

Обоснование технологии локального прогноза удароопасности методом естественного электромагнитного излучения в подземных условиях рудника Скалистого Норильского рудного района

С. М. Данильев, О. М. Шнюкова[✉], Н. А. Данильева

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ Shnyu-olga@yandex.ru

Резюме. Рассматривается применение метода естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) для локализации зон, склонных к проявлению опасных геодинамических явлений в условиях подземного рудника Октябрьского месторождения медно-никелевых руд. Целью работы является обоснование методики измерения параметров ЕЭМИ в подземных условиях и определение их критериев для локального прогноза удароопасности в горно-геологических условиях рудника Скалистого.

Для достижения поставленной цели на участке опытно-методических работ произведены измерения ЕЭМИ при помощи аппаратного комплекса «АНГЕЛ-М». Верификация результатов применения метода ЕЭМИ базируется на данных деформационного мониторинга, позволивших подтвердить результаты лабораторных испытаний и апробаций в выработке для обоснования эффективности применения метода при решении задачи локального прогноза удароопасности. В работе приведены результаты измерений параметров ЕЭМИ на участке опытно-методических работ в 2023 и 2026 годах, показана их взаимосвязь с процессами, происходящими в приконтурной части массива.

Ключевые слова: Октябрьское месторождение, рудник Скалистый, подземная горная выработка, естественное электромагнитное излучение, деформационный мониторинг, опасные геодинамические явления, локальный прогноз

Для цитирования: Данильев С.М., Шнюкова О.М., Данильева Н.А. Обоснование технологии локального прогноза удароопасности методом естественного электромагнитного излучения в подземных условиях рудника Скалистого Норильского рудного района. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 74-79. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-74-79>.

Justification of the technology of local impact hazard prediction using natural electromagnetic radiation in the underground conditions of the Skalisty mine in the Norilsk ore district

S. M. Daniliev, O. M. Shnyukova[✉], N. A. Danilieva

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

✉ Shnyu-olga@yandex.ru

Abstract. This article discusses the application of the natural electromagnetic radiation (EMR) method for localizing zones prone to dangerous geodynamic phenomena in the underground mine of the Oktyabrsky copper-nickel ore deposit. The purpose of this work is to substantiate the methodology for measuring EMR parameters in underground conditions and to determine their criteria for local prediction of impact hazard in the mining and geological conditions of the Skalisty mine. To achieve this goal, EMR measurements were performed at the experimental and methodological work site using the ANGEL-M equipment complex. The verification of the EMR method results is based on deformation monitoring data, which allowed the results of laboratory tests and field trials to be confirmed to justify the effectiveness of the method in solving the problem of local prediction of rockburst hazard. The work presents the results of measurements of EMR parameters on the experimental and methodological site in 2023 and 2026, and shows their relationship with the processes occurring in the near-boundary part of the array.

Keywords: Oktyabrskoye field, Skalisty mine, underground mining, natural electromagnetic radiation, deformation monitoring, hazardous geodynamic phenomena, local forecast

For citation: Daniliev S.M., Shnyukova O.M., Danilieva N.A. Justification of the technology of local impact hazard prediction using natural electromagnetic radiation in the underground conditions of the Skalisty mine in the Norilsk ore district. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 74-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-74-79>.

Введение

Норильский рудный район, к которому относятся Октябрьское и Талнахское месторождения, является одним из самых больших по запасам медно-никелевых руд, что делает данные месторождения уникальными [1–3]. На текущий момент из-за того, что добыча на рудниках Норильска снижается [4], необходимо вводить в эксплуатацию новые объекты. Новый рудник должен соответствовать новейшим требованиям безопасности, применяемым к подземным горным выработкам. В связи с этим необходимы разработка и развитие мероприятий, направленных на выявление опасных геодинамических явлений [5, 6], к которым относят горные удары, микроудары, толчки и стреляния [7–9].

Прогноз удароопасности делится на локальный и региональный [10–12].

Региональный прогноз удароопасности выполняется в пределах шахтного поля при помощи сейсмических станций службы прогноза и предотвращения горных ударов, функционирующей на предприятии [13]. Такой прогноз позволяет произвести выделение опасных зон в пределах всего месторождения. При расширении горных работ, которое заключается в вовлечении в разработку новых горизонтов, появляется необходимость в обеспечении безопасности на рудниках, где временно отсутствует сеть сейсмических павильонов, поэтому стоит вопрос об обеспечении безопасности при помощи локальных методов, преимуществом которых является их оперативность.

Локальный прогноз удароопасности осуществляется на определенном участке горной выработки. Одним из условий применения данного прогноза является его периодичность. Так, например, необходимо повторять измерения на тех участках, где была установлена категория «Опасно». Проведение мероприятий по прогнозированию проявлений горного давления дает возможность своевременно принять меры для приведения горных выработок в неудароопасное состояние. Локальный прогноз может производиться на основе применения геофизических методов, таких как акустические и электромагнитные [14–16].

Несмотря на то что геофизика давно занимает важное место в разведке полезных ископаемых, внедрение методов для контроля за состоянием массива продолжает развиваться. Стремление к повышенной безопасности и снижению эксплуатационных затрат стимулирует использование геофизических подходов в шахтах, все чаще заменяя или дополняя традиционные методы [17–19]. В условиях Норильского рудного района перспективным видится использование метода контроля за состоянием горного массива на основе исследования естественных электромагнитных полей [20].

Исследования явления естественного электромагнитного излучения производились как в России, так и за рубежом. Во время многочисленных лабораторных испытаний обнаружено, что излучение электромагнитного сигнала происходит при разрушении различных горных пород и минералов. Явление естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) наблюдается при разрушении: гранита [21], угля [22], кварца [23], габбро-долеритов [24] и др.

Помимо лабораторных испытаний, явление электромагнитной эмиссии наблюдается и на другом масштабном уровне, сопоставимом с размером горных выработок [25], из чего следует, что данное явление может лежать в основе методов неразрушающего контроля за состоянием горного массива.

Цель исследований: обоснование технологии локального прогноза удароопасности методом естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) в подземных условиях рудника Скалистого Норильского рудного района.

Объектом исследования является рудник Скалистый шахты «Глубокая» Октябрьского месторождения [26].

В шахте «Глубокая» на данный момент пройдено две разведочные горные выработки РВ-1 и РВ-2 (рис. 1а).

Фрагмент участка опытно-методических работ приведен на рисунке 1б.

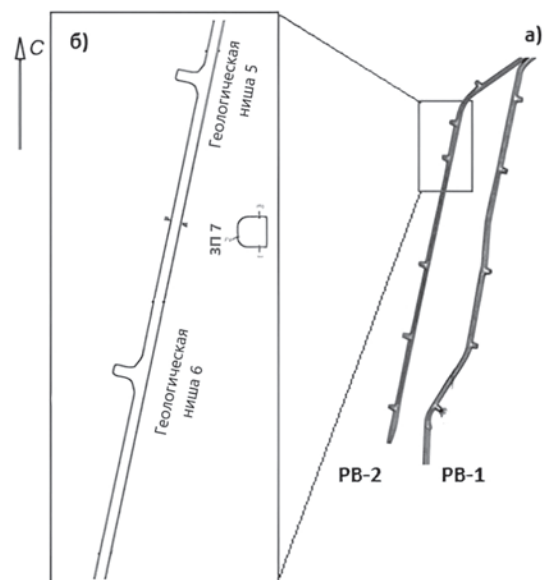


Рис. 1. Общая схема разведочных горных выработок (а) и фрагмент участка опытно-методических работ (б)

Fig. 1. General scheme of exploration mining operations (a) and fragment of an experimental methodological work site (b)

Методика исследований

Для оценки устойчивости горного массива и определения деформаций [27–29] приконтурной части на базе центра геодинамической безопасности ГМК «Норильский никель» реализован деформационный мониторинг горных выработок РВ-1 и РВ-2.

В выработках оборудованы замерные пункты (ЗП) с установленными реперами, конфигурация которых показана на рисунке 2.

На оборудованных замерных пунктах выполнены начальные измерения, которые послужили основой для определения деформации приконтурной части выработки при мониторинговых измерениях с определенной периодичностью. Для развития геофизических технологий контроля за состоянием массива выбран участок опытно-методических работ в выработке РВ-2, находящийся между геологическими ни-

шами 5 и 6, пересекающий наблюдениями замерный пункт ЗП17 (рис. 1а).

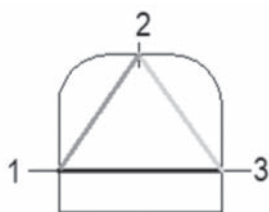


Рис. 2. Схема замерного пункта: 1, 2, 3 – реперы
Fig. 2. The scheme of the measuring point: 1, 2, 3 – bench marks

На данном замерном пункте реализовано 9 циклов наблюдений в период с 24 марта 2022 года по 14 декабря 2023 года, по которым определены смещения пород в контуре горных выработок (рис. 3). На рисунке 3 можно увидеть максимальное смещение контура выработки на дату измерений 15 марта 2023 года, которое составляет -6 мм при среднем значении 3 мм. Анализ результатов деформационного мониторинга позволяет сделать вывод о развитии зоны напряжений разнонаправленного характера в горном массиве.

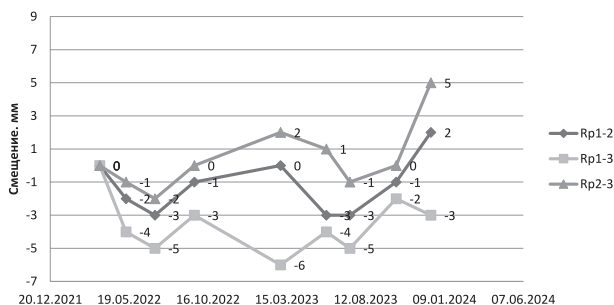


Рис. 3. Изменение смещений контура выработки /
Fig. 3. Changing the displacement of the production contour

На рисунке 4 приведены результаты расчета скорости деформации.

По рассчитанным скоростям деформации в интервале горной выработки (рис. 4) отмечается рост скорости деформаций в период 15 марта – 9 октября 2023 года.

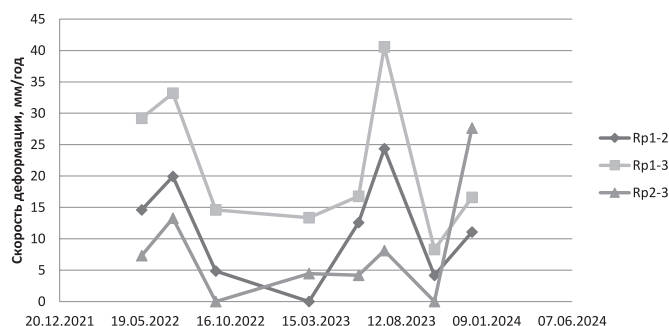


Рис. 4. Скорость деформации участка горной выработки РВ-2 /
Fig. 4. Rate of deformation of the mining section RV-2

Геофизические исследования

Помимо деформационного мониторинга в марте 2023 года, когда было отмечено значительное увеличение смещения контура горной выработки на выбранном участке опытно-методических работ, проведены измерения методом естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) при

помощи аппаратного комплекса «АНГЕЛ-М» (производства АО «ВНИМИ») [30–32].

На данном участке определение параметров электромагнитного излучения выполнено по разработанной методике измерений ЕЭМИ, базирующейся на зарегистрированных уровнях электромагнитных сигналов от горных пород, вмещающих выработку РВ-2. Методика предусматривала проведение измерений ЕЭМИ по профилю вдоль горной выработки РВ-2 от геологической ниши 5 до геологической ниши 6 с шагом между измерениями, не превышающим радиус ближней зоны электромагнитного сигнала (10 м), с регистрацией вертикальной (Z) двух горизонтальных (X, Y) компонент естественного электромагнитного поля.

Для этого регистрация проводилась при трех положениях антенной системы прибора «АНГЕЛ-М» относительно пространства выработки, а именно компонента X, ориентирована по оси выработки, компонента Y, ориентирована в борт выработки, и Z, ориентирована в кровлю. Аппаратурный комплекс «АНГЕЛ-М» обладает высокой чувствительностью к изменениям электромагнитного поля с частотой дискретизации, равной 467 кГц, что позволяет за 1 с измерений получать 467 тыс. отсчетов. При таких параметрах регистрации в единичном акте измерений продолжительностью 10 с уже статистически будут достоверно проявляться параметры естественного электромагнитного излучения. За один акт измерений в качестве основных параметров определяется средний уровень амплитуды электромагнитного поля (параметр А) и соотношение интенсивности импульсных высокоамплитудных электромагнитных сигналов к общему фону (параметр В).

На рисунке 5 представлены результаты измерения параметров естественного электромагнитного излучения за март 2023 года на участке опытно-методических работ разведочной выработки РВ-2.

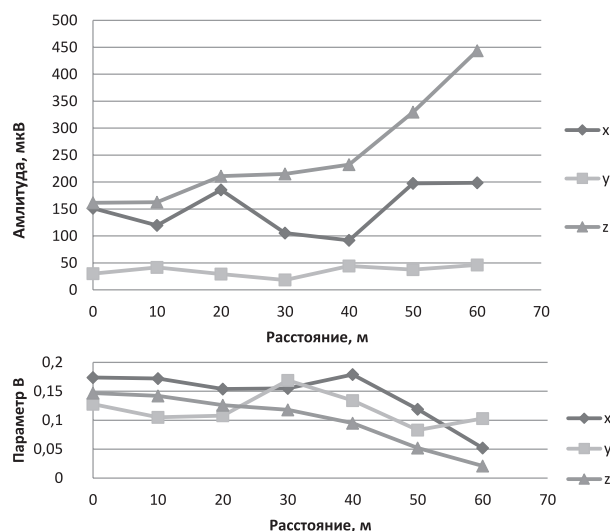


Рис. 5. Результаты измерения параметров естественного электромагнитного излучения в 2023 году /
Fig. 5. Results of measuring the parameters of natural electromagnetic radiation in 2023

Результаты и их обсуждение

По результатам измерений 2023 года отмечаются повышенные значения амплитуды естественного электромагнитного поля, особенно при приближении к геологической нише 6. Одновременно с ростом амплитуды ЕЭМИ наблюда-

ется увеличение соотношения импульсных высокоамплитудных сигналов, что приводит к снижению параметра В.

Согласно лабораторным испытаниям горных пород вмещающих выработки РВ-1, 2, параметры амплитуды импульсного естественного электромагнитного поля возрастают с ростом напряжений [33]. На участке опытно-методических работ в районе геологической ниши 6 происходит рост средних значений амплитуд электромагнитного сигнала более чем в два раза при ориентации антенны в кровлю выработки (Z-компонента), что позволяет сделать предположение о преимущественно вертикальной ориентации сильных напряжений в массиве.

По параметру В, характеризующему интенсивность событий, имеющих высокую амплитуду, можно отметить его понижение к геологической нише 6 для всех компонент (X, Y и Z), что позволяет судить о развитии в выработке процессов интенсивного трещинообразования [34]. Данные выводы подтверждаются результатами деформационного мониторинга, на которых отмечается после марта 2023 года рост скорости деформаций горных выработок (рис. 4).

Исходя из результатов измерений методом ЕЭМИ (рост параметра А и понижение параметра В), а также последующего во времени увеличения скорости деформаций, можно сделать заключение, что в период измерений горная выработка находилась в состоянии «Опасно».

После проходки выработок РВ-1 и РВ-2 и проведения всех необходимых мероприятий по результатам прямых измерений выработки находятся в состоянии «Неопасно». Для подтверждения ранее сделанных выводов и категории «Неопасно» по параметрам естественного электромагнитного поля по участку опытно-методических работ разведочной выработки РВ-2 в январе 2026 года выполнены повторные измерения, результаты которых представлены на рисунке 6.

По результатам повторных измерений ЕЭМИ отмечается, что по всем компонентам (X, Y, Z) изменение амплитуд естественного электромагнитного поля вдоль всего участка опытно-методических работ не превышает 20 %, а параметр В ведет себя стабильно без резкого изменения и имеет достаточно высокое значение, что говорит о малой интенсивности высокоамплитудных импульсов. Следовательно, полученные результаты повторных наблюдений параметров ЕЭМИ полностью подтверждают информацию о стабильности выработки РВ-2 «Неопасно».

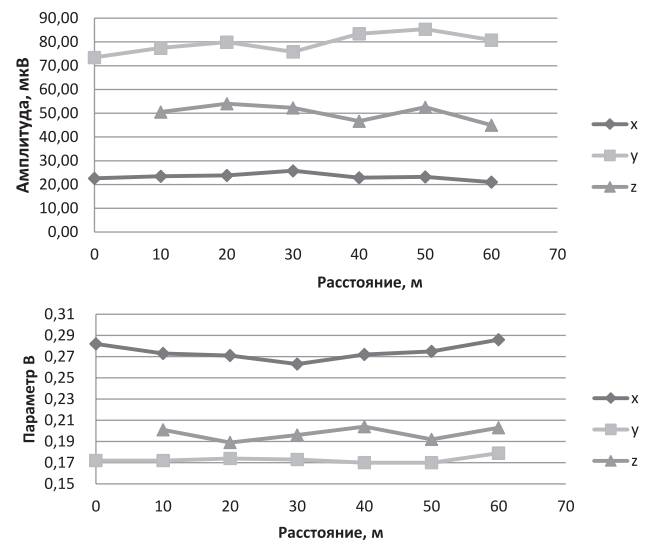


Рис. 6. Результаты измерения параметров естественного электромагнитного излучения в 2026 году /
Fig. 6. Results of measuring natural electromagnetic radiation parameters in 2026

Выводы

1. Выполненные исследования методом естественного электромагнитного излучения на участке опытно-методических работ и результаты независимого деформационного мониторинга позволяют обосновать эффективность метода ЕЭМИ для локализации интервалов повышенных напряжений, развития процессов интенсивного трещинообразования в горно-геологических условиях шахты «Глубокая» Октябрьского месторождения.

2. В ходе исследований была установлена взаимосвязь между основными параметрами ЕЭМИ и процессами трещинообразования в приконтурной части массива. Увеличение амплитуды А и уменьшение параметра В относительно фоновых значений говорит о развитии в горной выработке опасных геодинамических процессов.

3. Полученные результаты позволяют успешно верифицировать предложенные методические приемы для изучения параметров естественного электромагнитного поля и рекомендовать применение данной технологии в комплексе со стандартными методами для решения задач по контролю за состоянием массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Krivolutsкая N.A., Gongalsky B.I., Kedrovskaya, et al. Geology of the western flanks of the Oktyabr'skoe deposit, Norilsk district, Russia: Evidence of a closed magmatic system. *Mineralium Deposita*. 2019; 54 (4): 611-630. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0827-z>.
2. Krivolutsкая N.A., Tolstykh N., Kedrovskaya T.B., et al. World-Class PGE-Cu-Ni Talnakh Deposit: New Data on the Structure and Unique Mineralization of the South-Western Branch. *Minerals*. 2018; 8 (4): 124. <https://doi.org/10.3390/min8040124>.
3. Дурягина А.М., Таловина И.В., Либервирт Х. и др. Морфометрические параметры сульфидных руд как основа селективной рудоподготовки сырья. *Записки Горного института*. 2022; 256: 527-538. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.76>.
Duryagina A.M., Talovina I.V., Lieberwirth H., et al. Morphometric parameters of sulphide ores as a basis for selective ore dressing. *Journal of Mining Institute*. 2022; 256: 527-538. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.76>.
4. Хайрутдинов М.М., Ковальский А.Б. Технология и порядок разработки удароопасных участков рудника «Скалистый» с применением системы с закладкой выработанного пространства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008; 7: 304-309.
Khajrutdinov M.M., Kovalsky A.B. Technology and procedure for developing high-risk areas of the Skalisty mine using the system of filling the worked-out space. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2008; 7: 304-309. (In Russ.).
5. Sidorenko A.A., Sidorenko S.A. A Comprehensive Strategy for Safe and Efficient Mining of Thick, Spontaneous Combustion-prone Coal Seams under Geodynamic Hazard Conditions. *International Journal of Engineering Transactions B Applications*. 2026; 39 (4): 818-827. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.04a.01>.
6. Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Зеликман Д.И. и др. Локализация зон развития опасных геологических процессов берегового клифа по данным 3D сейсмотомографического прозвучивания. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025; 25 (1). <https://doi.org/10.2205/2025es000993>.

- Glazunov V.V., Efimova N.N., Zelikman D.I., et al. Zones Localization of Hazardous Geological Processes Habit of the Coastal Cliff According to 3D Seismotomography Sounding Data. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025; 25 (1). (In Russ.). <https://doi.org/10.2205/2025es000993>.
7. Господариков А.П., Трофимов А.В., Киркин А.П. Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения. *Записки Горного института*. 2022; 256: 539-548. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.87>.
Gospodarikov A.P., Trofimov A.V., Kirkin A.P. Evaluation of deformation characteristics of brittle rocks beyond the limit of strength in the mode of uni-axial servohydraulic loading. *Journal of Mining Institute*. 2022; 256: 539-548. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.87>.
 8. Казанцева В.В., Ожигин Д.С., Косарев Н.С. и др. Разработка комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных. *Записки Горного института*. 2025; 276 (1): 142-156.
Kazantseva V.V., Ozhigin D.S., Kosarev N.S., et al. Development of complex system of geotechnical monitoring of technogenic objects based on geospatial data. *Journal of Mining Institute*. 2025; 276 (1): 142-156. (In Russ.).
 9. Manchao He, Tai Cheng, Yafei Qiao, et al. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023; 15 (5): 1312-1353. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.014>.
 10. Простов С.М., Разумов Е.Е., Мулев С.Н. и др. Обоснование критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации естественного электромагнитного излучения на шахтах Кузбасса. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022; 333 (12): 99-110. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3831>.
Prostov S.M., Razumov E.E., Mulev S.N., et al. Justification of criteria for local prediction of impact safety by registering Natural electromagnetic radiation at the mines of AO «SUEK-KUZBASS». Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*. 2022; 333 (12): 99-110. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3831>.
 11. Рассказов И.Ю., Аникин П.А., Грунин А.П. и др. Совершенствование технических средств локального контроля удароопасности при ведении горных работ. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023; (5): 177-184. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230519>.
Rasskazov I.Yu., Anikin P.A., Grunin A.P., et al. Improvement of Local Rockburst Control Equipment in Mineral Mining. *Journal of Mining Science*. 2023; 59 (5): 862-869. <https://doi.org/10.1134/s1062739123050198>.
 12. Разумов Е.Е., Простов С.М., Шабанов Е.А. Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности участков угольного пласта на основе сейсмического мониторинга. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024; 335 (8): 174-186. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4420>.
Razumov E.E., Prostov S.M., Shabanov E.A. Regional, local and current forecast of the impact hazard of coal seam sites based on seismic monitoring. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*. 2024; 335 (8): 174-186. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4420>.
 13. Жукова С.А., Журавлева О.Г., Онуприенко В.С. и др. Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений хибинского массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022; (7): 5-17. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5.
Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., Onuprienko V.S., et al. Seismic behavior of rock mass in mining rockburst-hazardous deposits in the Khibiny Massif. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2022; (7): 5-17. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5.
 14. He L., Li Q., An B. A Study of the Characteristics of Micro-Seismic (ME) and Electromagnetic Radiation (EMR) Signals under the Static Load Conditions of Rocks. *Applied sciences*. 2023; 13: 12910. <https://doi.org/10.3390/app132312910>.
 15. Potokin A.S., Pak A.K. Methods for determining rockburst in mining workings. *Mining Industry Journal*. 2022; (5): 139-143. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-139-143>.
 16. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Клишко Т.А. Исследование электромагнитной эмиссии контактов горных пород в шахтном поле. *Физическая мезомеханика*. 2004; 7 (S2): 285-287. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00027>.
Bespal'ko A.A., Yavorovich L.V., Klimko T.A. A study of electromagnetic emission of rock contacts in mine massif. *Physical Mesomechanics*. 2004; 7 (S2): 285-287. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00027>.
 17. Жерлыгина Е.С., Куранова М.Е., Гусев В.Н. и др. Выявление опасных участков на основе исследования развития техногенных трещин в толще слагающих массив пород. *Горная промышленность*. 2025; (1): 162-169. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-162-169>.
Zherlygina E.S., Kuranova M.E., Gusev V.N., et al. Identification of hazardous sites based on studying the development of man-made fractures within the rock mass. *Russian Mining Industry*. 2025; (1): 162-169. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-162-169>.
 18. Казанин О.И., Сидоренко А.А., Евсюкова А.А. и др. Обоснование технологий поддержания выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов на больших глубинах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; (9-1): 5-21. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_5.
Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Evsiukova A.A., et al. Justification of the longwall panel entries support technology when mining gently inclined coal seams at large depths. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2023; (9-1): 5-21. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_5.
 19. Козырев А.А., Константинов К.Н., Лобанов Е.А. и др. Оценка геомеханического состояния массива пород в окрестности глубоких выработок рудника «Скалистый» комплексом натурных методов. *Горная промышленность*. 2023; (5): 108-113. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-108-113>.
Kozyrev A.A., Konstantinov K.N., Lobanov E.A., et al. Assessment of the geomechanical state of the rock mass in the vicinity of deep mining workings of the Skalisty mine by in-situ methods. *Russian Mining Industry*. 2023; (5): 108-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-108-113>.
 20. Данильев С.М., Шнюкова О.М. Перспективы развития технологии регистрации естественного электромагнитного излучения для прогноза геодинамических явлений в условиях рудников Норильска. *Науки о Земле и недропользование*. 2024; 47 (1): 56-65. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-56-65>.
Daniliev S.M., Shnyukova O.M. Development prospects of natural electromagnetic radiation recording technology to predict geodynamic phenomena in Norilsk mines. *Earth sciences and subsoil use*. 2024; 47 (1): 56-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-56-65>.
 21. Yoshida S., Ogawa T. Electromagnetic emissions from dry and wet granite associated with acoustic emissions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2004; 109: 09204. <https://doi.org/10.1029/2004JB003092>.
 22. Liyang Gao, Wenrui Zhang, Wei Lu, et al. Study on the effects of temperature and immersion on the acoustic emission and electromagnetic radiation signals of coal rock damage under load. *Engineering Geology*. 2022; 297 (2): 106503. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106503>.
 23. Martinelli G., Plescia P., Tempesta E. Electromagnetic emissions from quartz subjected to shear stress: Spectral signatures and geophysical implications. *Geosciences*. 2020; 10 (4): 140. <https://doi.org/10.3390/geosciences10040140>.
 24. Данильев С.М., Мулев О.М., Шнюкова О.М. Корреляционно-регрессионный анализ активности естественной электромагнитной и акустической эмиссии в образцах горных пород Октябрьского месторождения. *Горный журнал*. 2024; (9): 51-55. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.08>.

- Daniliev S.M., Mulev S.N., Shnyukova O.M. Correlation and regression analysis of natural electromagnetic and acoustic emission activity in rock samples of the Oktyabrsky deposit. *Mining Journal*. 2024; (9): 51–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.08>.
25. Frid V., Vozoff K. Electromagnetic Radiation Induced by Mining Rock Failure. *International Journal of Coal Geology*. 2005; 64 (1-2): 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.03.005>.
26. Трофимов А.В., Киркин А.П., Кормнов А.А. и др. Исследование напряженно-деформированного состояния массива Октябрьского и Талнахского месторождений методом полной разгрузки керн. *Цветные металлы* 2024; (10): 31-39. <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.10.05>.
Trofimov A.V., Kirkin A.P., Kormnov A.A., et al. Study of the stress-strain state of oktyabrskoe and talnakhskoe deposits' rock mass by overcoring method. *Non-ferrous Metals*. 2024; (10): 31-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.10.05>.
27. Лобанова Т.В., Квочин В.А., Клишко В.К. Деформационный мониторинг процессов накопления напряжений для контроля удароопасности массива при отработке Таштагольского месторождения. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2005; 2: 148-153.
Lobanova T.V., Kvochin V.A., Klimko V.K. Deformation monitoring of stress accumulation processes to control the impact hazard of the massif during the development of the Tashtagol deposit. *Interexpo GEO-Siberia*. 2005; 2: 148-153. (In Russ.).
28. Лобанова Т.В., Трофимова О.Л. Современные геодинамические движения в районе ствола «Сибиряк» Таштагольского рудника. *Проблемы недропользования*. 2018; (3): 70-80. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.03.070>.
Lobanova T.V., Trofimova O.L. Up-to-date geodynamic movements in the area of the mine shaft «sibiryak» of the Eashtagol mine. *Problems of Subsoil Use*. 2018; (3): 70-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.03.070>.
29. Burda J., Mrlina J., Vilimek V. Geodynamic phenomena in hazardous fault zones affected by extensive surface mining in Central Europe. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022; 81: 153. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02650-x>.
30. Das S., Mallik J., Dhankhar S., et al. Application of Fracture Induced Electromagnetic Radiation (FEMR) technique to detect landslide-prone slip planes. *Natural Hazard*. 2020; 101: 505-535. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03883-3>.
31. Шадрин А.В., Плаксин М.С., Застрелов Д.Н. и др. Методика анализа достоверности геофизических методов прогноза динамических явлений, выполненных переносными приборами. *Горная промышленность*. 2023; (S2): 11-17. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-11-17>.
Shadrin A.V., Plaksin M.S., Zastrellov D.N., et al. Methodology for analyzing the reliability of geophysical methods that use portable instruments for predicting dynamic phenomena. *Russian Mining Industry*. 2023; (S2): 11-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-11-17>.
32. Frid V., Rabinovitch A., Bahat D., et al. Fracture Electromagnetic Radiation Induced by a Seismic Active Zone (in the Vicinity of Eilat City, Southern Israel). *Remote Sensing*. 2023; 15 (14): 3639. <https://doi.org/10.3390/rs15143639>.
33. Xin Li, Jing Zhou, Zhen Yang, et al. Time-frequency evolution of electromagnetic radiation in deformation and fracture of composite coal-rock under different loading rates. *Construction and Building Materials*. 2024; 453: 139030, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139030>.
34. Jinhui Han, Songling Huang, Wei Zhao, et al. Study on electromagnetic radiation in crack propagation produced by fracture of rocks. *Measurement*. 2018; 131 (4): 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.067>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Михайлович Данильев –
доцент, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры
геофизики, Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Ольга Михайловна Шнюкова –
аспирант кафедры геофизики, Санкт-Петербургский
горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Наталья Андреевна Данильева –
доцент, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры
геофизики, Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Критерии авторства:

С. М. Данильев – формулировка идеи и цели исследования, разработка концепции статьи, редактирование текста;
О. М. Шнюкова – подготовка и редактирование текста, описание методов исследования, написание введения и выводов; Н. А. Данильева – редактирование текста, обсуждение результатов, подготовка графических материалов.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 06.05.2026
Поступила после рецензирования: 31.05.26
Принята к публикации: 11.06.2026

ABOUT THE AUTHORS

Sergey M. Daniliev –
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associated Professor,
Associated Professor of the Geophysics Department, Empress
Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russian Federation

Olga M. Shnyukova –
Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg
Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

Natalia A. Danilieva –
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associated Professor,
Associated Professor of the Geophysics Department, Empress
Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russian Federation

Contribution:

S. M. Daniliev – formulation of the idea and purpose of the study, development of the article's concept, editing of the text;
O. M. Shnyukova – writing and editing the text, describing the research methods, writing the introduction and conclusions;
N.A. Danilieva – editing the text, discussing the results, and preparing graphic materials.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 06.05.2026
Revised: 31.05.26
Accepted: 11.06.2026