

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

Научная статья

УДК 614.841.48; DOI: 10.61260/2304-0130-2025-4-7-12

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГЕОСРЕДЫ И ИНФРАСТРУКТУРЫ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

✉ Романевич Кирилл Викторович;

Мулёв Сергей Николаевич.

Государственный научно-исследовательский институт горной геомеханики и
маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ, Санкт-Петербург, Россия

✉ romanovich@vnimi.ru

Аннотация. Рассматриваются современные подходы к повышению промышленной и экологической безопасности при освоении Арктического региона России. Представлены предпосылки применения систем сейсмоакустического и электромагнитного мониторинга для прогнозирования динамических явлений в массивах горных пород и на инженерных сооружениях. Показана перспективность интеграции мультимодальных данных и технологий искусственного интеллекта для создания цифровых сервисов предиктивного анализа. Отмечено, что развитие таких систем способствует устойчивому и экологически безопасному освоению северных территорий и повышению надежности инфраструктуры Арктической зоны.

Ключевые слова: Арктика, промышленная безопасность, сейсмоакустический мониторинг, электромагнитная эмиссия, геодинамические процессы, искусственный интеллект, инженерные сооружения

Для цитирования: Романевич К.В., Мулев С.Н. Интеллектуальные системы мониторинга геосреды и инфраструктуры арктической зоны Российской Федерации // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2025. № 4 (56). С. 7–12. DOI: 10.61260/2307-7476-2025-4-7-12.

Scientific article

INTELLIGENT SYSTEMS FOR MONITORING THE GEOENVIRONMENT AND INFRASTRUCTURE OF THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA

✉ Romanovich Kirill V.;

Mulev Sergey N.

State research institute of mining geomechanics and mine surveying – Intersectoral research center VNIMI, Saint-Petersburg, Russia

✉ romanovich@vnimi.ru

Abstract. This article examines modern approaches to improving industrial and environmental safety during the development of Russia's Arctic region. It presents the rationale for using seismoacoustics and electromagnetic monitoring systems to predict dynamic phenomena in rock masses and engineering structures. The potential of integrating multimodal data and artificial intelligence technologies to create digital predictive analysis services is demonstrated. It is noted that the development of such systems contributes to the sustainable and environmentally safe development of northern territories and increases the reliability of Arctic infrastructure.

Keywords: Arctic, industrial safety, seismoacoustics monitoring, electromagnetic emission, geodynamic processes, artificial intelligence, engineering structures

For citation: Romanovich K.V., Mulev S.N. Intelligent systems for monitoring the geoenvironment and infrastructure of the Arctic zone of the Russia // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2025. № 4 (56). P. 7–12. DOI: 10.61260/2307-7476-2025-4-7-12.

Введение

Современные задачи обеспечения промышленной безопасности в горнодобывающей отрасли России требуют внедрения новых цифровых подходов к прогнозированию и предотвращению динамических явлений. Особенно остро эта проблема проявляется в Арктическом регионе, где горно-геологические и климатические условия существенно осложняют ведение горных работ и эксплуатацию инженерных сооружений [1].

В этих условиях критически важно создание систем, обеспечивающих непрерывный контроль состояния массива горных пород, своевременное выявление зон активизации геодинамических процессов и формирование эффективного сервиса безопасности, направленного на предупреждение аварий и катастрофических проявлений горного давления.

Институт ВНИМИ, созданный в 1929 г., на основе накопленного опыта на протяжении последних лет ведёт работы по развитию технологий сейсмоакустического и геодинамического мониторинга, включая систему GITS – региональную систему прогнозирования динамических явлений, а также методы регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ). Совмещение этих технологий формирует основу нового поколения интеллектуальных сервисов безопасности, способных работать в самых сложных геологических и климатических условиях, включая Арктику [2].

Система сейсмомониторинга GITS и её применение в арктических условиях

Система GITS, разработанная ВНИМИ, предназначена для непрерывного контроля динамических явлений в массивах горных пород на угольных и рудных месторождениях, а также на инженерных сооружениях (рис. 1). Она сочетает аппаратно-программный комплекс и аналитические алгоритмы, обеспечивающие регистрацию микросейсмических событий, их классификацию и визуализацию в режиме реального времени [3].

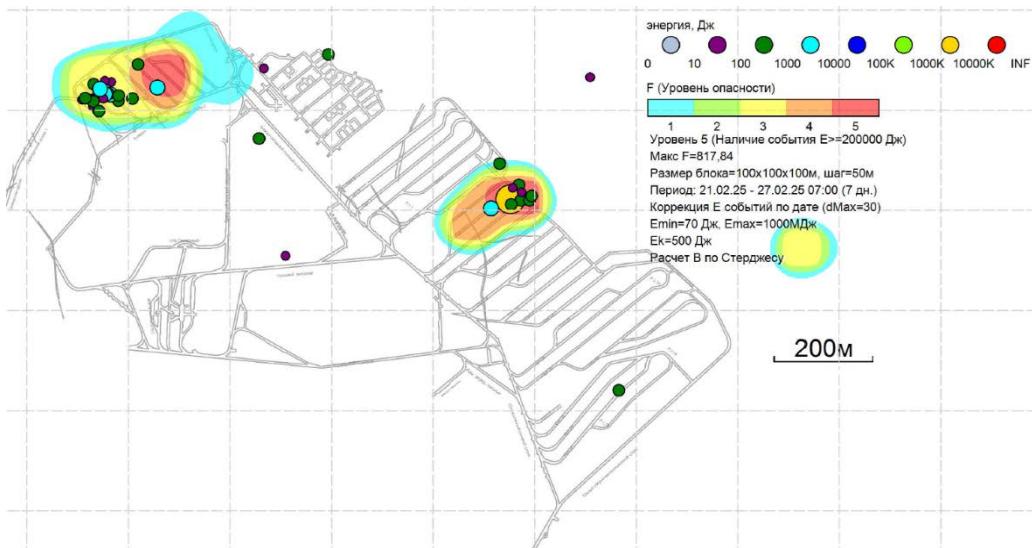


Рис. 1. Пример карты сейсмической активности, совмещенной с планом горных работ рудника (точками показаны единичные сейсмические события за одни сутки, цветом – рассчитанная зона сейсмической активности по методике ВНИМИ [3])

В Арктическом регионе система применяется на шахтах Воркутинского промышленного узла (шахты «Комсомольская», «Воркутинская», «Заполярная») и рудниках Таймырского п-ова («Октябрьский», «Таймырский», «Скалистый»), а также на Баренцбургском месторождении. Эксплуатация в экстремальных климатических условиях подтверждает надёжность и высокую адаптивность аппаратуры GITs.

Накопленные данные о микросейсмических событиях позволяют выявлять закономерности в распределении очагов, определять активизацию разрывных нарушений и прогнозировать развитие разрушений породного массива. В ряде случаев выявленные зоны сейсмической активности предшествовали опасным геодинамическим событиям, что подтвердило возможность раннего предупреждения потенциально аварийных ситуаций.

Метод регистрации ЕЭМИ как дополнительный инструмент прогноза

Метод ЕЭМИ применяется для регистрации электромагнитных сигналов, возникающих в процессе деформации и разрушения горных пород (рис. 2, 3). Излучение фиксируется антеннами и приёмными устройствами, а его параметры отражают изменения напряжённо-деформированного состояния массива.

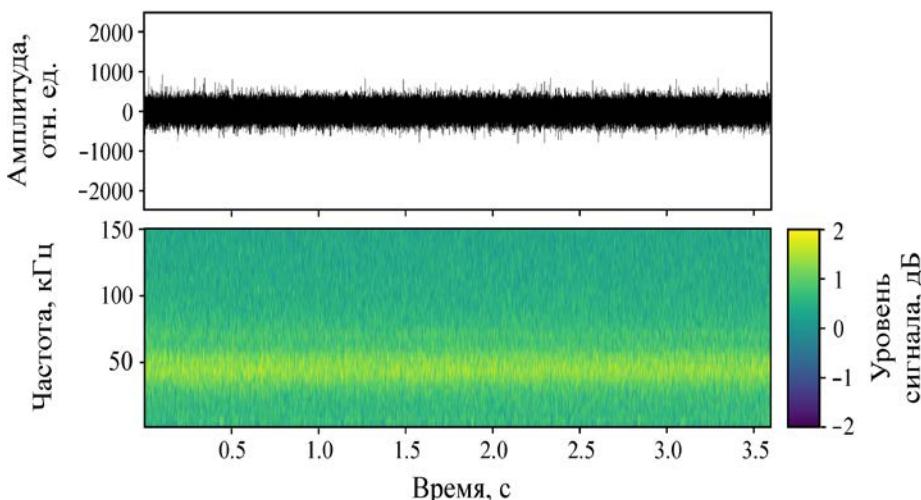


Рис. 2. Визуализация единичного фонового сигнала на забое полевого штрека одного из рудников (России) [4]

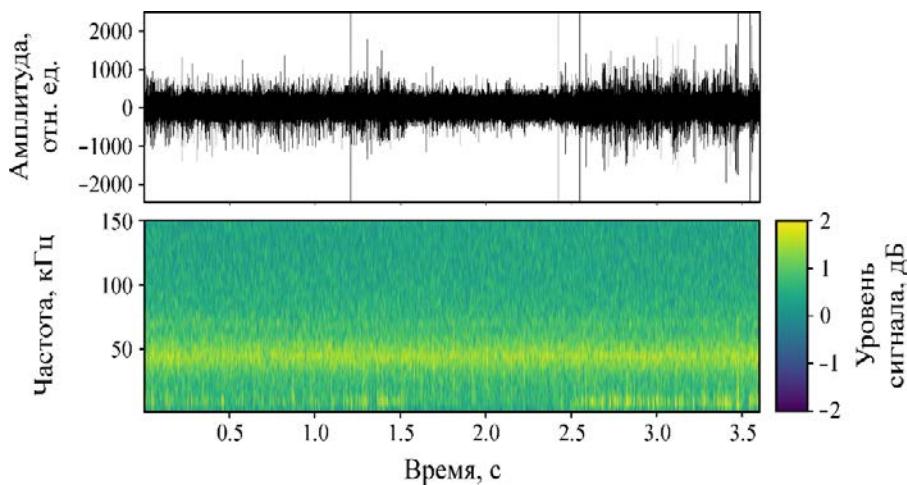


Рис. 3. Визуализация единичного аномального (геодеформационного) сигнала на забое полевого штрека того же рудника [4]

В лабораторных и натурных условиях, включая объекты в Арктике, метод ЕЭМИ демонстрирует высокую чувствительность к микродеформациям и может использоваться как предвестник динамических явлений. Аппаратура Ангел-М, применяемая ВНИМИ, позволяет получать большие массивы данных, содержащие характеристики электромагнитных сигналов, их амплитудно-временные и спектральные параметры.

С использованием методов машинного обучения разработаны алгоритмы классификации сигналов ЕЭМИ, которые позволяют автоматически выделять геодеформационные аномалии. Эти алгоритмы демонстрируют точность до 98 % при определении состояния массива – «Опасно» или «Неопасно», что делает метод ЕЭМИ эффективным инструментом для оценки удароопасности [4].

Интеграция систем GITS и ЕЭМИ в рамках сервиса промышленной безопасности

Совместное использование данных сейсмоакустического мониторинга (GITS) и ЕЭМИ открывает новые возможности для комплексной оценки состояния горных массивов и инженерных сооружений [5]. Объединённый анализ этих данных позволяет выявлять взаимосвязь механических и электромагнитных проявлений деформационных процессов, что значительно повышает достоверность прогноза динамических явлений.

Технологии GITS и ЕЭМИ могут применяться не только для прогноза геодинамических процессов в шахтах и рудниках, но и в системах мониторинга инженерных объектов, подверженных природным и техногенным воздействиям – сейсмическим колебаниям, взрывным нагрузкам, вибрациям от транспорта и оборудования. Это позволяет своевременно выявлять зарождающиеся деформации и предотвращать аварийные ситуации.

В Арктических регионах, где эксплуатация объектов осложнена воздействием низких температур, многолетней мерзлоты и ограниченными возможностями эвакуации, такие интеллектуальные системы становятся ключевым элементом сервиса промышленной и горно-экологической безопасности [6].

Интеграция мультимодальных данных с использованием методов искусственного интеллекта обеспечивает построение цифровых моделей состояния массива и инфраструктуры. Это создаёт основу предиктивного анализа, позволяющего в реальном времени прогнозировать развитие опасных процессов и принимать превентивные решения для обеспечения устойчивости горных работ и инженерных сооружений.

Применение технологий в урбанизированных районах Арктики

Развитие арктических территорий сопровождается ростом техногенной нагрузки и увеличением числа инженерных сооружений, возводимых в сложных геокриологических условиях. В этих условиях особую актуальность приобретает системный мониторинг состояния оснований и конструкций, обеспечивающий раннее выявление деформаций, связанных с деградацией многолетней мерзлоты, вибрационными воздействиями и изменением геодинамического режима.

Использование цифровых методов анализа геофизических и инженерно-геологических данных позволяет формировать целостное представление о поведении подземного и наземного пространства городов Арктической зоны. Объединение различных источников информации в единой аналитической среде обеспечивает предиктивную оценку устойчивости городской инфраструктуры и способствует повышению её безопасности в условиях изменяющегося климата.

Заключение

Развитие Арктического региона России определяется сочетанием факторов – освоением минерально-сырьевых ресурсов, расширением транспортной и энергетической инфраструктуры, а также необходимостью сохранения уникальной экосистемы Севера. В этих условиях приоритетным направлением становится создание единого цифрового пространства наблюдений, объединяющего геомеханические, экологические и климатические данные в масштабах региона.

Интеллектуальные системы мониторинга, основанные на анализе сигналов различной природы, способны обеспечить прогнозное управление геосредой, позволяя минимизировать риски аварий, деформаций и утечек загрязняющих веществ. Их развитие формирует основу устойчивого освоения Арктики, где безопасность горных работ и сохранение окружающей среды рассматриваются как взаимосвязанные задачи.

В перспективе широкое внедрение подобных технологий позволит создать экологически ориентированные цифровые сервисы, которые не только обеспечат промышленную и инфраструктурную безопасность, но и станут инструментом мониторинга опасных процессов – деградации многолетней мерзлоты, изменения водного баланса, миграции газов, теплового потока в недрах и др.

Комплексный подход к анализу данных, поддержанный средствами искусственного интеллекта, даст возможность формировать прогностические карты природных рисков, управлять техногенной нагрузкой и разрабатывать оптимальные сценарии освоения северных территорий с минимальным воздействием на природу. Такой путь позволит не только повысить устойчивость Арктической зоны, но и превратить её в модель сбалансированного взаимодействия технологий, промышленности и экосистемы, ориентированную на безопасность и экологическое равновесие.

Список источников

1. Гилярова А.А. Экономические эффекты применения цифровых решений в горной промышленности (на примере западной части Арктики) // Горная промышленность. 2023. № 6. С. 95–102.
2. Мулев С.Н., Романевич К.В. Система регионального прогноза динамических явлений по непрерывным сейсмоакустическим наблюдениям на шахтах, рудниках и в инженерных сооружениях в условиях Арктики // Техносферная безопасность в Арктике: сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2025. С. 133–137.
3. Питаль М.Н., Мулев С.Н. Программный комплекс GITS2. Руководство по эксплуатации. СПб.: ВНИМИ, 2024. 117 с.
4. Романевич К.В. Оценка геодинамической активности массивов горных пород бесконтактным методом регистрации электромагнитной эмиссии с применением современных цифровых технологий // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2025. Т. 12. № 3. С. 28–35.
5. Романевич К.В., Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д. Применение горно-шахтной системы сейсмического контроля GITS для целей геотехнического мониторинга подземных сооружений // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях: материалы Общерос. науч.-практ. конф. М.: Геомаркетинг, 2024. С. 44–51.
6. Цепелев В.Ю., Ильющенко И.А. Оценка успешности ансамблевого долгосрочного метеорологического прогноза в Западной Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2025. № 71 (2). С. 108–122.

References

1. Gilyarova A.A. Ekonomicheskie effekty primeneniya cifrovyh reshenij v gornoj promyshlennosti (na primere zapadnoj chasti Arktiki) // Gornaya promyshlennost'. 2023. № 6. S. 95–102.

2. Mulev S.N., Romanovich K.V. Sistema regional'nogo prognoza dinamicheskikh yavlenij po neprervnym sejsmoakusticheskim nablyudeniyam na shahtah, rudnikah i v inzhenernyh sooruzheniyah v usloviyah Arktiki // Tekhnosfernaya bezopasnost' v Arktike: cb. materialov VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2025. S. 133–137.
3. Pital' M.N., Mulev S.N. Programmnyj kompleks GITS2. Rukovodstvo po ekspluatacii. SPb.: VNIMI, 2024. 117 s.
4. Romanovich K.V. Ocenka geodinamicheskoy aktivnosti massivov gornyh porod beskontaktnym metodom registracii elektromagnitnoj emissii s primeneniem sovremennyh cifrovych tekhnologij // Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk. 2025. T. 12. № 3. S. 28–35.
5. Romanovich K.V., Mulev S.N., Rukavishnikov G.D. Primenenie gorno-shahtnoj sistemy sejsmicheskogo kontrolya GITS dlya celej geotekhnicheskogo monitoringa podzemnyh sooruzhenij // Izuchenie opasnyh prirodnyh processov i geotekhnicheskij monitoring pri inzhenernyh izyskaniyah: materialy Obshcheros. nauch.-prakt. konf. M.: Geomarketing, 2024. S. 44–51.
6. Cepelov V.Yu., Il'yushchenkova I.A. Ocenka uspeshnosti ansamblevogo dolgosrochnogo meteorologicheskogo prognoza v Zapadnoj Arktike // Problemy Arktiki i Antarktiki. 2025. № 71 (2). S. 108–122.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 07.10.2025; одобрена после рецензирования: 17.12.2025; принята к публикации: 19.12.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 07.10.2025; approved after review: 17.12.2025; accepted for publication: 19.12.2025

Сведения об авторах:

Романевич Кирилл Викторович, ведущий научный сотрудник лаборатории геофизических исследований, ученый секретарь Научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевого научного центра ВНИМИ (199178, г. Санкт-Петербург, В.О. Малый пр., дом 58, лит. А), кандидат технических наук, e-mail: romanovich@vnimi.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2052-7816>, SPIN: 2750-0427

Мулеев Сергей Николаевич, заместитель генерального директора по науке Научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевого научного центра ВНИМИ (199178, г. Санкт-Петербург, В.О. Малый пр., дом 58, лит. А), e-mail: mulev@vnimi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6745-5291>

Information about the authors:

Romanovich Kirill V., leading researcher, geophysical research laboratory, academic secretary JSC Research institute of mining geomechanics and mine surveying – Intersectoral scientific center VNIMI (199178, St. Petersburg, V.O. Maly A, Building 58, Lit. A), PhD, e-mail: romanovich@vnimi.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2052-7816>, SPIN: 2750-0427

Mulev Sergey N., deputy director general for science, JSC Research institute of mining geomechanics and mine surveying – Intersectoral scientific center VNIMI (199178, St. Petersburg, V.O. Maly A, Building 58, Lit. A), e-mail: mulev@vnimi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6745-5291>