

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ,
ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Обзорная статья

УДК 550.837.21

EDN: MXFKTH

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-56-65

Перспективы развития технологии регистрации
естественного электромагнитного излучения для прогноза
геодинамических явлений в условиях рудников НорильскаС.М. Данильев^a, О.М. Шнюкова^b✉^{a,b}Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель данного исследования заключалась в анализе современного состояния изученности вопроса опасных проявлений горного давления в естественных электромагнитных полях и оценке возможности использования данного явления для задач прогноза опасных геодинамических явлений на рудниках Норильского рудного района. Современные горнопромышленные технологии позволяют реализовывать добычу полезных ископаемых на достаточно больших глубинах, например, в рудниках Норильского региона добыча может вестись на отметках порядка 1,5–2 км, что существенно превышает критическую глубину проявлений опасных деформационных процессов. Объектом проведенных исследований являлись массивы пород Талнахского рудного узла Норильского района, склонные к проявлению опасных геодинамических явлений. Месторождения Норильского рудного района являются склонными или опасными по горным ударам. В связи с увеличением глубины разработки месторождений происходит активизация опасных геодинамических явлений, что влечет за собой необходимость их прогноза для обеспечения безопасного производства горных работ. Развитие геофизических технологий, а именно технологий электроразведки в естественных электромагнитных полях для прогноза сейсмических событий, является актуальной задачей, позволяющей обеспечить повышение безопасности производства горных работ. В результате анализа мирового опыта можно сделать вывод о перспективности использования регистрации естественного электромагнитного излучения для прогноза изменения состояния горного массива. В связи с тем, что на параметры естественного электромагнитного излучения влияет большое количество факторов, среди которых можно назвать литологический состав, особенности текстуры и структуры, технология прогноза для конкретного рудника должна базироваться на отклонении параметров естественного электромагнитного излучения от фоновых значений, зависящих от горно-геологических условий исследуемого рудника.

Ключевые слова: талнахский рудный узел, электромагнитное излучение, мониторинг, месторождения полезных ископаемых, аппаратура

Для цитирования: 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. Т. 47. № 1. С. 56–65. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-56-65>. EDN: MXFKTH.

APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY,
GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Review article

Development prospects of natural electromagnetic radiation
recording technology to predict geodynamic phenomena
in Norilsk minesSergey M. Daniliev^a, Olga M. Shnyukova^b✉^{a,b}Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Abstract. The purpose of this study is to analyze the current level of knowledge on the issue of hazardous manifestations of rock pressure in natural electromagnetic fields as well as to assess the possibility of using this phenomenon for forecasting dangerous geodynamic phenomena in the open-pits of the Norilsk ore region. Modern mining technologies allow to extract

© Данильев С.М., Шнюкова О.М., 2024



minerals from fairly large depths, for example, in Norilsk region mining can be carried out at levels of about 1.5–2 km deep, which significantly exceeds the critical depth of dangerous deformation process manifestations. The object of the conducted research is the rock massifs of the Talnakh ore cluster in the Norilsk region prone to the manifestation of dangerous geodynamic phenomena. The deposits of the Norilsk ore region are liable to or dangerous for rock bumps. As the mining depth increases the hazardous geodynamic phenomena intensify, which justifies the need for hazardous phenomena prediction to ensure safe mining operations. The development of geophysical technologies (the electrical prospecting technologies in natural electromagnetic fields to predict seismic events in particular) is an urgent task that will improve the safety of mining operations. Based on the analysis of world experience we can conclude that the use of natural electromagnetic radiation recording to predict changes in the state of a rock massif is promising. Due to the fact that a large number of factors including lithological composition, texture and structure features influence the parameters of natural electromagnetic radiation the forecast technology for a specific mine should be based on the deviation of natural electromagnetic radiation parameters from background values that depend on the mining and geological conditions of the open-pit under investigation.

Keywords: Talnakh ore node, electromagnetic radiation, monitoring, mineral deposits, equipment

For citation: Daniliev S.M., Shnyukova O.M. Development prospects of natural electromagnetic radiation recording technology to predict geodynamic phenomena in Norilsk mines. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):56-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-56-65>. EDN: MXFKTH.

Введение

Экономическое развитие России неотъемлемо связано с природно-сырьевой базой нашей страны. Наряду с традиционными углеводородами большое внимание в этой отрасли уделяется и твердым полезным ископаемым, разработка которых преимущественно производится подземным способом. Интенсификация разработки месторождений твердых полезных ископаемых и увеличение планов по их добыче сопровождаются расширением границ добычи, переходом к разработке углубленных горизонтов, что может привести к развитию и активизации опасных геодинамических проявлений горного давления.

Целью представленной работы является обоснование перспективности использования методов регистрации естественных электромагнитных полей для прогноза опасных геодинамических процессов в условиях рудников Норильска.

Объектом исследования являются месторождения Норильского рудного узла [1], в частности Октябрьское (рисунок), которые являются склонными и опасными по горным ударам. В данных условиях крайне актуальной является задача прогноза геодинамических явлений для обеспечения безопасного и эффективного производства горных работ [2, 3].

Прогноз проявлений горного давления является трудноразрешимой задачей, так как существует множество факторов и условий, приводящих к катастрофическим явлениям. Появляется необходимость учитывать множество характеризующих состояние горного массива параметров, изменяющихся во времени. Оценке проявлений сейсмической опасности на рудниках, склонных к сейсмической

активности, посвящено большое количество исследований. Авторы публикаций предлагают либо новые методы количественной оценки опасности, либо демонстрируют их применение на реальных данных. Оценка сейсмической активности включает в себя:

- энергию сейсмических событий и координаты их гипоцентров;
- связь сейсмических событий с проведением горных работ на руднике;
- приуроченность геодинамических явлений к тектоническим нарушениям [4].

Известно, что геологическая среда представляет собой сложную открытую динамическую нелинейную систему, что затрудняет точное прогнозирование различных явлений, включая сейсмическую активность. Учитывая современное состояние развития техники и технологий горного производства, горные работы ведутся быстрым темпом, что приводит к перераспределению напряжений в массиве и развитию потенциальных рисков активизации геодинамических процессов. В связи с этим требуется разработка системы оперативного инструментального мониторинга горных выработок, которая обеспечила бы прогноз участков развития рисков неустойчивости горного массива, связанных с проявлением горного давления [5]. Поэтому единственным способом обеспечить контроль и точный прогноз развития геодинамических процессов является комплексный и подробный мониторинг [6].

Существующие методы мониторинга состояния горного массива

На месторождениях, склонных и опасных по горным ударам, выполняется комплекс работ по контролю геодинамической активности



Схема Талнахского рудного узла [1]:

1, 2 – медно-никелевые месторождения: 1 – Октябрьское, 2 – Талнахское; 3 – залежи богатых (сплошных) сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд; 4 – границы Талнахского рудного узла (границы полей рудников); 5 – тектонические нарушения (зона главного шва Норильско-Харлаухского разлома)

Diagram of the Talnakh ore cluster [1]:

1, 2 – copper-nickel deposits: 1 – Oktyabrskoye, 2 – Talnakhskoye; 3 – deposits of rich (solid) sulfide platinum-copper-nickel ores; 4 – boundaries of the Talnakh ore cluster (borders of mine fields); 5 – tectonic disturbances (zone of the main suture of the Norilsk-Kharaelakh fault)

горного массива. Основными методами мониторинга состояния горных выработок являются:

1. Инструментальный маркшейдерский контроль, который позволяет систематически отслеживать развитие процессов перемещения горных пород. Некоторыми недостатками этого метода являются значительные времен-

ные промежутки между измерениями, а также трудоемкость съемки и обработки полученной информации.

2. Непрерывный сейсмический мониторинг, обеспечивающий геодинамическую безопасность месторождения. Системы сейсмического мониторинга предоставляют возможность регистрировать сейсмоакустические сигналы, ко-



торые появляются в результате динамических проявлений горного давления в породах. Также система позволяет осуществлять отбор сигналов на фоне помех, производить расчет характеристик и параметров сейсмических явлений, а также контролировать потенциально опасные шахтные участки в автоматическом режиме и автоматизировать обработку информации для оценки уровня риска [7, 8]. К недостаткам непрерывного сейсмического мониторинга можно отнести необходимость создания дорогостоящей сети сейсмопавильонов, что не позволяет делать оперативный прогноз для условий разработки новых рудников, а также трудоемкость обработки полученной информации.

3. Акустические методы, позволяющие определить потенциально опасные зоны проявления опасных геодинамических явлений в горном массиве. Импульсы акустической эмиссии возникают во время процесса трещинообразования массива горных пород. Индикаторами данного процесса является активность акустической эмиссии и b-фактор [9]. Недостатками метода акустической эмиссии является достаточно продолжительное время регистрации и необходимость обеспечения плотного контакта датчика (шпурового, микрошпурового, накладного) с обследуемым массивом.

4. Электромагнитный метод, основанный на явлении возникновения естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) в процессе трещинообразования горных пород [10–12]. Применение метода электроразведки в естественных электромагнитных полях базируется на взаимосвязи ЕЭМИ с аномальным проявлением напряженно-деформационного состояния массива горных пород. К недостаткам измерений естественных электромагнитных полей можно отнести возможность регистрации электромагнитных помех и отсутствие полноценно научно обоснованной методики подземных исследований.

Анализируя специфику производства горных работ и методы мониторинга состояния горных выработок, можно сформулировать общие требования к технологиям контроля геодинамической активности горного массива:

- высокая скорость и производительность при производстве измерений и обработке результатов;

- минимизация дополнительных сопутствующих мероприятий, обеспечивающих производство измерений (бурение скважин, шпуров и т. д.);

- достоверность, обоснованность и представительность результатов прогноза.

Исходя из всего вышеперечисленного, перспективным методом мониторинга горных выработок представляется технология исследования ЕЭМИ, дающая возможность достаточно быстрого проведения полевых наблюдений, оценки результатов распределения электромагнитной эмиссии как предвестников сейсмических событий.

Источники и механизмы возникновения электромагнитной эмиссии в твердых телах

Электромагнитная эмиссия – это явление, которое представляет собой процесс возникновения электромагнитных полей при механическом воздействии на неметаллические материалы [13, 14]. По причине того, что технически реализована возможность регистрации ЕЭМИ с использованием бесконтактных приемных антенн, явление электромагнитной эмиссии заслуживает большого внимания и, как показывает опыт исследователей, оно обладает существенным практическим значением.

Электромагнитную эмиссию можно наблюдать в большинстве неметаллических материалов при различных видах механической нагрузки. Во время механической нагрузки на материалы, при возникновении микро- и макронарушений, а также в моменты, предшествующие разрушениям, происходит возникновение электромагнитных сигналов. Исходя из этого, по электромагнитным импульсам можно судить о возникновении процессов разрушения в материалах [15].

Механоэлектрические источники импульсных возмущений, наблюдаемые в твердых телах, являются источниками электромагнитного излучения за счет релаксации разделенных зарядов. В горных породах могут наблюдаться следующие явления: пьезоэлектрический эффект, эффект Степанова, процессы электризации при трении, разрушении [16, 17].

Одним из первых, кто наблюдал эффект появления электрического потенциала, был А.В. Степанов, который наблюдал явление возникновения заряда на поверхности каменной соли при пластической деформации кристалла. Заряд наблюдался при достижении напряжения выше предела текучести и исчезал при разгрузке. По мнению Степанова, причиной возникновения заряда является трение внутренних неоднородно-



стей кристалла и образование микротрещин. Степанов не только открыл это явление, но и изучил его основные закономерности. Он показал, что знак заряда может быть разным, определил величину заряда и заметил, что величина заряда зависит от геометрических размеров кристалла.

В 1970-х годах в Томском политехническом университете профессором Л.А. Воробьевым изучалась проблема появления электрических зарядов в земной коре. Предполагалось наличие явления накопления заряда в земной коре, были выделены следующие источники электрических явлений:

- электрические явления, источником которых является переход ионов через электрический барьер;

- явление пьезоэффекта;

- электризация при хрупком разрушении диэлектрических материалов [18].

Электромагнитное излучение возникает при колебательном движении электрических зарядов, локализованных в дефектах структуры [19]. Размер и число дефектов материалов влияет на амплитудно-частотные характеристики сигналов. Сигналы электромагнитного излучения сопровождают развитие трещин, разрывов и тому подобное, что дает возможность использовать данное явление для контроля над процессами возникновения и развития нарушений, а также диагностики технического состояния материалов. Использование методов неразрушающего контроля параметров электромагнитной и акустической эмиссии дает возможность осуществлять своевременную регистрацию и мониторинг опасных процессов разрушения горных пород на горных выработках, при этом не выводя объект из эксплуатации.

Согласно источнику [20], существуют следующие механизмы возникновения электромагнитных полей:

- колебательные механизмы возникновения электромагнитной эмиссии, такие как движение заряженных бортов трещин и движение электростатического поверхностного заряда, вызванное акустической волной в процессе разрушения материала (определено, что колебательные движения поверхности диэлектриков, как правило, создают внешнее электромагнитное поле за счет перемещения поверхностного заряда);

- искровой разряд между заряженными бортами трещин;

- скачкообразное разделение зарядов на поверхностях трещины в процессе разрушения материала.

В работе [21] исследовались явления возникновения электромагнитного излучения при упругом нагружении пород, не содержащих пьезоактивных кристаллов.

М.Е. Перельман и Н.Г. Хатиашвили показали, что процесс трещинообразования в твердых телах сопровождается возникновением электромагнитного излучения в диапазоне 10 кГц – 1000 МГц [15, 22]. Такие эффекты могут быть источником излучения при возникновении опасных геодинамических процессов.

В работе [23] проведена серия лабораторных испытаний на одноосное сжатие образцов горных пород с различными физическими свойствами, произведена оценка величины электромагнитного излучения. Установлено, что уровень электромагнитного излучения зависит от свойств горных пород: наибольшее значение электромагнитного излучения выделяется при разрушении хрупких горных пород, а наименьшее – при разрушении пластичных. Данный факт предлагается использовать для определения критерия склонности горных пород к хрупкому разрушению.

Разрабатываются методы оценки напряженно-деформированного состояния массива по параметрам электромагнитного излучения. А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Т.А. Климко произвели профильные измерения электромагнитного излучения, которые показали резкое увеличение значения электромагнитного излучения на контакте различных горных пород, что позволяет использовать данный метод в тектонически опасных зонах [21].

Известно, что при механическом нагружении горных пород в процессе их деформирования происходит образование микро- и макротрещин, сопровождающееся акустической и электромагнитной эмиссией. Согласно исследованию [24], существует взаимосвязь между явлениями электромагнитной и акустической эмиссии в диэлектриках. Во время механической нагрузки на горные породы происходит их деформирование. В этот момент возникают и два типа эмиссии: акустическая и электромагнитная.

Интенсивность акустической эмиссии увеличивается по мере развития процесса разрушения и достигает своей максимальной величины в момент макроразрушения. Образование трещин также приводит к появлению



зарядов на их гранях, которые ответственны за появление электромагнитной эмиссии [9].

В Научно-исследовательском институте горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевом научном центре ВНИМИ разработан аппаратный комплекс ANGEL-M для измерения ЕЭМИ, позволяющий производить регистрацию параметров ЕЭМИ в лабораторных и полевых условиях. На базе комплекса ANGEL-M учеными ВНИМИ предложена технология проведения профильных съемок в подземных условиях угольных шахт для оценки интенсивности амплитуды ЕЭМИ на участках, склонных к сейсмической активности [25]. Данный подход апробирован на различных рудниках, в том числе в Норильске и Апатитах [26–28]. Сложившийся тренд свидетельствует о развитии и постепенном внедрении технологий, основанных на изучении ЕЭМИ, генерируемого горными породами, подверженными процессу деформирования вследствие геодинамических явлений.

Заключение

Анализ результатов исследований параметров и источников ЕЭМИ обосновывает перспективность направления регистрации ЕЭМИ с последующей обработкой данных для прогнозирования изменения состояния массива горных пород, локализации зон с потенциально опасным развитием геодинамических явлений. К сожалению, решение прямой задачи при регистрации ЕЭМИ по аналогии с классическими методами электроразведки практически невозможно, так

как на характеристики ЕЭМИ влияет огромное количество факторов, начиная от состава литологического строения, текстурно-структурных особенностей исследуемых пород и заканчивая распределением напряженно-деформированного состояния массива и крепостью пород. Поэтому методика прогноза геодинамических явлений для определенного рудника (породоносного комплекса) должна базироваться на отклонениях фоновых значений интенсивности амплитуды ЕЭМИ, формирующихся в горно-геологических условиях конкретного массива пород с учетом плана проведения горных работ. Для разработки методических рекомендаций прогноза геодинамических явлений в условиях рудников Норильска необходимо проведение опытно-методических работ для установления фоновых значений распределения ЕЭМИ в горно-геологических условиях исследуемого рудного поля. На следующем этапе для определения взаимосвязи между деформированием горных пород (аномальным проявлением горного давления) с интенсивностью акустической эмиссии и электромагнитного излучения необходимо провести лабораторные испытания при нагружении на прессовых установках серии образцов различных литотипов горных пород с исследуемого рудника. Полученные значения интенсивности изменений сигналов ЕЭМИ для конкретного литотипа и напряженно-деформированного состояния позволят получить диагностические признаки (критерии) для прогноза геодинамических явлений в условиях конкретного рудника Норильска.

Список источников

1. Наговицин Ю.Н., Какошина Л.В. Региональный прогноз удароопасности на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». Перспективы развития // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование: материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 28–29 октября 2015 г.). Санкт-Петербург, 2015. С. 32–33.
2. Шабаров А.Н., Звездкин В.А., Анохин А.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния интрузии при совместной отработке рудных залежей Октябрьского и Талнахского месторождений, склонных и опасных по горным ударам // Записки Горного института. 2012. Т. 198. С. 161–165. EDN: QZERST.
3. Звездкин В.А., Андреев А.А. Геомеханические основы безопасного ведения горных работ при совместной отработке богатых, медистых и вкрапленных руд глубоких рудников Талнаха // Записки Горного института. 2010. Т. 188. С. 47–49. EDN: RENUAP.
4. Маловичко Д.А. Оценка сейсмической опасности в рудниках // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 2. С. 21–38. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.02>. EDN: EGQZBI.
5. Цирель С.В. Закономерности развития техногенной сейсмической активности при ведении горных работ // Записки Горного института. 2010. Т. 188. С. 58–62. EDN: RENUBT.
6. Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Федотова Ю.В. [и др.]. Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками: монография. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2019. 431 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>. EDN: ZKZKWA.
7. Наговицин Ю.Н., Какошина Л.В., Родионова Е.В., Мулёв С.Н. Система непрерывного сейсмического мониторинга на удароопасных месторождениях Норильска // Горный журнал. 2015. № 6. С. 36–40. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.06.07>. EDN: UGZLHZ.



8. Востриков В.И., Опарин В.Н., Усольцева О.М., Мулев С.Н. Оценка геодинамического состояния массивов горных пород на глубоких рудниках Норильско-Талнахского месторождения полиметаллов // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2019. Т. 6. № 2. С. 28–34. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060205>. EDN: ZOGVRO.
9. Рассказов И.Ю., Цирель С.В., Розанов А.О., Терешкин А.А., Гладырь А.В. Использование данных сейсмоакустических наблюдений для определения характера развития очага разрушения породного массива // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017. № 2. С. 29–37. EDN: YPBWBB.
10. Wei M., Song D., He X., Li Z., Qiu L., Lou Q. Effect of rock properties on electromagnetic radiation characteristics generated by rock fracture during uniaxial compression // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020. Vol. 53. P. 5223–5238. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02216-x>.
11. Lin P., Wei P., Wang C., Kang S., Wang X. Effect of rock mechanical properties on electromagnetic radiation mechanism of rock fracturing // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021. Vol. 13. Iss. 4. P. 798–810. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.001>.
12. Li Z., Lei Y., Wang E., Frid V., Li D., Liu, X., et al. Characteristics of electromagnetic radiation and the acoustic emission response of multi-scale rock-like material failure and their application // *Foundations*. 2022. Vol. 2. P. 763–780. <https://doi.org/10.3390/foundations2030052>.
13. Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С. Электромагнитные явления при деформировании и разрушении твердых диэлектриков // *Физика твердого тела*. 2005. Т. 47. № 5. С. 856–859. EDN: RDABMV.
14. Han J., Huang S., Zhao W., Wang S., Deng Y. Study on electromagnetic radiation in crack propagation produced by fracture of rocks // *Measurement*. 2019. Vol. 131. P. 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.067>.
15. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // *Доклады Академии наук СССР*. 1981. Т. 256. № 4. С. 824–826.
16. Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Добровольский И.П. Источники электромагнитных предвестников землетрясений // *Доклады Академии наук СССР*. 1980. Т. 250. № 2. С. 323–326.
17. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Аронов Е.Л. О высокочастотном электромагнитном излучении при сейсмической активности // *Доклады Академии наук СССР*. 1979. Т. 248. № 5. С. 1077–1081.
18. Воробьев Л.А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // *Геология и геофизика*. 1970. Т. 11. № 12. С. 3–13.
19. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Малышков С.Ю., Поливач В.И., Шталин С.Г. Электромагнитный мониторинг технического состояния бетонных конструкций, мостовых переходов и других искусственных сооружений // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № S17. С. 225–229. EDN: KIFEYI.
20. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чахлов В.Л., Фурса Т.В., Биллер В.К., Елисеев В.П. Электромагнитная эмиссия диэлектрических материалов при статическом и динамическом нагружении // *Журнал технической физики*. 1994. Т. 64. № 4. С. 57–67.
21. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Климко Т.А. Исследование электромагнитной эмиссии контактов горных пород в шахтном поле // *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 7. № 2. С. 285–287. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00027>.
22. Хатиашвили Н.Г., Перельман М.Е. Генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через кристаллические диэлектрики и некоторые горные породы // *Доклады Академии наук СССР*. 1982. Т. 263. № 4. С. 839–842.
23. Вострецов А.Г., Кривецкий А.В., Бизяев А.А., Яковичкая Г.Е. Характеристики электромагнитного излучения горных пород при их разрушении в лабораторных экспериментах // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2013. № 2. С. 46–54. EDN: RFABFV.
24. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействиях // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2005. Т. 308. № 7. С. 18–23. EDN: HROTMF.
25. Мулев С.Н., Старников В.Н., Романевич О.А. Современный этап развития геофизического метода регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) // *Уголь*. 2019. № 10. С. 6–14. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-6-14>. EDN: EJOFQL.
26. Daniliev S., Danilieva N., Mulev S., Frid V. Integration of seismic refraction and fracture-induced electromagnetic radiation methods to assess the stability of the roof in mine-workings // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 5. P. 609. <https://doi.org/10.3390/min12050609>. EDN: DUOUDO.
27. Простов С.М., Разумов Е.Е., Мулев С.Н., Шабанов Е.А. Расчетная и аппаратная база геомониторинга состояния массива методом регистрации естественного электромагнитного излучения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333. № 11. С. 183–193. <https://doi.org/10.18799/2413-1830/2022/11/3840>. EDN: FKWVBW.
28. Егоров А.П., Рыжов В.А. К вопросу систематизации геофизических исследований геомеханического состояния массива горных пород и земной поверхности для оперативного контроля безопасности ведения горных работ на угольных шахтах // *Уголь*. 2019. № 10. С. 29–33. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-29-33>. EDN: ZCRGQY.

References

1. Nagovitsin Yu.N., Kakoshina L.V. Regional forecast of rock-bump hazard at the PJSC Mining Metallurgical Company Norilsk Nickel mines. Development prospects. In: *Gornoe delo v XXI veke: tekhnologii, nauka, obrazovanie: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Mining in the 21st century: technology, science, education: materials of the*



international scientific and practical conference: scientific conference materials. 28–29 October 2015, Saint Petersburg. Saint Petersburg; 2015, p. 32-33. (In Russ.).

2. Shabarov A.N., Zvezdkin V.A., Anokhin A.G. Studies of the stress-strain state of intrusion in the process of joint mining of ore deposits of the Oktyabrskiy and Talnakhskiy deposits. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2012;198:161-165. (In Russ.). EDN: QZERST.

3. Zvezdkin V.A., Andreev A.A. Geomechanical foundations of the safe extraction in joint mining of rich, coppery and ore patches in deep ore mines at Talnakh. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2010;188:47-49. (In Russ.). EDN: RENUAP.

4. Malovichko D.A. Assessment of seismic hazard in mines. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal = Russian Journal of Seismology*. 2020;2(2):21-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.02>. EDN: EGQZBI.

5. Tsirel S.V. Regularities of progressing of technogenic seismic activity in mining areas. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2010;188:58-62. (In Russ.). EDN: RENUBT.

6. Kozyrev A.A., Savchenko S.N., Panin V.I., Semenova I.Eh., Rybin V.V., Fedotova Yu.V., et al. *Geomechanical processes in the geological environment of mining engineering systems and geodynamic risk management*. Apatity: Kola Science Centre RAS; 2019, 431 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>. EDN: ZKZKWA.

7. Nagovitsin Yu.N., Kakoshina L.V., Rodionova E.V., Mulev S.N. Continuous seismic monitoring at rockburst-hazardous deposits in the Norilsk area. *Gornyi Zhurnal*. 2015;6:36-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.06.07>. EDN: UGZLHZ.

8. Vostrikov V.I., Oparin V.N., Usoltseva O.M., Mulev S.N. The assessment of the geodynamic state of rock massifs in deep mines of the Norilsk-Talnakh polymetallic deposit. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2019;6(2):28-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060205>. EDN: ZOGVRO.

9. Rasskazov I.Yu., Tereshkin A.A., Gladyr A.V., Tsirel S.V., Rozanov A.O. Application of acoustic measurement data to characterize initiation and development of disintegration focus in a rock mass. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2017;2:29-37. (In Russ.). EDN: YPBWBB.

10. Wei M., Song D., He X., Li Z., Qiu L., Lou Q. Effect of rock properties on electromagnetic radiation characteristics generated by rock fracture during uniaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020;53:5223-5238. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02216-x>.

11. Lin P., Wei P., Wang C., Kang S., Wang X. Effect of rock mechanical properties on electromagnetic radiation mechanism of rock fracturing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021;13(4):798-810. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.001>.

12. Li Z., Lei Y., Wang E., Frid V., Li D., Liu, X., et al. Characteristics of electromagnetic radiation and the acoustic emission response of multi-scale rock-like material failure and their application. *Foundations*. 2022;2:763-780. <https://doi.org/10.3390/foundations2030052>.

13. Makhmudov Kh.F., Kuksenko V.S. Electromagnetic phenomena entailed by deformation and fracture of dielectric solids. *Fizika tverdogo tela*. 2005;47(5):856-859. (In Russ.). EDN: RDABMV.

14. Han J., Huang S., Zhao W., Wang S., Deng Y. Study on electromagnetic radiation in crack propagation produced by fracture of rocks. *Measurement*. 2019;131:125-131. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.067>.

15. Perelman M.E., Khatiasvili N.G. On radio emission during brittle destruction of dielectrics. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1981;256(4):824-826. (In Russ.).

16. Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Dobrovolskiy I.P. Sources of electromagnetic precursors of earthquakes. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1980;250(2):323-326. (In Russ.).

17. Gokhberg M.B., Morgunov V.A., Aronov E.L. On high-frequency electromagnetic radiation during the seismic activity. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1979;248(5):1077-1081. (In Russ.).

18. Vorob'ev L.A. On the possibility of electrical discharges in the Earth's interior. *Geologiya i geofizika*. 1970;11(12):3-13. (In Russ.).

19. Gordeev V.F., Malyshkov Yu.P., Malyshkov S.Yu., Polivah V.I., Shtalin S.G. Electromagnetic monitoring of a technical condition of concrete frame, highway stream crossing and the other artificial constructions. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2009;S17:225-229. EDN: KIFEYI.

20. Gordeev V.F., Malyshkov Yu.P., Chakhlov V.L., Fursa T.V., Biller V.K., Eliseev V.P. Electromagnetic emission of dielectric materials under static and dynamic loading. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1994;64(4):57-67. (In Russ.).

21. Bepalko A.A., Yavorovich L.V., Klimko T.A. A study of electromagnetic emission of rock contacts in mine massif. *Fizicheskaya mezhmekhanika*. 2004;7(2):285-287. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00027>.

22. Khatiasvili N.G., Perelman M.E. Generation of the electromagnetic radiation during acoustic wave transmission through crystalline dielectrics and some rocks. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1982;263(4):839-842. (In Russ.).

23. Vostretsov A.G., Krivetsky A.V., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. Electromagnetic radiation characteristics of rocks in their destruction in laboratory experiments. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*. 2013;2:46-54. (In Russ.). EDN: RFABFV.

24. Bepal'ko A.A., Yavorovich L.V., Fedotov P.I. Relationship between electromagnetic signal parameters and rock electrical characteristics under acoustic and quasi-static influences. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2005;308(7):18-23. (In Russ.). EDN: HROTME.

25. Mulev S.N., Starnikov V.N., Romanevich O.A. The current development stage of the geophysical method of natural electromagnetic radiation recording. (EMI). *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2019;10:6-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-6-14>. EDN: EJOFQL.



26. Daniliev S., Danilieva N., Mulev S., Frid V. Integration of seismic refraction and fracture-induced electromagnetic radiation methods to assess the stability of the roof in mine-workings. *Minerals*. 2022;12(5):609. <https://doi.org/10.3390/min12050609>. EDN: DUOUDO.

27. Prostov S.M., Razumov E.E., Mulev S.N., Shabanov E.A. Calculation and hardware base for geomonitoring the state of the array by registering natural electromagnetic radiation. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(11):183-193. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3840>. EDN: FKWVBW.

28. Egorov A.P., Ryzhov V.A. To the issue of systematization of geophysical studies of the geomechanical state of rock mass and the Earth's surface for operational monitoring of the safety of mining in coal mines. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2019;10:29-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-29-33>. EDN: ZCRGQY.

Информация об авторах / Information about the authors



Данильев Сергей Михайлович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры геофизики,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
Danilev_sm@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3057-8527>

Sergey M. Daniliev,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associated Professor,
Associated Professor of the Geophysics Department,
Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia,
Danilev_sm@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3057-8527>



Шнюкова Ольга Михайловна,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
s225008@stud.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0008-1368-2860>

Olga M. Shnyukova,

Postgraduate Student,
Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia,
s225008@stud.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0008-1368-2860>

Вклад авторов / Contribution of the authors

С.М. Данильев – постановка задач и целей исследования, разработка концепции статьи, редактирование текста, обобщение результатов.

О.М. Шнюкова – подготовка и редактирование текста, сбор и обобщение данных литературы, описание состояния изученности вопроса проявлений геодинамических явлений в электромагнитных полях, описание перспективы осуществления прогноза геодинамических явлений в условиях рудников Норильского рудного района, написание заключения.

Sergey M. Daniliev set the purpose and objectives of the research, developed the concept of the article, edited the text and summarized the results.

Olga M. Shnyukova prepared and edited the text of the article, reviewed the selected literature, described the level of knowledge on the issue of geodynamic phenomena manifestations in electromagnetic fields, described the prospects for geodynamic phenomena prediction in the mines of the Norilsk ore region, wrote a conclusion.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.



Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 02.02.2024; одобрена после рецензирования 13.02.2024; принята к публикации 18.02.2024.

The article was submitted 02.02.2024; approved after reviewing 13.02.2024; accepted for publication 18.02.2024.