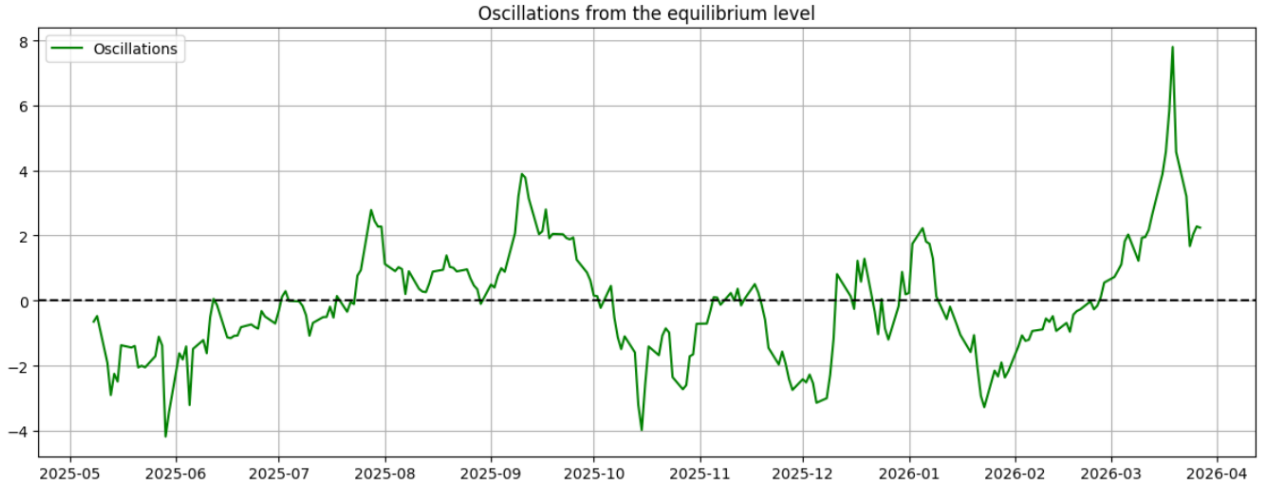


Figure 5 – Deviations from trend (USD/RUB), May 2025 - March 2026

Applying formula (3) gives $a = 0.9212$, again satisfying $0 < a < 1$ (monotonic convergence). However, the higher value means 92% of each deviation persists to the next day. The half-life from formula (4) is:

$$0.9212^n = 0.5 \rightarrow n \approx 8.4 \; days \tag{6}$$

Figure 6 confirms that the residuals for USD/RUB are large and present throughout the full year without any calm interval - in sharp contrast to USD/KGS.

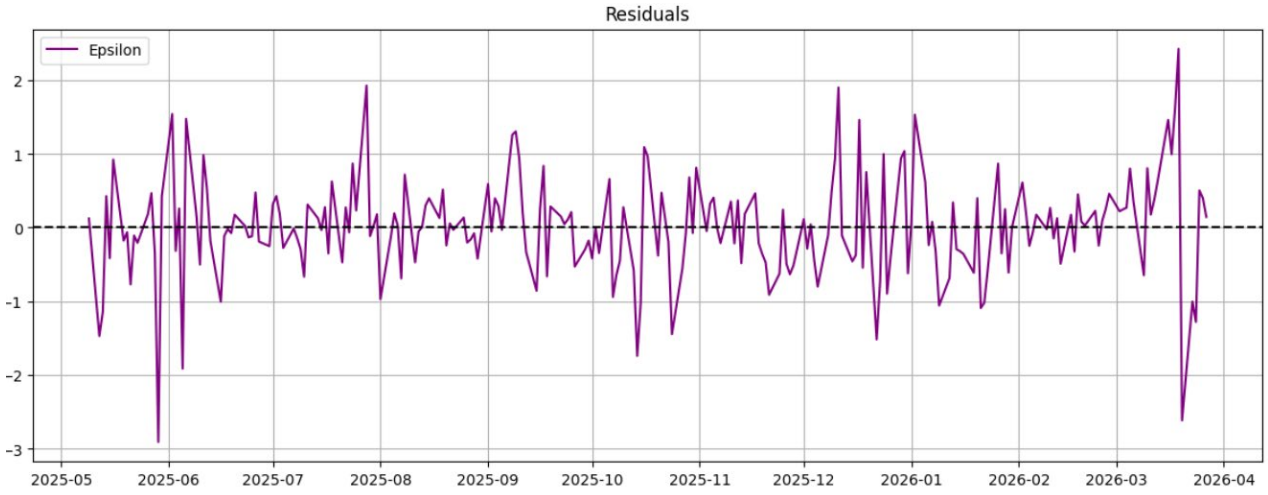


Figure 6 – Residuals ε_t for USD/RUB, May 2025 - March 2026

Comparative analysis. Table 1 summarizes the key numerical results. Despite sharing the same mathematical classification, the two currency pairs occupy opposite ends of the stability spectrum.

Table 1 – Comparative summary of USD/KGS and USD/RUB oscillation parameters

Parameter	**USD/KGS**	**USD/RUB**
Coefficient a	0.8513	0.9212
Convergence type	Monotonic	Monotonic
Half-life (days)	≈ 4.3	≈ 8.4
Residual pattern	Episodic shocks	Persistent shocks
Volatility period	Jun-Oct 2025	Entire period
Overall stability	High	Low

Both exchange rates satisfy $0 < a < 1$, placing them in the monotonically convergent regime [2]. Neither market possesses internal oscillatory dynamics: all observed fluctuations are attributable to the error term ε_t. The key difference lies in persistence and shock exposure. The Kyrgyz som recovers from shocks in roughly half the time of the Russian ruble (4.3 vs. 8.4 days), and its residuals are episodic rather than chronic, indicating a more insulated and stable currency market [3].

Conclusions. First-order difference equations prove to be an effective analytical tool for characterizing exchange-rate dynamics. Applied to one year of daily data, the model shows: (1) both USD/KGS and USD/RUB exhibit monotonic convergence without endogenous oscillations; (2) the Kyrgyz som ($a = 0.85$, half-life ≈ 4.3 days) demonstrates strong mean-reversion and episodic volatility; (3) the Russian ruble ($a = 0.92$, half-life ≈ 8.4 days) displays higher inertia and is continuously driven by external shocks. The residual analysis is the key diagnostic: it cleanly

separates the autoregressive structure from stochastic noise, making the origin of each volatility episode transparent.

References

1. Кыдыралиев С.К. Разностные и дифференциальные уравнения с приложениями. Бишкек. 2011. 133 с.
2. Gandolfo G. Economic dynamics: methods and models (Fourth ed.). Berlin: Springer. 2009. P. 14-101, 474-480.
3. Investing.com - USD/KGS and USD/RUB historical data. URL: https://ru.investing.com/currencies/.
4. Pandas Development Team. Pandas: powerful Python data analysis toolkit. URL: https://pandas.pydata.org/.
5. Harris C.R. et al. Array programming with NumPy // Nature. 2020. Vol. 585. P. 357-362.
6. Chiang A.C. Fundamental Methods of Mathematical Economics. 4th ed. New York: McGraw-Hill. 2005. 688 p.

УДК 004.8

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КЛАССОВ ИНДЕКСА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Абубакерова З.М.[1,2]
abubazuu@gmail.com
[1] Институт машиноведения автоматики и геомеханики НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан
[2] Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан

В работе предложена пространственно-временная графовая нейронная сеть ST-GAT+TCN (Spatio-Temporal Graph Attention Network with Temporal Convolutional Network) для прогнозирования классов индекса качества воздуха (AQI). Актуальность исследования обусловлена острой экологической проблемой загрязнения атмосферного воздуха в г. Бишкек, особенно в зимний отопительный период, когда концентрации PM2.5 многократно превышает допустимые нормы. Модель объединяет механизм внимания GATv2Conv, позволяющий учитывать пространственные связи между станциями мониторинга, и блок Temporal Convolutional Network (улучшенный TCN), предназначенный для извлечения долгосрочных временных закономерностей. Граф станций построен как взвешенный на основе географических расстояний. В качестве предикторных переменных используются метеорологические параметры, концентрации PM2.5, бинарный признак отопительного сезона и исторические значения AQI за период 2021-2023 годов с 3-часовыми интервалами. Модель позволяет прогнозировать классы AQI (0-3) для станций наблюдения с одновременным учетом как пространственных, так и временных зависимостей. Разработанная модель может служить основой для создания систем раннего оповещения населения об опасных уровнях загрязнения воздуха.

Ключевые слова: PM2.5, индекс качества воздуха (AQI), пространственно-временной анализ, графовые нейронные сети (GNN), механизм внимания, сверточные нейронные сети (TCN).

Введение. Загрязнение атмосферного воздуха представляет собой одну из наиболее серьезных экологических проблем современности. Город Бишкек (Кыргызстан) - яркий пример острой ситуации: в зимний отопительный период концентрации мелкодисперсных частиц PM2.5 многократно возрастают из-за массового сжигания угля в частных домохозяйствах, что усугубляется неблагоприятными метеорологическими условиями (инверсии, слабый ветер) и географическим положением города в котловине, окружённой горами [1, 2, 3]. Традиционные методы прогнозирования качества воздуха - статистические модели (AutoRegressive Integrated Moving Average, ARIMA) или рекуррентные нейронные сети, такие как Long Short-Term Memory (LSTM) и Gated Recurrent Unit (GRU) - рассматривают каждую станцию мониторинга независимо [4]. Такой подход игнорирует пространственные взаимосвязи между станциями: загрязнение переносится воздушными массами, а метеорологические условия действуют как общие факторы для всей территории. В результате точность прогнозов снижается, особенно при ограниченном числе станций наблюдения.

В последние годы активно развиваются пространственно-временные графовые нейронные сети (Spatial-Temporal Graph Neural Network, STGNN), которые позволяют одновременно учитывать временные зависимости и пространственные связи между объектами [5, 6]. Графовые нейронные сети (Graph Neural Network, GNN) агрегируют информацию от соседних узлов графа с учетом весов ребер. Одним из наиболее эффективных механизмов агрегации является механизм внимания (attention mechanism), который позволяет модели динамически определять важность каждого соседнего узла в зависимости от текущих данных.

В настоящей работе используется усовершенствованная версия - Graph Attention Network v2 (GATv2Conv), обладающая большей выразительной силой за счет динамического

вычисления коэффициентов внимания [7]. Для моделирования временных зависимостей применяется улучшенный блок Temporal Convolutional Network (Improved TCN), который, отличие от LSTM, обеспечивает параллельную обработку последовательностей, устойчивость к затуханию градиентов и явный контроль рецептивного поля через дилатированные каузальные свёртки [8].

Целью исследования является повышение точности и устойчивости прогнозирования классов AQI по сравнению с базовыми временными моделями. Для достижения этой цели разработана пространственно-временная графовая нейронная сеть ST-GAT+TCN.

Задачи исследования включают:

- построение взвешенного графа станций мониторинга на основе географических расстояний (формула haversine) с весами ребер (формула 1);
- разработку архитектуры ST-GAT+TCN с улучшенным TCN-блоком;
- обучение модели с многозадачным предсказанием классов AQI (0–3);
- оценку качества модели с использованием метрик accuracy и macro-F1, анализ результатов и сравнение с традиционными подходами.

Научная новизна работы заключается в: применении GATv2Conv в сочетании с улучшенным TCN для задачи прогнозирования AQI; использовании взвешенного графа на основе реальных расстояний с экспоненциальным затуханием весов; разработке улучшенного TCN-блока с дополнительными механизмами стабилизации. Практическая значимость состоит в возможности применения разработанной модели для систем раннего оповещения населения и поддержки принятия управленческих решений в области охраны атмосферного воздуха.

Постановка задачи. Задача прогнозирования качества воздуха относится к классу пространственно-временных задач прогнозирования (spatio-temporal forecasting).

Пусть $G=(V,E)$ - взвешенный неориентированный граф станций мониторинга, где: $V=\{v_1,v_2,\ldots,v_N\}$ - множество вершин, каждая из которых соответствует одной станции наблюдения, а E - множество ребер с весами w_{ij}, отражающими степень пространственной близости и влияния между станциями. Веса ребер вычисляются по формуле экспоненциального затухания:

$$w_{\text{ij}} = \exp\left(-d_{\text{ij}}/\sigma\right), \tag{1}$$

где d_{ij} - географическое расстояние между станциями i и j, рассчитанное по формуле гаверсина с учетом сферической формы Земли, а σ - медиана всех ненулевых расстояний. Ребра формируются только для пар станций, расстояние между которыми не превышает заданный порог (50 км), что обеспечивает полную связность графа в пределах этого порога.

Каждой вершине v_i в момент времени t соответствует вектор признаков $\mathrm{x}_i^{(t)} \in \mathbb{R}^F$, где F - размерность вектора предикторных переменных: метеорологические параметры, концентрации PM2.5 и бинарный признак отопительного сезона is_heating. Для прогнозирования используется скользящее окно (sliding window) определенной длины SEQ_LEN, которая соответствует часам истории, с горизонтом прогнозирования PRED_HORIZON шаг (+ 3 часа). Задача формулируется как: $\hat{y}_{t+1} = f\left(X_{t-(SEQ\_LEN-1):t}, G\right)$, где $X_{t-(SEQ\_LEN-1):t} \in \mathbb{R}^{\text{SEQ\_LEN}\times N\times F}$ - тензор входных данных за предыдущие 12 временных шагов для всех станций; G - взвешенный граф станций; $\hat{\mathrm{y}}_{t+1} \in \mathbb{R}^{N\times 4}$ - предсказанные вероятности классов AQI (0–3) для всех станций на момент t+1; $f(\cdot)$ - обучаемая модель ST-GAT+TCN.

Целевая переменная - дискретный класс AQI: 0 (0–50, Хороший), 1 (51–100, Умеренный), 2 (101–150, Нездоровый для чувствительных групп), 3 (151+, Нездоровый).

Модель решает задачу многозадачной классификации с использованием взвешенной функции потерь CrossEntropyLoss. Веса классов рассчитываются по формуле:

$$w_c = \frac{\sqrt{\frac{\text{total}}{n_{\text{classes}} \cdot \text{count}_c}}}{w_0},$$

где count_c - количество примеров класса c, а нормализация производилась относительно веса наиболее частого класса. Это позволяет модели уделять больше внимания редким, но критически важным классам загрязнения (2 и 3).

Данные и предобработка. Исходные данные охватывают период с 2021 по 2023 год с интервалом в 3 часа и собраны с нескольких станций мониторинга качества воздуха в г. Бишкек. Каждая станция представлена как узел графа и характеризуется как общими, так и индивидуальными параметрами.

Входные переменные включают общие метеорологические параметры (одинаковые для всех станций): скорость ветра, точка росы, температура воздуха, осадки, относительная влажность, атмосферное давление и бинарный признак отопительного сезона (is_heating); а также индивидуальные для каждой станции концентрации PM2.5. Целевой переменной является дискретный класс AQI (0–3).

Предобработка данных включала следующие этапы.

1. Заполнение пропущенных значений методами ffill и bfill с ограничением в 7 шагов (максимум 21 час).
2. Формирование временных последовательностей с использованием скользящего окна для прогнозирования на заданное число шагов вперед.
3. Нормализация числовых признаков с помощью StandardScaler, обученного только на тренировочной выборке.
4. Разбиение данных по времени (без перемешивания): 70 % - обучающая выборка, 15 % - валидационная, 15 % - тестовая.

Все преобразования применялись с учетом временного порядка, что является критически важным условием для корректного прогнозирования временных рядов.

Пространственный модуль (GATv2Conv). Для моделирования пространственных зависимостей используется слой GATv2Conv. В классической версии Graph Attention Network (GAT) коэффициенты внимания вычисляются путем независимого преобразования признаков целевого и соседних узлов с последующим их объединением. Такой подход приводит к статическому вниманию, при котором важность соседей слабо зависит от контекста целевого узла. В результате модель теряет часть выразительной силы.

GATv2Conv решает эту проблему за счет изменения порядка операций: нелинейная активация LeakyReLU применяется после конкатенации признаков целевого и соседнего узлов. Благодаря этому коэффициенты внимания становятся динамическими - важность каждой соседней станции теперь зависит от совместного представления признаков текущей и соседней станции. Это делает механизм внимания более гибким и позволяет лучше захватывать сложные нелинейные пространственные взаимодействия в данных о качестве воздуха.

Формально обновление представления узла i описывается следующим образом:

$$\mathrm{x}_i' = \alpha_{i,i}\Theta\mathrm{x}_i + \sum_{j\in\mathcal{N}(i)} \alpha_{i,j}\,\Theta\mathrm{x}_j,$$

где коэффициенты внимания α_{ij} вычисляют как:

$$\alpha_{ij} = \frac{\exp\left(a^{\top}\mathrm{LeakyReLU}\left(\Theta[\mathrm{x}_i \,||\, \mathrm{x}_j]\right)\right)}{\sum_{k\in\mathcal{N}(i)\cup\{i\}} \exp\left(a^{\top}\mathrm{LeakyReLU}(\Theta[\mathrm{x}_i \,||\, \mathrm{x}_k])\right)}$$

здесь Θ - матрица линейного преобразования признаков, a - вектор параметров внимания, (||) обозначает конкатенацию, а $N(i)$ - множество соседей узла i.

Временной модуль (Improved TCN Block). Для моделирования временных зависимостей применяется улучшенный блок Improved TCN. В отличие от рекуррентных архитектур типа LSTM, TCN обеспечивает параллельную обработку последовательностей, что значительно ускоряет обучение и инференс, а также решает проблему затухающих градиентов на длинных временных рядах. Основу блока составляют каузальные дилатированные свертки. Каузальность достигается с помощью специального дополнения (causal padding) и операцией Chomp1d, которая гарантирует, что при предсказании в момент времени t модель использует только информацию из прошлого и настоящего. Дилатации (dilations) позволяют экспоненциально увеличивать рецептивное поле блока без существенного роста числа параметров, что дает возможность эффективно захватывать как краткосрочные, так и долгосрочные зависимости в данных.

Ключевой особенностью Improved TCN является gated convolution: для каждой свертки вычисляются два параллельных выхода: «filter» и «gate», результат которых получается путем их поэлементного умножения. Такой механизм позволяет модели динамически отбирать наиболее значимую информацию [9].

Для повышения стабильности обучения в блок включены современные механизмы: LayerNorm, активация GELU, LayerScale (обучаемый масштабируемый параметр) и остаточные связи (residual connections). Кроме того, применяется dropout с коэффициентом 0,15.

Комбинация модулей. В архитектуре ST-GAT+TCN пространственный и временной модули работают последовательно. На каждом временном шаге входные данные сначала поступают в модуль GATv2Conv, который с помощью взвешенного графа и механизма динамического внимания агрегирует информацию от соседних станций. В результате для каждой станции формируется обогащенное представление, учитывающее как ее собственные предикторные переменные, так и контекст соседних станций.

Далее полученные представления подаются в блок Improved TCN, где с помощью каузальных дилатированных сверток и gated механизма извлекаются долгосрочные временные зависимости. На завершающем этапе выходные признаки проходят через линейный классификационный слой, формируя предсказания классов AQI. Таким образом, модель одновременно учитывает, как пространственные взаимодействия между станциями, так и сложные временные паттерны, включая сезонную динамику загрязнения [10].

Обсуждение. Предложенная модель ST-GAT+TCN продемонстрировала способность эффективно решать задачу прогнозирования классов AQI за счет совместного учета пространственных и временных зависимостей. Использование механизма динамического внимания GATv2Conv позволило модели учитывать влияние соседних станций с учетом их географической близости и текущего состояния. Применение улучшенного блока Improved TCN обеспечило надежное выделение долгосрочных временных паттернов, включая изменения загрязнения. Важным преимуществом стало построение взвешенного графа на основе реальных расстояний с экспоненциальным затуханием весов. Это дало возможность учитывать пространственных перенос загрязняющих веществ между станциями. Сохранение бинарного признака is_heating позволило модели лучше улавливать влияние отопительного сезона на качество воздуха.

Анализ ошибок показал, что модель преимущественно ошибается между соседними классами AQI, что свидетельствует о ее способности отслеживать постепенное изменение уровня загрязнения. Ошибка между крайними классами (0-3) встречаются редко.

К основным ограничениям работы относятся небольшой размер графа, относительно короткий горизонт прогнозирования, а также использование данных только за период 2021-2023 годов. Эти факторы могут снижать обобщающую способность модели при значительных изменениях условий или расширении сети мониторинга.

В целом, результаты подтверждают перспективность сочетания графовых нейронных сетей с современными сверточными моделями для задач прогнозирования качества воздуха в городах с ограниченной сетью станций [11].

Заключение. В настоящей работе была разработана пространственно-временная графовая нейронная сеть ST-GAT+TCN, объединяющая механизм внимания GATv2Conv и улучшенный блок TCNдля прогнозирования классов индекса качества воздуха AQI. Модель позволяет одновременно учитывать пространственные взаимодействия между станциями и долгосрочные временные паттерны. Научная новизна исследования заключается в сочетании GATv2Conv с улучшенным TCN-блоком, использовании взвешенного графа на основе реальных географических расстояний и сохранении бинарного признака is_heating как важной предикторной переменной.

Разработанная модель обладает практической значимостью и может быть использована в системах раннего оповещения населения об опасных уровнях загрязнения воздуха. Дальнейшие исследования предполагают расширение графа станций, увеличение горизонта прогнозирования, проведение ablation-экспериментов для оценки вклада отдельных компонентов модели, а также интеграцию дополнительных источников данных.

Таким образом, применение современных пространственно-временных графовых нейронных сетей открывает новые возможности для экологического мониторинга в условиях ограниченной инфраструктуры станций наблюдения.

Литература

1. UNDP, UNEP. Air Quality in Bishkek: Assessment of Emission Sources and Roadmap for Supporting Air Quality Management. Bishkek; Nairobi. 2022. 102 p.
2. World Bank. Air Quality Analysis for Bishkek: PM2.5 Source Apportionment and Emission Reduction Measures. Washington, DC, 2023.
3. Vicent J.F. et al. Spatio-temporal graph neural network for inter-city air quality forecasting // International Journal of Environmental Science and Technology. 2025. Vol. 23. P. 63–78.
4. Bai S., Kolter J.Z., Koltun V. An empirical evaluation of generic convolutional and recurrent networks for sequence modeling // arXiv preprint arXiv:1803.01271. 2018.
5. Yu B., Yin H., Zhu Z. Spatio-Temporal Graph Convolutional Networks: A Deep Learning Framework for Traffic Forecasting // Proceedings of the 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). 2018. P. 3634–3640.
6. Wu Z. et al. Connecting the Dots: Multivariate Time Series Forecasting with Graph Neural Networks // Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (KDD). 2020. P. 753–763.
7. Brody S., Alon U., Yahav E. How attentive are graph attention networks? // Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). 2022.
8. Yang W. et al. Hybrid TCN-BiGRU model for accurate air quality index forecasting // Environmental Pollution. 2025.
9. Sundaramoorthy R.A. et al. Implementing heuristic-based multiscale depth-wise separable adaptive temporal convolutional network for ambient air quality prediction // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Article number: 68793.
10. Li P. et al. A Spatio-Temporal Graph Convolutional Network for Air Quality Prediction // Sustainability. 2023. Vol. 15. № 9. 7624.
11. Guttikunda S.K. et al. Mapping PM2.5 Sources and Emission Management Options for Bishkek, Kyrgyzstan // Air. 2024. Vol. 2. No. 4. P. 1–18.

УДК 532.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В НАНОЖИДКОСТИ

Алтынбек уулу Ы., Кучунова Е.В.
imanuulu9@gmail.com
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

В работе представлено численное моделирование естественной конвекции наножидкости в рамках однофазного подхода. Математическая модель базируется на системе уравнений Навье-Стокса, неразрывности и энергии в приближении Буссинеска. Для решения задачи использован классический проекционный метод. Результаты вычислительных экспериментов демонстрируют интенсификацию теплообмена при использовании наножидкостей по сравнению с базовой жидкостью.

Ключевые слова: уравнение Навье-Стокса, приближение Буссинеска, наножидкость, естественная конвекция, численное моделирование, проекционный метод.

Введение. Естественная конвекция играет критическую роль в энергоэффективности тепловых систем, однако традиционные теплоносители часто ограничены низкой теплопроводностью. Добавление наночастиц высокой теплопроводности является перспективным способом интенсификации теплообмена [1]. Хотя конвекция в замкнутых полостях изучена подробно [2, 3], влияние комбинированных граничных условий (тепловой поток и внешняя конвекция) и ориентации полости требует дальнейшего анализа. В работе Chelia et al. [4] методом решеточных уравнений Больцмана (LBM) было показано, что число Био и ориентация нагрева влияют на теплоотдачу для наножидкости Cu/вода. Цель данной работы-адаптация постановки задачи [4] для наножидкости Al_2O_3/вода с применением метода конечных элементов (FEM). Численная реализация выполнена в современном фреймворке FEniCSx [5, 6], что обеспечивает высокую точность аппроксимации уравнений Навье-Стокса и энергии. Исследуется влияние числа Грасгофа и концентрации частиц на гидродинамику и интенсивность теплопереноса. Это позволяет верифицировать результаты [4] альтернативным численным методом и расширить их на другие типы наножидкостей.

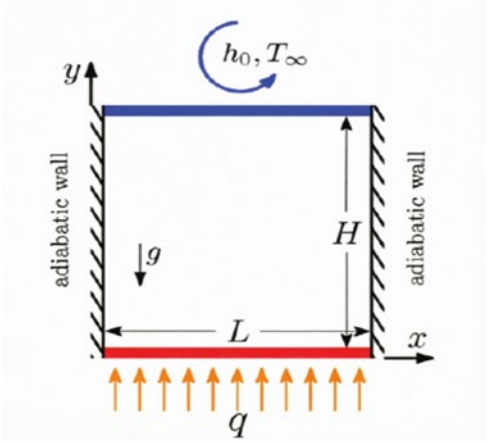


Рисунок 1 – Схема полости

Постановка задачи. Рассматривается двумерная квадратная область $\Omega = [0, L]^2$, заполненная наножидкостью Al_2O_3/вода (рис. 1). Течение стационарное, ламинарное, жидкость несжимаемая и ньютоновская. Силы плавучести учитываются в приближении Буссинеска [7]. Конфигурация граничных условий соответствует модели нагрева снизу [4]:

1. Нагрев (y=0): постоянный тепловой поток $q = \text{const}$.
2. Охлаждение (y=1): конвективный теплообмен $-k_{nf}\frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty)$.

3. Боковые стенки (x=0,1): адиабатические.
4. Границы**:** условие прилипания $u = 0$.

Масштабирование переменных выполнено по методике [7]:

$$\overline{\boldsymbol{x}} = \frac{x}{L}, \qquad \boldsymbol{t_c} = \frac{L}{U}, \qquad \overline{\boldsymbol{u}} = \frac{u}{U}, \bar{p} = \frac{p}{\rho U^2}, \qquad \overline{\boldsymbol{T}} = \frac{T - T_0}{\Delta T},$$

где характерная скорость $U = \sqrt{\beta \Delta T L}$.

Система уравнений в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \cdot \bar{\nabla}\bar{u} = -\bar{\nabla}\bar{p} + \frac{1}{\sqrt{Gr}}\nabla^2\bar{u} - Fr^{-2}\boldsymbol{k} + \bar{T}\boldsymbol{k}, \quad (1)$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{u} = 0, \quad (2)$$

$$Gr^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \cdot \bar{\nabla}\bar{T}\right) = Pr^{-1}\,\bar{\nabla}^2\bar{T} + 2EcGr^{-1/2}\,\overline{\epsilon_{ij}}\,\overline{\epsilon_{ij}}. \quad (3)$$

Здесь ключевыми критериями подобия являются:

1. Число Грасгофа: $\mathrm{Gr} = \frac{g\beta\Delta T}{\nu^2}$ - отношение сил плавучести к силам вязкости.
2. Число Прандтля: $\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$ - отношение кинематической вязкости к температуропроводности.

Эффективные свойства наножидкости определяются через объемную долю ϕ [1, 3, 8]:

1. Плотность и теплоемкость: $\rho_{\mathrm{nf}} = (1-\phi)\rho_{\mathrm{f}} + \phi\rho_{\mathrm{p}}, \left(\rho C_{\mathrm{p}}\right)_{\mathrm{nf}} = (1-\phi)\left(\rho C_{\mathrm{p}}\right)_{\mathrm{f}} + \phi\left(\rho C_{\mathrm{p}}\right)_{\mathrm{p}}$
2. Теплопроводность (Модель Хо): $\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 2.7\phi$
3. Вязкость (Бринкман): $\mu_{nf} = \mu_f(1-\phi)^{-2.5}$.

Численное решение. Задача (1)–(3) решается методом конечных элементов (FEM) в фреймворке FEniCSx [5, 6]. Для связи давления и скорости используется проекционный метод [9]. Пространственная аппроксимация выполняется элементами Тейлора-Худа (P2-P1), что удовлетворяет условию LBB (Ladyzhenskaya–Babuška–Brezzi). Для программирования в FEniCSx уравнения (1)–(3) приводятся к слабой (вариационной) формулировке путём умножения на тестовые функции и интегрирования по расчётной области.

Алгоритм имеет следующий вид, найти $(u, p, \theta) \in V \times Q \times \Theta$ такие, что $\forall (v, q, s) \in V \times Q \times \Theta$:

Шаг 1: Предварительная скорость

$$\left\langle \frac{\mathrm{u}^* - \mathrm{u}^{\mathrm{n}}}{\Delta \mathrm{t}}\,\Delta \mathrm{t}\,, \mathrm{v} \right\rangle + \langle (\mathrm{u}^{\mathrm{n}} \cdot \nabla)\mathrm{u}^{\mathrm{n}}\,, \mathrm{v}\rangle + \langle \sigma(\bar{u}, \mathrm{p}^{\mathrm{n}})\,, \nabla \mathrm{v}\rangle = \left\langle (\theta^{\mathrm{n}} - \theta_{\mathrm{ref}})\mathrm{e}_{\mathrm{y}}, \mathrm{v}\right\rangle, \quad (4)$$

$$\varepsilon(\mathrm{u}) = \frac{1}{2}(\nabla \mathrm{u} + \nabla \mathrm{u}^T), \qquad \sigma = \frac{2}{\sqrt{Gr}}\epsilon(\bar{u}) - p^n I, \qquad \bar{u} = \frac{u^n + u^*}{2},$$

Шаг 2: Давление

$$\langle \nabla p^{n+1}, \nabla \mathrm{q}\rangle = \langle \nabla p^n, \nabla \mathrm{q}\rangle - \frac{1}{\Delta t}\langle \nabla \cdot u^*, \mathrm{q}\rangle, \quad (5)$$

Шаг 3: Коррекция скорости

$$\langle u^{n+1}, v\rangle = \langle u^*, v\rangle - \Delta t\langle \nabla(p^{n+1} - p^n), v\rangle, \quad (6)$$

Шаг 4: Температура

$$\sqrt{Gr}\left\langle \frac{\theta^{n+1} - \theta^n}{\Delta t}, s\right\rangle + \sqrt{Gr}\left\langle (u^* \cdot \nabla)\bar{\theta}, s\right\rangle + \frac{1}{Pr}\left\langle \nabla\bar{\theta}, \nabla s\right\rangle = \left\langle q_{flux}, s\right\rangle_{\Gamma_{bottom}} - \left\langle Bi\left(\theta^{n+1} - \theta_{ref}\right), s\right\rangle_{\Gamma_{top}}, \quad (7)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\theta^n + \theta^{n+1}}{2}.$$

Таблица 1 - Влияние объёмной доли наночастиц Al_2O_3 на среднее число Нуссельта при Bi=100

$\phi, \%$	Gr	Pr	$Nu_{avg}(max)$	Прирост $Nu_{avg}, \%$
0	196 200	6,816	1,30	(базовая жидкость)
1	193 527	6,589	1,97	52,25
2	190 622	6,382	1,63	26,06
3	187 504	6,192	1,73	33,40
4	184 190	6,017	1,34	3,70
5	180 699	5,857	2,10	61,89

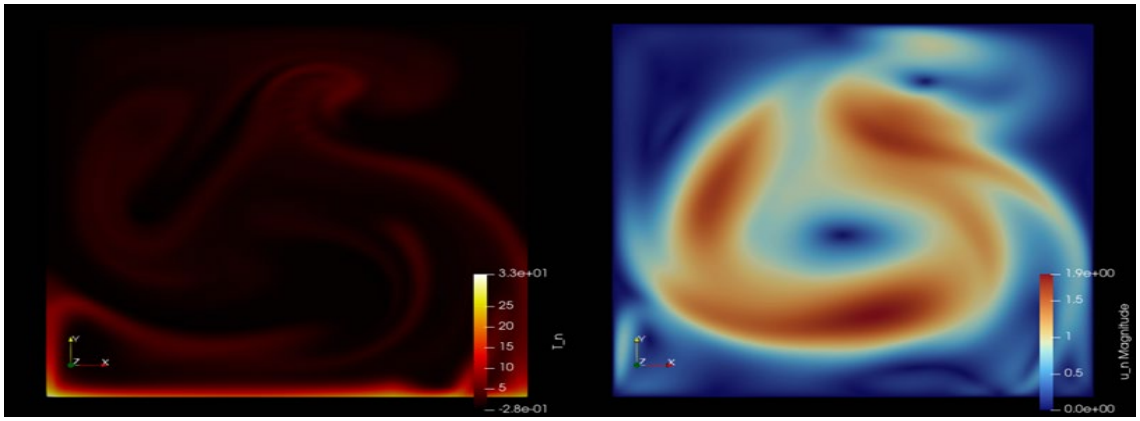


Рисунок 2 – Температура, скорость, ϕ = 1%, Gr= 193527

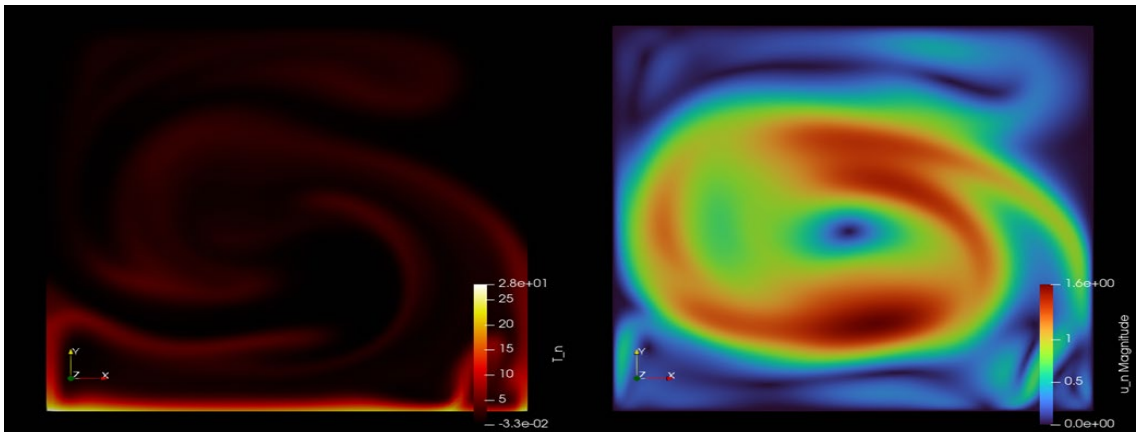


Рисунок 3 – Температура, скорость, ϕ = 2%, Gr= 190622

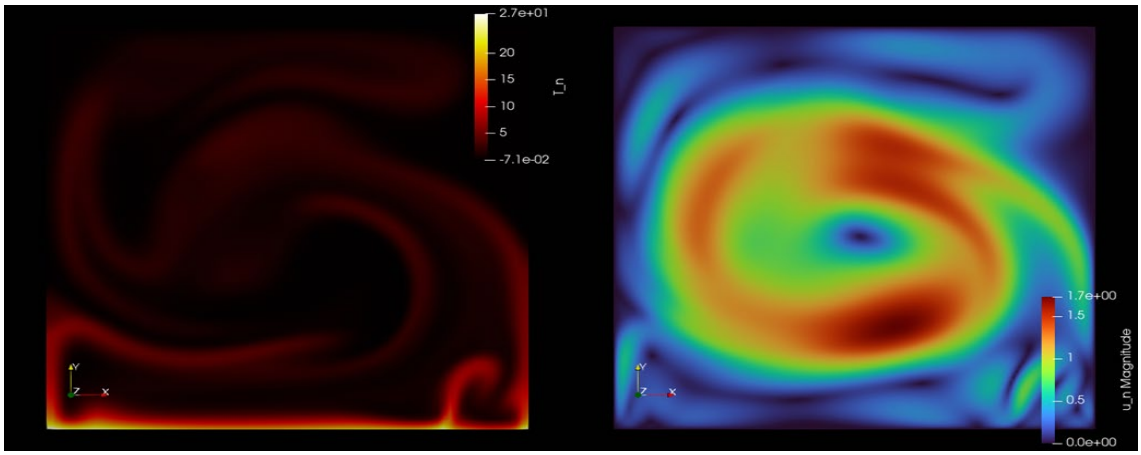


Рисунок 4 – Температура, скорость, ϕ = 3%, Gr=187503

Выводы. В работе проведено численное моделирование естественной конвекции наножидкости Al_2O_3/вода в квадратной полости с нагревом снизу и конвективным охлаждением сверху методом конечных элементов в FEniCSx + Python. Применение проекционного метода Чорина и элементов Тейлора-Худа (P2-P1) в FEniCSx продемонстрировало устойчивость алгоритма.

Добавление наночастиц Al_2O_3 приводит к росту среднего числа Нуссельта. При ϕ=5% зафиксирован максимальный прирост теплоотдачи (+61,89% относительно базовой жидкости). С увеличением концентрации наночастиц число *Gr* снижается с 196200 до 180699, число *Pr* снижается с 6,816 до 5,587 вследствие роста эффективной вязкости. Однако рост концентрации не дает линейного роста эффективности, при некоторых концентрациях баланс между вязкостью и теплопроводностью не оптимален.

Основное ограничение однофазной модели - предположение о равномерном распределении наночастиц. В реальности возможны эффекты седиментации и агрегации. Для повышения точности прогнозирования в будущих работах планируется переход к двухфазной модели, что позволит учесть относительное скольжение фаз и локальную концентрацию частиц.

Литература

1. Xuan Y., & Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids // International Journal of heat and fluid flow. 2000. 21 (1). 58-64.
2. Bawazeer S.A., & Alsoufi M.S. Natural convection in a square cavity: Effects of Rayleigh and Prandtl numbers on heat transfer and flow patterns // Case Studies in Thermal Engineering. 2025. 106680.
3. Boualit A., Zeraibi N., Chergui T., Lebbi M., Boutina L., & Laouar S. Natural convection investigation in square cavity filled with nanofluid using dispersion model // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. 42 (13). 8611-8623.
4. Chelia W., Laouer A., Mezaache E.H., Teggar M., Arıcı M., & Ismail K.A. Investigation of nanofluid natural convection inside a square cavity for two orientations using lattice Boltzmann method // Journal of Nanofluids. 2023. 12 (4). 889-903.
5. Baratta I.A., Dean J.P., Dokken J.S., Habera M., HALE J., Richardson C.N., ... & Wells G.N. DOLFINx: the next generation FEniCS problem solving environment. 2023.
6. Langtangen H.P. & Logg A. Solving PDEs in python: the FEniCS tutorial I. Springer Nature. 2017. 151 p.
7. Langtangen H.P. & Pedersen G.K. Scaling of differential equations. Springer Nature. 2016. 138 p.
8. Buongiorno J. Convective transport in nanofluids // Journal of Heat Transfer. 2006. 128 (3). 240-250.
9. Chorin A.J. Numerical solution of the Navier-Stokes equations // Mathematics of computation. 1968. 22 (104). 745-762.

УДК 534.23

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ДИФФУЗИИ-РЕАКЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ОДНОСТАДИЙНЫХ АЛГОРИТМОВ)

Быстрова М.Е.[1], Забинякова О.Б.[1,2], Скляр С.Н.[1]
bystrova_m@auca.kg, perah.92@inbox.ru, sklyar_s@auca.kg
[1] Американский университет в Центральной Азии, г. Бишкек, Кыргызстан
[2] Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

В работе построены и протестированы три одностадийных вычислительных алгоритма для решения нелинейной задачи диффузии-реакции: явный интерполяционный метод, явный проекционный метод и неявный проекционный метод. Тестирование предложенных алгоритмов выполняется на тестовой задаче с известным точным решением (начально-краевая задача для уравнения Фишера-Колмогорова). Выполняется сравнение эффективности разработанных численных методов.

Ключевые слова: нелинейное уравнение диффузии-реакции, одностадийный метод, интерполяционный метод, проекционный метод, явный метод, неявный метод.

Введение. Нелинейные уравнения диффузии-реакции являются фундаментальной математической основой для понимания систем, в которых вещества или организмы перемещаются в пространстве и одновременно трансформируются или взаимодействуют локально. Такие уравнения широко применяются при моделировании процессов диффузии и реакции в физике, биологии, химии, медицине, экологии и других отраслях науки. Например, уравнение Фишера-Колмогорова [1, 2] используется при изучении распространения эпидемий и биологических популяций в среде. Уравнение Фитцхью-Нагумо применяется при описании сложных динамических нейронных сетей, клеточных процессов и сердечной системы [3]. Также на уравнении диффузии-реакции основаны и модель, описывающая концентрацию хлорофилла на основе биомассы фитопланктона в зависимости от условий окружающей среды и пространственного распределения в толще воды [4], и модель b-ε, описывающая турбулентный поток и применяемая для моделирования распространения загрязнения в океане [5].

Обратим внимание на то, что в большинстве моделей нелинейные уравнения диффузии-реакции не решаются в аналитическом виде, поэтому существует необходимость в разработке соответствующих высокоточных численных методов.

В рамках данной работы рассматривается построение и тестирование новых численных методов для решения начально-краевой задачи для нелинейного уравнения диффузии-реакции: явных интерполяционного и проекционного методов, а также неявного проекционного метода.

Постановка задачи. Рассмотрим нелинейное уравнение диффузии-реакции:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x,t,u), \quad x \in (0,1), \quad t > 0, \tag{1}$$

где $u(x,t)$ – искомая функция, $\varepsilon > 0$ – коэффициент диффузии, $f(x,t,u)$ – заданная функция, описывающая реакционные процессы.

Для уравнения (1) будем использовать следующие граничные и начальные условия:

$$u(0,t) = \psi_0(t), \; u(1,t) = \psi_1(t), \; t \geq 0, \tag{2}$$

$$u(x,0) = \varphi(x), \; x \in [0,1], \tag{3}$$

где $\psi_0(t)$, $\psi_1(t)$ и $\varphi(x)$ – заданные функции.

Дискретизация задачи по пространству и времени. Введем равномерную сетку на отрезке $x \in [0,1]$: $x_i \equiv (i-1)h$, $h = 1/(n-1)$, $i = \overline{1,n}$. Применяя конечно-разностную аппроксимацию пространственной производной [6, 7] в уравнении (1), получим:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u_i}{\partial t} + \left(-\dfrac{\varepsilon}{h^2} u_{i-1} + \dfrac{2\varepsilon}{h^2} u_i - \dfrac{\varepsilon}{h^2} u_{i+1} \right) = f(x_i, t, u_i(t)), & i = \overline{2,n-1}, \quad t > 0, \\ u_1(t) = \psi_0(t), \quad u_n(t) = \psi_1(t), & t \geq 0, \\ u_i(t) = \varphi(x_i), & i = \overline{1,n}; \end{cases} \tag{4}$$

где $u_i = u_i(t) \approx u(x_i, t)$. Для каждого $i = \overline{1,n-1}$ система (4) представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений.

Задача (4) в операторной форме принимает вид:

$$\begin{cases} \dfrac{du}{dt}(\zeta, t) + Au(\zeta, t) = f(\zeta, t, u(\zeta, t)), & \zeta \in \mathring{\omega}, \quad t > 0, \\ u(\zeta, t) = \psi(\zeta, t) & \zeta \in \partial\omega, \\ u(\zeta, 0) = \varphi(\zeta) & \zeta \in \omega; \end{cases} \tag{5}$$

где ω – пространственная сеточная область, $\mathring{\omega}$ – внутренние узлы сетки, $\partial\omega$ граничные узлы сеточной области, то есть $\omega = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$, $\mathring{\omega} = \{x_2, x_3 ... x_{n-1}\}$, $\partial\omega = \{x_1, x_n\}$. Оператор A – сеточный матричный оператор, представимый в виде:

$$Av(\zeta) = \sum_{\eta \in \omega} a(\zeta, \eta) v(\eta), \quad \zeta \in \mathring{\omega}, \tag{6}$$

такой, что для всех узлов сетки $\zeta \in \mathring{\omega}$ выполняются условия монотонности:

$$a(\zeta, \zeta) > 0; \; a(\zeta, \eta) \leq 0, \quad \eta \neq \zeta; \; \sum_{\eta \in \omega} a(\zeta, \eta) \geq 0. \tag{7}$$

Для дискретизации рассматриваемой задачи по времени введем равномерную сетку во временной области: $t_m \equiv m\tau$, $m = 0,1,2,...$ – узлы сетки; τ – заданный шаг сетки.

Далее рассмотрим построение вычислительных схем для решения задачи (5). В рамках данной работы ограничимся построением одностадийных методов, тем не менее отметим, что все конструируемые численные методы могут быть обобщены и для *N*-стадийного случая.

Построение численных методов для решения задачи (5).

Явный одностадийный интерполяционный метод. Проинтегрируем операторное уравнение из системы (5) по произвольной сеточной ячейке $[t_{m-1}, t_m]$:

$$u(\zeta, t_m) = u(\zeta, t_{m-1}) - \int_{t_{m-1}}^{t_m} Au(\zeta, t)\, dt + \int_{t_{m-1}}^{t_m} f(\zeta, t, u(\zeta, t))dt, \; \zeta \in \mathring{\omega}, \; m = 1,2,3.... \tag{8}$$

Перепишем равенство (8), учитывая структуру оператора *A* (6), и применим следующие аппроксимации для подынтегральных функций:

$$u(\zeta, t) \approx u(\zeta, t_{m-1}), \; f(\zeta, t) \approx f(\zeta, t_{m-1}). \tag{9}$$

Получим вычислительную схему:

$$u(\zeta, t_m) = u(\zeta, t_{m-1}) + \tau \left[f(\zeta, t_{m-1}) - \sum_{\eta \in \omega} a(\zeta, \eta) u(\eta, t_{m-1}) \right], \; \zeta \in \mathring{\omega}, \; m = 1,2,..., \tag{10.1}$$

или, в операторной форме,

$$u(\zeta, t_m) = u(\zeta, t_{m-1}) + \tau \left[f(\zeta, t_{m-1}) - Au(\zeta, t_{m-1}) \right], \; \zeta \in \mathring{\omega}, \; m = 1,2,..., \tag{10.2}$$

которую в дальнейшем будем называть *явным одностадийным интерполяционным методом.*

Отметим, что вычислительная схема (10.1) идентична одностадийному методу Рунге-Кутты [6, 7]. Обратим внимание также на то, что аппроксимации (9) представляют собой интерполяционные многочлены Лагранжа [6, 7], построенные по одному узлу t_{m-1}. Очевидно, что повышение точности интерполяции можно достичь, применяя на каждой сеточной ячейке $[t_{m-1}, t_m]$ дополнительную вспомогательную сетку $\{z_j\}_{j=0}^{N}$:

$$t_{m-1} = z_0 < z_1 < \ldots < z_j < \ldots < z_N = t_m, \ m = 1,2,\ldots,$$

$$z_j = z_0 + \lambda_j \tau, \ j = \overline{0,N}, \ 0 = \lambda_0 < \lambda_1 < \ldots < \lambda_j < \ldots < \lambda_N = 1,$$

где величины $\{\lambda_j\}_{j=1}^{N-1}$ – параметры метода. Таким образом, выполняя замену исходных подынтегральных функции в уравнении (8) соответствующими многочленами Лагранжа, построенными по N вспомогательным узлам, можно получить явный N-стадийный интерполяционный метод, представляющий собой интерполяционный аналог классического N-стадийного метода Рунге-Кутты.

Явный одностадийный проекционный метод. При построении данной вычислительной схемы будем основываться на проекционном варианте интегро-интерполяционного метода, предложенном в работе [8].

Перепишем уравнение из системы (5) в виде:

$$\frac{du}{dt}(\zeta,t) + a(\zeta,\zeta)u(\zeta,t) = -\sum_{\substack{\eta\in\omega \\ \eta\neq\zeta}} a(\zeta,\eta)u(\eta,t) + f(\zeta,t), \ \zeta\in\omega, \ t>0. \tag{11}$$

Умножим уравнение (11) на произвольную тестовую функцию $v(\zeta,t)$, результат проинтегрируем по сеточной ячейке $[t_{m-1}, t_m]$. Получим равенство:

$$(uv)(\zeta,t)\Big|_{z_0}^{z_j} - \int_{z_0}^{z_j} u(\zeta,t)\left[\frac{dv(\zeta,t)}{dt} - a(\zeta,\zeta)v(\zeta,t)\right]dt = -\int_{z_0}^{z_j}\left[\sum_{\substack{\eta\in\omega \\ \eta\neq\zeta}} a(\zeta,\eta)u(\eta,t) - f(\zeta,t)\right]v(\zeta,t)\,dt. \tag{12}$$

Тестовую функцию $v(\zeta,t)$ выберем так, чтобы она являлась решением задачи:

$$\begin{cases} \dfrac{dv}{dt}(\zeta,t) - a(\zeta,\zeta)v(\zeta,t) = 0, \quad \zeta\in\mathring{\omega}, \quad t\in[t_m, t_{m-1}], \\ v(\zeta,t_m) = 1; \end{cases} \tag{13}$$

что позволяет обратить в ноль интеграл в левой части уравнения (12).

Учитывая, что решение задачи (13) имеет вид:

$$v(\zeta,t) = e^{a(\zeta,\zeta)(t-t_m)}, \tag{14}$$

из (12) получим равенство:

$$u(\zeta,t_m) = u(\zeta,t_{m-1})e^{-\tau a(\zeta,\zeta)} + \int_{t_{m-1}}^{t_m}\left[f(\zeta,t) - \sum_{\substack{\eta\in\omega \\ \eta\neq\zeta}} a(\zeta,\eta)u(\eta,t)\right]e^{a(\zeta,\zeta)(t-t_m)}dt\,. \tag{15}$$

Применяя в уравнении (15) ту же самую интерполяцию (9), получим вычислительную схему:

$$u(\zeta,t_m) = u(\zeta,t_{m-1})e^{-\tau a(\zeta,\zeta)} + \frac{1-e^{-\tau a(\zeta,\zeta)}}{a(\zeta,\zeta)}\left[f(\zeta,t_{m-1}) - \sum_{\substack{\eta\in\omega \\ \eta\neq\zeta}} a(\zeta,\eta)u(\eta,t_{m-1})\right], \ \zeta\in\mathring{\omega}, \ m = 1,2,\ldots, \tag{16.1}$$

или в операторной форме:

$$u(\zeta,t_m) = u(\zeta,t_{m-1}) + \tau\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))\left[f(\zeta,t_{m-1}) - Au(\zeta,t_{m-1})\right], \ \zeta\in\mathring{\omega}, \ m = 1,2,\ldots. \tag{16.2}$$

где

$$\alpha(z)=\frac{1-e^{-z}}{z},\ z>0, \tag{17}$$

вспомогательная функция. Вычислительную схему (16.1) (или (16.2)) в дальнейшем будем называть *явным одностадийным проекционным методом.* Аналогично, как это было отмечено выше для явного интерполяционного метода, явный проекционный метод также может быть обобщен для случая *N*-стадийного варианта.

Неявный одностадийный проекционный метод. Вернемся к уравнению (15), где заменим функцию $u(\zeta,t)$ интерполяционным многочленом Лагранжа, построенным по двум узлам t_{m-1} и t_m:

$$u(\zeta,t)\approx\frac{1}{\tau}\left[(t-t_{m-1})u(\zeta,t_m)-(t-t_m)u(\zeta,t_{m-1})\right], \tag{18}$$

а для функции $f(\zeta,t)$ применим ту же самую интерполяцию из (9). Получим равенство:

$$u(\zeta,t_m)=u(\zeta,t_{m-1})e^{-\tau a(\zeta,\zeta)}+\tau\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))f(\zeta,t_{m-1})-$$
$$-\left(\frac{1-\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))}{a(\zeta,\zeta)}\sum_{\substack{\eta\in\omega\\ \eta\neq\zeta}}a(\zeta,\eta)u(\zeta,t_m)-\frac{e^{-\tau a(\zeta,\zeta)}-\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))}{a(\zeta,\zeta)}\sum_{\substack{\eta\in\omega\\ \eta\neq\zeta}}a(\zeta,\eta)u(\zeta,t_{m-1})\right),$$
$$\zeta\in\mathring{\omega},m=1,2,... \tag{19.1}$$

или в операторной форме:

$$u(\zeta,t_m)=u(\zeta,t_{m-1})-\frac{1-\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))}{a(\zeta,\zeta)\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))}Au(\zeta,t_m)-\frac{\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))-e^{-\tau a(\zeta,\zeta)}}{a(\zeta,\zeta)\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))}Au(\zeta,t_{m-1})+\tau f(\zeta,t_{m-1}),$$
$$\zeta\in\mathring{\omega},m=1,2,... \tag{19.2}$$

Введем вспомогательную функцию

$$\mu(z)\equiv cth(z)-\frac{1}{z},$$

тогда

$$\frac{1-\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))}{a(\zeta,\zeta)\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))}=\tau\frac{1+\mu\left(\frac{\tau a(\zeta,\zeta)}{2}\right)}{2}\ \text{и}\ \frac{\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))-e^{-\tau a(\zeta,\zeta)}}{a(\zeta,\zeta)\alpha(\tau a(\zeta,\zeta))}=\tau\frac{1-\mu\left(\frac{\tau a(\zeta,\zeta)}{2}\right)}{2},$$

а значит, уравнение (19.2) примет вид:

$$u(\zeta,t_m)=u(\zeta,t_{m-1})+\tau\left[f(\zeta,t_{m-1})-\frac{1+\mu\left(\frac{\tau a(\zeta,\zeta)}{2}\right)}{2}Au(\zeta,t_m)-\frac{1-\mu\left(\frac{\tau a(\zeta,\zeta)}{2}\right)}{2}Au(\zeta,t_{m-1})\right],$$
$$\zeta\in\mathring{\omega},m=1,2,... \tag{20}$$

Вычислительную схему (20) в дальнейшем будем называть *неявным одностадийным проекционным методом* ввиду того, что искомая величина $u(\zeta,t_m)$ присутствует и в левой, и в правой частях уравнения (20). С учетом структуры оператора *A*, описанной в (6), для разрешения уравнения (20) на каждом шаге по времени необходимо рассматривать систему

линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей коэффициентов в левой части, которые, как известно [6, 7], решаются методом прогонки.

Аналогично, как это было отмечено выше для явного интерполяционного метода, неявный проекционный метод также может быть обобщен для случая *N*-стадийного варианта.

Тестовая задача.

В рамках данной работы в качестве тестовой задачи рассматривалось уравнение Фишера-Колмогорова

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + ru(1-u), \tag{21}$$

где r – коэффициент реакции. Для данного уравнения известно семейство аналитических решений

$$u(x,t) = \frac{1}{4}\left[1 - \tanh\left(\frac{\sqrt{r}}{2\sqrt{6\varepsilon}}\left(x - \frac{5\sqrt{\varepsilon r}}{\sqrt{6}}t\right)\right)\right]^2. \tag{22}$$

Таким образом, соответствующая начально-краевая задача (1)-(3) имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial t} = \varepsilon \dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2} + ru(1-u), \quad r \geq 1, \quad x \in [-1,1], \quad t > 0; \\ u(-1,t) = 1, \quad u(1,t) = 0, \quad t \geq 0; \\ u(x,0) = \dfrac{1}{4}\left[1 - \tanh\left(\dfrac{\sqrt{r}}{2\sqrt{6\varepsilon}}x\right)\right]^2, \quad x \in [-1,1]. \end{cases} \tag{23}$$

Результаты численных экспериментов.

Для оценки точности предложенных методов в данной статье использовалась относительная погрешность, рассчитываемая на каждом шаге по времени по формуле:

$$Err = \frac{\max\limits_{1 \leq i \leq N} \left| u(x_i,t) - v_i \right|}{\max\limits_{1 \leq i \leq N} \left| u(x_i,t) \right|}, \tag{24}$$

где $u(x_i,t)$ и v_i – точное и приближенное значения решения в узле x_i, $i = \overline{1,n}$.

Численные эксперименты были проведены для различных наборов параметров тестовой задачи (23) и вычислительных алгоритмов. Результаты показали, что явный одностадийный интерполяционный метод условно устойчив, то есть устойчиво работает, если выполняется условие $K \leq 0,5$, где $K = \dfrac{\varepsilon\tau}{h^2}$ – число Куранта. При этом явный и неявный проекционные методы также позволяют получить достаточно точный результат (см. табл. 1).

Таблица 1 – Погрешности решения тестовой задачи (23) при $r = 1$ и $\varepsilon = 0.005$

Вычислительная сетка $n \times M$		33 × 65	65 × 127	127 × 257
Число Куранта *K*		0,03938	0,08063	0,15444
Погрешности, вычисленные по формуле (24) на последнем шаге по времени				
Метод	Явный интерполяционный	0,533%	0,259%	0,124%
	Явный проекционный	2,33%	3,229%	6,985%
	Неявный проекционный	0,519%	0,246%	0,118%

Нарушение условия $K \le 0,5$ (например, при увеличении параметра τ или при использовании достаточно малого значения h) приводит к потере устойчивости явного интерполяционного метода (осцилляции, накопление погрешности, расхождение вычислительного процесса). В таких случаях применение явных и неявных проекционных схем позволяет получать более точное решение.

На рисунках 1–3 приведены примеры решения тестовой задачи (23) при $r = 3$ и $\varepsilon = 0.005$: красным цветом изображено точное решение соответствующей задачи, вычисленное по формуле (22); синим цветом – приближенное решение, полученное одним из предложенных методов. Для расчетов использовалась сетка с 127×67 (число Куранта $K \approx 0,592$). Из приведенных примеров видно, что решение, полученное с помощью явного интерполяционного метода, характеризуется значительными осцилляциями и отклонением от точного решения задачи (23) (рисунок 1). Приближенное решение, полученное с помощью явного проекционного метода, более устойчиво, но тем не менее характеризуется высокой погрешностью (рисунок 2). Неявный проекционный метод показал себя наилучшим образом – полученное решение устойчиво и достаточно точно (рисунок 3).

Дополнительные примеры сравнения эффективности предложенных численных методов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Погрешности решения тестовой задачи (23) при $r = 3$ и $\varepsilon = 0.005$

Вычислительная сетка $n \times M$		127 × 67	257 × 129	513 × 500
Число Куранта K		0,59239	1,27007	1,31072
Погрешности, вычисленные по формуле (24) на последнем шаге по времени				
Метод	Явный интерполяционный	1768,341%	∞%	∞%
	Явный проекционный	56,454%	74,496%	74,933%
	Неявный проекционный	2,605%	2,739%	0,728%

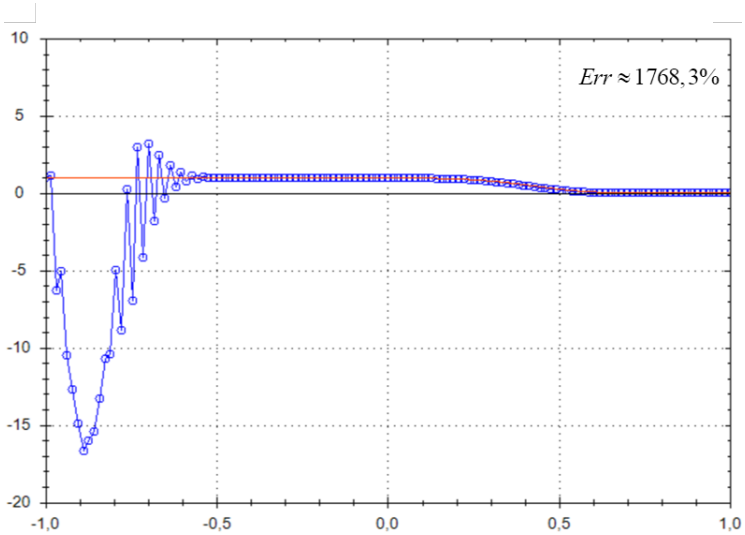


Рисунок 1 – Пример решения тестовой задачи (23) с помощью явного одностадийного интерполяционного метода

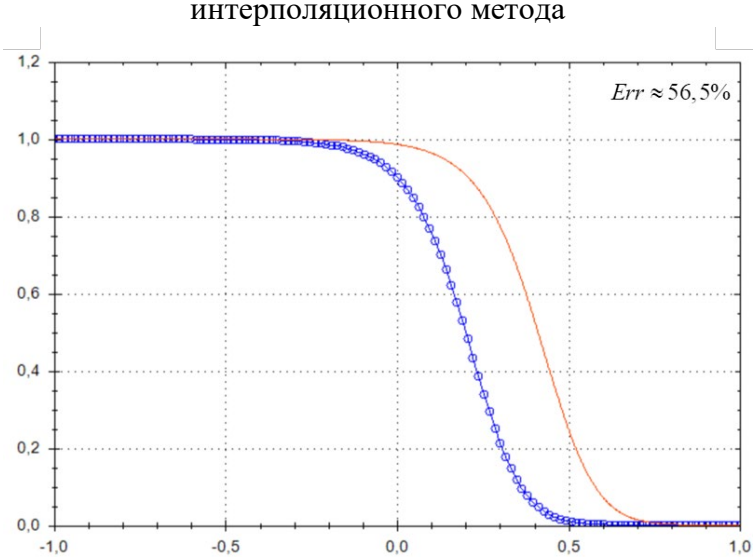


Рисунок 2 – Пример решения тестовой задачи (23) с помощью явного одностадийного проекционного метода

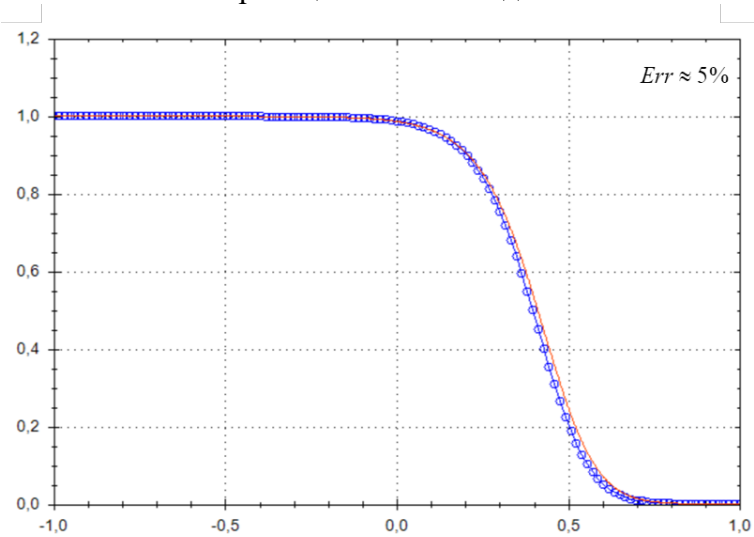


Рисунок 3 – Пример решения тестовой задачи (23) с помощью неявного одностадийного проекционного метода

Выводы.

Таким образом, в данной работе построены и протестированы три одностадийных вычислительных алгоритма для решения нелинейной задачи диффузии-реакции: явный интерполяционный метод, явный проекционный метод и неявный проекционный метод.

Тестирование предложенных алгоритмов выполнялось на тестовой задаче – начально-краевой задаче для уравнения Фишера-Колмогорова с известным точным решением.

Результаты численных экспериментов показали, что явный интерполяционный метод является условно устойчивым, то есть хорошо работает в случае, когда выполняется условие $\frac{\varepsilon\tau}{h^2} \le 0,5$, а при нарушении данного условия метод может осциллировать и приводить к высоким погрешностям приближенного решения.

Явный проекционный метод оказался безусловно устойчивым, но, тем не менее, приближенные решения характеризуются низкой точностью (преимущественно из-за «отставания» от аналитического решения – фазового запаздывания).

Наибольшей вычислительной эффективностью среди рассмотренных методов характеризуется неявный проекционный метод, обладающий свойством безусловной устойчивости и хорошей сходимостью.

Дополнительно отметим предположение о том, что увеличение количества вычислительных стадий позволит улучшить результаты для всех трех методов. Данное предположение будет исследовано в следующих работах авторов.

Литература

1. Iannelli M., Pugliese A. An introduction to mathematical population dynamics: along the trail of Volterra and Lotka. Vol. 79. Springer. 2015. 351 p.
2. Cherniha R. and Davydovych V. Nonlinear reaction-diffusion systems. Springer Lecture Notes in Mathematics LNM. 2196. 2017.
3. Cebrian-Lacasa D., Parra-Rivas P., Ruiz-Reynés D., and Gelens L. Six decades of the Fitzhugh–Nagumo model: A guide through its spatio-temporal dynamics and influence across disciplines // Physics Reports. 2024. 1096. 1–39.
4. Abakumov A.I., Izrailsky Y.G., et al. Model method of vertical chlorophyll concentration reconstruction from satellite data // Computer research and modeling. 2013. 5 (3). 473–482.
5. Kochergin V.P. and Sklyar S.N. Semianalytical version of approximation of system of equations in the ‘b-ε’ turbulence model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 1992. Vol. 7. No. 5. Pp. 405-418.
6. Samarskiy A.A., Gulin A.V. Numerical methods: Textbook for universities. Moscow: Nauka. Gl. ed. fiz-mat. litt. 1989. 432 p.
7. Samarskiy A.A. Theory of difference schemes: textbook. Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature. Moscow: Nauka Publishing Housею 1977. 656 p.
8. 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.

УДК 622.235

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ФРАКЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Доскожоева Н.М., Майрамбекова А.М.
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. Конечным итогом применения математических методов в производстве является оперативное управление факторами себестоимости его продукции.

В горном производстве более 60% текущих затрат составляют карьернофабричные затраты, связанные с выполнением буровзрывных, погрузочно-транспортных работ и работ дробления, измельчения взорванной породы на фабрике, из которых порядка 50% составляет стоимость энергетических затрат, по этому их оперативная минимизация является актуальной проблемой для всех добывающих горных предприятий.

Результаты опытно-промышленных испытаний фракционно-энергетической модели БВР (Кумтор).

Условия эксперимента:

- Материал – филлиты светлые, прочность породы изменяется от средней до довольно крепкой или по шкале Протодьяконова – f = 4–9.
- Бурение осуществлялось долотом диаметром – 200 мм, тип долота - III 200-ТЗ-ПГВ, компания ПТО «Агрострой», марка GLUBUR, Беларусь.
- Средняя глубина скважин – 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 БВР

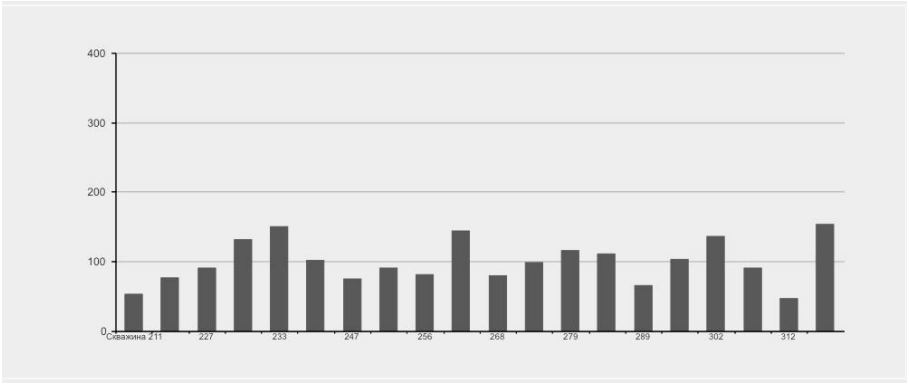


Рисунок 1 – Удельная энергоёмкость бурения

Удельная энергоёмкость бурения – это энергия, необходимая для разрушения единицы объёма горной породы в процессе бурения.

Энергоемкость бурение:

$$\mathrm{E_{бр}} = 8 * \mathrm{M_{вр}} * n/v * d_{\mathrm{ск}}^2 \quad (1)$$

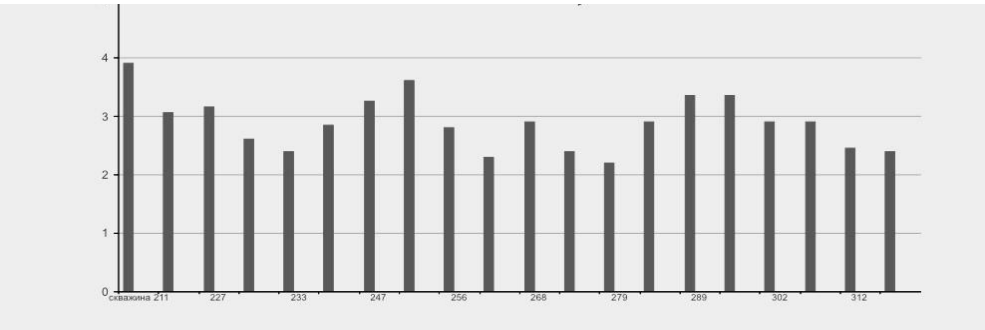


Рисунок 2 – Средний размер осколка бурового шлама по скважинам, мм

Средний размер осколка бурового шлама по скважинам – это характеристика 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).

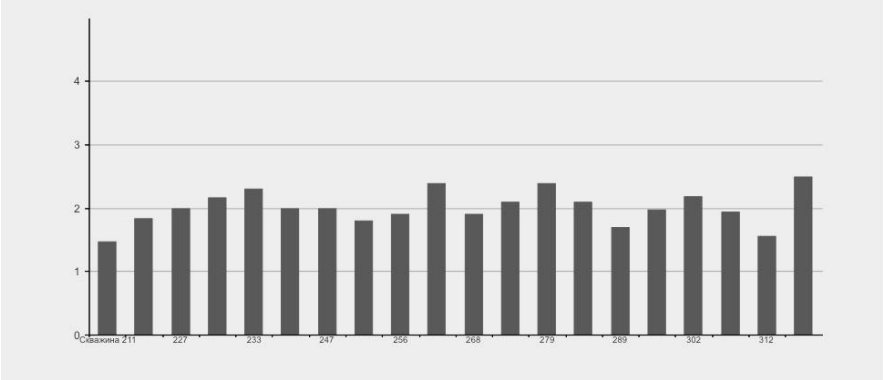


Рисунок 3 – Расчётная энергоёмкость взрывания

Энергоемкость взрывания $E_{\mathrm{вз}}$, мДж/м^3:

$$E_{\mathrm{вз}} = \frac{E_{\mathrm{бр}} * d_{\mathrm{бм}}}{d_{\mathrm{ср}}} \quad (2)$$

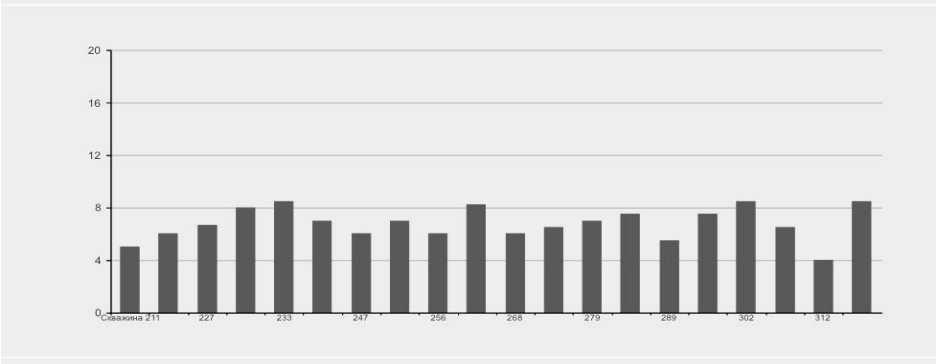


Рисунок 4 – Расчётная крепость породы по шкале Протодьяконова

Таблица 1 – Оценка адекватности модели удельной энергоёмкости бурения [1]

f	$E_{бр}^{(экс)}$, мДж/м^3	$E_{бр}^{(Р)}$, 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

f – крепость породы по М. М. Протодьяконову.

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 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 [2]. 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 534.23:550.837.211

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «MTMONDATAPROC» ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Забинякова О.Б.
perah.92@inbox.ru
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

В данной работе приводится краткая информация о программном комплексе «MTMonDataProc», разработанном в Научной станции РАН и применяемом при обработке данных магнитотеллурического мониторинга.

Ключевые слова: мониторинговые наблюдения, метод магнитотеллурического зондирования, программное обеспечение.

Введение. На протяжении многих лет выполнение мониторинговых наблюдений методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) является одним из основных направлений исследований лаборатории глубинных магнитотеллурических исследований Научной станции РАН в г. Бишкеке [1-11]. Тем не менее актуальным остается вопрос разработки современного и удобного программного обеспечения для автоматизированной обработки больших объемов данных МТ-мониторинга.

В данной работе приводится краткая информация о программном комплексе «MTMonDataProc» [12] и демонстрируются результаты его применения на примере данных, полученных в МТ-пункте «Боом».

Мониторинговые магнитотеллурические наблюдения (на примере МТ-пункта «Боом»).

В июле 2025 г. сотрудниками лаборатории ЛГМИ НС РАН была продолжена работа по мониторингу электромагнитных параметров методом глубинного магнитотеллурического зондирования в пункте «Боом». Наблюдения выполнялись в течение ~6,5 суток (158 часов) с применением стандартной методики полевых измерений, принятой в Научной станции РАН. Данная локация находится на достаточном удалении от жилых и промышленных объектов, в связи с чем уровень шумов и помех здесь достаточно низок, что позволяет получать полевые данные высокого качества.

Наблюденное электромагнитное поле (E_x, E_y – горизонтальные компоненты электрической напряженности; H_x, H_y, H_z – компоненты магнитной напряженности; ось x направлена на север, ось y – на восток) было разделено на серию часовых непересекающихся записей, каждая из которых в последующем обрабатывалась независимо. В итоге был получен отклик геологической среды на естественное электромагнитное поле Земли, отражающийся в частотно-временных рядах для основных магнитотеллурических параметров:

– тензора импеданса Z с компонентами Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}, характеризующими связь между электрической и магнитной напряженностями;

– матрицы Визе-Паркинсона (вектор типпера) с компонентами W_x, W_y, характеризующими связь горизонтальных магнитных компонент с соответствующей вертикальной составляющей магнитного поля.

В Научной станции РАН такие частотно-временные ряды хранятся в виде ансамблей файлов в формате *.edi (международный формат хранения геофизических данных), сгруппированных в отдельной папке и упорядоченных по времени.



Рисунок 1 – Местоположение мониторингового МТ-пункта «Боом»

Программа для обработки данных магнитотеллурического мониторинга MTMonDataProc. Для автоматизированной работы с описанными мониторинговыми данными был разработан сервисный программный комплекс *MTMonDataProc* [12], предоставляющий следующие возможности:

- конвертация данных МТ-мониторинга в табличный формат;
- визуализация данных МТ-мониторинга в виде сводной интерактивной таблицы;
- визуализация данных МТ-мониторинга в виде графиков основных параметров в частотном и временном разрезах;
- визуализация данных МТ-мониторинга в виде цветовых карт распределения основных параметров во временной и частотной областях.

Функциональность программы реализована на основе клиент-серверной архитектуры. Все вычислительные операции, включая загрузку и обработку данных, формирование таблиц и построение интерактивных графиков, выполняются на стороне сервера. Клиентская часть представляет собой веб-интерфейс, доступ к которому может осуществляться как локально, так и с удаленных компьютеров внутри сети.

Сервисный программный комплекс *MTMonDataProc* состоит из двух основных модулей – *EDI_reader.py* и *EDI_viewer.py,* реализованных в виде программного кода на языке Python версии 3.x.

Модуль ***EDI_reader.py*** выполняет функцию конвертации исходных данных МТ-мониторинга в табличный формат и сохраняет итоговую сводную таблицу с данными в формате xlsx-файла.

Модуль ***EDI_viewer.py*** работает в виде динамической web-страницы, загружаемой на локальном персональном компьютере. Стартовая страница модуля позволяет загрузить сводный xlsx-файл с данными МТ-мониторинга, а также указать дату и время начала мониторинговых наблюдений (рисунок 2).

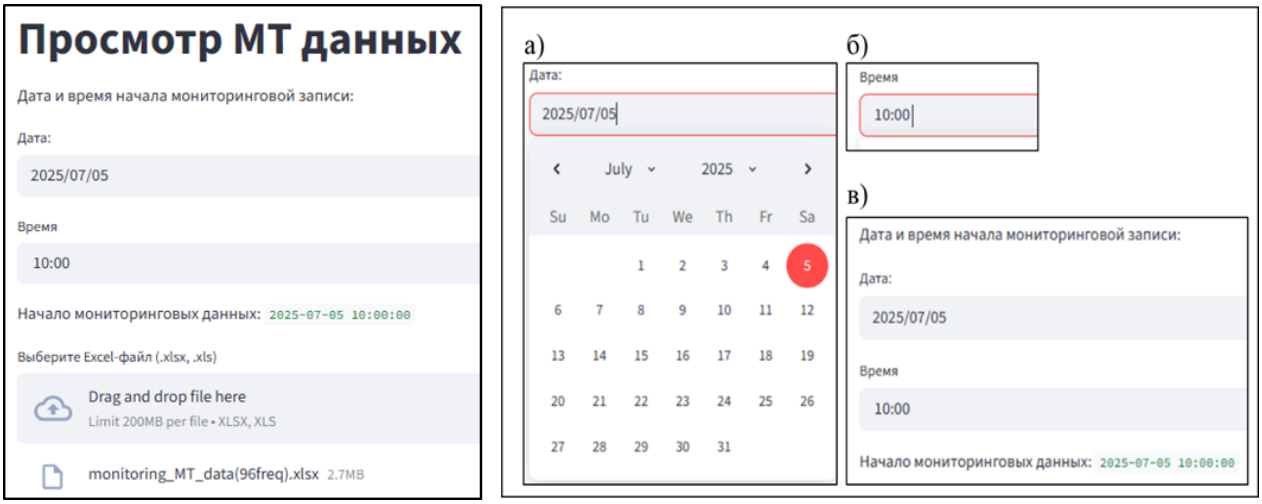


Рисунок 2 – Загрузка xlsx-файла с данными МТ-мониторинга в приложение *EDI_viewer*

Далее для работы становятся доступны несколько вкладок. Вкладка «Таблица» (рисунок 3) позволяет отображать выбранный xlsx-файл в виде сводной интерактивной таблицы, в которой можно выполнять сортировку данных по любому столбцу, менять местами колонки, выполнять поиск интересующих величин.

Вкладка «Визуализация МТ-кривых» позволяет просматривать графики магнитотеллурических параметров для выбранного момента времени (рисунок 3). Графики поддаются масштабированию, могут быть сохранены в виде *.png и *.html файлов. Также есть возможность выбора параметра для горизонтальной оси – частота, период или логарифм из периода.

Вкладка «Визуализация временных рядов» позволяет просматривать динамические изменения магнитотеллурических параметров на выбранной частоте (рисунок 3). Графики поддаются масштабированию, могут быть сохранены в виде *.png и *.html файлов.

Вкладка «Вариации» позволяет просматривать цветовые карты распределения основных мониторинговых параметров во временной и частотной областях (рисунок 3). Изображения поддаются масштабированию, могут быть сохранены в виде *.png и *.html файлов. Также есть возможность выбора параметра для вертикальной оси – частота, период или логарифм из периода.

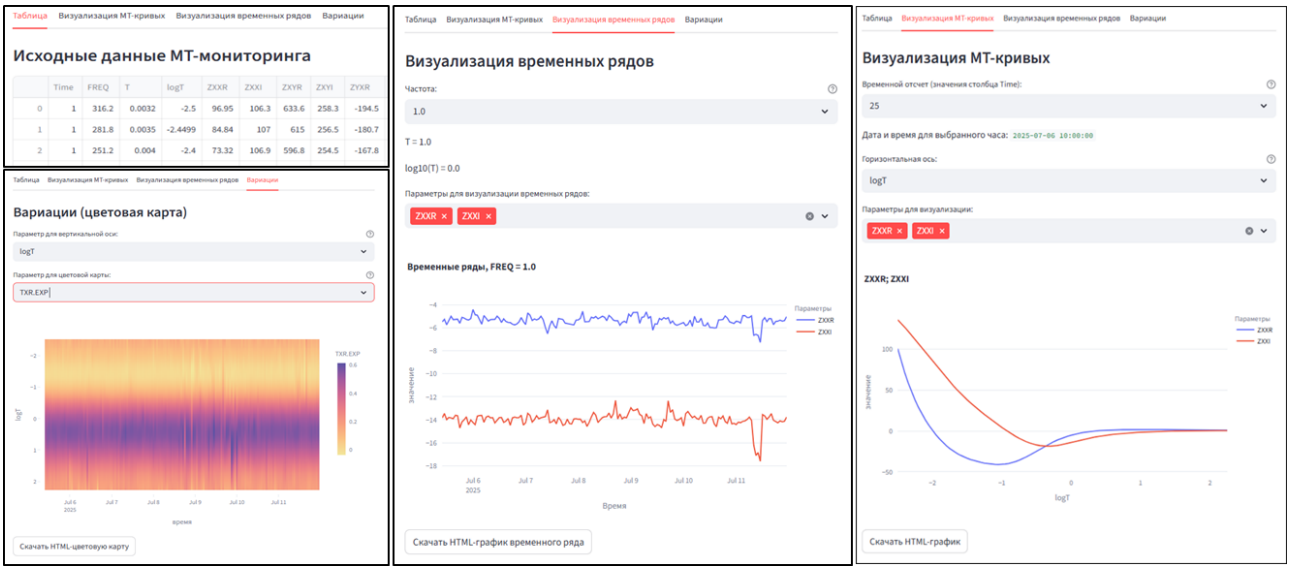


Рисунок 3 – Внешний вид рабочих вкладок

Результаты первичной обработки мониторинговых магнитотеллурических наблюдений в пункте «Боом». На рисунках 4–7 изображены вариации параметров Z_{xy}, Z_{yx}, и W_x, W_y, полученные по данным, наблюденным в пункте «Боом», и пересчитанные на различные азимуты (от 0° до 180° с шагом 15°) в соответствии с теорией, изложенной в монографии [13].

Для детального анализа полученных распределения необходимо сопоставление этих данных с другими геофизическими данными. Тем не менее, на первый взгляд справедливы следующие закономерности:

- наиболее интенсивные вариации компонент тензора импеданса наблюдаются для периодов T > 1 *c*;
- для компонент Z_{xy}, Z_{yx} прослеживается их ортогональность в том смысле, что чувствительность компоненты Z_{xy} более ярко проявляется в азимутах 0°-45° и 135°-180° (область направлений, тяготеющих к меридиональному направлению), чувствительность компоненты Z_{yx} более ярко проявляется в азимутах 45°-135° (область направлений, тяготеющих к широтному направлению);
- в целом амплитуды вариаций компонент Z_{xy}, Z_{yx} превышают Z_{xx}, Z_{yy}, что может свидетельствовать о квазидвумерности изучаемой среды под пунктом зондирования;
- в магнитных компонентах W_x и W_y заметны очевидные аномалии. Так аномалии, соответствующие 6 июля в окрестности 10:00 сопоставимы с возбужденным состоянием магнитосферы, а также с магнитной бурей (рис. 8). Также можно предположить, что смена знака вариаций действительных компонент W_x и W_y в утреннее время 7 июля и аномалия этих компонент в полуденное время 11 июля тоже соответствуют магнитной буре и возбужденному состоянию магнитосферы. При этом очевидно, что упомянутые аномалии значительно слабее вариаций, наблюдаемых 8-9 июля – для установления причин возникновения этих аномалий необходимо проводит дополнительный анализ. Тем не менее понятно, что эти вариации не являются последствием некорректной обработки данных, так как соответствующие изменения прослеживаются для указанного времени и в компонентах тензора импеданса.

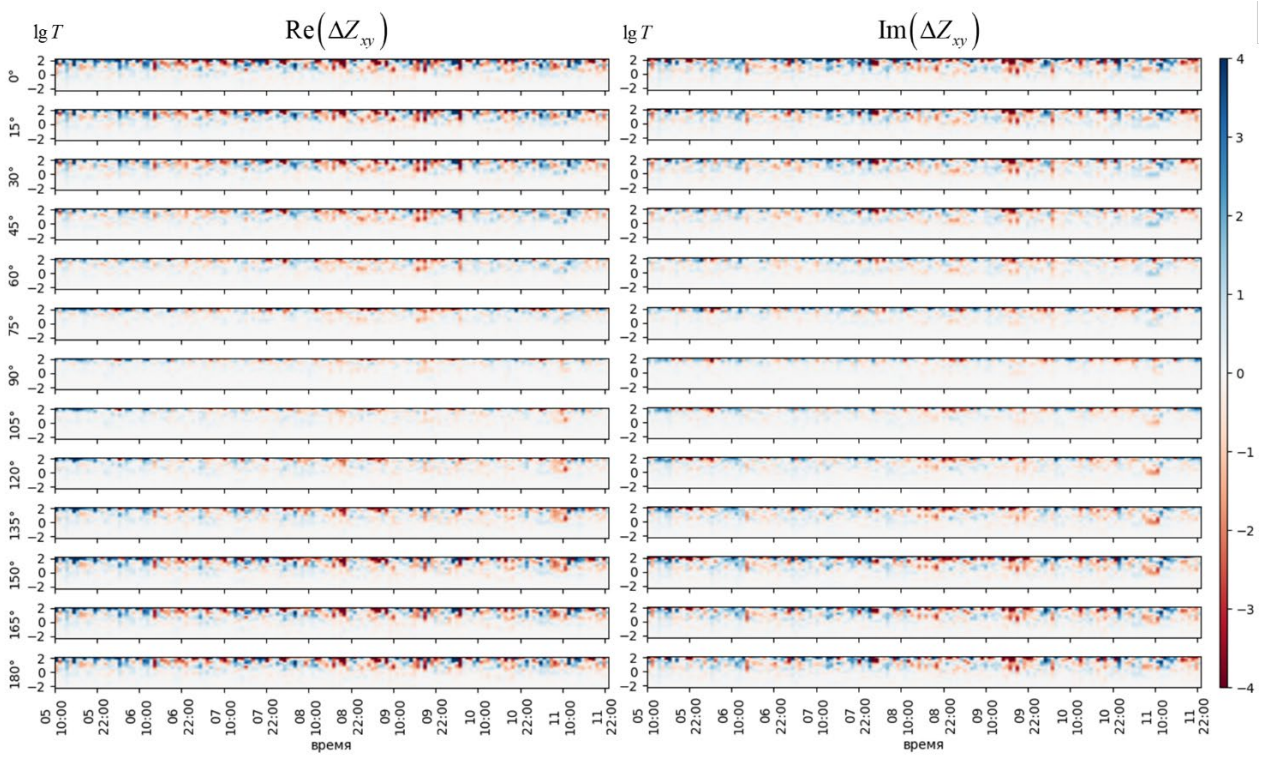


Рисунок 4 – Азимутальные вариации действительной и мнимой частей компоненты Z_{xy}

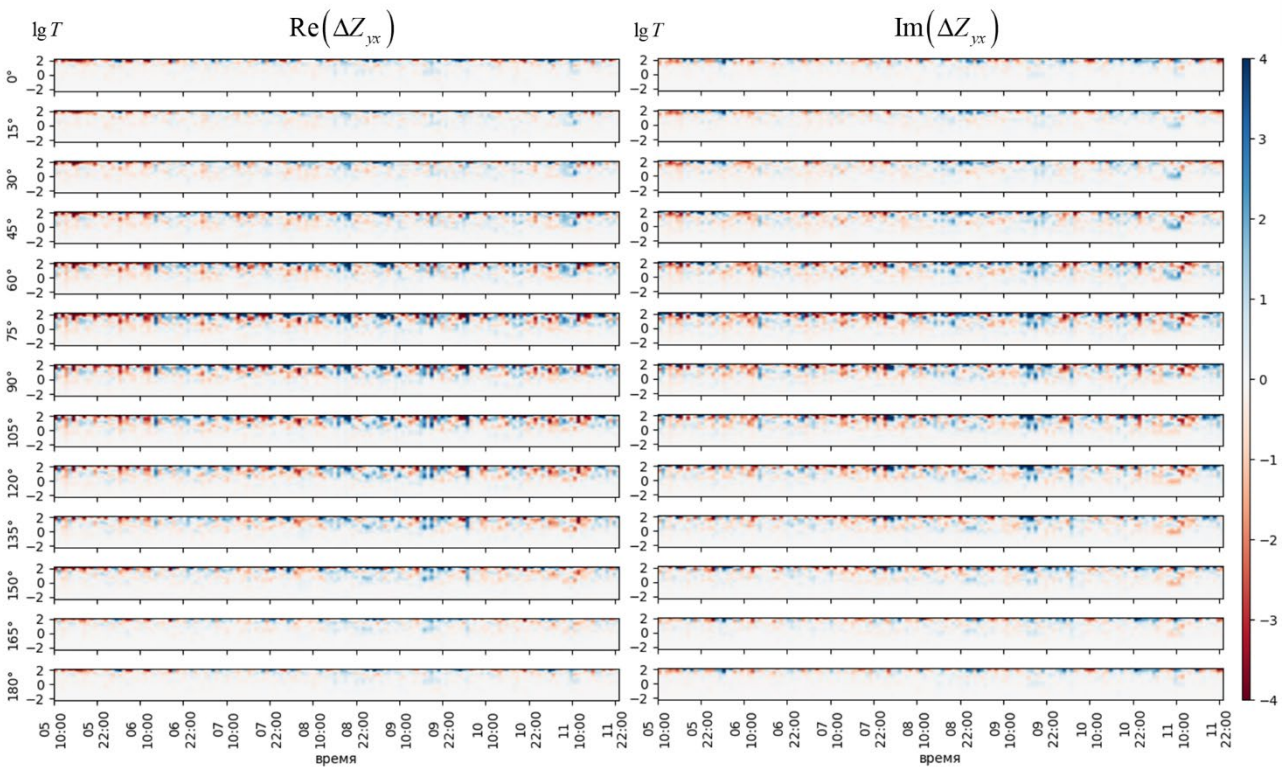


Рисунок 5 – Азимутальные вариации действительной и мнимой частей компоненты Z_{yx}

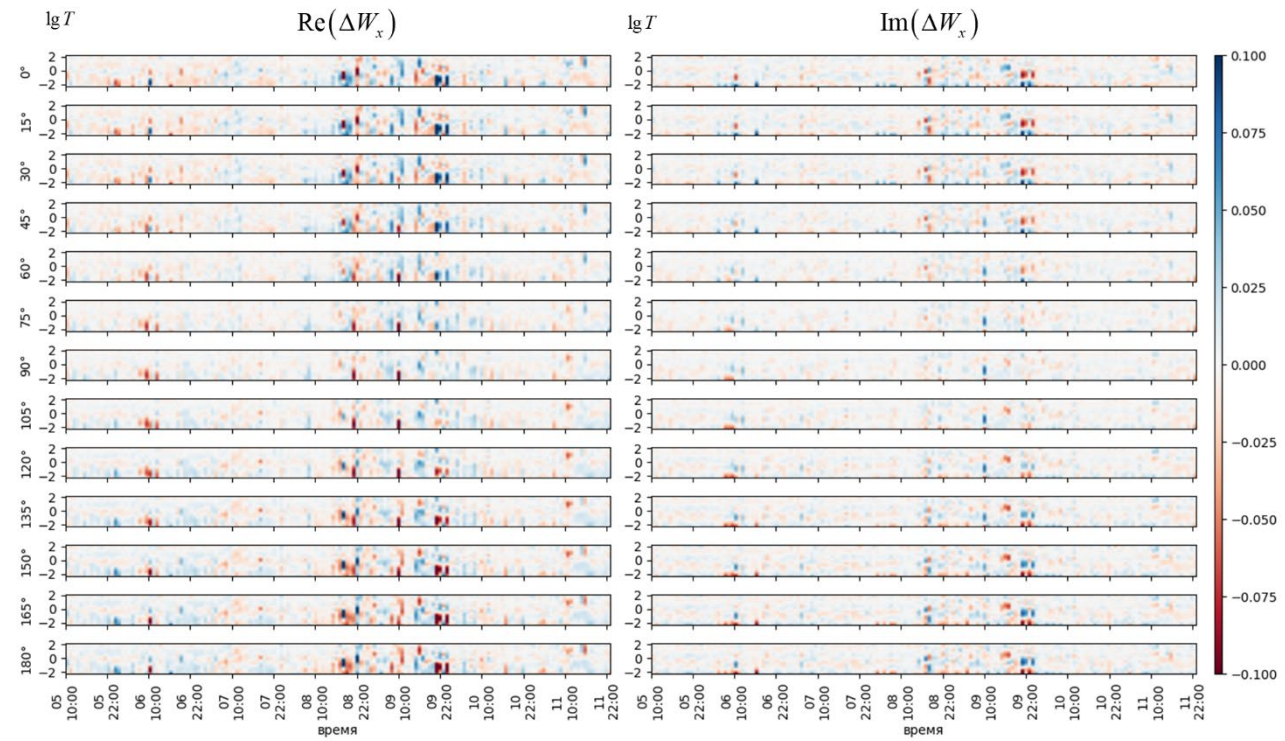


Рисунок 6 – Азимутальные вариации действительной и мнимой частей компоненты W_x

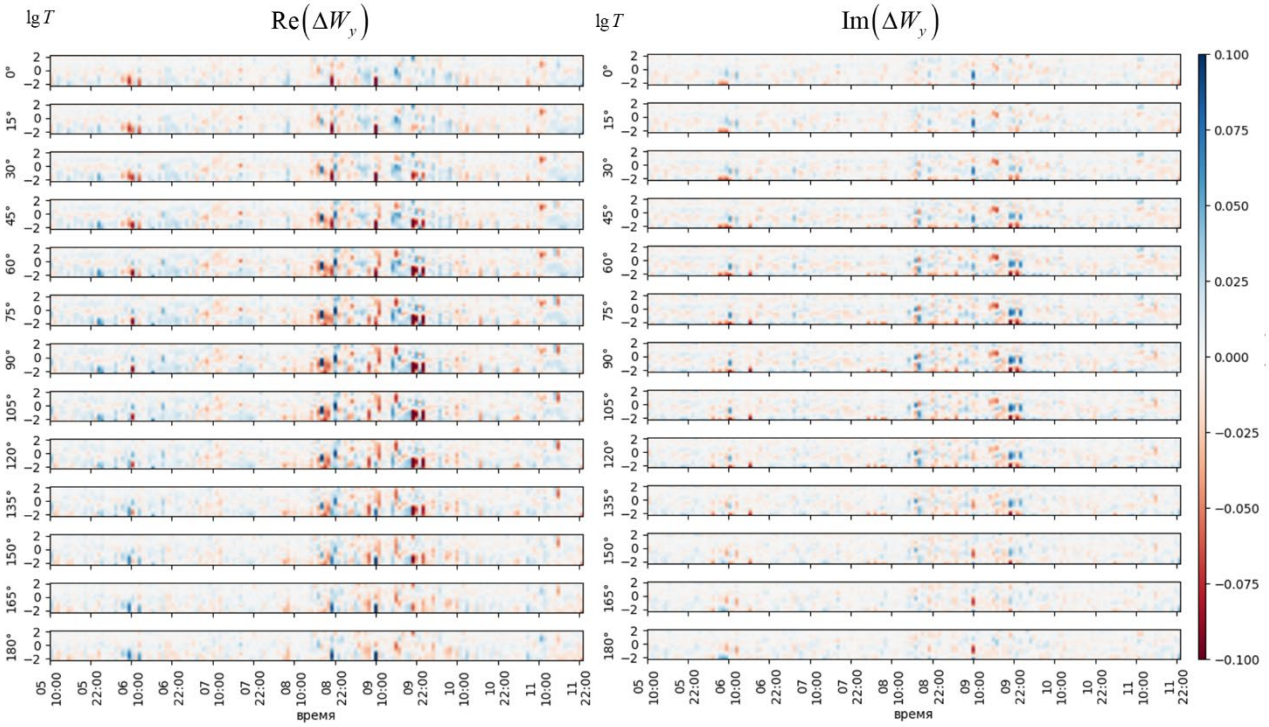


Рисунок 7 – Азимутальные вариации действительной и мнимой частей компоненты W_y



Рисунок 8 – Изменения максимального суточного геомагнитного индекса Kp в июле 2025 года для средних широт по данным лаборатории солнечной астрономии ИКИ РАН и ИСЗФ РАН (https://xras.ru)

Результаты, представленные в данной работе, получены в рамках выполнения государственного задания Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке.

Литература

1. 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 КРСУ. 2011. Т. 11. № 4. С. 29-40.
2. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Часть 1. Анализ данных магнитотеллурического мониторинга // Вестник КРСУ. 2014. Т. 14. № 7. С. 3-7.
3. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Часть 2. Разработка программного обеспечения для анализа данных МТ-мониторинга // Вестник КРСУ. 2014. Т. 14. № 7. С. 8-12.
4. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Проявление разломных структур в электромагнитных параметрах (для территории Центрального Тянь-Шаня) // Вестник КРСУ. 2015. Т. 15. № 9. С. 160-164.
5. Баталева Е.А. Корреляционные зависимости электромагнитных и деформационных параметров // Доклады академии наук. 2016. Т. 468. № 3. С. 319–322.
6. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Анализ результатов Камбаратинского эксперимента с привлечением методики синхронных измерений // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 1. С. 181-184.
7. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Детальный ретроспективный анализ данных магнитотеллурического мониторинга (Бишкекский геодинамический полигон) // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 12. С. 141-144.
8. Баталева Е.А., Воронцова Е.В., Баталев В.Ю. Корреляция индексов геомагнитной активности и вариаций частотно-временных рядов параметров // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 12. С. 137-140.
9. Баталева Е.А., Забинякова О.Б., Баталев В.Ю. Разработка программного обеспечения для мониторинга электромагнитных параметров Бишкекского геодинамического прогностического полигона // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 8. С. 144-149.
10. Баталева Е.А., Забинякова О.Б., Баталев В.Ю. Разработка программного обеспечения для профильного магнитотеллурического мониторинга миниполигона Кентор // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 8. С. 150-153.
11. Баталева Е.А., Мухамадеева В.А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 2. С. 461–487.
12. Забинякова О.Б., Имашев С.А. Программа для обработки данных магнитотеллурического мониторинга MTMonDataProc. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026610130, дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 13.01.2026. Правообладатель: ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкеке.
13. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 680 с.

УДК 624.012.45:624.042.7

ВЛИЯНИЕ ЗЕЛЕНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ РАСПОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ

Зулпуев А.М., Казакова К.К., Ли Ю.
dirar58@mail.ru, kanikey_kazakova@mail.ru
Ошский технологический университет им. М.М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан

В данной статье рассматривается влияние зелёной инфраструктуры (вертикальное озеленение, насыпи с растительностью, зелёные крыши) на динамическое поведение и долговечность распорных железобетонных плит перекрытий в сейсмоактивных регионах. Моделирование сейсмических воздействий показало, что элементы зелёной инфраструктуры изменяют характеристики возбуждения колебаний за счёт дополнительной массы и демпфирующих свойств почвенно-растительных слоёв. Введение зелёной насыпи на покрытия улучшает амортизационные характеристики конструкции, снижая максимальные ускорения на 8–15 %, а также увеличивает срок службы плиты за счёт замедления развития трещин. Анализ данных виброакустического мониторинга и численного моделирования указывает на статистически значимое улучшение динамических характеристик по сравнению с эталонными плитами без озеленения. Результаты исследования имеют практическое значение для сейсмостойкого проектирования и эксплуатации перекрытий в условиях интенсивной сейсмической активности.

Ключевые слова: зелёная инфраструктура, сейсмическое воздействие, железобетонные плиты, динамика, долговечность, вибродиагностика, растительный слой.

Введение. Возведение объектов на современных сейсмоопасных территориях накладывает жесткие требования на прочностные и эксплуатационные свойства несущих элементов, в частности, на распорные железобетонные плиты перекрытий, повсеместно внедряемые в многоэтажном строительстве. В фазе прохождения сейсмической волны данные конструктивные элементы претерпевают сложные пространственные динамические деформации, включая высокочастотные колебания, крутящие моменты и изгибающие напряжения. Подобные факторы инициируют раскрытие деструктивных трещин, падение остаточной несущей способности и ускоренную деградацию конструкций [1, 2].

В качестве одного из инновационных векторов повышения сейсмобезопасности выступает интеграция систем урбоэкологии — вертикального озеленения фасадных систем, эко-покрытий и демпфирующих растительных прослоек. Данные решения не только оптимизируют экологические параметры городской среды, формируя благоприятный микроклимат, но и оказывают непосредственное стабилизирующее воздействие на волновой отклик перекрытий за счет изменения инерционных характеристик сооружения, диссипации энергии и упругого взаимодействия с основанием [1, 2, 3].

Цель исследования. Количественная оценка и качественный анализ влияния компонентов экологической инфраструктуры на параметры динамического отклика распорных межэтажных плит, эксплуатируемых в сейсмически нестабильных зонах, и обоснование их роли в увеличении долговечности конструктивных систем.

Задачи исследования.

— Выполнить вариантное проектирование плит перекрытий с интеграцией различных типов ландшафтно-экологических модулей;

— Верифицировать и сопоставить базовые динамические показатели исследуемых элементов: амплитудно-частотные характеристики, пиковые ускорения и логарифмические декременты затухания;

— Организовать натурный виброакустический мониторинг опытных фрагментов зданий для последующей валидации численных моделей;

— Изучить специфику влияния вегетационных матриц на параметры выносливости бетона и вероятность раскрытия магистральных трещин;

— Сформулировать инженерно-технические рекомендации по практическому внедрению систем озеленения для повышения сейсмостойкости и долговечности дисков перекрытий [1, 2].

Актуальность исследования. Обусловлена тем, что традиционные схемы сейсмоусиления и капитального ремонта зданий сопряжены с колоссальными материально-техническими вложениями и высокой трудоемкостью. Применение растительных комплексов предлагает альтернативную синергетическую парадигму, совмещающую архитектурно-экологические выгоды и прирост конструктивной надежности сооружений. Между тем, строгие математические и численные обоснования механики взаимодействия грунтово-растительных массивов с колеблющимися железобетонными элементами в настоящее время представлены фрагментарно и требуют системной проработки [3, 4, 5].

Методы исследования. Для разрешения поставленных научно-технических задач был развернут комплексный исследовательский алгоритм, базирующийся на следующих подходах:

— **Численный эксперимент:** Расчеты выполнялись методом конечных элементов (МКЭ) в специализированной вычислительной среде ANSYS. Анализировались три принципиальные конструктивные схемы:

1. Контрольный (базовый) образец плиты (без экологических компонентов);
2. Перекрытие, сопряженное с эко-кровлей;
3. Плита с фланговыми (внешними) растительными насыпями.

— **Экспериментальный вибромониторинг:** Производилась инструментальная установка пьезоэлектрических акселерометров на пилотных объектах в районах с высокой сейсмической активностью. В ходе инструментальных замеров регистрировались кинематические параметры (амплитуды и виброускорения) при динамических толчках [4, 5].

— **Статистическая обработка информации:** Осуществлялся спектральный анализ частотных спектров, определялись критические экстремумы ускорений, выполнялось их сопоставление с контрольной серией испытаний.

Программа исследований охватывала математическое воспроизведение поведения конструкций при знакопеременных сейсмических нагрузках с верификацией расчетных данных натурными испытаниями.

В расчетных процедурах были зафиксированы:

— Предельные амплитуды виброускорений плит при различных комбинациях озеленения;

— Спектральный состав колебаний;

— Коэффициенты поглощения энергии (интенсивность затухания);

— Ресурс торможения микротрещинообразования и пролонгация жизненного цикла перекрытий.

Тестирование динамических свойств выявило, что присутствие элементов зеленой инфраструктуры гарантирует снижение амплитуды ускорений (таблица 1). Наиболее выраженное поглощение энергии колебаний отмечается при устройстве внешних вегетационных насыпей, что доказывает способность почвенных систем выступать эффективными демпферами [5, 6, 7].

Таблица 1– Динамические параметры перекрытий при сейсмодинамических нагрузках

Модификации плит	Пиковое ускорение (м/с²)	Амплитуда виброперемещений (мм)	Снижение виброускорения (%)
Контрольная (без озеленения)	2,40	10,3	0
С интегрированной эко-кровлей	2,10	8,9	12,5
С внешними вегетационными насыпями	2,02	8,6	15,8

Из представленной экспликации данных следует, что конструкции, снабженные растительными насыпями, обладают наилучшим потенциалом снижения инерционных сил — до 15,8 %, при этом максимальные прогибы минимизируются до 8,6 мм. Данные маркеры наглядно доказывают благотворное влияние эко-модулей на общую жесткость и динамическую стабильность перекрытий.

Мониторинг параметров свидетельствует об устойчивом снижении пиковых динамических реакций при введении упруго-вязких растительных слоев. Графическая интерпретация данных изменений приведена на рисунке 1.

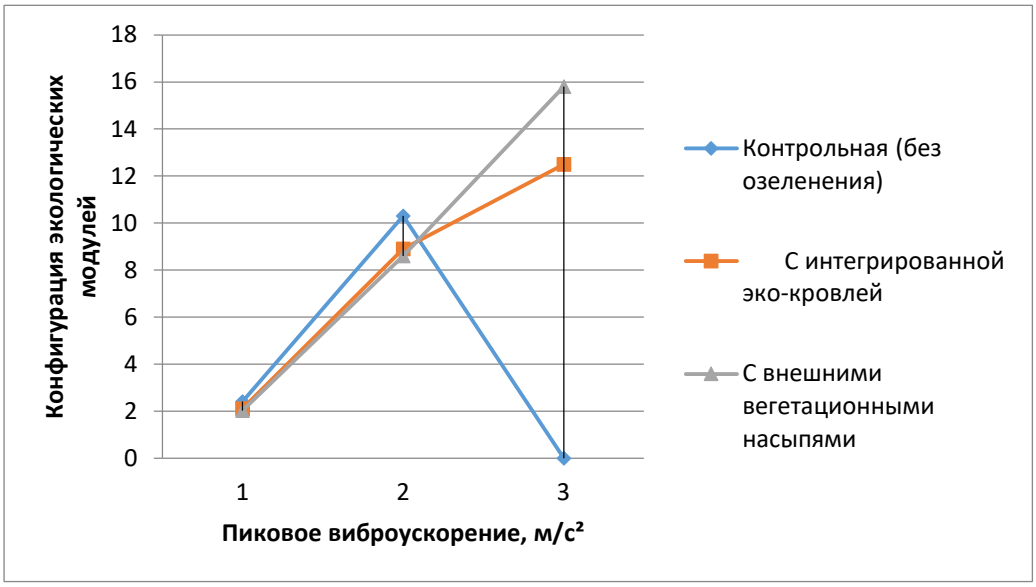


Рисунок 1– График снижения пиковых виброускорений распорных железобетонных плит в зависимости от конфигурации экологических модулей

Результаты. Синтез численных и натурных данных показывает, что интеграция элементов зеленой инфраструктуры в объемно-планировочные решения:

1. Эффективно гасит амплитуду волновых перемещений и нивелирует пиковые скачки динамических сил в теле плит;
2. На порядок повышает внутреннее рассеяние энергии (демпфирование) железобетона;
3. Локализует и замедляет деструктивные процессы раскрытия микропор и трещин, тем самым увеличивая межремонтный интервал;
4. Реализует сопутствующие экосистемные функции по оздоровлению городской среды.

Выводы. Внедрение компонентов зеленой инфраструктуры в общую конструктивную схему зданий оказывает стабилизирующее влияние на динамический отклик и распределение распорных усилий в железобетонных перекрытиях.

Наибольший градиент снижения пиковых виброускорений достигается посредством применения внешних растительных насыпей (15,8 %). Грунтово-вегетационные слои выполняют роль естественной демпфирующей подушки, подавляющей развитие деструктивных трещин, что напрямую увеличивает долговечность конструкций. Сформулированные выводы обладают высокой практической ценностью для проектирования энергоэффективных, сейсмостойких и экологически безопасных объектов гражданского строительства. Перспективным направлением дальнейших изысканий является оптимизация мощностей (толщины) и физико-механических констант почвенных субстратов для достижения наивысших показателей виброгашения.

Литература

1. Чопра А.К. Динамика сооружений: теория и применение при проектировании сейсмоустойчивых зданий. 5-е изд. М.: Прентис Холл. 2012. С. 45–120.
2. Клауф Р.В., Пенциен Дж. Динамика конструкций. 3-е изд. М.: МГХ. 2003. С. 210–275.
3. ФРСА (FEMA). Руководство по сейсмическому проектированию зданий и мостов. Федеральное агентство по чрезвычайным ситуациям. 2010. С. 15–89.
4. Зуо Ж., Чжао З. Влияние зелёных крыш на сейсмическое поведение железобетонных плит // Журнал строительной механики. 2018. №7. С. 65–78.
5. Хеггер Й., Гербер Дж., РотсДж.Г. Сейсмическое поведение плит в многоэтажных зданиях // Инженерные сооружения. 2015. №101. С. 426–438.
6. Оберндорфер Э., Лундхолм Дж., Бас Б. и др. Зелёные крыши как экосистемные услуги городов: обзор // BioScience. 2007. № 57 (10). С. 823–833.
7. Берради У. Оценка устойчивости зелёных крыш: обзор // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. № 62. С. 125–139.

УДК 004.8

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА СИЛЫ ВЕТРА В КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

Инчина К.А.
kamila.inchina@gmail.com
Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан

В работе рассматривается задача краткосрочного прогнозирования силы ветра на территории Кыргызской Республики в условиях несбалансированных данных. В ходе исследования были разработаны и протестированы модели прогнозирования, основанные на гибридных нейронных архитектурах: CNN-LSTM, CNN-Mamba. С целью объективной оценки построенных моделей им сопоставлена более простая архитектура решения, основанная на алгоритме логистической регрессии. Для борьбы с дисбалансом классов в работе использовалась функция потерь Focal Loss. Было проведено сравнение двух вариантов функции – с применением статического и адаптивного параметра α. Анализ результатов показал, что предложенные решения демонстрируют потенциал применения в системах прогнозирования для повышения безопасности в нестабильных ветровых условиях.

Ключевые слова: нейронные сети, прогнозирование, ветер, классификация, функция потерь, Focal Loss, CNN, LSTM, Mamba.

Введение. Экстремальные ветровые явления в горных районах представляют собой одну из наиболее сложных и слабо формализуемых проблем прикладной метеорологии. Их возникновение обусловлено взаимодействием крупномасштабной атмосферной циркуляции и локальных факторов. Для территорий с выраженным горным рельефом такие процессы носят ярко выраженный локальный характер и характеризуются высокой пространственной и временной изменчивостью. К числу подобных регионов относится территория Кыргызской Республики, где влияние горных систем Тянь-Шаня и Памиро-Алая существенно трансформирует поле ветра [1], оказывая, в частности, тормозящее воздействие на воздушные потоки. Дополнительным фактором, влияющим на динамику атмосферных процессов, является внешняя северная сторона Кыргызского хребта, выступающая барьером для перемещения воздушных масс [2].

Несмотря на то, что экстремальные ветровые явления на территории Кыргызстана не являются преобладающими, их своевременное и точное прогнозирование имеет важное практическое значение, поскольку сильные порывы ветра способны вызывать значительный ущерб. В связи с этим возникает необходимость разработки эффективных методов и программных средств прогнозирования, обеспечивающих повышение точности определения сильных ветров.

Таким образом, целью данной работы стало повышение эффективности прогнозирования силы ветровых явлений путем построения моделей нейронных сетей для поддержки принятия решений и снижения возможных последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с сильными ветрами.

Материалы и методы исследования. Исходные данные были получены со специализированного сайта rp5.ru, где ведётся архив наблюдений метеорологических параметров. Используемый в работе период наблюдений составляет двадцать лет, что позволяет получить репрезентативную выборку. Набор включает следующие параметры, оказывающие влияние на изменение скорости ветра:

- температура;
- атмосферное давление;
- влажность воздуха;

- направление ветра;
- скорость ветра;
- осадки.

Ветровые явления на территории Кыргызской Республики в наибольшей степени связаны с рядом определенных синоптических процессов, которые начинают формироваться еще за пределами Кыргызстана, на территориях соседствующих государств. Исходя из информации касаемо территориального происхождения этих процессов [2], метеоданные Кыргызстана были дополнены данными с Казахстана, Таджикистана и Китая.

Предобработка данных включала в себя интерполяцию и заполнение пропусков наиболее частыми значениями в соответствии с временной особенностью набора, также было произведено порядковое кодирование отдельных категориальных признаков.

Все временные зоны были приведены к местному времени Кыргызстана. Предсказание класса силы ветра производилось с горизонтом прогноза 3 часа вперёд.

Распределение данных по классам было проведено двумя способами (рис.1). При первом способе интенсивность была разделена на две категории:

- умеренный ветер, при котором скорость не превышает установленный порог;
- сильный ветер, при котором сила ветра превышает заданное пороговое значение.

Во втором случае данные были разделены на три категории:

- слабый ветер;
- умеренный ветер;
- сильный ветер.

При распределении на три класса, значения слабого ветра в распределении были взяты в диапазоне [0, 1.5), умеренного – [1.5, 8), сильного – [8, ∞) м/с. При распределении на два класса значения слабого ветра были включены в класс умеренных ветровых условий.

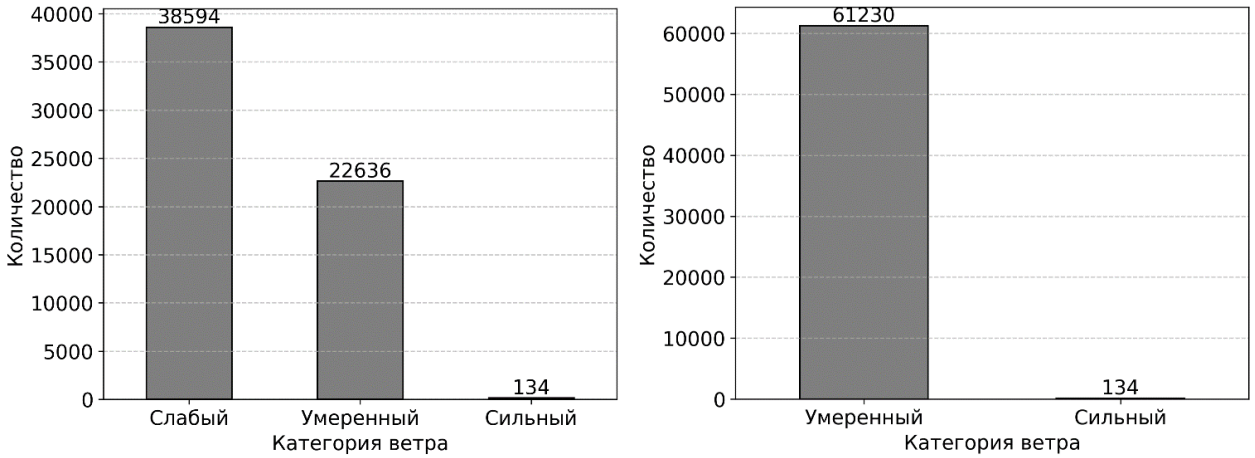


Рисунок 1 – Графики распределения скорости ветра по двум и трем классам

В качестве моделей решения использовались два подхода:

- Гибридная CNN-LSTM модель, сочетающая возможности сверточных нейронных сетей для извлечения признаков и рекуррентных сетей типа LSTM для моделирования временных зависимостей.
- Комбинированная архитектура CNN-Mamba, объединяющая свойства сверточных нейронных сетей с набирающей популярность SSM архитектурой Mamba [3, 4], обеспечивающей эффективное моделирование длинных последовательностей.

Для оценки качества построенных моделей в качестве базового подхода была построена модель, основанная на алгоритме логистической регрессии.

Существенной характеристикой используемого набора данных, как можно видеть на графиках (рисунок 1), является выраженный дисбаланс классов. Сильные ветра составляют значительно меньшую долю выборки по сравнению с другими условиями. Для устранения

классового дисбаланса использовалась функция потерь Focal Loss [5], являющаяся модификацией стандартной кросс-энтропии, представленной в формуле (1) как Categorical Cross-Entropy. Focal Loss добавляет модулирующий фактор, помогающий сфокусировать обучение на более сложных образцах, где параметр γ контролирует силу фокусирующего эффекта. Параметр α – весовой коэффициент, балансирующий вклад классов в ошибку. Данный фактор вычислялся путем нахождения обратных частот классов с последующей их нормализацией (2). Значения были фиксированы на протяжении всего процесса обучения.

$$FL(p_t) = a(1-p_t)^{\gamma} \times CCE(y,p) \tag{1}$$

$$a_c \propto \frac{1}{freq(c)}, \sum_{c=1}^{C} a_c = 1 \tag{2}$$

Также, был имплементирован вариант функции потерь, использующей адаптивный параметр α (3), вычисляемый на каждой эпохе обучения на основе:

- частоты класса (насколько распространён каждый класс);
- точности для каждого класса (насколько хорошо модель работает с каждым классом).

Показатели β и δ в формуле регулируют насколько сильное влияние на вес класса оказывают частота и точность соответственно.

$$a_c \propto \frac{1}{freq(c)^{\beta} \times acc(c)^{\delta}}, \sum_{c=1}^{C} a_c = 1 \tag{3}$$

Во избежание резких скачков и обеспечения более плавного изменения α, к параметру было применено дополнительное сглаживание (4). Текущие весовые значения объединялись с предыдущими с использованием коэффициента сглаживания μ и последующей нормализацией.

$$\tilde{a}_c^t \propto \mu \tilde{a}_c^{t-1} + (1-\mu) a_c^t, \sum_{c=1}^{C} \tilde{a}_c^t = 1 \tag{4}$$

Таким образом, в ходе сравнения проводилась оценка влияния выбранной стратегии задания α на качество классификации и способность модели выявлять сильный ветер в условиях дисбаланса классов.

Результаты и обсуждения. Для оценки полученных прогнозов были использованы следующие метрики классификации:

- *Accuracy* – точность классификации, отражающая долю корректно классифицированных примеров от общего числа наблюдений:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}$$

- *Precision* – точность положительных предсказаний, измеряющая долю предсказанных положительных случаев, действительно являющихся таковыми:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

- *Recall* – полнота, отражающая долю фактических значений, корректно обнаруженных моделью:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

- *F1-score* – F1-мера, представляющая собой гармоническое среднее между *precision* и *recall* и используемая для сбалансированной оценки качества классификации, особенно в условиях несбалансированных данных:

$$F1\text{-}score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

Для более детального анализа результатов классификации использовалась матрица ошибок (confusion matrix), наглядно отображающая распределение истинно положительных, истинно отрицательных, ложно положительных и ложно отрицательных предсказаний.

Как видно из результатов метрик (таблица 1) и матриц ошибок (рисунок 2), в обоих случаях базовый алгоритм не справляется с определением сильных ветров. Значение *accuracy* ошибочно высоко ввиду того, что модель достаточно неплохо справляется с прогнозированием превалирующих классов. Более точное представление о действительном качестве модели дают показатели *precision*, *recall* и *F1-score*.

Таблица 1 – Значения метрик классификации по результатам работы алгоритма логистической регрессии

Количество классов	Категория ветра	Precision	Recall	F1-score	Accuracy
2	Умеренный	1.00	1.00	1.00	1.0
	Сильный	0.33	0.03	0.06	
3	Слабый	0.69	0.69	0.69	0.65
	Умеренный	0.60	0.60	0.60	
	Сильный	0.00	0.00	0.00	

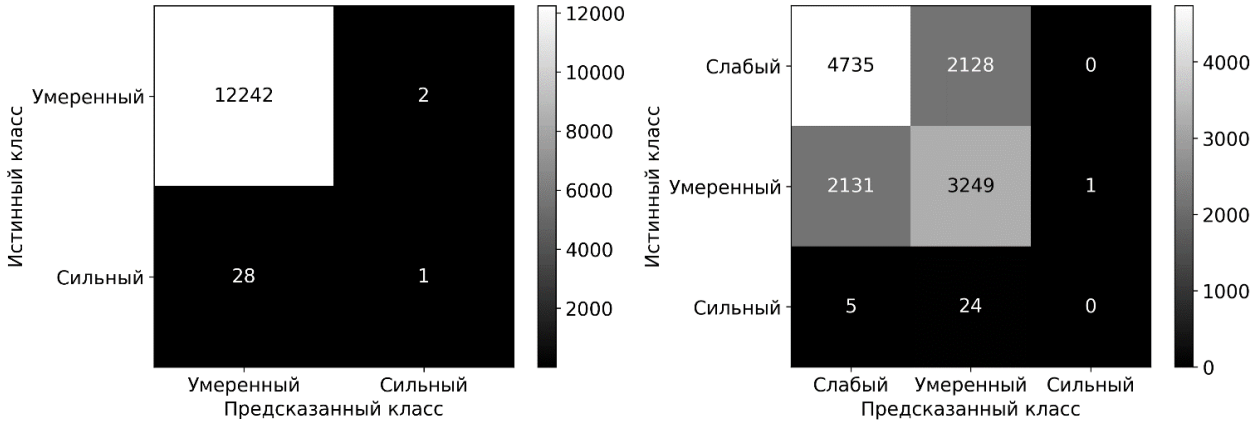


Рисунок 2 – Матрицы ошибок по результатам работы алгоритма логистической регресии (2 и 3 класса)

Гибридная CNN-LSTM модель, в свою очередь, демонстрирует более удачные результаты, что показывают и метрики (таблица 2), и матрицы ошибок (рисунок 3). В частности, это касается прогноза для двух классов. Вопреки более низкому *accuracy*, очевидно, что модель верно определяет большинство экземпляров класса как сильного ветра, так и умеренного. В случае с тремя классами, хоть и превосходя базовую модель, CNN-LSTM реализация все же испытывает трудности в определении сильных ветров и имеет тенденцию сводить большинство экземпляров как сильных, так и слабых к классу умеренных.

Таблица 2 – Значения метрик классификации по результатам работы CNN-LSTM модели со статическим параметром α в функции потерь

Количество классов	Категория ветра	Precision	Recall	F1-score	Accuracy
2	Умеренный	1.00	0.69	0.81	0.69
	Сильный	0.01	0.76	0.01	
3	Слабый	0.74	0.34	0.47	0.56
	Умеренный	0.50	0.84	0.63	
	Сильный	0.02	0.03	0.02	

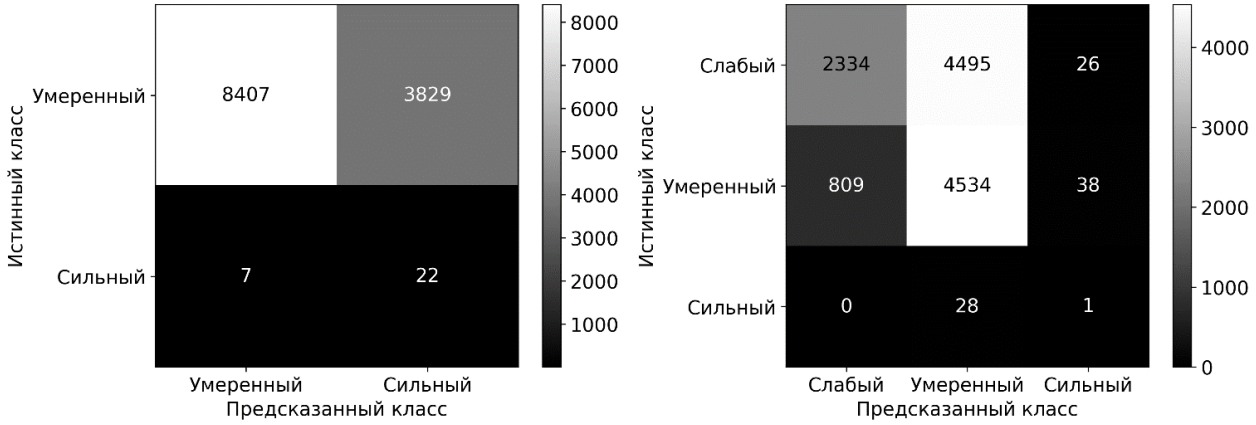


Рисунок 3 – Матрицы ошибок по результатам работы CNN-LSTM модели со статическим параметром α в функции потерь (2 и 3 класса)

Модель CNN-LSTM, использующая адаптивный параметр α в функции потерь, помогает более корректно классифицировать экземпляры, что справедливо в случае использования обоих способов разделения на классы. Для трех классов это наглядно отображено в матрице ошибок (рисунок 4). Судя по матрице ошибок для двух классов, несмотря на несколько меньшее количество обнаруженных сильных ветров, значительно снизилось число неверно опознанных. О повышенном качестве классификации говорят и соответствующие более высокие значения метрики *F1-score* (таблица 3).

Таблица 3 – Значения метрик классификации по результатам работы CNN-LSTM модели с динамическим параметром α в функции потерь.

Количество классов	Категория ветра	Precision	Recall	F1-score	Accuracy
2	Умеренный	1.00	0.82	0.90	0.82
	Сильный	0.01	0.59	0.02	
3	Слабый	0.63	0.51	0.56	0.54
	Умеренный	0.49	0.59	0.54	
	Сильный	0.03	0.31	0.06	

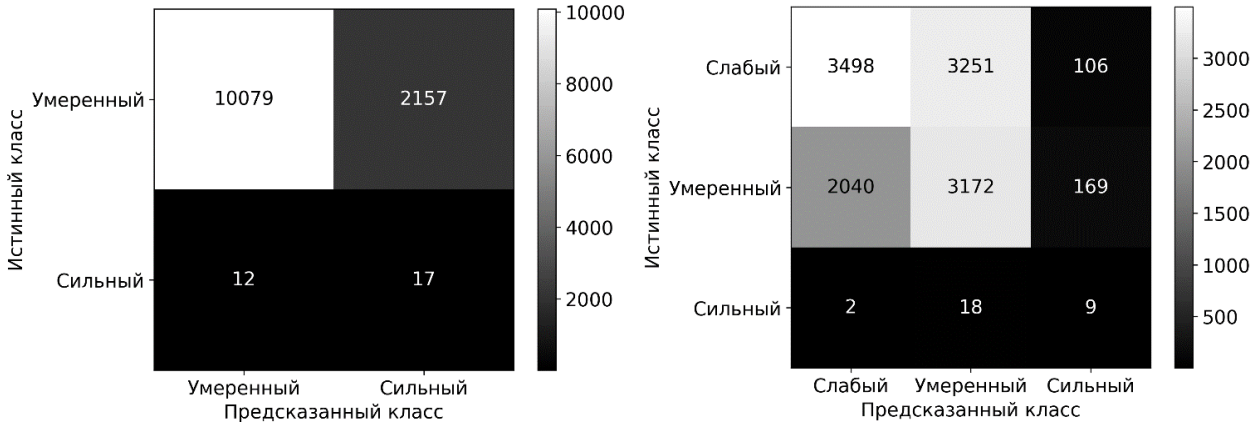


Рисунок 4 – Матрицы ошибок по результатам работы CNN-LSTM модели с динамическим параметром α в функции потерь (2 и 3 класса)

Модель CNN-Mamba, также использующая в функции потерь адаптивный α, демонстрирует наибольший потенциал исходя из своих показателей. При работе с двумя классами модель дает меньшее количество ложных прогнозов сильных ветров, при этом

сохраняя количество верно предсказанных (рисунок 5). Значения метрик, соответственно, оказываются выше, нежели у предыдущих моделей (таблица 4). В трех классах наблюдается несколько меньшее число верно предсказанных сильных ветров, однако становится меньше и ложных. О лучшей работе модели в данном случае свидетельствуют метрики качества, в особенности показатель *F1-score*.

Таблица 4 – Значения метрик классификации по результатам работы CNN-Mamba модели с динамическим параметром α в функции потерь

Количество классов	Категория ветра	Precision	Recall	F1-score	Accuracy
2	Умеренный	1.00	0.87	0.93	0.87
	Сильный	0.01	0.59	0.02	
3	Слабый	0.60	0.72	0.65	0.56
	Умеренный	0.51	0.36	0.42	
	Сильный	0.05	0.28	0.08	

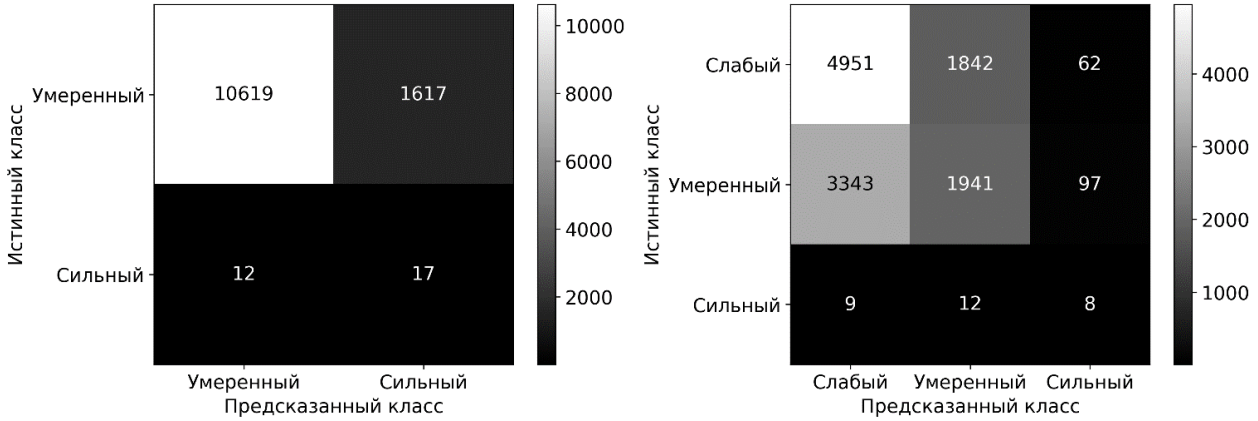


Рисунок 5 – Матрицы ошибок по результатам работы CNN-Mamba модели с динамическим параметром α в функции потерь (2 и 3 класса)

Из результатов следует, что более сложные модели, а в частности модель CNN-Mamba, и использование адаптивного параметра α в функции потерь позволяют предоставлять более точные прогнозы, однако сильный дисбаланс данных все же снижает эффективность подхода, препятствуя большему приближению предсказаний к целевой точности.

Выводы. По результатам работы можно заключить, что предложенные архитектуры демонстрируют свое превосходство в точности прогнозов по сравнению с более базовыми решениями, показывая более успешные результаты по мере усложнения модели. Использование динамического параметра α в функции потерь Focal Loss также играет важную роль, демонстрируя выраженный потенциал для повышения эффективности прогнозирования. В отличие от статического значения α, динамическая адаптация данного параметра позволяет модели учитывать вклад редкого класса и формировать более устойчивые признаки, необходимые для его корректного распознавания.

Представленные в работе методы демонстрируют перспективность своего использования в задачах прогнозной классификации ветровых явлений, но, в то же время, эффективность выбранного метода напрямую связана с обучающими данными, так как даже при соответствующей настройке параметров высокая несбалансированность данных в выборке создает существенные препятствия для работы модели. Полученные результаты подчёркивают сложность обучения моделей в условиях сильного дисбаланса классов и указывают на необходимость дальнейшего улучшения стратегии балансировки.

Таким образом, результаты работы формируют основу для последующих исследований, направленных на повышение надёжности и практической применимости

предложенных решений путем увеличения числа корректно прогнозируемых значений и снижения числа ложных предсказаний.

Литература

1. Брусенская И.С., Подрезов О.А. Режим ветра на территории Северного, Северо-Западного Кыргызстана. Бишкек: КРСУ. 2011. 143 с.
2. Подрезов О.А. Современный климат Бишкека, Чуйской долины и северного склона Киргизского хребта. Бишкек: КРСУ. 2013. 202 с.
3. Gu A., Dao T. Mamba: Linear-Time Sequence Modeling with Selective State Spaces. 2024. DOI: 10.48550:arXiv.2312.00752.
4. Qin H., Chen Y., Jiang Q., Sun P., Ye X., Kin C. MetMamba: Regional Weather Forecasting with Spatial-Temporal Mamba Model. 2024. DOI: 10.48550:arXiv.2408.06400.
5. Lin T.-Y., Goyal P., Girshick R., He K., Dollár P. Focal Loss for Dense Object Detection. 2018. DOI: arXiv:1708.02002v2.

УДК 621.23.05

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМОМОЛОТОВ В АРКТИКЕ

Иоанов И.Е.
ioanow@yandex.ru
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В статье рассмотрена возможность использования пневмомолотов в Арктике. Рассмотрена технология работ по строительству сооружений с использованием ударных механизмов. Приведены примеры существующих пневмомолотов, проведен анализ конструкций систем воздухораспределения машин. Обозначены задачи по созданию высокоэффективных пневмоударных устройств, работающих в условиях отрицательных температур.

Ключевые слова: пневмомолот, труба, Арктика, строительство, грунт, сжатый воздух.

Введение. Арктика играет ключевую роль в экономике России. Добыча полезных ископаемых существенно пополняет государственный бюджет. Для этого строятся различные сооружения: свайные основания, подпорные стены, опоры, анкеры и другие. Процесс строительства начинается с бурения мерзлого грунта, что позволяет создать необходимые условия для дальнейшей работы. Бурение - это метод разработки грунта, при котором образуется горная выработка, чаще всего цилиндрической формы [1]. После этого в выработку забиваются трубы, для чего используются современные технические средства, такие как пневмомолоты.

Цель работы. Обоснование применения пневматических импульсных машин в условиях Арктики.

Основная часть. Арктический регион характеризуется экстремально низкими температурами. В зимний период температура может опускаться до –3°С на юге приатлантического района и до –16°С в притихоокеанском. На северо-востоке Якутии зафиксированы температуры до –40 °С. Относительная влажность воздуха составляет 80–90% [2].

Рельеф Арктики в основном представлен равнинами и низменностями, а также многочисленными островами и архипелагами, такими как острова Арктического института, острова Гейберга, Дунай, Медвежьи острова, Новая Земля, Новосибирские острова и Северная Земля. Горные массивы встречаются редко.

Почвы в Арктике маломощные, слабокислые и слабогумусированные. В южной части региона преобладают кислые тундровые и дерновые почвы.

Арктика богата полезными ископаемыми, включая нефть, природный газ и различные руды, такие как апатит, золото, алмазы, серебро, цирконий, титан, платина и редкоземельные металлы.

Разработка полезных ископаемых требует создания современных горнодобывающих предприятий и инфраструктуры. Строительство в Арктике имеет свои особенности [3, 4]:

1. Суровый климат. Низкие температуры и промёрзшие грунты значительно усложняют и замедляют строительство и эксплуатацию зданий.

2. Вечная мерзлота. Вода в грунте чаще всего находится в твёрдом состоянии. Однако возможны кратковременные оттаивания, что негативно сказывается на надёжности конструкций.

3. Порывистые ветры и метели. Здания в Арктике строят по принципу замкнутого контура, а расстояние между домами стараются минимизировать.

4. Удалённость поставщиков строительных материалов. Многие объекты строятся на островах, что требует использования только водного транспорта для доставки материалов.

5. Высокая стоимость строительства. Удалённость районов и необходимость использования дорогостоящих материалов в суровых условиях увеличивают затраты.

6. Нехватка квалифицированного персонала. Климат Арктики негативно влияет на здоровье работников, поэтому перед отправкой на север сотрудники проходят углублённое медицинское обследование.

Для строительства горнодобывающих предприятий и транспортной инфраструктуры в различных климатических условиях используется широкая гамма специальной строительной техники. Она включает различные типы погружателей труб в породный массив. Примерами таких машин являются пневмомолоты с рабочим циклом расширения сжатого воздуха перед выхлопом (СО-134, СО-166, М-200, М-400) и пневмомолоты без расширения сжатого воздуха в камере обратного хода (Тайфун-70, Тайфун-130, Тайфун-190, Тайфун-320, Тайфун-500, Тайфун-740, Тайфун-1000). Технические характеристики машин представлены в таблицах 1 [5] и 2 [6].

Таблица 1 – Основные параметры пневмомолотов СО-134, СО-166, М-200, М-400 для забивания труб конструкции ИГД СО РАН [5]

Тип	Энергия удара, Дж	Частота ударов f, Гц	Расход воздуха, $м^3$/мин	Диаметр, мм	Длина, мм	Масса: ударника (общая), кг	Диаметр труб, мм
СО-134	500	4,1	8,0	155	1700	56 (150)	159-325
СО-166	1000	3,3	9,0	240	1720	175 (370)	325-530
М-200	1800	2,7	10,0	270	2260	270 (710)	219-820
М-400	3500	2,6	20,0	400	2590	570 (1560)	426-1020

Таблица 2 – Основные параметры пневмомолотов «Тайфун» для забивания труб [6]

Тип	Масса ударника, кг	Энергия удара, кДж	Частота ударов, Гц	Наружный диаметр, мм	Длина, мм	Наибольш ийдиаметр труб, мм
Тайфун-70	70	0,7	2,5-3,7	160	1400	273
Тайфун-130	130	1,3	2,0-4,0	240	1330	325
Тайфун-190	190	1,8	2,0-3,2	240	1700	530
Тайфун-320	320	3,0	1,5-2,5	270	1920	630
Тайфун-500	500	4,3	1,0-1,7	400	2000	820
Тайфун-740	740	6,0	1,0-1,5	400	2650	1020
Тайфун-1000	1000	8,5	0,8-1,3	460	2670	1220

Машина СО134 включает в себя ударный узел, шланг, расширитель Ø 245 мм, удлинитель, комплект насадок, стартовое устройство, запчасти, инструмент и принадлежности [5].

Стержень 4 ударника конической поверхностью запрессован в гнезде гильзы 3 ударника. На наружной поверхности гильзы 3 имеются направляющие пояски. Задний поясок является одновременно уплотнительным, на переднем имеются воздухопропускные лыски. Во внутренней полости гильзы размещается патрубок 5 золотника, в её боковых стенках выполнены воздухопропускные окна [5].

Внутренняя поверхность корпуса и наружная поверхность ударника образуют камеру А, а внутренняя полость ударника и патрубок золотника – камеру Б, которая через осевой канал патрубка и воздухоподводящий шланг сообщается с источником сжатого воздуха [5].

При положении ударника, показанном рисунке 1, сжатый воздух поступает из камеры Б, постоянно находящейся под давлением сжатого воздуха, через окна В в камеру А. За счёт разности рабочих площадей со стороны камер А и Б ударник начинает двигаться вправо. При подходе ударника к крайнему правому положению происходит выхлоп из камеры А через окна

В, камеру Г и окна Д в атмосферу. Давлением воздуха в камере Б ударник вначале останавливается, а затем двигается влево и наносит удар по корпусу. При подходе ударника к крайнему левому положению сжатый воздух из камеры Б через окна В в камеру А и цикл повторяется. Недостатком машины является работа за счёт расширения сжатого воздуха внутри камеры холостого хода, в результате которого температура понижается, что может способствовать обледенению машины. Минимальные зазоры ударника в корпусе при попадании льда способствуют заклиниванию и остановке машины [5].

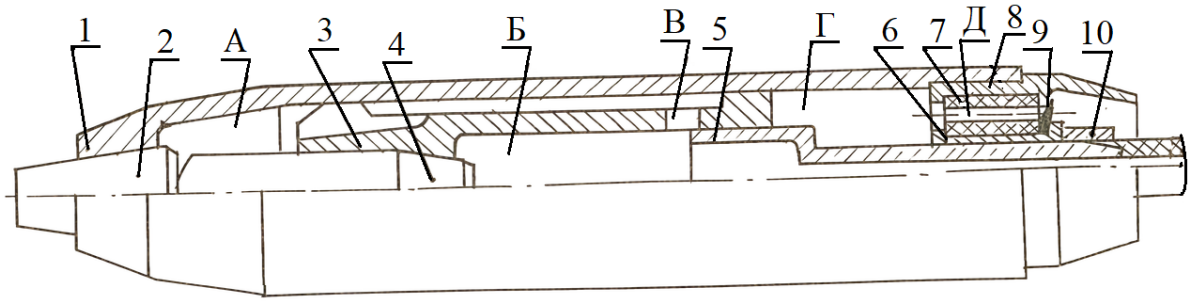


Рисунок 1 – Ударный узел машины СО134: 1 – корпус; 2 – наковальня; 3 – гильза; 4 – стержень; 5 – патрубок; 6 – гайка; 7 – амортизатор; 8 – хвостовик; 9 – клапан; 10 – гайка [5]

В пневмомолотах «Тайфун» в отличии от машины СО134 надёжную работу в зимних условиях обеспечивают большие зазоры и отсутствие расширения воздуха внутри камеры холостого хода, что возможно за счёт наличия упругого воздухораспределительного клапана. «Тайфуны» работают следующим образом (рисунок 2). Сжатый воздух из воздухоподводящей магистрали под давлением p_0 через патрубок поступает в камеру прямого хода 1 ударника. Посредством дроссельного канала 5 она соединяется с камерой обратного хода 2. Поскольку диаметр D_2, а, следовательно, и определяемая им площадь поперечно сечения передней полости больше, чем аналогичные параметры задней с диаметром D_1, то ударник начинает двигаться назад. Кольцевой клапан 3 своей наружной поверхностью скользит по внутреннему профилю наковальни, создавая герметичную полость. По достижению им выхлопных пазов 4, происходит резкий сброс давления и сжатие упругого элемента. Это сопровождается появлением кольцевого зазора, через который сжатый воздух из передней полости через продольные пазы в ударнике выходит в атмосферу. Под действием движущей силы со стороны камеры прямого хода он начинает двигаться вперед и, разгоняясь, наносит удар по наковальне. Далее рабочий цикл повторяется.

Наличие калибровочного отверстия с диаметром d, задает время наполнения камеры обратного хода ударника, что в свою очередь позволяет изменять период его обратного хода, а, следовательно, и регулировать частоту ударов [6, 7].

Пневмомолоты «Тайфун» отличаются простотой, высокой надёжностью, не требуют высокой квалификации рабочего [7].

Недостатки пневмомолотов «Тайфун» [7]: неадаптированная конструкция воздухораспределительной системы для работы в условиях Арктики; необходимость «прогрева» упругого кольцевого клапана, материал которого при отрицательных температурах имеет повышенную жесткость.

Для устранения недостатков обозначены задачи, способствующие созданию новых пневмоударных механизмов: разработка методических рекомендаций для расчёта конструкции воздухораспределительной системы пневмоударного устройства, адаптированной к условиям отрицательной температуры; установление влияния фактического температурного баланса энергоносителя в системе воздухораспределения пневмоударного устройства на жесткость упругого кольцевого клапана.

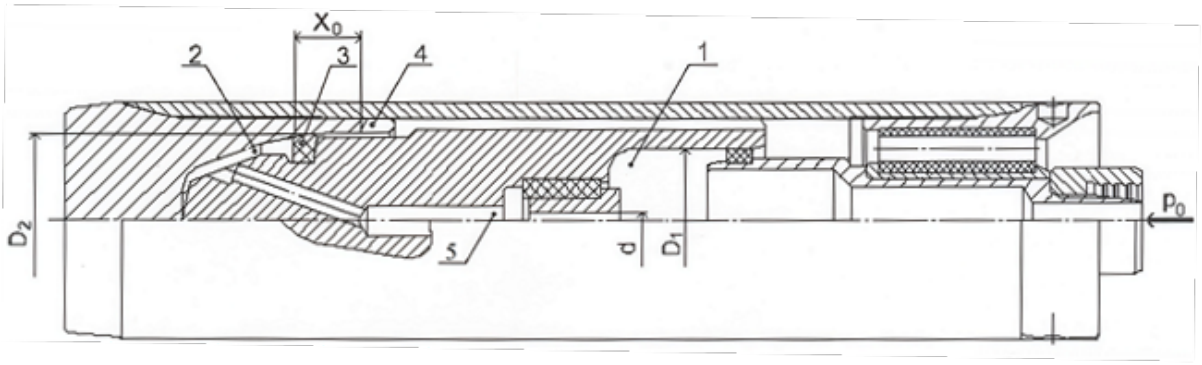


Рисунок 2 – Схема устройства пневмомолотов «Тайфун» [7]: 1 – камера прямого хода; 2 – камера обратного хода; 3 – скользящий упругий клапан; 4 – выхлопные пазы; 5 – дроссельный канал; D_1 – диаметр камеры прямого хода; D_2 – диаметр камеры обратного хода; d – калибровочное отверстие в жиклере; p_0 – давление сжатого воздуха; X_0 – прямой ход ударника

Выводы. Возведение горнодобывающих, военных и гражданских объектов сопряжено с проведением комплекса специальных строительных работ. За последние годы их объемы неуклонно увеличиваются, что обусловливается освоением Арктики. В перечень таких работ входит бестраншейная прокладка подземных каналов, укрепление откосов котлованов и насыпей, сооружение подпорных стенок и экранов, получение набивных свай под фундаменты зданий. Широко используются технологии, основанные на погружении различных металлических профилей и конструкций в упруго-пластичную грунтовую среду бурозабивным методом. Для его реализации наиболее рационально использовать пневмоударные машины, поскольку в качестве энергоносителя используется сжатый воздух. Поэтому исследования, направленные на обоснование параметров и разработку пневмоударного устройства, работающего без расширения сжатого воздуха внутри камеры холостого хода, являются одним из возможных путей получения высокоэффективной техники не только для строительства горнодобывающих предприятий, но и для разрушения горных пород и уплотнения грунта в условиях Арктики.

Литература

1. Бурение. Большая Российская энциклопедия. Код доступа: https://bigenc.ru/c/burenie-2634a5
2. Арктика. Большая Российская энциклопедия. Код доступа: https://bigenc.ru/c/arktika-d5074d
3. Строительный эксперт. Портал для специалистов архитектурно-строительной отрасли. Строительство в высоких широтах. Принципы, возможности и перспективы. Код доступа: https://ardexpert.ru/article/5072
4. Информационный портал «Всё о саморегулировании». НОСТРОЙ о строительстве в Арктике: проблемы и способы их решения. Код доступа: https://www.all-sro.ru/news/nostroy-o-stroitelstve-v-arktike-problemy-i-sposoby-ikh-resheniya/
5. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д., Плавских В.Д., Русин Е.П., Смоляницкий Б.Н., Тупицын К.К., Чепурной Н.П. Пневмопробойники. Новосибирск: Институт горного дела СО АН СССР. 1990. 213 с.
6. Червов В.В. Расширение области применения пневмомолотов с переменной структурой ударной мощности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 2. № 5. С. 103-111.
7. Червов А.В. Расчёт динамических параметров камеры обратного хода пневмомолота с механическим замыканием упругого клапана // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 2. № 5. С. 98-102.

УДК 004.4

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К АВТОМАТИЗАЦИИ УЧЕТА ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Каретный Б.Д.
bogdankaretnyi@gmail.com
Кыргызско-Российский славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан

В статье рассматриваются современные подходы к автоматизации учета логистических процессов автотранспортных предприятий в рамках корпоративных информационных систем управления. Проанализированы основные логистические бизнес-процессы, подлежащие автоматизации, и типовые архитектурные решения, применяемые при разработке учетных систем. Особое внимание уделено использованию платформенных решений класса ERP и прикладных сред быстрой разработки, включая конфигурационные платформы. Проведен сравнительный анализ ручных и автоматизированных методов учета логистических операций. Полученные результаты формируют методологическую основу для разработки специализированных информационных систем управления логистикой автотранспортных предприятий.

Ключевые слова: логистические процессы, автотранспортное предприятие, информационная система, автоматизация учета, ERP-системы, управление перевозками, конфигурационные платформы.

Введение. Логистика – это основа работы любого автотранспортного предприятия. Она включает в себя всё, начиная с планирования маршрутов и заканчивая контролем расхода топлива. Грамотное управление этими процессами позволяет снизить издержки и повысить качество оказываемых услуг [1].

В настоящее же время транспортные компании сталкиваются с огромными объемами данных. Использование бумажных журналов или разрозненных таблиц приводит к потере информации и частым ошибкам из-за человеческого фактора [2]. В эпоху цифровизации подобного рода устаревшие методы мешают быстро принимать решения и эффективно контролировать работу автопарка.

Внедрение современных информационных систем меняет ситуацию в корне. Автоматизация делает возможным объединение данные о перевозках, финансах и кадрах в единую сеть [3]. Исследования подтверждают: такие системы не только экономят время сотрудников, но и делают данные более точными [4]. Однако универсальные программы часто не учитывают специфику транспорта. По этой причине важно изучать альтернативы – к примеру, гибкие платформы, которые можно настроить под конкретные задачи логистики без дорогостоящей разработки «с нуля» [5].

Цель статьи состоит в систематизации методов автоматизации логистики и формулировке требований к информационным системам, способным объединить все данные предприятия в цифровой среде.

Анализ логистических процессов автотранспортного предприятия. Логистика автотранспортного предприятия – это система операций по планированию, выполнению и контролю перевозок [6]. Главной целью в данной области является рациональное использование транспорта и минимизация общих затрат.

С позиции процессного подхода работу компании можно разделить на несколько основных блоков, каждый из которых имеет свои входные данные и результат:

1. Учет транспорта – хранение данных о характеристиках машин и графиках техобслуживания.

2. Планирование и учет ездок – этап работы, к которому относится создание маршрутов и назначение водителей. При ручном учете возникает больше всего ошибок, связанных с человеческим фактором.
3. Контроль топлива – на него в основном и расходуются финансовые средства. Без автоматизации этого процесса данные часто искажаются, что мешает эффективно управлять себестоимостью перевозок [7, 8].
4. Учет работы водителей – необходим для расчета зарплат, соблюдения норм безопасности и трудового законодательства [9].
5. Аналитическая отчетность – итоговый этап, где объединяются данные с выполненной транспортной работы. Качество управленческих решений напрямую зависит от того, насколько полными и актуальными будут эти отчеты.

Подходы к автоматизации учета логистических процессов. Автоматизацию на автотранспортных предприятиях обычно реализуют одним из четырех способов, которые различаются по гибкости, стоимости и сложности внедрения. Выбор конкретного подхода зависит от масштаба бизнеса и его бюджета. Наиболее перспективными являются решения, которые сочетают в себе готовую функциональность с возможностью быстрой адаптации под нужды перевозчика.

Во-первых, это универсальные ERP-системы, главный плюс которых – создание единого цифрового пространства для всей компании, где логистика связана с бухгалтерией и кадрами [10]. Однако такие гиганты часто плохо учитывают специфику перевозок, из-за чего их настройка и поддержка обходятся очень дорого [11].

Во-вторых, специализированные TMS-системы, которые «заточены» именно под транспорт: планирование маршрутов, ездок и контроль автопарка [12]. У них отличный функционал для логистов, но они часто работают изолированно от других отделов компании.

В-третьих, индивидуальная разработка, подразумевающая создание системы с нуля под конкретный бизнес. Это гарантирует идеальное соответствие процессам, но одновременно это самый долгий и дорогой путь, требующий постоянных вложений в команду разработчиков [13].

Наконец, конфигурационные платформы, являющиеся «золотой серединой». Использование готовых платформ для быстрой разработки позволяет настроить бизнес-логику под задачи транспорта, не переплачивая за написание кода с чистого листа [14].

Сравнительный анализ подходов к автоматизации учета. Для выбора оптимального решения был проведен сравнительный анализ подходов по основным критериям эффективности. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов автоматизации логистического учета

Критерий	*ERP-системы*	*TMS-решения*	*Индивидуальная разработка*	*Конфигурационные платформы*
Снижение трудозатрат	Высокое	Высокое	Среднее	Высокое
Достоверность данных	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Оперативность отчетности	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая
Интеграция с подсистемами	Высокая	Низкая	Средняя	Высокая
Гибкость настройки	Низкая	Низкая	Высокая	Высокая
Масштабируемость	Высокая	Средняя	Средняя	Высокая
Затраты на внедрение	Высокие	Средние	Высокие	Средние
Затраты на сопровождение	Высокие	Средние	Высокие	Средние

Сравнение показало, что каждый подход имеет свои особенности. Универсальные ERP-системы гарантируют отличную интеграцию, но они «неповоротливы» в настройке и очень дороги. Специализированные TMS-решения идеальны для оперативного учета в транспорте, но плохо связываются с другими отделами (бухгалтерией, кадрами). Индивидуальная разработка дает 100% адаптацию под бизнес, но требует немалого количества ресурсов на создание и поддержку. Конфигурационные платформы же выглядят наиболее сбалансированно, ведь они сочетают гибкость настройки и легкую интеграцию с умеренными затратами, что делает их универсальным выбором для современных предприятий.

Сравнительный анализ конфигурационных платформ. Выше мы выяснили, что для автоматизации предприятий в СНГ наиболее выгодны конфигурационные платформы. Они популярны и ориентированы именно на учетные задачи. В таблице 2 приведено сравнение лидеров рынка: семейств 1С и BAS, облачных сервисов (вроде «МойСклад» или «Контур») и корпоративного портала Битрикс24.

Таблица 2 – Сравнение платформ для автоматизации учета

Критерий	*1С*	*BAS*	*Облачные сервисы*	*Битрикс24*
Ориентация на учет	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая
Логистический учет	Высокий	Высокий	Ограниченный	Ограниченный
Гибкость настройки	Высокая	Средняя	Низкая	Средняя
Доработка бизнес-логики	Высокая	Средняя	Низкая	Средняя
Интеграция с бухгалтерией	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая
Местное законодательство	Высокое	Высокое	Среднее	Низкое
Масштабируемость	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
Автономное развертывание	Да	Да	Нет	Частично
Назначение платформы	Учет и управление	Учет и управление	Облачный сервис	Корпоративный портал

Сравнение показало, что облачные сервисы хорошо подходят для малого бизнеса с типовыми задачами, но им не хватает гибкости для сложной логистики и глубокой настройки процессов. Битрикс24 отлично справляется с коммуникациями и задачами, но это не учетная система и для полноценного логистического учета её возможностей недостаточно. 1С и BAS показали лучшие результаты, причем 1С лидирует за счет максимальной гибкости, огромной экосистемы готовых решений и возможности доработать систему под любые уникальные нужды перевозчика [15]. Это делает платформу 1С оптимальной базой для разработки специализированных систем управления транспортной логистикой.

Результаты и обсуждение. Сравнительный анализ подходов к автоматизации (таблица 1) позволяет сделать следующие выводы о выборе IT-решений для транспорта:

1. ERP-системы дают отличную связность данных, но их внедрение слишком дорого и сложно из-за низкой гибкости при настройке под транспортную специфику.
2. Специализированные TMS эффективны, но узконаправлены. Их «изолированность» мешает создать единую информационную среду предприятия.
3. Индивидуальная разработка идеально подстраивается под бизнес-процессы, но экономически оправдана только для крупных корпораций с уникальными задачами.

4. Конфигурационный подход (использование готовых платформ) признан наиболее перспективным. Он обеспечивает баланс между ценой, гибкостью и скоростью внедрения, позволяя адаптировать систему без написания кода «с нуля».

В свою очередь, анализ конкретных платформ (таблица 2) показал, что:

1. Облачные сервисы слишком ограничены в настройках для сложной логистики.
2. Битрикс24 не подходит для глубокого учета и анализа перевозок.
3. 1С и BAS максимально соответствуют требованиям отрасли. При этом платформа 1С обладает преимуществом благодаря самой высокой гибкости, развитой экосистеме и широким возможностям доработки под нужды конкретного автопарка.

Так, для автоматизации логистики автотранспортных предприятий оптимальным решением является использование конфигурационных платформ, среди которых лидирует 1С.

Выводы. Проведённое исследование подтверждает целесообразность использования конфигурационного подхода при проектировании информационных систем учета логистических процессов автотранспортных предприятий. Платформа 1С является наиболее функционально и методологически подходящей конфигурационной основой для разработки информационной системы автотранспортного предприятия в условиях стран СНГ.

Полученные выводы могут быть использованы в качестве методологической основы при разработке прикладных решений, ориентированных на автоматизацию логистической деятельности и интеграцию учетных данных в едином информационном пространстве предприятия.

Литература

1. Кузнецова М.Н. Транспортное обеспечение логистических систем. М.: ЛитРес. 2019. 137 с.
2. Гаврилов Д.С., Грановский В.А. Совершенствование управления на транспорте // Молодой ученый. 2009. № 12 (12). С. 40–42.
3. Laudon K., Laudon J. Management Information Systems. Pearson. 2016. 71 p.
4. Christopher M. Logistics & Supply Chain Management. Pearson. 2016. 289 p. Режим доступа: https://vk.cc/cSST8l (дата обращения: 07.10.2025).
5. Смоленцева Т.Е., Исаев Р.А. Проектирование корпоративных информационных систем: Учебно-методическое пособие. М: МИРЭА. 2023. 69 с.
6. Алсеитов М.Т., Советбеков Б.С., Элеманов Ч.З. Грузоведение. Учеб. пособие. Бишкек: ГОУВПО КРСУ. 2016. 322 с. Режим доступа: https://lib.krsu.kg/uploads/files/public/7960.pdf (дата обращения: 07.10.2025).
7. Савельева Н.А. Логистические издержки и их классификация в цепи поставок // Экономика и социум. 2017. № 11 (42). С. 745–749. Режим доступа: https://vk.cc/cSSVUW (дата обращения: 09.10.2025).
8. Ангадаева Е.В. О формировании системы учета логистических затрат предприятия // Управленец. 2014. № 4 (50). С. 68–71. Режим доступа: https://vk.cc/cSSW6z (дата обращения: 07.10.2025).
9. Rodrigue J.-P., Comtois C., Slack B. The Geography of Transport Systems. Routledge. 2016. 297 p.
10. Monk E., Wagner B. Concepts in Enterprise Resource Planning. Cengage Learning. 2008. 274 p.
11. Davenport T.H. Putting the Enterprise into the Enterprise System // Harvard Business Review. 1998. 76 (4). P. 121–132.
12. Rushton A., Croucher P., Baker P. The Handbook of Logistics & Distribution Management. Kogan Page. 2010. 665 p. Режим доступа: https://vk.cc/cSSYIk (дата обращения: 12.10.2025).
13. Pressman R. Software Engineering: A Practitioner’s Approach. McGraw-Hill. 2010. 930 p. Режим доступа: https://vk.cc/cSSZn9 (дата обращения: 15.10.2025).

14. Скумина М.А. Прикладные информационные системы в логистике. Гомель: БелГУТ. 2022. 104 с.
15. Радченко М.Г., Хрусталева Е.Ю. 1С: Предприятие 8.3. Практическое пособие разработчика. Примеры и типовые приемы. 3-е изд. М.: 1С-Паблишнг. 2023. 983 с.

УДК 520.2

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕЛЕСКОПА МТМ-500 В КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Кривенко А.С., Назаров С.В.
krivenko86@yandex.ru
Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный, Крым, Россия

В работе представлены результаты основного этапа модернизации одного из первых в Советском Союзе менисковых телескопов МТМ-500. Оптическая система демонстрирует хорошую сохранность, однако механика и электроника устарели и требовали модернизации. Авторами выполнен расчёт кинематики монтировки, позволивший выбрать электромеханические компоненты для полной автоматизации системы управления телескопом. Смонтированы новые привода, программируемые логические контроллеры (ПЛК) и определены оптимальные режимы работы системы. Обеспечено точное наведение телескопа по координатам за одну итерацию. Суточное вращение компенсируется часовым ведением.

Ключевые слова: автоматизация телескопа, МТМ-500, система управления, часовое ведение

Введение. Телескопы системы Максутова относятся к типу менисковых катадиоптриков. Они сыграли заметную роль в развитии наблюдательной астрономии в СССР, в том числе как специализированные инструменты для точных фотометрических и астрометрических наблюдений. МТМ-500 в Крымской астрофизической обсерватории относится к числу первых систем такого типа, разработанных и реализованных в СССР, оптическая схема которых восходит к работам Д.Д. Максутова 1940-х годов по новым менисковым системам [1]. Спустя многие десятилетия эксплуатации его оптика демонстрирует хорошую сохранность [2].

Цели и задачи. Модернизация 500-мм менискового телескопа Максутова МТМ-500 в Крымской астрофизической обсерватории направлена на переход от трудоёмкого ручного наведения к полностью автоматизированной системе управления, совместимой с современным оборудованием и программами. Это создаёт базу для регулярных и эффективных многополосных фотометрических наблюдений активных ядер галактик, переменных звёзд и других объектов.

Инструмент. С ПЗС-камерой, обладающей размером чипа 36x36мм, телескоп даёт поле размером 14′×14′, масштаб 0,762″/пиксель и достигает проницающей силы 20^m за 2 минуты экспозиции на одиночном кадре, что хорошо подходит для фотометрических задач. Высокое оптическое разрешение накладывает серьезные требования на качество компенсации вращения Земли, особенно при наблюдении слабых внегалактических источников в фильтрах. Монтировка МТМ-500 немецкая, экваториального типа, с приводом по оси прямого восхождения. Наведение предполагалось вручную, по координатной шкале и искателю.

Процесс. В ходе работ по модернизации была проведена оценка кинематики телескопа и выбраны электромеханические узлы, обеспечивающие автоматизацию систем наведения [3]. Для оси прямого восхождения применён сервопривод на основе PMSM двигателя с планетарным редуктором. Это позволило отказаться от многомоторной схемы управления и применить один привод как для часового ведения, так и для быстрого наведения. Внешний вид привода представлен на рисунке 1. Подбор параметров привода и режимов работы позволил добиться устойчивого часового ведения и уверенного наведения по координатам [3].

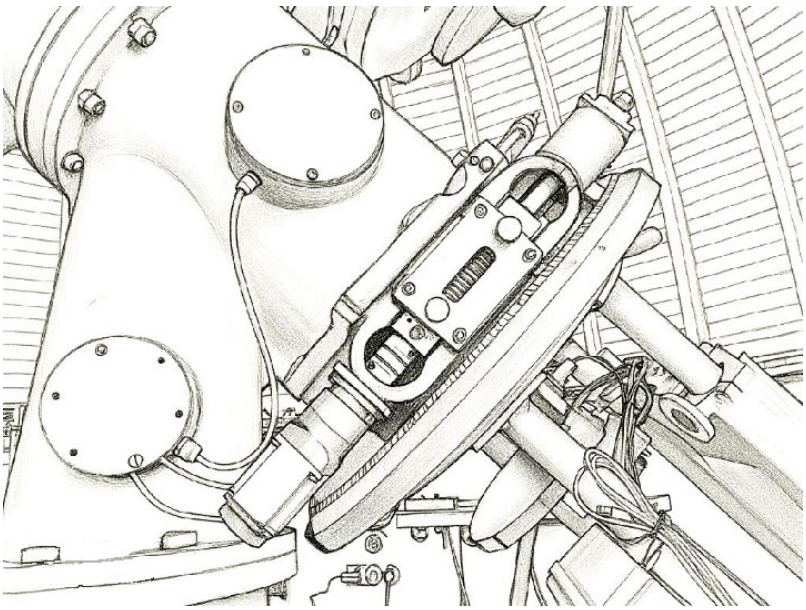


Рисунок 1 – Внешний вид привода оси прямого восхождения после модернизации

Для привода оси склонения выбран шаговый двигатель с встроенным энкодером в обратной связи управления. Это позволило сделать программную коррекцию люфтов механики, а также добиться широкого диапазона скоростей перемещения при наведении.

По результатам испытаний, ошибка часового ведения составила не более 2” за 40 минут, ошибка наведения – 15.71”, а ошибка наведения после синхронизации – 0.118” [4]. Этой точности достаточно для научных наблюдений в фокусе Кудэ.

Управление движением приводов, расчет небесных координат выполняет ПЛК, связанный с пользовательским компьютером по протоколу Modbus TCP. Пользовательский интерфейс выполнен в системе SCADA SimpLight v5 и передает небесные координаты и команды управления на ПЛК монтировки. Такая архитектура упрощает интеграцию с другими системами управления монтировкой.

Научные наблюдения. После завершения основных этапов модернизации на МТМ-500 начаты регулярные научные наблюдения. Основное направление текущей программы — многополосная фотометрия активных ядер галактик и переменных звезд. Эти объекты требуют систематических наблюдений и высокой повторяемости позиционирования.

Многополосная фотометрия позволяет исследовать долговременную переменность источников, эволюцию их яркости и цветовых характеристик, а также выявлять кратковременные изменения светимости. Для активных ядер галактик это открывает возможность изучать процессы в джетах и аккреционных дисках, а для переменных звезд — отслеживать изменения, связанные с пульсациями, затмениями и вспышечной активностью.

Переход к регулярному наблюдательному режиму является ключевым результатом модернизации. Телескоп теперь используется не только как объект технической реконструкции, но и как постоянно действующий научный инструмент, включённый в плановую наблюдательную работу обсерватории.

Автоматизация купола. Следующим важным этапом является модернизация системы управления куполом. В настоящее время синхронизация положения купола с направлением трубы телескопа выполняется с участием оператора, что ограничивает степень автоматизации наблюдений. Для дальнейшего повышения эффективности работы необходимо обеспечить автоматическое согласование положения купола с текущим положением телескопа.

Реализация этой задачи позволит исключить ручные операции при сопровождении объекта, уменьшить вероятность ошибок оператора и повысить безопасность работы. Кроме того, автоматическая синхронизация купола с телескопом создаст условия для более длительных наблюдательных серий, особенно в режимах многополосной фотометрии, где важно минимизировать вмешательство человека в процессе съёмки.

В перспективе система управления куполом должна быть интегрирована с общей системой управления телескопом, чтобы обеспечивались автоматическое открытие и закрытие забрала, согласованное вращение купола и возможность работы в полуавтоматическом или полностью автоматическом режиме.

Выводы. Проведённая модернизация МТМ-500 существенно повысила функциональные возможности телескопа. Инструмент переведён в режим, пригодный для регулярных научных наблюдений, что стало основой для начала систематической фотометрической программы. В настоящее время телескоп используется для многополосной фотометрии десятков объектов.

Доработка механики, установка новых приводов и программная автоматизация позволила вернуть исторический инструмент в активную научную эксплуатацию. Удалось существенно сократить потери наблюдательного времени при наведении на объект. Повышение точности и контроль часового сопровождения позволяет добиваться больших выдержек без смазов, что дает возможность наблюдать значительно более слабые, значит менее изученные, объекты. Следующим этапом является завершение модернизации системы управления куполом и её интеграция с телескопом для полностью согласованной работы без участия оператора.

Планируется создание ASCOM-драйвера, что откроет доступ к современным программам гидирования и полной автоматизации наблюдений.

Литература

1. Максутов Д.Д. Новые катадиоптрические менисковые системы. М.: Гос. изд-во оборонной промышленности. 1944. 132 с.
2. Назаров С.В., Кривенко А.С. Проект модернизации телескопа МТМ-500 в Крымской астрофизической обсерватории // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сборник материалов XVI Международной конференции молодых ученых и студентов, г. Бишкек, 24–26 апреля 2024 г. Бишкек: НС РАН. 2024. С. 452-456.
3. Назаров С.В., Кривенко А.С. Процесс модернизации телескопа МТМ-500 в Крымской астрофизической обсерватории // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сборник материалов XVII Международной конференции молодых ученых и студентов, г. Бишкек, 23–25 апреля 2025 г. Бишкек: НС РАН. 2025. С. 356-358.
4. Кривенко А.С., Назаров С.В., Бутузова М.С. Применение PMSM-сервопривода при модернизации оси прямого восхождения на телескопе МТМ-500 // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 2026. Т. 122. № 1. С. 1-17.

УДК 520.1

МОНИТОРИНГ ФОНА НЕБА В КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ПРИ ПОМОЩИ ПРИБОРА SQM В 2019-2024 гг.

Назаров С.В.
astrotourist@gmail.com
Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный, Крым, Россия

В работе представлены результаты пятилетнего мониторинга яркости ночного неба в Крымской астрофизической обсерватории (высота 590 м н.у.м.) с помощью автоматизированного фотометра SQM-LE в период 2019–2024 гг. Выявлена устойчивая сезонная вариация зенитной яркости фона, аппроксимируемая синусоидой с периодом ~1 год и амплитудой ~0.2^m. Установлено, что небо темнее в летние месяцы и светлее в зимние. Основные факторы, определяющие сезонную модуляцию: вариации интенсивности собственного свечения атмосферы (airglow), сезонные изменения концентрации аэрозолей (включая перенос сахарской пыли и морской соли), облачность, а также отражение техногенной засветки от снежного покрова. Оценено влияние выявленных вариаций на качество фотометрических, астрометрических и спектроскопических наблюдений. Показано, что летний сезон предпочтителен для наблюдений предельных объектов, тогда как зимние условия требуют коррекции времени экспозиции для достижения аналогичного отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: фон неба, астроклимат, SQM-LE, аэрозоли.

Введение. Современная астрономия стремится к повышению точности фотометрических, астрометрических и спектроскопических измерений. Это важно для открытия экзопланет транзитным методом, исследования спутников планет Солнечной системы, звёзд, открытия опасных астероидов и многих других задач. Точность измерений зависит не только от возможностей телескопа, а и от характеристик фона неба, который представляет собой совокупность всех источников рассеянного и диффузного излучения — как природного, так и техногенного характера. Непрерывный мониторинг фонового излучения важен для выявления долгосрочных и краткосрочных тенденций, связанных с изменениями состояния атмосферы и уровня антропогенного воздействия.

Регулярное изучение фона неба позволяет оптимизировать выбор наблюдательных ночей и оценивать стабильность фотометрических условий. Кроме того, такие наблюдения являются ценным источником информации о динамике атмосферных процессов, включая вариации яркости ночного свечения и распространение аэрозолей. Систематический подход к измерению фонового излучения формирует основу для сопоставления данных, получаемых с различных телескопов и обсерваторий, улучшая точность глобальных мониторинговых программ.

Мониторинг фона неба приобретает особое значение в условиях растущего светового загрязнения, которое всё сильнее ограничивает возможности наземной астрономии [1].

Цели и задачи. Модернизация 500-мм менискового телескопа Максутова МТМ-500 в Крымской астрофизической обсерватории направлена на переход от трудоёмкого ручного наведения к полностью автоматизированной системе управления, совместимой с современным оборудованием и программами. Это создаёт базу для регулярных и эффективных многополосных фотометрических наблюдений активных ядер галактик, переменных звёзд и других объектов.

Инструмент. SQM-LE представляет собой компактный фотометрический прибор, предназначенный для количественного измерения яркости ночного неба (фона неба) в единицах звёздной величины на квадратную угловую секунду (mag/arcsec²). Устройство

обладает высокой пригодностью для научных астрономических измерений благодаря объективной регистрации диффузного фонового излучения, включая атмосферное свечение, зодиакальный свет и техногенное световое загрязнение. Его конструкция с оптической линзой обеспечивает поле зрения с FWHM ≈ 20°, что позволяет эффективно усреднять локальные вариации яркости и минимизировать влияние точечных источников, регистрируя внеосевые сигналы с затуханием до 10 раз по сравнению с осевым положением.

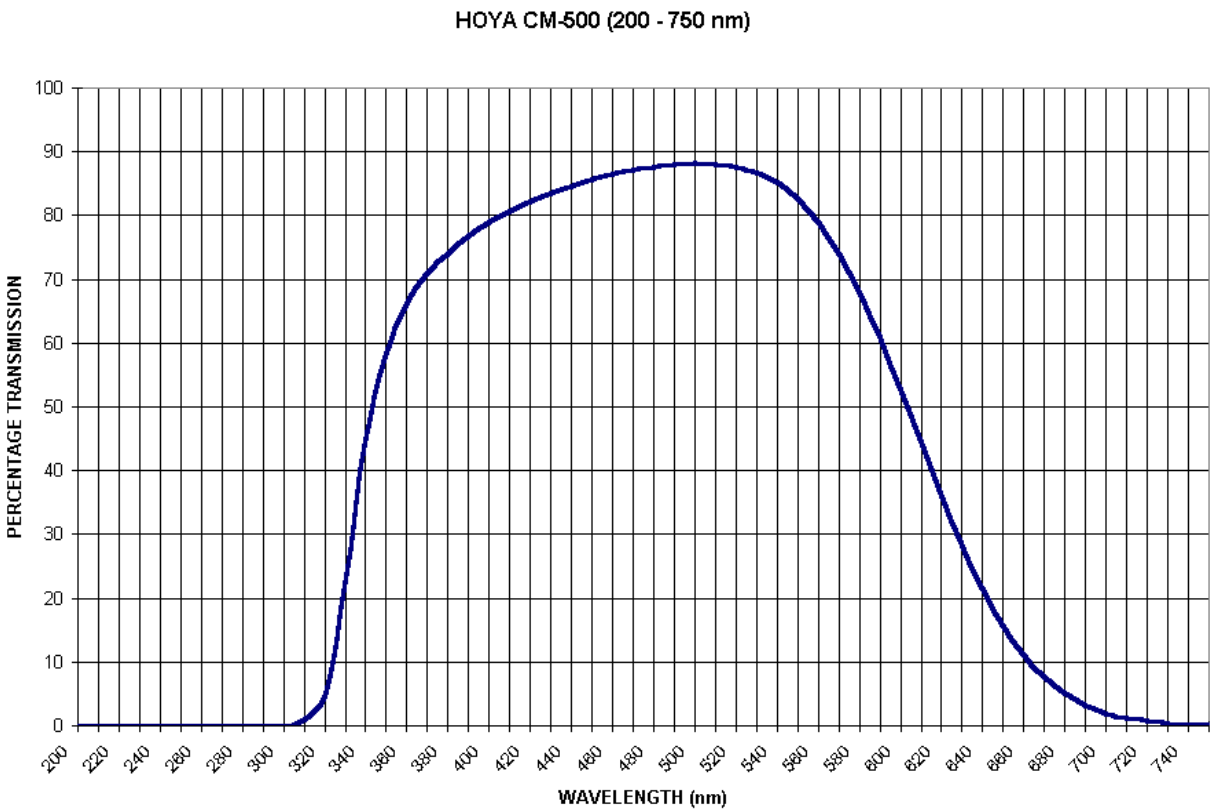


Рисунок 1 – Полоса пропускания блокирующего фильтра прибора

SQM-LE оптимизирован для систематического мониторинга в рамках долгосрочных астрономических программ, где требуется высокая воспроизводимость данных. Встроенные калибровки обеспечивают стабильность измерений без внешних эталонов: прибор использует инфракрасный блокирующий фильтр и фотодиод TSL237S, чувствительный преимущественно в видимом диапазоне: пик чувствительности ~520 нм, эффективный диапазон 400–700 нм с акцентом на V-фильтр (рисунок 1). Чувствительность прибора позволяет фиксировать как условия лучших астроклиматических мест (Бортль 1–2), так и значительное загрязнение, причем с временным разрешением от 1 сек, что подходит для изучения динамики атмосферных процессов и кросс-калибровки данных между обсерваториями.

Применение SQM-LE в научных измерениях подтверждается его интеграцией в глобальные сети мониторинга (например, Globe at Night), где данные используются для анализа трендов светового загрязнения и оптимизации наблюдательных условий. Высокая точность (±0.01 mag/arcsec² при стабильных условиях) и Ethernet-интерфейс для автоматизированного логирования определяют его ценность для современных обсерваторий, ориентированных на стандартизированный сбор фоновых данных [2].

Наблюдения. Измерения яркости неба проводились в автоматическом режиме на приборе SQM-LE, установленном на крыше павильона АЗТ-8 на высоте 590 метров над уровнем моря. Прибор был расположен так, чтобы в поле зрения не попадали деревья,

строения и искусственные источники света. Регулярные наблюдения велись с 2019 по 2024 годы.

Температурную компенсацию прибор производит автоматически. Дополнительная калибровка не проводилась.

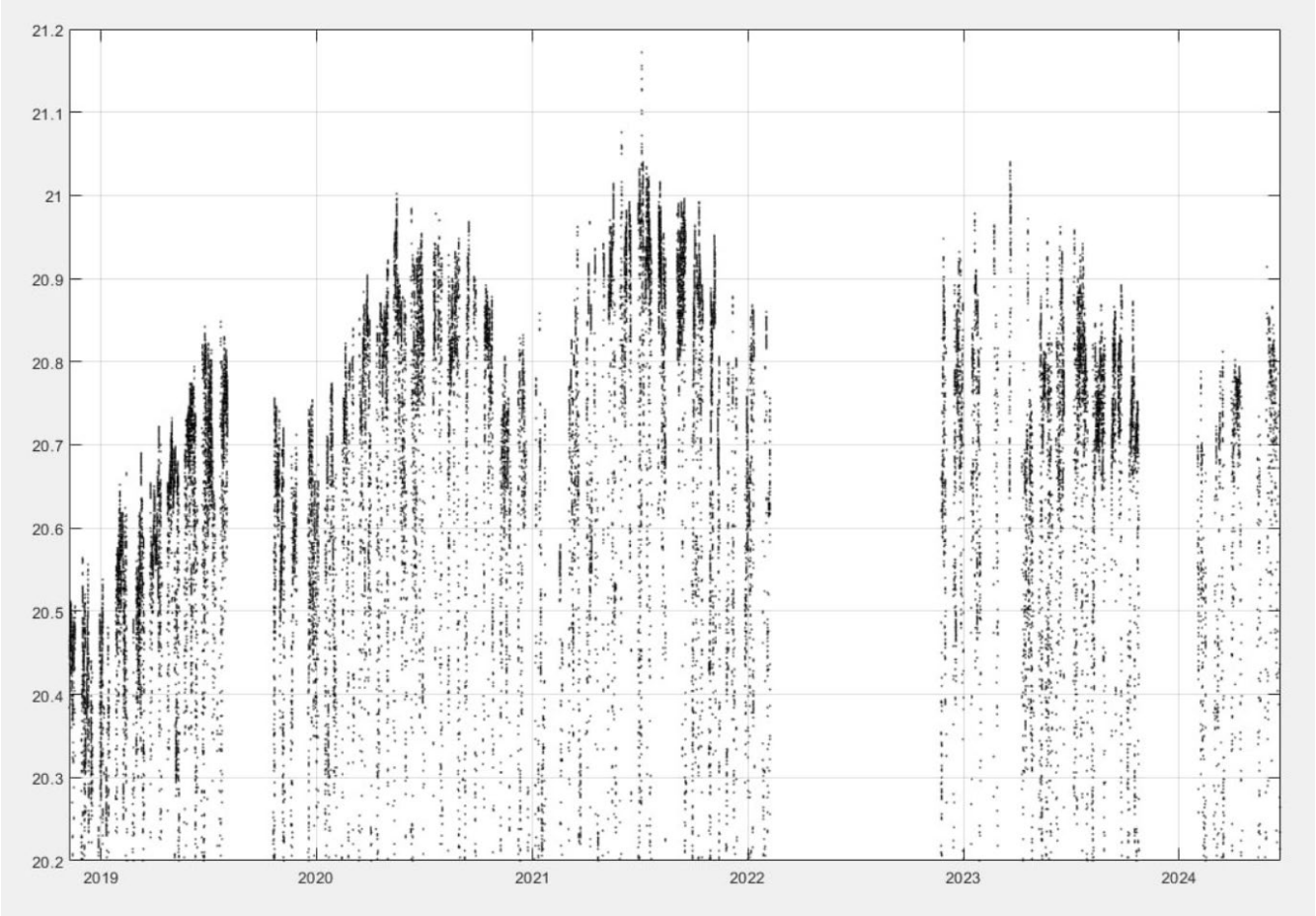


Рисунок 2 – Изменение яркости фона неба в mag/arcsec². Больше величина – темнее, меньше – светлее

Результаты. Построенная зависимость «яркость - время» наглядно демонстрирует выраженную синусоидальную зависимость с периодом ~1 год, амплитудой ~0.2^m в полосе пропускания SQM-LE (~390–600 нм, пик ~520 нм), что позволяет оценить изменение астроклиматических условий.

Минимум фона, то есть более тёмное небо, приходится на летние месяцы, максимум, то есть более светлое — на зимние. Также присутствуют вариации больших длительностей.

Форма кривой близка к гармонической, с плавными переходами между экстремумами; краткосрочные флуктуации (облачность, Луна, аэрозоли) накладываются на сезонный тренд, но не маскируют его.

Амплитуда ~0.2^m согласуется с типичными естественными вариациями ночного неба в других обсерваториях с низким уровнем засветки [3]. Основными причинами, влияющими на сезонные колебания, являются: собственное свечение неба в линиях кислорода и натрия, а также увеличение количества аэрозолей и пылинок, а также облаков зимой из-за большей активности атмосферы.

К примеру, в Крыму зимой-весной отмечаются устойчивые южные ветра, способные принести на полуостров значительное количество песка из Сахары. Зафиксированы случаи переноса пыли и из Казахстана [4]. Правда, отмеченные повышения концентрации пыли сохраняются лишь на масштабах в несколько суток. Возможно, влияет также увеличение содержания морской соли в воздухе из-за более частых зимних штормов.

В целом аэрозоли, пыль и облака увеличивают рассеяние засветки от окрестных населенных пунктов, что приводит к росту фона неба. Некоторый вклад может вносить переотражение городской засветки снежным покровом, устойчиво сохраняющимся на главной гряде Крымских гор с января по март.

Влияние на наблюдения разных типов

Фотометрия. Увеличение яркости фона неба на 0.2 mag/arcsec² соответствует росту фонового потока примерно на 20%, поэтому для сохранения того же отношения сигнал/шум требуется увеличить экспозицию примерно на ту же величину. Для слабых объектов, наблюдения которых ограничены фоновым шумом неба, это приводит к увеличению времени накопления данных на 15–20%.

Для программ мониторинга (переменные звезды, транзиты, сверхновые) требуется регулярная калибровка нуля по стандартным звёздам.

Астрометрия. Астрометрическая точность в первую очередь определяется турбулентностью атмосферы и отношением сигнал-шум. Рост фона зимой уменьшает отношение сигнал/шум для слабых источников и может приводить к большему разбросу координат для объектов около предела чувствительности.

Спектроскопия. Более яркое зимнее небо повышает континуум фона и интенсивность ночного спектра (эмиссионные линии собственного свечения неба), что ухудшает предельные величины для слабых линий/континуума [5].

Летом (более тёмное небо) достигаются более глубокие пределы при тех же экспозициях; зимой для того же проницания нужны более длинные экспозиции, особенно в красной и ближней ИК-областях.

Выводы. Наблюдаемая синусоидальная сезонная модуляция фона неба с амплитудой ~0.2^{m} хорошо согласуется с известными сезонными вариациями, обусловленными собственным свечением атмосферы, прозрачностью, облачностью и снежным покровом.

Для КрАО это означает, что летом условия для слабых фотометрических и спектроскопических наблюдений заметно лучше. Это совпадает с увеличением количества ясных ночей и благоприятствует проведению разнообразных наблюдательных кампаний. Зимой возрастает фон, и для сохранения точности и проницания требуются более длительные экспозиции.

Планируется продолжение наблюдений, уточнение полученных результатов, оценка вклада каждого из факторов на изменение фона, вклада солнечной активности, сравнение со спутниковыми данными, выявление глобальных трендов и долговременных вариаций, учет лунного света, исследование влияния локальных источников засветки.

Литература

1. Васильев Г.И. и др. Влияние оптического фона ночного неба на наземные наблюдения гамма-всплесков в диапазоне 1–10 ГэВ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2012. № 3. С. 191-195.
2. Bertolo V.M., et al. Sky Quality Meter and satellite correlation for night cloud-cover analysis at astronomical sites // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2020. 493 (2). 2463–2474.
3. Plauchu-Frayn I., Richer M., Colorado E., Herrera J., Córdova A., Ceseña U., & Avila F. Night Sky Brightness at San Pedro Martir Observatory // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2016. 129. 973. 035003. https://doi.org/10.1088/1538-3873/129/973/035003.
4. Артамонова М.С., Чхетиани О.Г., Иорданский М.А., Максименков Л.О., Лапченко В.А. Особенности распределения и состава аэрозоля на юго-востоке Крыма весной 2020 г. // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 07. С. 563–576. DOI: 10.15372/AOO20230705.
5. Patat F. The dancing sky: 6 years of night-sky observations at Cerro Paranal // Astronomy and Astrophysics. 2008. 481. 575-591. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20079279.

УДК 519.6

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВИРТУАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗИСОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СРЕДАХ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Петухов К.В.
petukhov1kv@gmail.com
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

В работе представлена вариационная постановка метода виртуальных элементов для решения задачи стационарного теплопереноса с использованием базисов высокого порядка. На её основе разработан программный комплекс для моделирования теплопереноса в неоднородных средах с контрастными коэффициентами теплопроводности на различных полигональных сетках. С использованием данного комплекса проведены численные эксперименты на модельных задачах с различными типами разбиений расчётной области. По результатам вычислений сформулированы выводы и рекомендации по применению метода виртуальных элементов на полигональных конечноэлементных сетках при решении задач стационарного теплопереноса.

Ключевые слова: метод виртуальных элементов, базис повышенного порядка, задача теплопереноса, гетерогенная среда.

Введение. Математическое моделирование процессов в неоднородных средах с геометрически сложными включениями широко используется в прикладных областях, включая задачи геофизики, биомедицины, материаловедения и др. [1]. Классические конечноэлементные подходы при работе с областями сложной формы сталкиваются с необходимостью детализированной триангуляции в окрестности сложных включений, что приводит к существенному увеличению числа степеней свободы (DOF, degrees of freedom) и усложнению решения получаемой СЛАУ. В этой связи особый интерес представляют методы, допускающие использование полигональных и неконформных разбиений, что позволило бы сохранять точность при уменьшенных вычислительных затратах.

Одним из таких подходов является метод виртуальных элементов (VEM, Virtual Element Method). Метод виртуальных элементов представляет собой современное обобщение метода конечных элементов, объединяющее идеи mimetic-схем и многомасштабных подходов [2-3]. В основе метода лежит использование операторов проектирования и степеней свободы, что позволяет неявно определить базисные функции на элементах произвольной полигональной формы [4-5].

Основные особенности метода виртуальных элементов:

- возможность использования элементов произвольной (в том числе невыпуклой) формы;
- построение дискретных билинейных и линейных форм на основе степеней свободы и операторов проектирования без явного задания базисных функций.

Эти свойства расширяют область применения метода, обеспечивая возможность работы с произвольными невыпуклыми элементами и повышая точность аппроксимации за счёт использования базисов высокого порядка [6].

Математическая модель. Математическая модель процесса стационарного распространения тепла в двумерной области Ω имеет вид:

$$-\nabla\cdot\left(\lambda\nabla u\right)+\beta\cdot\nabla u+\gamma u=f, \tag{1}$$

с краевыми условиями по границе $d\Omega=\Gamma_1\cup\Gamma_2$ следующего вида:

$$u\,|_{\Gamma_1}=u_g, \tag{2}$$

$$-\lambda \frac{du}{dn}\bigg|_{\Gamma_2} = \theta, \tag{3}$$

где λ – коэффициент диффузии, β – вектор скорости конвекции, γ – коэффициент реакции.

Пространство виртуальных элементов. Введем понятие виртуального элемента следующим образом: E – полигон в пространстве $\mathbb{R}^2$. Основные характеристики полигона E : x_E – центроид полигона, h_E – диаметр полигона, $|E|$ – площадь полигона.

Обозначим $\mathcal{P}_k(E)$ – пространство полиномов степени меньше или равной k, заданных на полигоне $E \subset \mathbb{R}^2$ и определим

$$n_k = \dim \mathcal{P}_k(E) = \frac{(k+1)(k+2)}{2}. \tag{4}$$

Также определим мультииндекс α со свойствами:

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2), \quad |\alpha| = \alpha_1 + \alpha_2, \quad \alpha_1, \alpha_2 \geq 0. \tag{5}$$

На полигоне E определяются вспомогательные базисные функции – мономиалы:

$$m_\alpha = \left(\frac{x - x_E}{h_E}\right)^{\alpha_1} \left(\frac{y - y_E}{h_E}\right)^{\alpha_2}, \tag{6}$$

где (x_E, y_E) – центроид полигона E. Тогда m_α – масштабированный мономиал степени $|\alpha|$.

Множество масштабированных мономиалов степени меньше или равной k обозначим как $\mathcal{M}_k(E)$:

$$\mathcal{M}_k(E) = \{m_\alpha : 0 \leq |\alpha| \leq k\}. \tag{7}$$

Множество (7) является базисом для $\mathcal{P}_k(E)$. Порядок этого базиса определяется индексацией α в соответствующих мономиалах (6) согласно правилу:

$$1 \leftrightarrow (0,0), \quad 2 \leftrightarrow (1,0), \quad 3 \leftrightarrow (0,1), \quad 4 \leftrightarrow (2,0), \quad 5 \leftrightarrow (1,1), \quad \ldots \tag{8}$$

Метод виртуальных элементов предполагает разбиение $\mathcal{T}_h$ области $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ на совокупность непересекающихся полигонов $E \in \mathcal{T}_h$. Для каждого полигона определяется локальное виртуальное пространство $V_k(E)$.

Функция v_h из пространства $V_k(E)$ определяется следующими свойствами [4]:

- v_h – полином степени $\leq k$ на каждом ребре e полигона E, т.е. $v_h|_{\partial e} \in \mathcal{P}_k(e)$;
- v_h глобально непрерывна на границе ∂E, т.е. $v_h|_{\partial E} \in C^0(\partial E)$;
- Лапласиан Δv_h является полиномом степени $\leq k-2$ внутри E, т.е. $\Delta v_h \in \mathcal{P}_{k-2}(E)$.

Для каждого локального виртуального пространства $V_k(E)$ определены следующие степени свободы (рисунок 1):

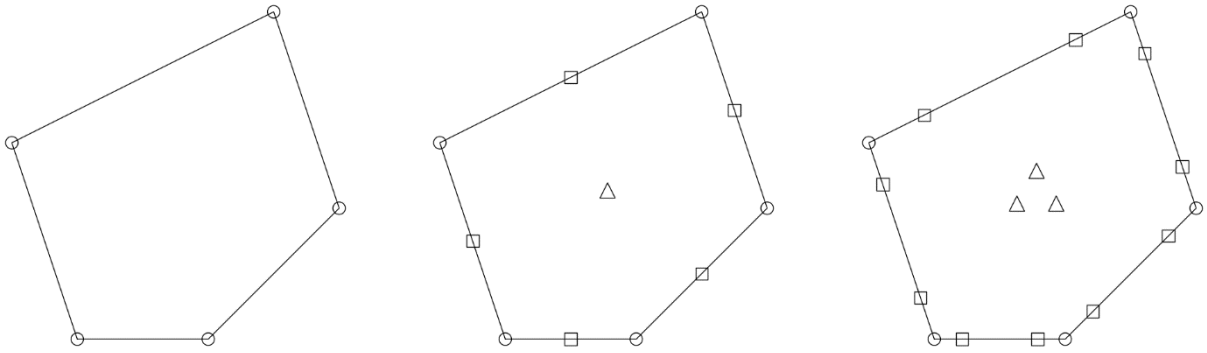
- Значения v_h в вершинах полигона E;
- На каждом ребре e значения функции v_h в $k-1$ внутренних точках, формируемых по правилу квадратуры Гаусса-Лобатто;
- Моменты v_h степени $k-2$, определяемые как:

$$\frac{1}{|E|}\int_E v_h m_j, \quad (j = 1, \ldots, n_{k-2}).$$

Общее число степеней свободы тогда:

$$N_{\text{dof}}^{E} = \dim V_k\left(E\right) = kN_V^E + n_{k-2},$$

где N_V^E – число вершин полигона E.



(а) (б) (в)

Рисунок 1 – Элемент из 5 вершин. Определение степеней свободы: (a) $k=1$, (b) $k=2$, (c) $k=3$, где ○ – вершины полигона, □ – внутриреберные точки, определяемые по правилу квадратуры Гаусса-Лобатто, △ – моменты степени $k-2$

Степени свободы определяют на каждом ребре единственный полином степени $\le k$. Следовательно, можно задать глобальное пространство $V_h \subset H_0^1\left(\Omega\right)$, как:

$$V_h = \left\{v_h \in H_0^1(\Omega)\colon v_{h|E} \in V_h \quad \forall E\right\}. \tag{9}$$

Численная аппроксимация задачи при помощи метода виртуальных элементов. В ходе вариационной постановки локальная билинейная форма для элемента E примет вид:

$$a_E\left(u_h, v_h\right) = \int_E \lambda \nabla u_h \nabla v_h \, dE + \int_E \beta \cdot \nabla u_h v_h \, dE + \int_E \gamma u_h v_h \, dE, \tag{10}$$

линейная форма:

$$b_E\left(f, v_h\right) = \int_E f v_h \, dE. \tag{11}$$

Основная идея метода виртуальных элементов заключается в определении проекции решения $u \subset H_0^1$ на подпространство виртуальных элементов $V_h \in H_0^1$ с заданным порядком базисных функций. Для реализации операции проектирования используются два проектора: Π^{∇} и Π^{0} – операторы проектирования соответствующей билинейной формы. Для их определения используются только степени свободы.

Для вычисления (10) и (11) воспользуемся проекторами Π, которые удовлетворяют условию ортогональности [5]:

$$\left(p_k, \left(\Pi v_h - v_h\right)\right)_{0,E} = 0, \quad \forall p_k \in \mathcal{P}_k\left(E\right), \quad \forall v_h \in V_k\left(E\right). \tag{12}$$

Для базисных функций $\varphi_i \in V_h$ верно:

$$\varphi_i = \Pi \varphi_i + \left(\mathrm{I} - \Pi\right)\varphi_i. \tag{13}$$

Формулы (10), (13) определяют соотношения для вычисления матриц жесткости, конвекции и массы, соответственно:

$$\left(K_E\right)_{ij} = \left(\nabla \Pi^{\nabla} \varphi_i, \nabla \Pi^{\nabla} \varphi_j\right)_{0,E} + \left(\nabla\left(\mathrm{I} - \Pi^{\nabla}\right)\varphi_i, \nabla\left(\mathrm{I} - \Pi^{\nabla}\right)\varphi_j\right)_{0,E}, \tag{14}$$

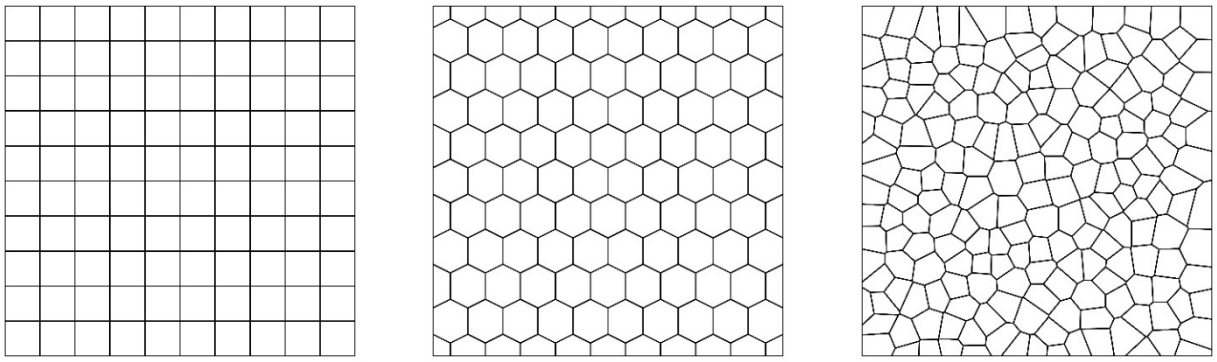
$$\left(L_E\right)_{ij} = \left(\Pi^{0} \varphi_i, \nabla \Pi^{\nabla} \varphi_j\right)_{0,E} + \left(\left(\mathrm{I} - \Pi^{0}\right)\varphi_i, \nabla\left(\mathrm{I} - \Pi^{\nabla}\right)\varphi_j\right)_{0,E}, \tag{15}$$

$$\left(M_E\right)_{ij} = \left(\Pi^{0} \varphi_i, \Pi^{0} \varphi_j\right)_{0,E} + \left(\left(\mathrm{I} - \Pi^{0}\right)\varphi_i, \left(\mathrm{I} - \Pi^{0}\right)\varphi_j\right)_{0,E}. \tag{16}$$

Вектор правой части определяется как:

$$\left(b_E\right)_i = \left(f, \Pi^0 \varphi_i\right)_{0,E}. \quad (17)$$

Результаты численных экспериментов. Для решения стационарной задачи теплопереноса было разработано программное обеспечение с возможностью формировать различные полигональные конечноэлементные сетки (рисунок 2).



(а) (б) (в)

Рисунок 2 – Примеры сеточного разбиения $\mathcal{T}_h$: (а) – равномерная прямоугольная сетка, (б) – сетка из правильных шестиугольников, (в) – неструктурированная сетка Вороного

Программный комплекс был верифицирован на ряде модельных задач с использованием как различных сеток, так и разных порядков базисных функций. В таблицах 1-3 представлены результаты решения задачи вида:

$$-\nabla\cdot\left(\lambda\nabla u\right)+\beta\cdot\nabla u+\gamma u = f, \quad \text{на } \Omega\in\left[0,1\right]^2,$$

$$\lambda = 1, \quad \beta = \left(1,1\right), \quad \gamma = 1,$$

с искомой функцией вида:

$$u\left(x,y\right) = x^n + y^n, \quad n\in\left[1,4\right],$$

и краевыми условиями по границе $d\Omega$:

$$u\big|_{y=0.0} = x^n,$$

$$\left.\frac{du}{dx}\right|_{x=1.0} = nx^{n-1},$$

$$u\big|_{y=1.0} = x^n + 1,$$

$$-\left.\frac{du}{dx}\right|_{x=0.0} = -nx^{n-1}.$$

Решение модельной задачи показало, что метод виртуальных элементов обеспечивает гарантированную точность лишь для функций порядка максимальной степени функций, формирующих множество масштабированных мономиалов. Для функций, не представимых в выбранном базисе, величина погрешности существенно зависит от геометрии используемой расчетной сетки. В частности, установлено, что наименьшие значения ошибки достигаются на регулярных прямоугольных разбиениях, что объясняется геометрией элементов.

Таблица 1 – Относительная ошибка численного решения при $k = 1$

Порядок искомой функции (n)	1	2	3	4
Прямоугольная сетка	3.14E-16	1.14E-03	2.50E-03	1.07E-02
Шестиугольная сетка	1.81E-15	4.28E-03	9.08E-03	1.34E-02
Сетка Вороного	4.40E-15	4.86E-03	9.83E-03	1.72E-02
	Относительная ошибка решения			

Таблица 2 – Относительная ошибка численного решения при $k = 2$

Порядок искомой функции (n)	1	2	3	4
Прямоугольная сетка	1.42E-13	1.18E-13	2.61E-05	1.02E-04
Шестиугольная сетка	1.67E-13	9.00E-14	2.89E-04	7.03E-04
Сетка Вороного	1.68E-13	8.76E-14	2.07E-04	5.39E-04
	Относительная ошибка решения			

Таблица 3 – Относительная ошибка численного решения при $k = 3$

Порядок искомой функции (n)	1	2	3	4
Прямоугольная сетка	2.85E-14	8.15E-15	6.16E-14	2.21E-06
Шестиугольная сетка	1.14E-14	2.96E-14	5.11E-14	1.80E-05
Сетка Вороного	1.41E-14	5.00E-14	6.41E-14	1.16E-05
	Относительная ошибка решения			

В качестве прикладной задачи была рассмотрена задача стационарного теплопереноса в неоднородной среде при отсутствии внутренних источников тепла, вида:

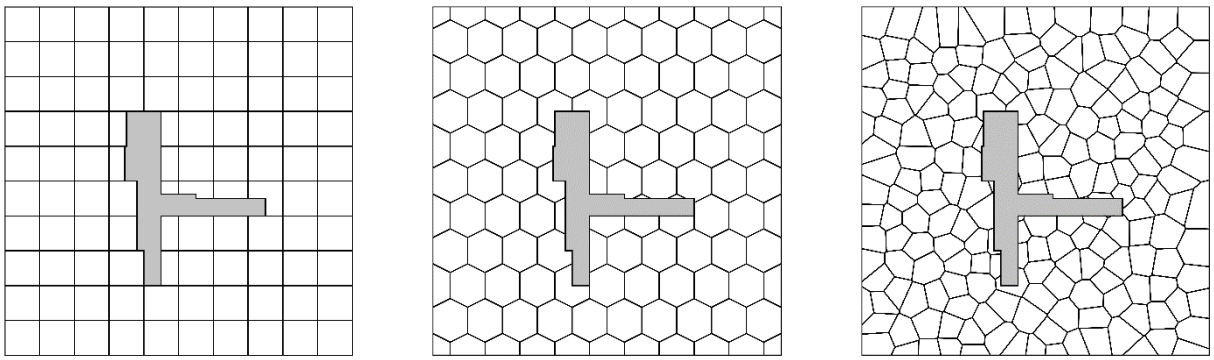
$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla u) = 0, \quad \text{на } \Omega \in [0,1]^2,$$

с краевыми условиями по границе $d\Omega$:

$$u|_{y=0.0} = 100,$$
$$u|_{y=1.0} = 0,$$
$$-\lambda \frac{du}{dn}\bigg|_{x=0.0, x=1.0} = 0.$$

Будем исследовать погрешность при решении задачи с контрастным значением теплопроводности по области: $\lambda_1 = 0.076$ – теплопроводность основной среды, $\lambda_2 = 57.0$ – теплопроводность включения. Верификация выполнена посредством сравнения решения с решением, полученным классическим методом конечных элементов на равномерной прямоугольной сетке. Форма и примеры учета включения в области с разным разбиением показаны на рисунке 3. Включение выделено серым цветом.

Из-за сложности формы включения сетка для метода конечных элементов должна быть очень подробной, что увеличивает вычислительные затраты. Метод виртуальных элементов позволяет учесть включение не перестраивая сетку, тем самым уменьшить количество степеней свободы. Число получившихся степеней свободы для разных сеток и порядков элементов представлены в таблице 4.



(а) (б) (в)

Рисунок 3 – Примеры учета включения внутри сеточного разбиения $\mathcal{T}_h$

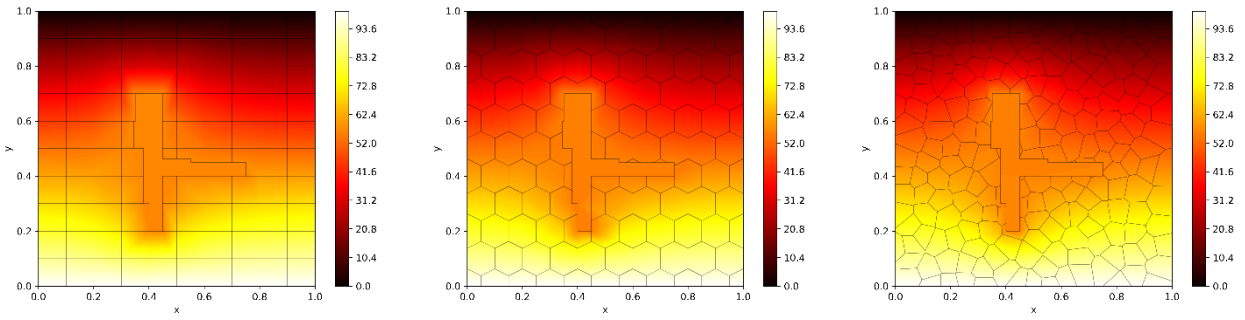
Таблица 4 – Количество степеней свободы на различных сетках при различной базисе

	$k=1$	$k=2$	$k=3$
Сетка для метода конечных элементов	1681	6561	14641
Прямоугольная сетка	111	363	686
Шестиугольная сетка	178	515	932
Сетка Вороного	308	905	1647

Визуализация решения представлена на рисунках 4-5. Результаты исследований показывают, что применение метода виртуальных элементов сокращает размерность решаемой СЛАУ без весомой потери точности, ошибка не превышает 4% (таблица 5).

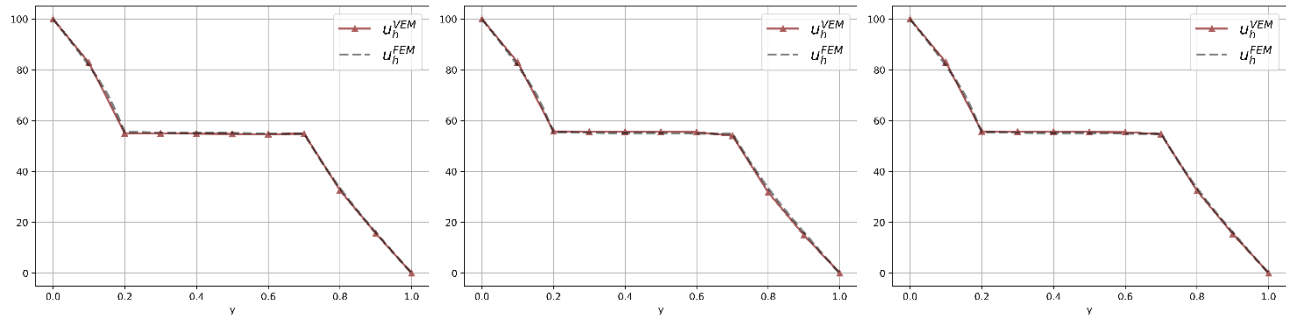
Таблица 5 – Относительная ошибка решения в гетерогенной среде в процентах

	$\frac{\left\|u_h^{VEM}-u_h^{FEM}\right\|}{\left\|u_h^{FEM}\right\|}\cdot 100\%$		
Порядок элементов	$k=1$	$k=2$	$k=3$
Прямоугольная сетка	3.27%	2.00%	1.54%
Шестиугольная сетка	1.94%	1.20%	1.13%
Сетка Вороного	1.98%	1.64%	1.27%



(а) (б) (в)

Рисунок 4 – Тепловое поле на области с включениями: (а) – прямоугольная сетка, (б) – шестиугольная сетка, (в) – сетка Вороного



(а) (б) (в)

Рисунок 5 – Одномерный график в сечении $x=0.425$: (а) – прямоугольная сетка, (б) – шестиугольная сетка, (в) – сетка Вороного

Выводы. Исходя из проведённых численных экспериментов можно заключить, что метод виртуальных элементов подходит для решения задач стационарного теплопереноса в неоднородных средах. Метод показывает приемлемую точность аппроксимации при существенном снижении размерности СЛАУ по сравнению с классическим методом конечных элементов. В рассмотренных тестовых задачах сокращение числа степеней свободы достигало

порядка 80% при относительной погрешности решения в пределах 4%. Метод хорошо подходит для решения класса задач, характеризующихся наличием включений сложной геометрии, где традиционные подходы требуют значительных вычислительных затрат. Повышение порядка базисных функций позволяет решать более сложные задачи с точной аппроксимацией решения. При этом установлено, что для более сложных функций погрешность существенно зависит от геометрии сеточного разбиения.

Литература

1. Эпов М.И., Терехов В.И., Низовцев М.И., Шурина Э.П., Иткина Н.Б., Уколов Е.С. Эффективная теплопроводность дисперсных материалов с контрастными включениями // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 1. С. 48–53.
2. Brezzi F., Lipnikov K., Simoncini V. A family of mimetic finite difference methods on polygonal and polyhedral meshes // Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2005. V. 15. No. 10. P. 1533–1552.
3. Efendiev Y., Galvis J., Hou T.Y. Generalized multiscale finite element methods (GMsFEM) // Journal of Computational Physics. 2013. V. 251. P. 116–135.
4. Beirao da Veiga L., Brezzi F., Cangiani A., Manzini G., Marini L.D., Russo A. Basic principles of virtual element methods // Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2013. V. 23. No. 1. P. 199–214.
5. Beirao da Veiga L., Brezzi F., Marini L.D., Russo A. The Hitchhiker’s Guide to the Virtual Element Method // Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2014. V. 24. No. 8. P. 1541–1573.
6. Beirao da Veiga L., Dassi F., Russo A. High-order Virtual Element Method on polyhedral meshes // Computers & Mathematics with Applications. 2017. V. 74. No. 5. P. 1110-1122.

УДК 519.65

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ОЦЕНКЕ ОСТРОЙ ИШЕМИИ СЕРДЦА

Урустемов С.С., Иманалиев Т.М., Данияров Б.С.
urustemov_se@auca.kg
Американский Университет в Центральной Азии, г. Бишкек, Кыргызстан

Данный проект посвящен разработке математического инструмента для оценки острой ишемии миокарда на основе данных электрокардиограммы, полученных из сканов ЭКГ. Исследование основано на дигитизации изображений ЭКГ и преобразовании графических данных в числовую форму сигнала. Для достижения этой цели было разработано программное приложение, которое позволяет пользователю загружать изображение ЭКГ, калибровать горизонтальную и вертикальную оси, отслеживать форму сигнала и получать оцифрованные точки ЭКГ. После дигитизации сигнал аппроксимируется сглаживающим сплайном, который обеспечивает непрерывное функциональное представление кривой ЭКГ. На этой основе вычисляются первая, вторая и третья производные, что позволяет более детально анализировать изменения формы сигнала. Разработанная программа также позволяет экспортировать обработанную информацию и графические результаты, что упрощает их последующий математический и графический анализ. Результаты данной работы показывают, что предложенный подход может использоваться как удобный математический инструмент для анализа сигналов ЭКГ и может быть полезен для количественного анализа ишемических изменений.

Ключевые слова: ЭКГ, острая ишемия миокарда, оцифровка сигнала, сглаживающий сплайн, производные, математический анализ.

Введение. Электрокардиография является одним из основных методов диагностики сердечно-сосудистых заболеваний и широко используется для выявления различных нарушений работы сердца. Одним из клинически значимых состояний является острая ишемия миокарда, своевременное обнаружение которой имеет большое значение для последующей диагностики и лечения. Изменения на электрокардиограмме могут содержать важную информацию о развитии ишемических процессов, однако их точный количественный анализ не всегда возможен при работе только с бумажными или сканированными ЭКГ.

Во многих случаях электрокардиографические данные представлены в виде изображений, что затрудняет применение математических методов анализа сигнала. Для выполнения более детального исследования необходимо преобразовать графическое представление ЭКГ в числовую форму, пригодную для дальнейшей обработки. Оцифровка сигнала позволяет перейти от визуального анализа кривой к ее количественному исследованию, включая интерполяцию, построение непрерывной функции и вычисление производных.

В данной работе предлагается подход к анализу ЭКГ, основанный на оцифровке сканов электрокардиограмм и их последующей математической обработке. Для этого было разработано программное приложение, позволяющее загружать изображение ЭКГ, выполнять калибровку осей, выделять точки сигнала и формировать цифровое представление кривой. После этого сигнал аппроксимируется сглаживающим сплайном, на основе которого вычисляются первая, вторая и третья производные.

Постановка задачи. Целью исследования является разработка математического инструмента для анализа электрокардиографических данных, полученных из сканированных изображений ЭКГ. В работе рассматривается задача преобразования графического представления сигнала в числовую форму с последующей математической обработкой.

Основное внимание уделяется построению непрерывного представления ЭКГ-кривой и анализу ее свойств с помощью производных различных порядков.

Методика исследования. В качестве исходных данных в работе использовались сканированные изображения электрокардиограмм. Основной задачей данного этапа являлось преобразование графического представления ЭКГ в числовую форму, пригодную для дальнейшего математического анализа. Для этого было разработано программное приложение, позволяющее выполнять последовательную обработку изображения сигнала.

На первом этапе пользователь загружает изображение электрокардиограммы в программу. После этого производится калибровка горизонтальной и вертикальной осей, что необходимо для установления соответствия между координатами изображения и реальными значениями времени и амплитуды сигнала. Такая калибровка позволяет перейти от визуального представления ЭКГ к корректному числовому описанию.

Следующим этапом является выделение точек электрокардиографической кривой. В процессе работы пользователь отмечает положение сигнала на изображении, после чего программа формирует набор дискретных точек, описывающих форму ЭКГ. Полученные точки представляют собой цифровую выборку, которая используется на последующих этапах обработки.

После оцифровки сигнала выполняется его аппроксимация с помощью сглаживающего сплайна. Использование данного метода позволяет получить непрерывное функциональное представление ЭКГ-кривой и уменьшить влияние возможных шумов, неточностей сканирования и погрешностей ручного выделения точек. В результате дискретный набор значений заменяется гладкой функцией, удобной для дальнейшего анализа.

На основе построенной аппроксимирующей функции вычисляются первая, вторая и третья производные. Первая производная позволяет анализировать скорость изменения сигнала, вторая - его кривизну и характер локальных изменений, а третья производная дает возможность более детально исследовать поведение сигнала в точках резкого изменения формы. Такой подход делает возможным более глубокий математический анализ электрокардиограммы по сравнению с обычным визуальным рассмотрением.

Разработанная программа также предусматривает возможность экспорта результатов обработки. Пользователь может сохранять полученные числовые данные, графики исходного и аппроксимированного сигналов, а также результаты вычисления производных. Это позволяет использовать обработанную информацию для дальнейшего математического, графического и сравнительного анализа.

Таким образом, предложенная методика включает загрузку ЭКГ-скана, калибровку осей, оцифровку сигнала, аппроксимацию сглаживающим сплайном, вычисление производных и экспорт результатов. Такая последовательность обеспечивает переход от графического изображения электрокардиограммы к ее математической интерпретации.

Математическая модель. После оцифровки электрокардиографический сигнал представляется в виде набора дискретных точек

$$(x_i, y_i), \quad i = 1, 2, \ldots, n,$$

где x_i соответствует времени, а y_i - амплитуде сигнала в данной точке.

Так как дискретные данные не позволяют в полной мере исследовать свойства сигнала, следующим этапом является построение его непрерывного приближения. Для этого в работе используется сглаживающий сплайн, который аппроксимирует исходный набор точек и задает непрерывную функцию

$$y = f(x). \tag{1}$$

Выбор сглаживающего сплайна обусловлен тем, что он позволяет не только приблизить экспериментальные данные, но и уменьшить влияние шумов, неточностей сканирования и

погрешностей, возникающих при ручной оцифровке ЭКГ. В отличие от точной интерполяции, сглаживающий сплайн обеспечивает более устойчивое и гладкое представление сигнала

После построения функции появляется возможность исследовать ее производные. Первая производная

$$f'(x) = \frac{dy}{dx} \tag{2}$$

характеризует скорость изменения сигнала и позволяет определить участки роста и убывания электрокардиографической кривой.

Вторая производная

$$f''(x) = \frac{d^2y}{dx^2} \tag{3}$$

используется для анализа кривизны сигнала и позволяет выявлять участки изменения выпуклости, а также точки, в которых форма кривой меняется наиболее существенно.

Третья производная

$$f'''(x) = \frac{d^3y}{dx^3} \tag{4}$$

дает дополнительную информацию о характере изменения кривизны и может быть полезна при более детальном исследовании резких изменений формы сигнала.

Таким образом, математическая модель исследования включает два основных этапа: построение непрерывной функции ЭКГ-сигнала на основе сглаживающего сплайна и последующий анализ этой функции с помощью производных первого, второго и третьего порядков. В результате электрокардиограмма рассматривается не только как графическое изображение, но и как математический объект, пригодный для количественного анализа.

Предложенная модель может быть записана в общем виде как последовательность преобразований:

$$\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^{n} \;\rightarrow\; f(x) \;\rightarrow\; f'(x),\; f''(x),\; f'''(x). \tag{5}$$

Это позволяет перейти от исходного изображения ЭКГ к аналитическому исследованию формы сигнала и его локальных особенностей.

Результаты и обсуждение. В результате проведенной работы было разработано программное приложение, позволяющее выполнять оцифровку электрокардиографических изображений и переводить их в числовую форму. Программа обеспечивает загрузку ЭКГ-скана, калибровку координатных осей, выделение точек сигнала и дальнейшую математическую обработку полученных данных.

После оцифровки электрокардиографический сигнал был представлен в виде набора дискретных точек, на основе которых строилась аппроксимирующая функция с использованием сглаживающего сплайна. Полученная непрерывная функция позволила более точно описать форму ЭКГ-кривой и создать основу для дальнейшего аналитического исследования сигнала.

Вычисление первой производной позволило оценить скорость изменения сигнала на различных участках кривой. Это дало возможность выделить интервалы наиболее быстрого роста и убывания, что важно при анализе формы электрокардиограммы. Вторая производная использовалась для исследования кривизны сигнала и определения участков изменения его геометрического характера. Третья производная дала дополнительную информацию о более тонких изменениях формы кривой и позволила глубже исследовать особенности сигнала.

Полученные результаты показывают, что использование сглаживающего сплайна совместно с анализом производных делает возможным переход от визуального анализа ЭКГ к количественному математическому исследованию. Такой подход позволяет рассматривать

электрокардиограмму не только как медицинское изображение, но и как математический объект, свойства которого могут быть изучены с помощью методов анализа функций.

Дополнительным преимуществом разработанной программы является возможность экспорта обработанных данных и графических результатов. Это делает удобным последующее использование полученной информации для сравнительного анализа, визуализации и дальнейших исследований.

Таким образом, предложенный подход может быть использован как удобный математический инструмент для анализа электрокардиографических сигналов. Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов оцифровки, аппроксимации и анализа производных для количественной оценки изменений ЭКГ, в том числе связанных с ишемическими процессами.

Выводы. В данной работе был предложен подход к математическому анализу электрокардиографических сигналов на основе сканированных изображений ЭКГ. Разработанное программное приложение позволяет выполнять загрузку изображения, калибровку осей, оцифровку сигнала, его аппроксимацию с помощью сглаживающего сплайна, а также вычисление первой, второй и третьей производных.

Проведенное исследование показало, что переход от графического изображения электрокардиограммы к ее числовому и функциональному представлению создает возможность для более детального количественного анализа сигнала. Использование сглаживающего сплайна позволяет получить непрерывную модель ЭКГ-кривой, удобную для дальнейшего исследования ее свойств. Вычисление производных разных порядков дает дополнительную информацию о скорости изменения сигнала, его кривизне и особенностях локального поведения.

Полученные результаты подтверждают, что предложенный подход может рассматриваться как удобный математический инструмент для анализа ЭКГ и количественной оценки изменений, связанных с ишемическими процессами. Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного инструмента для последующего математического, графического и сравнительного анализа электрокардиографических данных.

В дальнейшем данный подход может быть расширен за счет автоматизации выделения сигнала, использования дополнительных методов интерполяции и анализа других характеристик электрокардиограммы, имеющих диагностическое значение.

Литература

1. Randazzo V., Puleo E., Paviglianiti A., Vallan A., Pasero E. Development and Validation of an Algorithm for the Digitization of ECG Paper Images // Sensors. 2022. V. 22. No. 19. P. 7138.
2. Baydoun M., Safatly L., Abou Hassan O.K., Ghaziri H., El Hajj A., Isma'eel H. High Precision Digitization of Paper-Based ECG Records: A Step Toward Machine Learning // IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine. 2019. V. 7.
3. Fernandez-Santamonica A., Carratala-Saez R., Larriba Y., Perez-Castellanos A. Rueda C. ECGMiner: A flexible software for accurately digitizing ECG // Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2024. V. 246. P. 108053.

УДК 519.2

ЕДИНАЯ ФОРМА МОДЕЛЕЙ ЭВАНСА И ПАУТИНООБРАЗНОЙ МОДЕЛИ, МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЕЁ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦЕН

Ыдырысов Б.Ы.
Yb13096@auca.kg
Американский Университет в Центральной Азии, г. Бишкек, Кыргызстан

В работе рассматриваются модель Эванса и паутинообразная модель динамики цен. Показано, что обе модели сводятся к линейному разностному уравнению первого порядка вида $p_n = ap_{\{n-1\}} + b$. *Следовательно, задача прогнозирования цен сводится к определению коэффициентов* a *и* b. *Для оценки параметров были рассмотрены несколько методов: вычисление по двум точкам, метод наименьших квадратов и взвешенный метод наименьших квадратов. Полученные коэффициенты использованы для построения прогноза и сравнения точности моделей на реальных данных. Показано, что различные способы оценки используют одну и ту же форму уравнения, но отличаются точностью прогнозирования.*

Ключевые слова: модель Эванса, паутинообразная модель, линейное разностное уравнение первого порядка, прогнозирование цен, метод наименьших квадратов, OLS, weighted OLS, метод усреднённых коэффициентов, устойчивость модели, временные ряды.

Введение. Прогнозирование динамики цен является одной из важнейших задач экономико-математического моделирования используемое в реальных задачах повседневной жизни. Для описания изменения цен во времени широко используются различные модели, среди которых особое место занимают модель Эванса и паутинообразная модель. Несмотря на разные экономические интерпретации, обе модели приводят к одному и тому же математическому выражению — линейному разностному уравнению первого порядка. Модель Эванса описывает постепенную корректировку цены в зависимости от разности между спросом и предложением. Паутинообразная модель, напротив, исходит из предположения, что производители принимают решения, ориентируясь на цену предыдущего периода, вследствие чего возникает запаздывание предложения. Однако в обоих случаях динамика цены может быть записана в виде

$$\mathrm{p_n} = \mathrm{ap_{n-1}} + \mathrm{b} \qquad (1)$$

Следовательно, задача прогнозирования цены сводится к определению коэффициентов a и b. В данной работе показывается эквивалентность модели Эванса и паутинообразной модели уравнению (1), а также сравнивается точность различных способов оценки коэффициентов по реальным данным.

Теоретическое сведение модели Эванса к линейному разностному уравнению. Модель Эванса предполагает, что изменение цены пропорционально разности между спросом и предложением:

$$\mathrm{p_n} = \mathrm{p_{n-1}} + \mathrm{k}\left(\mathrm{q^d_{n-1}} - \mathrm{q^s_{n-1}}\right) \qquad (2)$$

где p_n — цена в момент n, q^d — величина спроса, q^s — величина предложения, $k > 0$ — коэффициент скорости адаптации.

Предположим, что функции спроса и предложения линейны:

$$q^d = \alpha - \beta p \qquad (3)$$

$$q^{\mathrm{s}} = \gamma + \delta \mathrm{p} \qquad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (2), получаем

$$p_n = p_{n-1} + k[(\alpha - \beta p_{n-1}) - (\gamma + \delta p_{n-1})] \qquad (5)$$

После раскрытия скобок имеем

$$p_n = p_{n-1} + k(\alpha - \gamma - (\beta + \delta)p_{n-1}) \qquad (6)$$

Сгруппируем члены при p_{n-1}:

$$p_n = [1 - k(\beta + \delta)]p_{n-1} + k(\alpha - \gamma) \quad (7)$$

Обозначив

$$a = 1 - k(\beta + \delta) \quad (8)$$

$$b = k(\alpha - \gamma) \quad (9)$$

Получаем

$$p_n = ap_{n-1} + b \quad (1)$$

Таким образом, модель Эванса сводится к линейному разностному уравнению первого порядка

Сведение паутинообразной модели к линейному разностному уравнению. В паутинообразной модели предполагается, что предложение текущего периода зависит от цены предыдущего периода:

$$q_n^s = \gamma + \delta p_{n-1} \quad (10)$$

Спрос определяется текущей ценой:

$$q_n^d = \alpha - \beta p_n \quad (11)$$

В состоянии рыночного равновесия выполняется условие

$$q_n^d = q_n^s \quad (12)$$

Подставляя (10) и (11), получаем

$$\alpha - \beta p_n = \gamma + \delta p_{n-1} \quad (13)$$

Выразим p_n:

$$\beta pn = \alpha - \gamma - \delta pn{-}1 \quad (14)$$

$$p_n = -\left(\frac{\delta}{\beta}\right)p_{n-1} + \frac{\alpha - \gamma}{\beta} \quad (15)$$

Обозначая

$$a = -\frac{\delta}{\beta} \quad (16)$$

$$b = \frac{\alpha - \gamma}{\beta} \quad (17)$$

снова приходим к уравнению

$$p_n = ap_{n-1} + b \quad (1)$$

Следовательно, несмотря на различную экономическую интерпретацию, обе модели имеют одинаковую математическую форму.

Методы определения коэффициентов a и b. Поскольку обе модели сводятся к уравнению (1), задача прогнозирования заключается в оценке коэффициентов a и b по историческим данным. В работе были рассмотрены три метода.

1. Метод усредненных коэффициентов

Другим способом оценки параметров является последовательное вычисление локальных коэффициентов a и b по всем доступным данным, а затем их усреднение.

Пусть известна последовательность цен

$$p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$$

Для каждых трёх последовательных наблюдений записывается система

$$p_{\{i+1\}} = a_i p_i + b_i \quad (18)$$

$$p_{\{i+2\}} = a_i p_{\{i+1\}} + b_i \quad (19)$$

Вычитая (18) из (19), получаем выражение для локального коэффициента

$$a_i = \frac{\{p_{\{i+2\}} - p_{\{i+1\}}\}}{\{p_{\{i+1\}} - p_i\}} \quad (20)$$

После нахождения a_i коэффициент b_i определяется по формуле

$$b_i = p_{\{i+1\}} - a_i p_i \quad (21)$$

Таким образом, для всей последовательности данных получаются наборы коэффициентов

$$a_1, a_2, \dots, a_m$$
$$b_1, b_2, \dots, b_m$$

Итоговые коэффициенты модели определяются как средние значения.

Арифметическое среднее вычисляется по формулам

$$a = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} a_i \quad (22)$$

$$b = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} b_i \quad (23)$$

После вычисления итоговых коэффициентов строится модель

$$p_n = ap_{n-1} + b \quad (1)$$

Данный метод использует все имеющиеся данные, однако в отличие от метода наименьших квадратов не минимизирует суммарную ошибку. Его преимущество состоит в простоте вычислений и возможности учитывать локальные изменения динамики цены.

2. Метод наименьших квадратов [2]

Наиболее распространенным способом является метод наименьших квадратов (OLS – Ordinary Least Squares). Предполагается, что выполняется зависимость

$$p_n = ap_{n-1} + b \quad (1)$$

Метод OLS выбирает такие значения a и b, при которых минимальна сумма квадратов ошибок:

$$S(a,b) = \Sigma[p_n - (ap_{n-1} + b)]^2 \quad (22)$$

В Microsoft Excel коэффициенты определяются с помощью функций:

SLOPE(p_n; p_{n-1}) — для коэффициента a,

INTERCEPT(p_n; p_{n-1}) — для коэффициента b.

Полученные значения используются для построения прогноза:

$$p_n = ap_{n-1} + b \quad (1)$$

3. Взвешенный метод наименьших квадратов [2]

Для учета того, что более новые данные могут быть важнее старых, используется взвешенный метод. В этом случае минимизируется выражение

$$S(a,b) = \sum k^n\left(p_n - (ap_{n-1} + b)\right)^2 \quad (23)$$

где k^n— вес наблюдения, где k > 1.

Таким образом, более поздние наблюдения получают больший вес в уравнении. После умножения данных на квадратный корень из веса снова применяется стандартный метод OLS.

Экспериментальная часть. В экспериментальной части работы использовались исторические данные о ценах различных активов и товаров за период 2010-2026 гг. Для исследования были выбраны временные ряды с различным характером динамики: быстро растущие акции, акции со спадом, сырьевые товары и продовольственная корзина.

Данные о стоимости одной акции были получены с сайта Yahoo Finance: Apple Inc. [2], NVIDIA Corporation [3] и Intel Corporation [4]. Для золота использовались исторические цены за одну унцию с сайта Macrotrends [5], а для нефти за баррель - данные сайта Macrotrends [6]. Стоимость продовольственной корзины в Бишкеке определялась на основе официальной продовольственной части прожиточного минимума в Кыргызстане, в которую входят продовольственные товары, непродовольственные продукты, услуги и налоги [7]. Цены на корзину были переведены в Доллары США по соответствующему на указанный период курсу [8].

Для каждого временного ряда строилась модель вида

$$p_n = ap_{n-1} + b \quad (1)$$

Коэффициенты a и b определялись тремя способами:

1. методом усреднённых коэффициентов;
2. методом наименьших квадратов (OLS);

3. взвешенным методом наименьших квадратов (Weighted OLS).

Для проверки качества моделей использовались два подхода.

В первом случае коэффициенты вычислялись по всем данным 2010–2026 гг., после чего ошибка определялась на тех же данных (in-sample).

Во втором случае коэффициенты определялись только по данным 2010–2024 гг., а затем использовались для прогноза на период 2025–2026 гг. (out-of-sample). Прогноз строился рекуррентно:

$$p_{\{2025\}} = ap_{\{2024\}} + b \quad (24)$$

$$p_{\{2026\}} = \hat{a}p_{\{2025\}} + b \quad (25)$$

Точность прогнозов оценивалась с помощью средней относительной ошибки:

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{p_i - p_{ix}}{p_i}\right| \times 100\% \quad (26)$$

1. Результаты in-sample

В первом эксперименте коэффициенты a и b определялись по всем имеющимся данным за 2010-2026 гг., после чего модель проверялась на тех же данных. Такой подход позволяет оценить, насколько хорошо модель описывает уже известную динамику ряда.

Метод усреднённых коэффициентов показал высокую ошибку для нестабильных финансовых рядов. Для акций Apple Inc. средняя относительная ошибка составила 176,84%, для NVIDIA Corporation - 1649,2%, для Intel Corporation - 54,36%. Причина заключается в том, что локальные коэффициенты a_i и b_i, вычисляемые по трём соседним точкам, сильно меняются при наличии резких скачков цены. Для более плавных рядов метод дал значительно лучшие результаты: для золота ошибка составила 8,62%, для нефти - 31,31%, для продуктовой корзины в Бишкеке - 3,03%.

Метод наименьших квадратов (OLS) значительно уменьшил ошибку почти для всех рядов. Для Apple ошибка снизилась до 14,64%, для Intel - до 9,37%, для золота - до 8,32%, для нефти - до 14,74%, для продуктовой корзины - до 0,87%. Для NVIDIA ошибка также уменьшилась, однако осталась высокой и составила 293,65%, что связано с очень быстрым ростом акций после 2020 г.

Weighted OLS показал смешанные результаты. Для золота ошибка составила 28,72%, для продуктовой корзины - 12,55%, однако для Apple ошибка выросла до 96,97%, для NVIDIA - до 5012,97%, для нефти – 30,73%, а для Intel - до 98,36%. Следовательно, даже внутри выборки weighted OLS оказался нестабильным для быстро меняющихся временных рядов.

2. Результаты out-of-sample

Во втором эксперименте коэффициенты модели определялись только по данным за 2010–2024 гг., после чего строился прогноз на 2025 г. и начало 2026 г. по рекуррентной формуле

$$\widehat{p_n} = \hat{a}p_{\{n-1\}} + b \quad (27)$$

Для метода усреднённых коэффициентов были получены следующие значения ошибки: 72,91% для Apple, 86,29% для NVIDIA, 62,15% для Intel, 60,19% для золота, 9,57% для нефти и 3,23% для продуктовой корзины. Несмотря на то, что для нефти и продовольственной корзины ошибка оставалась сравнительно небольшой, для остальных рядов данный метод оказался малоэффективным.

Метод OLS снова показал наилучшие результаты. Для Apple средняя ошибка составила 3,77%, для продуктовой корзины — 2,12%, для нефти — 22,6%. Для золота ошибка была равна 34,69%, для Intel — 48,29%, а для NVIDIA — 99,79%. Таким образом, OLS хорошо справился с прогнозированием рядов, динамика которых после 2024 г. существенно не изменилась, однако оказался менее эффективен для NVIDIA, Intel и золота, чья динамика резко изменилась после 2024 года.

Weighted OLS дал худшие результаты почти для всех рядов. Для Apple ошибка составила 42,52%, для NVIDIA — 146,43%, для Intel — 204%, для нефти — 57,16%, для продуктовой корзины — 27,96%. Только для золота weighted OLS оказался немного лучше обычного OLS: ошибка составила 29,47%. Это связано с тем, что золото перед 2024

подверглось резкому повышению цен и weighted OLS отлично это показал, дав больший вес в вычислениях последним данным.

Причина ухудшения качества прогноза состоит в том, что weighted OLS приводит к завышенным значениям коэффициента a. Например, для Apple было получено $a = 1{,}193$, для Intel $a = 1{,}083$, для продуктовой корзины $a = 1{,}132$. Поскольку при $|a| > 1$ решение разностного уравнения становится неустойчивым, ошибка прогноза начинает быстро расти.

3. Сравнение in-sample и out-of-sample

Сравнение двух подходов показывает, что хорошее описание уже известных данных ещё не означает хорошего прогноза будущих значений.

Для метода усреднённых коэффициентов переход к out-of-sample не привёл к заметному улучшению качества. Ошибка для золота увеличилась с 8,62% до 60,19%, т.к. коэффициенты, найденные по данным до 2024, не смогли предсказать резкий скачок цен после 2024. Однако для Apple ошибка уменьшилась с 176,84% до 72,91% благодаря тому, что в вычислениях не участвовали экстремальные последние данные за 2025 и 2026 год, которые вносили «хаос». Следовательно, данный метод остаётся нестабильным и слишком чувствительным к локальным изменениям ряда.

Для OLS результаты вне выборки оказались хуже, чем внутри выборки, но метод всё же сохранил наилучшую устойчивость. Например, для Apple ошибка уменьшилась с 14,64% до 3,77%, то есть прогноз оказался даже лучше, чем описание всей выборки. Для золота ошибка выросла с 8,32% до 34,69%, а для Intel - с 9,37% до 48,29%. Это связано с тем, что после 2024 г. характер динамики данных изменился.

Weighted OLS в большинстве случаев показал резкое ухудшение результатов вне выборки. Особенно сильно это проявилось для Intel: ошибка выросла с 98,36% до 204%, а для продуктовой корзины - с 12,55% до 27,96%. Таким образом, дополнительное увеличение веса последних наблюдений не улучшает прогноз, а часто приводит к нарушению условия устойчивости $|a| < 1$.

Следовательно, проведённый эксперимент подтверждает, что наиболее универсальным и надёжным способом определения коэффициентов a и b является обычный метод наименьших квадратов.

Выводы. В результате исследования было показано, что как модель Эванса, так и паутинообразная модель сводятся к линейному разностному уравнению первого порядка

$$p_n = ap_{n-1} + b \qquad (1)$$

Следовательно, задача построения прогноза сводится к определению коэффициентов a и b. Были рассмотрены три способа нахождения этих коэффициентов: метод усреднённых коэффициентов, метод наименьших квадратов (OLS) и weighted OLS.

Проведённые вычисления показали, что метод усреднённых коэффициентов пригоден лишь для достаточно плавных временных рядов. Для продуктовой корзины и нефти его ошибка составила 3,23% и 9,57% соответственно. Однако для акций Apple Inc., NVIDIA Corporation и Intel Corporation ошибка оказалась значительно выше и достигала 72,91%, 86,29% и 62,15%. Это связано с тем, что метод слишком чувствителен к локальным изменениям цен.

Weighted OLS также показал низкую устойчивость. При увеличении веса последних наблюдений коэффициент a часто становился больше единицы. Для Apple было получено $a = 1{,}193$, для Intel $a = 1{,}083$, для продуктовой корзины $a = 1{,}132$. Вследствие этого прогноз начинал расходиться, а ошибка существенно возрастала. Например, для Intel средняя ошибка достигла 204%, а для NVIDIA — 146,43%.

Наиболее устойчивым методом оказался обычный OLS. Он давал наименьшую ошибку как внутри выборки, так и при прогнозировании новых данных. Для прогноза на 2025–2026 гг. ошибка OLS составила 3,77% для Apple, 22,6% для нефти и 2,12% для продуктовой корзины. Следовательно, именно этот метод является наиболее целесообразным для дальнейшего применения.

Используя коэффициенты OLS, были получены ориентировочные прогнозы до 2027 года (таблица 1).

Таблица 1

Год/Актив ($)	Apple Inc.	NVIDIA Corporation	Intel Corporation	Золото	Нефть	Продуктовая Корзина
2026, 2 квартал	277,4	200,4	44	4985,1	80,5	167,5
2027, 1 квартал	295,8	229	42,5	5821	80	173.3
2027, 2 квартал	315,1	261,4	41,3	6841	79.7	179,2

Таким образом, исследование подтверждает, что для линейных динамических моделей решающее значение имеет выполнение условия устойчивости $|a| < 1$.

Если это условие выполняется, то модель способна давать разумный прогноз. В противном случае ошибка быстро возрастает, и прогноз теряет практический смысл.

Благодарности. *Особая благодарность профессору факультета «Прикладной математики и информатики» и доктору наук Кыдыралиеву С.К. за помощь и советы в написании данной работы.*

Литература

1. Кыдыралиев С.К. Разностные и дифференциальные уравнения с приложениями. Бишкек. 2020. С. 64–68.
2. Gujarati D.N., Porter D.C. Basic Econometrics. 5th ed. New York: McGraw-Hill. 2009. P. 56, 409.
3. Yahoo Finance: Apple Inc.
4. Yahoo Finance: NVIDIA Corporation.
5. Yahoo Finance: Intel Corporation.
6. Macrotrends: Historical Gold Prices.
7. Macrotrends: Crude Oil Price History.
8. Национальный статистический комитет Кыргызской Республики. Прожиточный минимум.
9. Национальный банк Кыргызской Республики. Курсы валют.

СОДЕРЖАНИЕ

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ

TECTONIC - GEOMORPHOLOGIC INTERACTION: INSIGHTS FROM LABORATORY FAULT MODELLING AND APPLICATIONS FOR NATURAL SYSTEMS
Zasorina I.I. 4

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОБЪЕКТОВ К БУРЕНИЮ И ВОСПОЛНЕНИИ РЕСУРСНОЙ БАЗЫ УГЛЕВОДОРОДОВ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
Абдураимов М.Х., Богданов А.Н., Эйдельнант Н.К., Хмыров П.В., Тухтаев Р.Р. 9

ОЦЕНКА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ КАК ИНДИКАТОРА СТРУКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЗРЫВОВ
Асаншоева Ш.А., Шозиёев Ш.П. 14

ЭЛЕКТРО-ТОМОГРАФО-СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ОПОЛЗНЕ-ОПАСНОГО СКЛОНА ТУЮК-СУУ В БАССЕЙНЕ РЕКИ МИН-КУШ
Бектурсунов Ж.З., Абдыбачаев У.А., Усупаев Ш.Э., Коноков Т.К., Тумышев Б.А., Казиев Э.Б. 21

ОЧЕРКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ 1885–1889 ГОДОВ НА СТРАНИЦАХ СИБИРСКОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ
Ватокина А.А. 27

ОПЫТ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИКИ РАЗЛОМОВ ДОНБАССА
Грицаенко А.Ю., Мартынов Г.П., Ялпута Е.А. 32

ФРАКТАЛЬНО-ИТЕРАЦИОННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ АНАЛИЗА НЕФТЯНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ В АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ
Доненко Л.Н., Доненко И.Л., Доненко С.Л. 40

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КАК ИНДИКАТОР ГЛУБИННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
Зулпухарова Б.А. 46

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ GNSS-НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ВЗРЫВОНАБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ КАМБАРАТА 2
Кенигсберг Д.В. 51

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ СОВМЕЩЕННЫХ УСТАНОВОК С МНОГОШТЫРЕВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ
Коломейцев Д.В. 57

ОРГАНИЗАЦИЯ ВРЕМЕННОГО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО ПУНКТА НАБЛЮДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКВАЖИННОГО ПРИБОРА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ
Косоротова Е.А. 63

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «SEISMICPHASETIME» ДЛЯ РАСЧЕТА ВРЕМЕН ВСТУПЛЕНИЯ ФАЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН
Лазарева Е.А. 67

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ FDM-ПЕЧАТИ
Лисимов М.О., Лашин О.А. 72

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ОЧАГАХ РОЕВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ
Лютикова В.С., Литовченко И.Н. 78

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИПОЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗА 25 ЛЕТ НА ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОФИЛЯ МТЗ «TIPAGE-ALAI»
Непеина К.С., Матюков В.Е. 85

ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА ОБСЕРВАТОРИИ «МЕМАМБЕТЦУ» В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА КАМЧАТКЕ МАГНИТУДОЙ 8.8
Рябова С.А. 90

ДАННЫЕ ГНСС КАК ИСТОЧНИК ИССЛЕДОВАНИЯ ТРОПОСФЕРНОЙ ВЛАЖНОСТИ
Саламатина Ю.М. 92

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ И МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ГРАДИЕНТНОЙ УСТАНОВКИ
Стасенко Л.В. 97

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА OBSPY ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РОЕВ СЛАБЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА
Темникова З.В. 104

ГЕОДЕФОРМАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ПОДЗЕМНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ НА ТЕРРИТОРИИ НИЦ "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ" – ИФВЭ
Фаттахов Е.А. 111

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРТАТИВНОГО РАДОНОВОГО МОНИТОРА FYCDY-30 В ИНСТИТУТЕ СЕЙСМОЛОГИИ (СОДЕРЖАНИЕ РАДОНА В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ И ВОЗДУХЕ)
Хасанова Г.И., Юсупов В.Р., Сагдуллаева К. А., Назаров С. Х., Ризакаева М. А. 117

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВТОРНЫХ ЗАМЕРОВ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОГО УЗБЕКИСТАНА С ПОКАЗАНИЯМИ ОБСЕРВАТОРИИ ЯНГИБАЗАР
Хусанова Г.И., Сагдуллаева К.А., Назаров С.Х., Хакимов Э.Н., Хусанов У.М., Салимов И.М. 123

ВЛИЯНИЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ПРОИЗОШЕДШИХ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В 1967–1989 ГГ., НА ИЗМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЯНГИАБАДСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
Хусомиддинов А.С., Рузимбоев Ф.Ф., Эгамбердиев С.А. 130

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛОМНЫХ ЗОН МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ: ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДНЫХ УСТАНОВОК
Юнусов А.И. 135

ПОВТОРНЫЕ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ ТАШКЕНТА И ФЕРГАНЫ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМОГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
Юсупов В.Р. 141

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ОПАСНОСТИ

CLIMATE DATA ANALYSIS OF DROUGHT TRENDS IN KAKUMA REFUGEE CAMP (1950–2022)
Abalo J.A., Orunbaev S.Z. 146

CLIMATE VARIABILITY AND CYCLONE IMPACTS ON LIVELIHOODS IN COASTAL BANGLADESH: EVIDENCE FROM THE BENGAL DELTA
Das T.K., Orunbaev S.Z. 154

CLIMATE DATA ANALYSIS FOR THE WEST BANK - PALESTINE: LOOKING AT DROUGHT PATTERNS AND HEAT WAVES (1901-2024) USING CRU TS DATA
Dawabsheh D., Orunbaev S.Z. 169

GLOBAL DEMAND, LOCAL RISK: CRITICAL MINERALS AND CLIMATE DISASTERS IN THE RANGKUL–MURGHAB REGION
Noyobshoeva A., Orunbaeva S. 178

CLIMATE CHANGE AND COMPOUND RISKS IN KYRGYZ LEGACY MINING LANDSCAPES: A COMPARATIVE ANALYSIS OF MAILUU-SUU AND AK-TYUZ
Ricciotti E., Pacher S., Orunbaev S.Z. 182

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ГАЗА
Кузьмин Д.К. 190

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА УСТЬ-КАМЕНОГОРСК)
Маулитова Ш.Е., Ишпекбаева А.К., Таукебаев Ж.Ж. 194

ДИНАМИКА ПРОРЫВООПАСНОСТИ ОЗЕР КЫРГЫЗСТАНА
Мусабаев Д.Н., Ерохин С.А. 200

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ СЕЙСМООПАСНЫХ ЗОН РАЗЛОМОВ НА ПРИМЕРЕ ГОРНОГО КРЫМА
Мягков Д.С. 208

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТРУЗИЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ПРИЛОЖЕНИИ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕКТОНОФИЗИКИ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА
Мягков Д.С. 211

МЕХАНИКА И МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ANALYSIS OF EXCHANGE RATE OSCILLATIONS: USD/KGS AND USD/RUB VIA FIRST-ORDER DIFFERENCE EQUATIONS
Shakiraliev E.S. 216

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КЛАССОВ ИНДЕКСА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
Абубакерова З.М. 221

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В НАНОЖИДКОСТИ
Алтынбек уулу Ы., Кучунова Е.В. 226

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ДИФФУЗИИ-РЕАКЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ОДНОСТАДИЙНЫХ АЛГОРИТМОВ)
Быстрова М.Е., Забинякова О.Б., Скляр С.Н. 230

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ФРАКЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ
Доскожоева Н.М., Майрамбекова А.М. 238

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «MTMONDATAPROC» ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
Забинякова О.Б. 241

ВЛИЯНИЕ ЗЕЛЕНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ РАСПОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ
Зулпуев А.М., Казакова К.К., Ли Ю. 248

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА СИЛЫ ВЕТРА В КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ
Инчина К.А. 252

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМОМОЛОТОВ В АРКТИКЕ
Иоанов И.Е. 259

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К АВТОМАТИЗАЦИИ УЧЕТА ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ
Каретный Б.Д. 263

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕЛЕСКОПА МТМ-500 В КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
Кривенко А.С., Назаров С.В. 268

МОНИТОРИНГ ФОНА НЕБА В КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ПРИ ПОМОЩИ ПРИБОРА SQM В 2019-2024 гг.
Назаров С.В. 271

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВИРТУАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗИСОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СРЕДАХ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ
Петухов К.В. 275

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ОЦЕНКЕ ОСТРОЙ ИШЕМИИ СЕРДЦА
Урустемов С.С., Иманалиев Т.М., Данияров Б.С. 282

ЕДИНАЯ ФОРМА МОДЕЛЕЙ ЭВАНСА И ПАУТИНООБРАЗНОЙ МОДЕЛИ, МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЕЁ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦЕН
Ыдырысов Б.Ы. 286

Научное издание

XVIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Сборник материалов
XVIII Международной конференции молодых ученых и студентов

22-24 апреля 2026 года
Научная станция РАН г. Бишкек,
Кыргызская Республика

Электронное издание НС РАН
720049, Кыргызстан, Бишкек-49
Тел.: +996 (312) 61 31 40