

Локализация выходов тектонических нарушений под четвертичные отложения геофизическими методами

Н.Н. Гриб^{1,2}✉, И.И. Колодезников³, Г.В. Гриб¹, А.В. Качаев¹

¹ Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, г. Нерюнгри, Российской Федерации

² Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российской Федерации

³ Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российской Федерации

✉ grib-n-n@yandex.ru

Резюме: Тектонические нарушения углепородного массива являются одним из наиболее распространенных геологических факторов, которые осложняют проведение горных работ. Одним из наиболее перспективных методов локализации выходов тектонических нарушений под четвертичные отложения является комплекс, включающий: геофизические методы (электротомография и сейсморазведка в модификации КМПВ), геоморфологические особенности местности и гипсометрию угольных пластов. Исследования выполнены на шахтном поле Верхне-Талуминского месторождения Южно-Якутского бассейна. Принципы локализации тектонических нарушений при комплексной геолого-геофизической интерпретации: выделение значимых аномалий производится путем сопоставления геоэлектрического и скоростного разреза в пределах одного профиля, выделение аномальных точек; сопоставление геофизических разрезов по отдельным методам между профилями (два разных вида сопоставлений – по числу геофизических методов), корреляция положения аномальных точек на геофизических разрезах. Основными факторами при выделении аномальных точек являлись: низкие значения распространения упругих волн, низкие значения удельных электрических сопротивлений, морфологическая схожесть аномалий на геофизических разрезах. Эти точки выносятся на топографическую основу изучаемого участка и используются при дальнейшей интерпретации. Следующий этап – интерпретация нескольких рядом расположенных профилей. По ним проводится корреляция аномалий, ассоциированных с прогнозными тектоническими нарушениями. Корреляция аномалий между профилями производилась по схожести следующих параметров: интенсивность аномалий, морфология аномальных проявлений по методам, взаимное расположение аномалий. Корреляция корректируется на топографическом плане с учетом геоморфологических признаков. По результатам геолого-геофизической интерпретации групп профилей, морфоструктурных особенностей рельефа месторождения и гипсометрии угольных пластов построена тектоническая схема с линиями прогнозных тектонических структур шахтного поля Верхне-Талуминского месторождения.

Ключевые слова: тектонические нарушения, четвертичные отложения, геофизические методы, аномалии, морфология рельефа, гипсометрия угольных пластов

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №24-17-20031).

Для цитирования: Гриб Н.Н., Колодезников И.И., Гриб Г.В., Качаев А.В. Локализация выходов тектонических нарушений под четвертичные отложения геофизическими методами. *Горная промышленность*. 2025;(4S):18–22. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-18-22>

Localization of tectonic faults below Quaternary deposits using geophysical methods

N.N. Grib^{1,2}✉, I.I. Kolodeznikov³, G.V. Grib¹, A.V. Kachaev¹

¹ Technical Institute (branch) of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Neryungri, Russian Federation

² Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation

³ Academy of sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

✉ grib-n-n@yandex.ru

Abstract: Tectonic faults in coal-bearing rock formations are one of the most common geological factors that hamper the mining process. One of the most promising methods to localize tectonic faults below the Quaternary deposits is a complex that comprises geophysical methods (electrical tomography and seismic surveys using the correlation refraction method), geomorphological features of the terrain, and the hypsometry of the coal seams. The research was carried out at the Verkhne-Taluminskoye deposit in the South Yakutsk Basin. The principles of localizing tectonic faults in complex geological and geophysical interpretation

included identification of significant anomalies by comparing geoelectric and velocity sections within a single profile and detection of the anomalous points; comparison of geophysical sections made using selected methods between the profiles (two different types of comparison based on the number of geophysical methods), correlation of the anomalous points' position on the geophysical sections. The main factors in identifying anomalous points included low values of elastic wave propagation, low values of specific electrical resistivity, and morphological similarity of anomalies on geophysical sections. These points were plotted on a topographic map of the investigated area and used for further interpretation. The next stage was interpretation of several adjacent profiles. These were used to correlate anomalies associated with the predicted tectonic faults. Correlation of anomalies between the profiles was made based on the similarity of the following parameters: the intensity of anomalies, the morphology of anomalous manifestations according to the methods, and the mutual arrangement of anomalies. The correlation was corrected on a topographic map with account of the geomorphological features. A tectonic diagram with lines of the predicted tectonic structures for mine takes of the Verkhne-Taluminskoye deposit was built based on the results of geological and geophysical interpretation of the profile groups, morphostructural features of the deposit terrain, and hypsometry of the coal seams.

Keywords: tectonic faults, Quaternary deposits, geophysical methods, anomalies, terrain morphology, gypsometry of coal seams

Acknowledgements: This work was supported by a grant of the Russian Science Foundation (project No. 24-17-20031).

For citation: Grib N.N., Kolodeznikov I.I., Grib G.V., Kachaev A.V. Localization of tectonic faults below Quaternary deposits using geophysical methods. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):18–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-18-22>

Введение

Тектонические нарушения углепородного массива являются одним из наиболее распространенных геологических факторов, которые осложняют проведение горных работ. Кроме того, они являются сейсмогенерирующими структурами как при природной, так и при техногенной сейсмичности, поэтому изучение тектонических нарушений углепородного массива выполняется на всех стадиях освоения угольных месторождений. Инновационный метод изучения тектонических нарушений с применением ориентированно-направленного бурения скважин из подготовительных горных выработок был предложен в работе [1].

Наиболее оперативными и экономичными методами изучения тектонических нарушений на всех стадиях освоения угольных месторождений являются методы наземной геофизики.

Наибольшее распространение получили методы сейсморазведки как на дневной поверхности, так и в шахтных условиях. В работах [2; 3] рассмотрено применение сейсморазведочного метода отраженных волн для картирования и прослеживания тектонических нарушений в углепородном массиве. Изучение геометрической структуры разломов по данным сейсморазведки рассмотрено в работах [4; 5].

Активно развивается как в России, так и в зарубежье разработка программных комплексов на основе нейросетевого анализа для обработки результатов сейсморазведки, выполненных различными методами [6; 7].

В настоящее время в практике локализации выходов тектонических нарушений широко используется электротомография, которая позволяет проводить интерпретацию в рамках двумерных моделей [8]. Локализация тектонических структур, перекрытых толщами четвертичных отложений, методом электротомографии рассмотрена в работах [9–11]. Применение метода электротомографии для изучения тектонических нарушений углепородного массива из горных выработок рассмотрено в работах [12; 13]. Из анализа как отечественной, так и зарубежной литературы следует, что проблема выделения тектонических нарушений углепородного массива геофизическими методами является очень актуальной. Поэтому цель работы заключалась в разработке технологии локализации тектонических нарушений по комплексу геофизических методов с привлечением геологических данных и геоморфологических особенностей рельефа.

Методы локализации тектонических нарушений

Исследования по локализации выходов тектонических нарушений под четвертичные отложения проводились геофизическими методами: электротомографией (ЭТ) и сейсморазведкой, методом корреляции преломленных волн (КМПВ). Научно-исследовательские работы выполнены на шахтном поле Верхне-Талуминского месторождения Южно-Якутского бассейна.

Полученные в ходе полевых работ материалы подвергаются специальной математической обработке. Результатом обработки данных КМПВ являются глубинные скоростные разрезы. Обработка данных сейсморазведки производилась с использованием специализированных программ RadExPro и ZondST2D¹.

Интерпретация данных ЭТ выполнялась с использованием специализированного программного обеспечения ZondRes2D. По результатам обработки электротомографии построены разрезы удельных электрических сопротивлений².

Результаты обработки геофизических данных экспортируются в формат AutoCAD, затем используются в последующей комплексной интерпретации.

Структура комплексной интерпретации состоит из трех блоков: интерпретация геофизических данных отдельного профиля с выделением аномальных точек и прогнозных нарушений; корреляция аномалий, ассоциированных с прогнозными тектоническими нарушениями на геофизических разрезах с построением план-схемы с прогнозными тектоническими структурами; завершающий этап – построение тектонической схемы изучаемой площади с учетом морфоструктурных особенностей рельефа месторождения и гипсометрии угольных пластов.

Основными факторами при выделении аномальных точек являлись: низкие значения распространения упругих волн, низкие значения удельных электрических сопротивлений, морфологическая схожесть аномалий на геофизических разрезах. Эти точки выносятся на топографическую основу изучаемого участка и используются при дальнейшей интерпретации.

Следующим этапом является обработка нескольких профилей. По ряду расположенным профилям была прове-

¹ ZOND: пакет программ Zond. Available at: <http://zond-geo.com/software/> (дата обращения: 12.05.2025).

² Ibid.

дена корреляция геофизических аномалий. Корреляция проводилась по следующим параметрам аномалий: морфологии геофизических аномалий на разных профилях, их интенсивности, взаиморасположением на профилях.

Принцип корреляции иллюстрируется на примере профилей 2–4 Верхне-Талуминского месторождения (рис. 1). В последующем увязка аномалий будет корректироваться на топографическом плане с учетом геоморфологических признаков изучаемого участка.

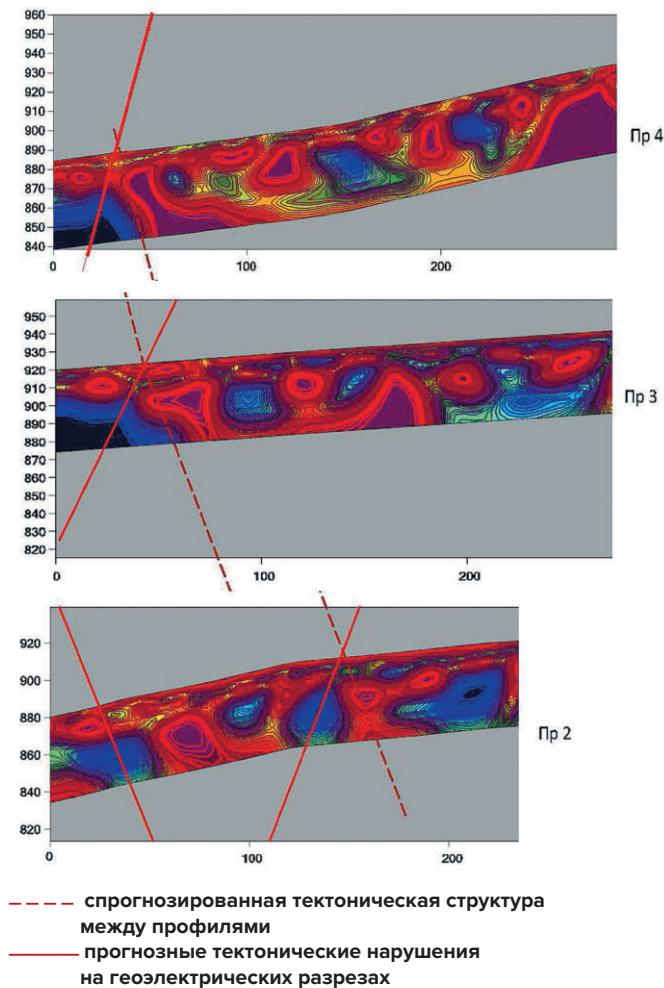


Рис. 1
Корреляция геофизических аномалий и выделенных тектонических нарушений между профилями

На рис. 1 приведены геоэлектрические разрезы по профилям, от четвертого (верхний профиль) до второго (нижний профиль). В данном случае корреляция производилась по интенсивности и форме аномалий на геоэлектрических разрезах по профилям 2–4.

По результатам корреляции аномалий по профилям строится схема тектонических нарушений на топографическом плане. На план выносятся и аномальные точки второго порядка. Это точки связаны с аномалиями, аналогичными аномалиям спрогнозированных тектонических структур, но не явно выраженные.

Высока вероятность, что в этих точках профилями пересечены малоамплитудные разрывные нарушения, зоны трещиноватости или иные неоднородности разреза, отраженные в геофизических полях.

Результаты и их обсуждение

Из анализа топографического плана с вынесенными аномальными точками следует, что площадь месторождения плотно насыщена аномалиями. Последующие построения заключались в корреляции аномалий между профилями и исключении ложных аномальных точек.

Как отмечалось выше, корреляция аномалий производилась по их морфологии и с учетом рельефа местности участка работ. Такой подход позволил определить основные направления предполагаемых тектонических нарушений и построить первый вариант тектонической схемы Верхне-Талуминского месторождения. Тем не менее построенная тектоническая схема характеризовалась высокой степенью сложности в связи с большим количеством исходных аномалий и нуждалась в уточнении.

Для уточнения построенной тектонической схемы использован гипсометрический анализ данных по пластам Д5 и Д7. Эти пласты выбраны по признаку максимального распространения в пределах площади работ.

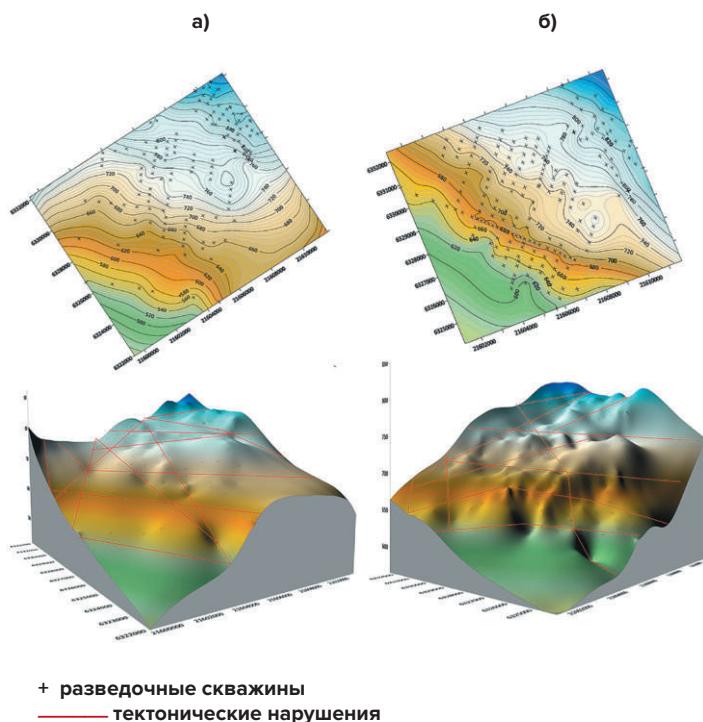


Рис. 2
План изогипс почвы пласта Д7 (а) и Д5 (б) с основными

прогнозными тектоническими
структурами
Верхне-Талуминского
месторождения

Fig. 2
An isohypse map of D7 (a)
and D5 (b) formation bottoms
with the main predicted
tectonic structures
of the Verkhne-Taluminskoye
deposit

На рис. 2, б приведён план изогипс почвы пласта Д5. Построение было выполнено по данным бурения углеразведочных скважин. Результат построений иллюстрирует достаточно сложный рельеф почвы пласта и позволяет определить направления основных прогнозных тектонических нарушений.

Следующий этап анализа выполнен исходя из следующих позиций: при работе с данными гипсометрии почвы одиночного угольного пласта следует учитывать, что изрезанность (невыдержанность) палеорельефа может быть связана не только с разрывными нарушениями или



Рис. 3
Фрагмент схемы прогнозных тектонических структур Верхне-Талуминского месторождения, локализованных по результатам геофизических исследований

Fig. 3
A fragment of the diagram of the predicted tectonic structures at the Verkhne-Taluminskoye deposit, localized based on the results of the geophysical studies

постседиментационной складчатостью, но и с исходной неровностью основы пласта в период осадконакопления. Для исключения неверного толкования аномалий градиента угла падения почвы пласта необходимо сопоставление выделенных аномалий с аналогичными аномалиями

по другому пласту. Совпадшие при сопоставлении аномалии с высокой степенью вероятности могут быть отнесены к аномалиям тектонического генезиса (как тектонические нарушения, так и постседиментационные складки).

На рис. 2, а представлена гипсометрия почвы пласта Д7. В процессе построений отмечено сходство морфологических характеристик планов изогипс отмеченных пластов. По результатам большого совпадения линиментов можно сделать вывод о тектонической природе выделенных аномалий. После подтверждения тектонической природы линиментов была построена уточнённая тектоническая схема площади Верхне-Талуминского месторождения.

Принцип построения схемы заключался в следующем: линии прогнозных тектонических нарушений проводились при совпадении линиментов аномалий изогипс почвы обоих пластов и линий прогнозных тектонических нарушений, построенных по результатам корреляции геофизических аномалий. Схема прогнозных тектонических структур представлена на рис. 3.

Заключение

Предлагаемый подход локализации выходов угольных пластов под четвертичные отложения на основе комплексной интерпретации геологого-геофизических данных, а также с учетом морфоструктурных особенностей рельефа месторождения позволил с высокой надежностью выделить в пределах шахтного поля Верхне-Талуминского месторождения сеть предполагаемых тектонических структур. Преимущественное направление простирации тектонических нарушений – северо-западное и юго-восточное. Надежность локализации тектонических нарушений подтверждена горными работами.

Реализация предлагаемого подхода позволит прогнозировать тектонические структуры и другие неоднородности геологического разреза шахтного поля, что повысит эффективность и безопасность введения горных работ.

Список литературы / References

- Гриб Н.Н. Изучение тектонических нарушений угольных пластов горизонтально-направленным бурением из подготовительных горных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(2):35–50. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_2_0_35
Grib N.N. Investigation of tectonic faults in coal seams using horizontal directional drilling from temporary roadways. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(2):35–50. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_2_0_35
- Байкенжина А.Ж. Выявление и картирование тектонических нарушений как индикаторов выбросоопасных зон методом МОГТ-3Д в условиях Карагандинского угольного бассейна. *Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов*. 2018;329(8):145–155. Режим доступа: <https://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/2082> (дата обращения: 27.05.2025).
Baikenzhina A.Zh. Detection and mapping of tectonic disturbances as indicators of outburst hazard zones by MOGT-3D method detailed prospecting in the conditions of the Qaraghandy coal basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(8):145–155. (In Russ.) Available at: <https://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/2082> (accessed: 27.05.2025).
- Анциферов А.В., Глухов А.А., Анциферов В.А. Шахтный сейсмический прогноз тектонических нарушений по отраженным волнам методом локации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(6):131–139. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-6-0-131-139>
Antsiferov A. V., Glukhov A.A., Antsiferov V.A. Mine seismic prediction of tectonic faults by reflected waves using the method of location. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(6):131–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-6-0-131-139>
- Carvajal F.R., Butler R.W.H., Bond C.E. Mapping faults in 3D seismic data – why the method matters. *Journal of Structural Geology*. 2023;177:104976. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2023.104976>

5. Wei F, Sun J, Xu X. Analysis of high-resolution seismic exploration in coalfield geological exploration methods. *Academic Journal of Engineering and Technology Science*. 2022;5(9):1–7. <https://doi.org/10.25236/AJETS.2022.050901>
6. Анциферов А.В., Глухов А.А. Использование комплекса обработки сейсмических данных для прогноза тектонических нарушений углепородного массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(11):126–138. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2024/11/11_2024_126-138.pdf (дата обращения: 27.05.2025).
Antsiferov A.V., Glukhov A.A. The use of seismic data processing package in prediction of tectonic disturbances in coal-rock masses. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(11):126–138. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2024/11/11_2024_126-138.pdf (accessed: 27.05.2025).
7. Mousavi S.M.1, Beroza G.C.2, Mukerji T.3, Rasht-Behesht M. Applications of deep neural networks in exploration seismology: A technical survey. *Geophysics*. 2024;89(1):WA95–WA115. <https://doi.org/10.1190/geo2023-0063.1>
8. Бобачев А.А., Модин И.Н., Первого Е.В., Шевнин В.А. *Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред*. М.: Геоинформмарт; 1996. 51 с.
9. Маркин М.Ю. Выявление перекрытых разрывных нарушений методом электротомографии на примере городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан). *Геология и геофизика Юга России*. 2024;14(2):107–116. <https://doi.org/10.46698/VNC.2024.45.42.008>
Markin M.Yu. Identification of overlapped raptures by electrotomography on the example of urban agglomeration Ust-Kamenogorsk (Republic of Kazakhstan). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024;14(2):107–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.46698/VNC.2024.45.42.008>
10. Guo W, Liu S, Liu Y, Chen S. Application of electrical resistivity imaging to detection of hidden geological structures in a single roadway. *Open Geosciences*. 2020;12(1):1083–1093. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0175>
11. Du L., Qin T., Mizunaga H., Zong Z., Zhu W., Zhu Z. Monitoring water infiltration in multiple layers of sandstone coal mining model with cracks using ERT. *Open Geosciences*. 2024;16(1):20220707. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0707>
12. Gyulai Á., Dobróka M., Ormos T., Turai E., Sasvári T. In-mine geoelectric investigations for detecting tectonic disturbances in coal seam structures. *Acta Geophysica*. 2013;61(5):1184–1195. <https://doi.org/10.2478/s11600-013-0112-6>
13. Гайсин Р.М., Цариков А.Ю. Определение положения зон нарушенности угольных пластов по данным подземной электроразведки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(6):19–26. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-19-26>
Gaysin R.M., Tsarikov A.Yu. Location of damage zones in coal seams by underground resistivity prospecting. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(6):19–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-19-26>

Информация об авторах

Гриб Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры горного дела, Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, г. Нерюнгри, Российская Федерация; Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: grib-n-n@yandex.ru

Колодезников Игорь Иннокентьевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, советник президента, Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация

Гриб Галина Владиславовна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией мониторинга и прогноза сейсмических событий, Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, г. Нерюнгри, Российская Федерация

Качаев Андрей Викторович – заведующий лабораторией физики горных пород, Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, г. Нерюнгри, Российская Федерация

Information about the authors

Nikolay N. Grib – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mining Engineering, Technical Institute (branch) of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Neryungri, Russian Federation; Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation; e-mail: grib-n-n@yandex.ru

Igor I. Kolodeznikov – Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Advisor to the President, Academy of sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

Galina V. Grib – Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Head of the Laboratory for Monitoring and Forecasting of Seismic Events, Technical Institute (branch) of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Neryungri, Russian Federation

Andrey V. Kachaev – Head of the Laboratory of Rock Physics, Technical Institute (branch) of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Neryungri, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 16.06.2025

Поступила после рецензирования: 07.08.2025

Принята к публикации: 13.08.2025

Article info

Received: 16.06.2025

Revised: 07.08.2025

Accepted: 13.08.2025