



Федеральное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела
Уральского отделения Российской академии наук

В НОМЕРЕ:

- Геотехника при освоении месторождений
- Геомеханические и геодинамические процессы при освоении месторождений
- Техника безопасности

СЕТЕВОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ISSN 2313-1586

ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ PROBLEMS OF SUBSOIL USE



Сайт
<http://trud.igduran.ru>

Выпуск 1 (48)
2026

16+

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела Уральского отделения РАН

№ государственной регистрации Эл № ФС77-56413 от 11.12.2013

Выходит 4 раза в год только в электронном виде

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.В. Корнилков, д.т.н., проф., г.н.с., ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург – главный редактор
В.М. Аленичев, д.т.н., проф., г.н.с., ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург – зам. главного редактора

Члены редакционной коллегии:

Н.Ю. Антонинова, к.т.н., заведующая лабораторией ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
А.А. Абдурасулов, к.ф.-м.н., советник ректора, доцент, Таджикский технический университет имени академика
М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан
Н.Г. Валиев, д.т.н., проф., заведующий кафедрой горного дела УГГУ, г. Екатеринбург
С.Д. Викторов, д.т.н., проф., заведующий отделом проблем геомеханики и разрушения горных пород ИПКОН РАН,
г. Москва
С.Е. Гавришев, д.т.н., проф., заведующий кафедрой разработки полезных ископаемых, МГТУ им. Носова,
г. Магнитогорск
С.Ж. Галиев, д.т.н., проф., чл.-корр. НАН РК, вице-президент АО «Казахстанский институт развития индустрии»
Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан
А.В. Глебов, д.т.н., заместитель директора ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
Ш.Ш. Заиров, д.т.н., проф., Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Республика Узбекистан
О.В. Зотеев, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН
И. В. Зырянов, д.т.н., заведующий кафедрой горного дела политехнического института (филиал) СВФУ в г. Мирном
В.С. Коваленко, д.т.н., проф., Горный институт НИТУ «МИСиС», г. Москва
К.Ч. Кожогулов, д.т.н., проф., чл.-корр НАН КР, директор Института геомеханики и освоения недр НАН КР,
г. Бишкек, Киргизская Республика
И.А. Козлова, к.г.-м. н, директор института геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург
И.Л. Кравчук, д.т.н. директор Челябинского Филиала института горного дела УрО РАН, г. Челябинск
М.В. Курленя, д.т.н., проф., академик, научный руководитель ИГД СО РАН, г. Новосибирск
Ю.Г. Лаврикова, д.э.н., проф., директор Института экономики УрО РАН, г. Екатеринбург
С.В. Лукичев, д.т.н., проф., директор ГоИ КНЦ РАН, г. Апатиты
А.М. Макаров, д.т.н., проф., исполнительный директор ООО НИИОГР, г. Челябинск
А.А. Панжин, к.т.н., ученый секретарь ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
А.Е. Пелевин д.т.н., проф. кафедры обогащения полезных ископаемых УГГУ, г. Екатеринбург
И.Ю. Рассказов, д.т.н., чл.-корр. РАН, директор Хабаровского федерального научного центра, г. Хабаровск
Л.С. Рыбникова, д.т.н., с.н.с. ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
Д.И. Симисинов., д.т.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
И.В. Соколов, д.т.н., директор ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
С.М. Ткач, д.т.н., директор ИГДС СО РАН, г. Якутск
С.И. Фомин, д.т.н., проф. кафедры, НМСУ «Горный», г. Санкт-Петербург
Хадхуугийн Жаргалсайхан, д.т.н., директор Института горного дела Монгольского государственного университета
науки и технологий, г. Улан-Батор, Монголия
Л.С. Шамганова, д.т.н., член-корреспондент НАН РК, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Национальный центр по
комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан
В.Л. Яковлев, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН, советник РАН, ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела Уральского отделения РАН

Все статьи проходят обязательное рецензирование

Адрес редакции: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58, тел. (343)350-35-62

Сайт издания: trud.igduran.ru

Выпускающий редактор: Е.А. Катаева

Редактор: О.А. Истомина

Компьютерный набор и верстка: Я.В. Неугодникова, Т.Г. Петрова

Уважаемые читатели журнала!

Предлагаем вам первый выпуск издания «Проблемы недропользования» за 2026 год.

Начинается наш выпуск со статьи главного научного сотрудника, Советника РАН, чл.-корр. РАН Яковлева Виктора Леонтьевича. В статье «Методические рекомендации по подготовке к защите докторских и кандидатских диссертаций по научной специальности «2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем» представлены особенности исследований и представления к защите диссертаций по научной специальности 2.8.7, требования, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени. Приведен опыт автора по защите кандидатской и докторской диссертаций, методические рекомендации по защите. Статья будет полезна для ученых, готовящихся к защите диссертаций.

Первый номер журнала посвящен итогам XX Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования», которая традиционно проводится с 2007 года в Институте горного дела УрО РАН. Конференция призвана способствовать междисциплинарному диалогу в области недропользования для создания прорывных технологий, а также стать площадкой для повышения квалификации молодых специалистов производства, молодых ученых, аспирантов и студентов!

Конференция прошла в очном формате в Институте горного дела УрО РАН, а также в дистанционном формате на площадках в городах Апатиты, Хабаровске, Пермь, Новосибирск и Якутск, объединенных посредством телемоста.

Основная цель конференции — междисциплинарный диалог в области недропользования для создания прорывных технологий. Исследованиям в данном направлении посвящен наш номер, тематика которого освещает, кроме того, основные рубрики журнала и знакомит читателя с результатами исследований молодых ученых в области геотехники при освоении месторождений геомеханических и геодинамических процессов при освоении месторождений, техники безопасности.

Редколлегия

Содержание

Яковлев В.Л. Методические рекомендации по подготовке к защите докторских и кандидатских диссертаций по научной специальности «2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем».....	5
ГЕОТЕХНИКА ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
Николаев П.В., Тарасов В.В. Анализ существующих способов очистки тубинговой крепи вертикальных шахтных стволов от соляных наростов.....	21
Пашко А.Д., Великанов В.С. Проблема разработки научно-обоснованной методологии создания мобильных автономных транспортных платформ для горнодобывающей промышленности.....	32
Колпаков В.О., Шибанов Д.А., Хамидов О.У. Зависимость готовности карьерных электрических экскаваторов от работоспособности элементов автоматических централизованных систем смазки.....	39
Афанасьев А.И., Зубов В.В., Симисинов Д.И. Анализ конструктивных решений и оценка эффективности ударных измельчающих устройств.....	47
ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
Ломов М.А. Анализ результатов сейсмоакустического мониторинга массива Николаевского рудника по данным автоматизированной системы контроля горного давления.....	57
Шиндин А.В., Котик Д.С. Новая технология электромагнитного зондирования недр контролируемым ионосферным источником низкочастотных радиоволн.....	66
Леуткин А.А., Симонов Б.Ф., Кордубайло А.О., Барсуков В.Р. Датчик координаты бойка электромагнитного молота.....	77
Грицаенко А.Ю., Мартынов Г.П., Твердохлеб В.П. Микросейсмические исследования геодинамической активности разломов на шахтных полях Донбасса.....	86
ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ	
Лонский О.В., Третьякова П.С. К вопросу о выборе оптимального места расположения аварийно-спасательных формирований на опасных производственных объектах с целью снижения экологического риска.....	99

УДК 622.27:001.818

Яковлев Виктор Леонтьевич

доктор технических наук,
профессор, советник РАН,
член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58;
e-mail: yakovlev@igduran.ru

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ПОДГОТОВКЕ К ЗАЩИТЕ
ДОКТОРСКИХ И КАНДИДАТСКИХ
ДИССЕРТАЦИЙ ПО НАУЧНОЙ
СПЕЦИАЛЬНОСТИ
«2.8.7. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»***Аннотация:*

В статье представлены особенности исследований и представления к защите диссертаций по научной специальности 2.8.7, требования, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени. Приведен опыт автора по защите кандидатской и докторской диссертаций, методические рекомендации по защите.

Ключевые слова: защита диссертации, теоретические основы, проектирование, горнотехнические системы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.005

Yakovlev Viktor L.

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Advisor to the RAS,
Corresponding Member of the RAS,
Chief Researcher,
Institute of Mining UB RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
62075 Ekaterinburg
e-mail: yakovlev@igduran.ru

**METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS
ON PREPARATION FOR THE DEFENSE
OF DOCTORAL AND CANDIDATE THESES
IN THE SCIENTIFIC SPECIALTY
«2.8.7. THEORETICAL FOUNDATIONS
OF MINING ENGINEERING SYSTEMS
DESIGN»***Abstract:*

The article presents the features of research and presentation for the defense of dissertations in the scientific specialty 2.8.7, the requirements that a dissertation for an academic degree must meet. It issues the author's experience in defending candidate's and doctoral dissertations, methodological recommendations for the defense.

Key words: thesis defense, theoretical foundations, design, mining engineering systems.

Введение

Приказом Минобрнауки России №1843/НК от 26 сентября 2023 года выдано решение на создание Институтом горного дела УрО РАН диссертационного совета, которому предоставлено право приема к защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по научным специальностям 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» и 2.8.7 «Теоретические основы проектирования горнотехнических систем» (технические науки).

Соискателям ученой степени следует руководствоваться утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» и «Положением о присуждении ученых степеней».

В особенности следует руководствоваться критериями, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней.

Диссертация на соискание ученой степени доктора наук должна быть научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения (*), совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, либо решена научная проблема (*), имеющая важное политическое, социально-экономическое, культурное или хозяйственное значение, либо изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения (*), внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук должна быть научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи (*), имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, либо изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки (*), имеющие существенное значение для развития страны.

(*) – конкретно по вашей тематике

Паспорт научной специальности 2.8.7.

Теоретические основы проектирования горнотехнических систем

Область науки: 2. Технические науки.

Группа научных специальностей: 2.8. Недропользование и горные науки.

Наименование отрасли науки, по которой присуждаются ученые степени: Технические.

Шифр научной специальности: 2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем.

Направления исследований:

1. Методологические:

– горно-геологическая и технико-экономическая оценка месторождений при проектировании горнотехнических систем;

– обоснование типа и структуры горнотехнической системы и выбор методов ее моделирования и оптимизации параметров;

– исследование взаимосвязи между подсистемами и элементами горнотехнических систем (предприятий по извлечению из недр полезных ископаемых, созданию и использованию подземного пространства);

– обоснование методов оценки точности и надежности принимаемых решений, обеспечение качества проектов с учетом промышленной и экологической безопасности и выпуска конкурентоспособной продукции.

2. Геотехнологические:

– выбор способа разработки месторождения или его части;

– обоснование параметров горнотехнических систем на базе сочетаний различных геотехнологий, выбор области их применения на месторождении и в региональном масштабе;

– установление производственной мощности горных предприятий и последовательности строительства и ввода в эксплуатацию;

– обоснование технологических схем предприятий в целом, схем вентиляции и транспорта;

– исследование технологических схем и параметров вскрытия и подготовки месторождений, отдельных пластов, залежей и рудных тел.

3. Технико-экономико-экологические:

– обоснование критерия оптимальности и установление зависимостей между элементами горнотехнической системы и их стоимостными оценками в связи с научно-техническим прогрессом, социально-экономическими и экологическими факторами;

– совершенствование организации производственных процессов в связи с особенностями функционирования, реконструкции, технического переоснащения горнотехнических систем;

– исследование целесообразности, масштабов и принципов комплексного освоения недр, количественных и качественных характеристик георесурсов.

Смежные специальности (в т.ч. в рамках группы научной специальности):

2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

2.8.8. Геотехнология, горные машины.

По научной специальности 2.8.7 «Теоретические основы проектирования горнотехнических систем» защиты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора технических наук в настоящее время поручены Президиумом ВАК двум диссертационным советам: ИПКОН РАН и ИГД УрО РАН.

При подготовке кандидатских диссертаций целесообразно обосновывать параметры подсистем с целью учета их роли в обеспечении экономической эффективности и экологической безопасности в функционировании горнотехнической системы предприятия в целом.

*Научно-методическая постановка проблем развития
действующих предприятий*

1. Разработка долгосрочной стратегии инновационно-технологического развития, включающей решение комплексных задач:

- анализ горно-геологической информации об объемах, качестве и пространственном расположении оставшихся запасов основных и попутных полезных компонентов;
- обоснование кондиций с учетом уточненных качественных признаков добываемого сырья и конъюнктуры отечественного и мирового рынка на товарную продукцию;
- уточнение границ открытых и подземных горных работ и их последовательного, параллельного или комбинированного применения;
- обоснование объемов добычи и номенклатуры товарной продукции как основы для выработки и принятия управленческих воздействий в технологическом и организационно-экономическом развитии на краткосрочную и долгосрочную перспективу.

2. Выработка подходов к развитию технологии горного производства, включая:

- исследование режима горных работ в увязке с порядком их развития и формированием рабочей зоны (очистного пространства), обеспечивающим предпосылки для управления качеством добываемого сырья;
- аудит и анализ структуры парка оборудования и на их основе – модернизация действующих, а также создание и применение новых машин и механизмов;
- целевая оптимизация параметров технологических процессов и их взаимодействия применительно к конкретным, специфичным условиям функционирования.

3. Разработка комплекса организационно-экономических мероприятий и управленческих воздействий с целью выхода из кризисных ситуаций или их предотвращения, в том числе:

- обоснование способов резервирования и управления ресурсами предприятия всех видов (товарная продукция, финансы, оборудование, материалы и т.п.);
- ситуационный технико-технологический анализ организационной структуры горного производства и поиск «узких» мест, сдерживающих снижение текущих издержек или повышение доходности, а также обеспечивающих безопасность ведения работ;
- комплексный анализ управленческих решений и системная увязка элементов и подсистем горного предприятия как организационно-экономической и финансовой системы и пр.

Важнейшие принципы научного обоснования оптимальных параметров горнотехнических систем следующие (рис.1):

- горные предприятия приобретают многопрофильный характер вследствие множественности видов ресурсов недр и требований к управлению их качеством, состоянием и степенью использования;
- освоение недр не ограничивается исчерпанием какого-либо определенного ресурса;
- необходим мониторинг состояния природной среды на всех этапах преобразования недр, принимая во внимание возможность изменения во времени функционального назначения горного предприятия;
- параметры горных предприятий необходимо устанавливать на каждом из этапов освоения того или иного георесурса; эти параметры балансируются не только технологически и экономически, но и экологически.

Основные научные направления в теории проектирования освоения недр:

- обоснование стратегии освоения и сохранения недр, направлений и способов ее реализации;
- оптимизация производственной мощности и параметров технологических схем горных предприятий;

- развитие принципов проектирования и методов принятия решений при обосновании выбора технологии и техники освоения георесурсов;
- развитие теории и методов автоматизированного проектирования горных предприятий.

Геологический отчет

Характеристика месторождения: разведанность, условия залегания, запасы, их качественная и технологическая характеристика; гидрогеология; физико-механические свойства руд и пород.

Все данные – с определенной степенью достоверности.

Проект разработки месторождения

Способ разработки (открытый, подземный, комбинированный).

Производственная мощность.

Схемы вскрытия и системы разработки, границы, техника технологических процессов и т.д.

Объемы и качество товарной продукции, возможные потребители.

Ожидаемые ТЭП, сроки строительства и эксплуатации.

Источники финансирования.

Все решения принимаются на основе прогнозных геологических, технологических, технических и социально-экономических данных на периоды проектирования, строительства и эксплуатации горного предприятия.

Строительство и ввод в эксплуатацию горного предприятия

Применяемая горная техника может отличаться от предусмотренной проектом, в том числе и в период последующей эксплуатации.

Уточняются физико-механические свойства горных пород, запасы, условия залегания и качественная характеристика полезных ископаемых.

Могут существенно измениться цены на оборудование, товарную продукцию, сырье, материалы и т.п.

Вывод: требуется корректировка проектных решений.

Позатные периоды эксплуатации месторождения

Изменяются горнотехнические условия формирования и развития горных работ и функционирования технологических процессов, требования потребителей по объемам, качеству и ценам товарной продукции.

Необходима постоянная адаптация горного предприятия к изменяющимся условиям функционирования на основе мониторинга, состояния и прогноза внутренней и внешней среды.

Рис. 1. Этапы формирования основ эффективного освоения месторождений и параметров развития горных предприятий [2]

По каждому этапу следует учесть требования о необходимости корректировки проектных решений с целью адаптации горного предприятия к изменяющимся условиям функционирования.

Главнейшей задачей горной науки и практики в современных условиях является нейтрализация ухудшения естественных условий добычи и переработки минерального сырья, снижение темпов удорожания конечной продукции горнодобывающих отраслей. Возможный арсенал стратегических направлений такой нейтрализации вытекает из анализа соотношения удорожающих и нейтрализующих факторов в добыче и переработке минерального сырья [2]: уменьшение степени влияния неблагоприятных факторов и повышение степени влияния благоприятных. Основными мерами такого управления могут быть:

- уменьшение вредного влияния горнодобывающей промышленности на окружающую среду, сбережение дефицитного минерального сырья для будущих поколений;
- изменение теории и практики геолого-экономической оценки месторождений в части полного учета ущерба от загрязнения окружающей среды, изъятия земель и пр.;
- оптимизация затрат в цикле разведка – опережающее и сопровождающее опробование – добыча – рудоподготовка – обогащение – металлургический передел с максимально возможным учетом всех особенностей месторождений и концепций дифференцированных кондиций и n-кратной разработки месторождений;
- непрерывная сменяемость техники и технологии на разведке, добыче и переработке минерального сырья;
- открытие новых месторождений с благоприятными природными условиями;
- опережающее развитие науки и техники в области поисков, добычи, переработки и использования нетрадиционных видов минерального сырья;
- полное правовое обеспечение недропользования в условиях рыночной экономики.

Опыт применения экономико-математического моделирования и ЭЦВМ

Автор статьи с отличием окончил в 1956 г. горный факультет Свердловского горного института им. В.В. Вахрушева и был направлен в Уралгипрошахт (1956 – 1962 гг.), где получил богатый опыт инженера-проектировщика.

С 1962 г. в аспирантуре ИГД УФАИ СССР (позднее ИГД МЧМ СССР) подготовил и в 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование и выбор оптимальных режимов горно-транспортных работ рудных карьеров с помощью ЭЦВМ», в которой были изложены результаты принципиально нового в то время подхода к решению задач горного дела на основе экономико-математического моделирования.

Основной целью деятельности предприятий комбината «Ураласбест» является увеличение выпуска товарного асбеста и снижение его себестоимости, поэтому эти факторы необходимо было учитывать при выборе критерия оптимальности.

В то же время ставить задачу максимизации общего выпуска товарного асбеста в натуральном выражении также было бы ошибочно. В оптимальном распределении решающее влияние стал бы оказывать выпуск У и У1 сортов, выход которых составляет по весу основную долю в общем объеме товарного асбеста.

Наиболее правильным критерием оптимальности в данном случае будет максимум выхода товарной продукции в ценностном выражении за минусом затрат на добычу, транспортировку и переработку руд, то есть прибыль.

При этом необходимо иметь такую экономико-математическую модель, которая позволила бы при удовлетворении обязательных требований по выпуску того или иного сорта товарного асбеста и учете технологических ограничений (пропускная способность транспортных коммуникаций, производительность карьеров и обогатительных фабрик и др.) выбирать все остальные показатели и параметры технологического процесса соответствующими суммарному оптимуму.

Математическая модель задачи, сформулированной выше, имеет следующий вид: при условиях:

$$\sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^n x_{ijk} = P_{ij}; \quad \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^m x_{ijk} = Q_j; \quad x_{ijk} \geq 0; \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m q_{is}^{(j)} \cdot x_{ijk} \geq G_s; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ijk} \leq R_k \quad (3)$$

найти также значения x_{ijk} , при которых целевая функция

$$\sum_{i=1}^m z_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l x_{ijk} \left[\sum_s q_{is}^{(j)} \cdot c_s - d_{ij} - \lambda_{ijk} - \rho_{ij} \right] \quad (4)$$

достигает максимума.

При этом

$$q_{is}^{(j)} = f(A_j, d_j, P_i). \quad (5)$$

Принятые условные обозначения:

x_{ijk} – объем руды, добываемой из j -ой залежи, перерабатываемой на i -ой обогатительной фабрике, транспортируемой по k -ому маршруту, тыс. т;

m – общее количество обогатительных фабрик;

l – расстояние транспортирования;

n – общее количество асбестоносных залежей (блоков);

P_i – производительность i -ой фабрики, тыс. т;

Q_j – объем добычи руды с j -ой залежи, тыс. т;

$q_{is}^{(j)}$ – выход товарного асбеста s -ого сорта при переработке 1000 т руды j -ой залежи на i -ой фабрике, т;

c_s – отпускная цена за 1 т товарного асбеста s -го сорта, руб.;

G_s – план производства товарного асбеста s -ого сорта по всем фабрикам, т;

R_k – пропускная способность транспортных коммуникаций на k -ом маршруте (участке) за планируемый период времени, тыс. т.

Все расчеты на ЭЦВМ для решения задачи оптимального распределения руд карьеров комбината «Ураласбест» по обогатительным фабрикам выполнялись в лаборатории линейного программирования Свердловского отделения Математического института имени В.А. Стеклова, руководителем которого тогда был кандидат наук И.И. Еремин, далее – доктор наук, член-корреспондент, академик по специальности «Исследование операций и принятие решений, информатика».

Результаты сравнения планового и оптимального распределения годовых объемов руды, добытой в карьерах по обогатительным фабрикам, показывают, что оптимальное распределение обеспечивает прибыль 8,94 млн руб. Диссертация [7] представлена в библиотеке ИГД УрО РАН (рукопись).

Методологический подход, основные этапы и результаты исследования в диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук «Теоретические основы выбора транспорта рудных карьеров» [8]

Актуальность темы докторской диссертации подтверждается:

1. Непрерывным ухудшением технико-экономических показателей рудных карьеров глубинного типа, связанным с усложнением горно-геологических условий их эксплуатации. Отсюда – необходимость периодического совершенствования транспортных схем рудных карьеров по мере изменения горнотехнических условий их эксплуатации.

2. Особенностью эксплуатации рудных карьеров как части горно-обогатительных комбинатов, на которых условия и показатели работы транспорта в значительной степени зависят от необходимости обеспечения эффективности технологического процесса добычи и переработки руд в целом. Методы же выбора транспортных схем горно-обогатительных комбинатов с учетом влияния транспорта на показатели обогатительного передела практически отсутствовали.

3. Необходимостью решения транспортной проблемы вновь строящихся горнодобывающих предприятий: Качарского карьера в Казахстане, Средне-Уральского ГОКа на Урале, Костомукшского ГОКа на Северо-Западе, Стойленского и Лебединского ГОКов в бассейне КМА и т.д. Подлежали реконструкции в связи с необходимостью вскрытия глубоких горизонтов Южный, Центральный и Северный ГОКи Кривбасса, Сарбайский карьер ССГОКа, Оленегорский и Ковдорский железорудные карьеры, Центральный и Южный карьеры комбината Ураласбест и др.

4. Несовершенством применяемых методов проектирования и необходимостью разработки единой научной основы для сравнения и выбора видов и схем транспорта. При этом общим недостатком применяемых методов выбора транспортных схем рудных карьеров являлась статичность оценочных критериев, недостаточный учет взаимосвязи транспорта со смежными звеньями, низкий уровень методологии проектных работ, исключающий выбор оптимальных значений параметров технологических схем карьерного транспорта и др.

Вопросы теории решения транспортной проблемы карьеров всегда были в центре внимания ученых в области горного дела (акад. АН СССР Н.В. Мельникова, член-корреспондентов АН СССР В.В. Ржевского и А.О. Спиваковского, профессоров Е.Ф. Шешко, М.В. Васильева, М.Г. Новожилова и др.).

Основная научная идея исследования состояла в том, чтобы выбор транспорта рудных карьеров осуществлялся с помощью комплекса экономико-математических моделей, описывающих с позиций системного подхода его взаимосвязи с изменяющимися в процессе эксплуатации горнотехническими условиями, параметрами карьера и смежными технологическими процессами за период оптимизации, достаточный для объективной оценки сравнительной эффективности возможных в условиях рассматриваемого месторождения видов и схем транспорта.

Выдвинуты и обоснованы следующие основные научные положения:

1. Транспорт рудного карьера является важным связующим звеном в динамической системе – горно-обогатительном комбинате. Эффективность различных технологических схем транспорта определяется поэтому во взаимосвязи с горнотехническими условиями, с учетом затрат и эффекта, в том числе и в смежных звеньях, за определенный период оптимизации, в течение которого достоинства и недостатки отдельных видов транспорта проявляются достаточно полно.

2. Условия вскрытия и разработки верхних и нижних горизонтов карьеров существенно различны, поэтому расчеты сравнительной эффективности отдельных видов и схем транспорта должны осуществляться дифференцированно по высоте рабочей зоны. При этом в карьерах большой глубины и производительности, как правило, целесооб-

разно одновременное применение нескольких видов или комбинаций средств транспорта.

3. В связи с неодинаковым по величине изменением показателей работы отдельных видов и средств транспорта по мере развития карьера, периодический переход от одних видов и схем транспорта к другим — объективная закономерность.

4. Параметры карьера, его производительность по руде и вскрыше, порядок разработки месторождения, схемы вскрытия и системы разработки в одних и тех же горно-технических условиях могут иметь разное оптимальное значение при различных схемах транспорта, поэтому при выборе вида транспорта указанные факторы должны включаться в число варьируемых параметров, что обеспечивает нахождение оптимального их сочетания для каждой схемы транспорта.

В диссертационной работе использованы методы технико-экономического анализа и научного обобщения, математической статистики и экономико-математического моделирования на ЭВМ, графо-аналитические методы и методы экспертной оценки, экспериментальные и опытно-промышленные испытания. Основным научным результатом выполненного исследования является разработка теории и методов выбора транспортных систем рудных карьеров при проектировании горно-обогачительных комбинатов.

Научная новизна исследования заключается в комплексном подходе к решению проблемы транспорта рудных карьеров с учетом динамики показателей отдельных видов и технических средств транспорта в зависимости от изменения горно-технических условий и технологических схем разработки месторождений.

При этом сформулированы основные принципы оптимизации карьерного транспорта; установлены закономерности и предложен метод формирования транспортных систем карьеров в различные периоды разработки крутопадающих рудных месторождений; определены количественные зависимости технико-экономических показателей транспортирования от высоты подъема горной массы; предложен критерий оптимальности для выбора транспортных схем горно-обогачительных комбинатов, обеспечивающий приведение вариантов к сопоставимому виду по уровню производственной мощности и срокам ее освоения, количеству и качеству подаваемой на фабрику рудной массы.

На основе проведенных теоретических исследований, анализа и обобщения многолетнего опыта проектирования и эксплуатации карьерного транспорта, экономико-математического моделирования погрузочно-транспортного процесса и опытно-промышленных испытаний разработанных рекомендаций автором дано теоретическое и практическое решение проблемы выбора транспорта рудных карьеров при проектировании новых и реконструкции действующих горнодобывающих предприятий.

Теоретические основы были положены в основу разработанной Институтом горного дела МЧМ СССР при участии институтов Гипроруда, Центрогипрошахт, ПромтрансНИИпроект и Южгипроруда методики «Выбор вида карьерного транспорта» [22], утвержденной МЧМ СССР 8 декабря 1971 г.

В «Единой методике проектирования горнорудных предприятий черной металлургии с открытым способом разработки» институтом Гипроруда рекомендуется руководствоваться разработанной ИГД МЧМ СССР методикой.

В приложениях к диссертации представлены документы, подтверждающие внедрение Методики в проектных институтах и ГОКах МЧМ СССР.

В 1989 г. издана монография «Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров» [19], в которой изложены основные вопросы проектирования карьерного транспорта.

В ранее изданном паспорте научной специальности 25.00.21 «Теоретические основы проектирования горно-технических систем», утвержденном Высшей аттестационной комиссией, была приведена формула специальности, определяющая содержание и научную область исследований.

Специальность «Теоретические основы проектирования горнотехнических систем» относится к горной науке «Теория проектирования освоения недр» – области знаний о закономерностях взаимосвязи и методах установления параметров техногенного преобразования недр Земли. Представляет собой исследования и разработку научно-методической базы расчетов и критериев принятия решения по выбору типа, структуры и оценке параметров и конструкций горнотехнических систем – техногенных объектов, используемых в целях извлечения георесурсов и рассматриваемых совместно с участком недр, подлежащим освоению. Эффективность горного производства в решающей степени предопределяется на стадии проектирования эксплуатации и реконструкции предприятий, когда обосновываются масштабы и способы освоения недр, технологические схемы разработки месторождений и использования выработанных пространств, организационно-технические решения по ведению горных работ.

Значение решения научных и практических проблем данной специальности состоит:

- в совершенствовании теории и практики комплексного освоения и сохранения недр;
- в развитии научно-методической базы выбора стратегии освоения месторождений полезных ископаемых;
- в обеспечении высоких технико-экономических показателей строящихся, действующих и реконструируемых горных предприятий.

Методические рекомендации по подготовке к защите докторских и кандидатских диссертаций

Методология – совокупность процедур, процессов и методов науки, объединенных в единую конструктивную программу, служащих средствами для достижения того или иного объекта научного знания.

Наиболее важные точки приложения методологии:

- постановка проблемы;
- построение предмета исследования;
- построение научной теории;
- проверка истинности научного результата, то есть соответствие объекту изучения.

Цель публикации рекомендаций – дополнить официальные документы.

1. Теоретические исследования

Целью теоретических исследований является выделение в процессе синтеза знаний существенных связей между исследуемым объектом и окружающей средой, объяснение и обобщение результатов эмпирического исследования, выявление общих закономерностей и их формализация.

Теоретическое исследование завершается формированием теории, не обязательно связанной с построением ее математического аппарата. Теория проходит в своем развитии различные стадии от качественного объяснения и количественного измерения процессов до их формализации и в зависимости от стадии может быть представлена как в виде качественных правил, так и в виде математических уравнений (соотношений).

Задачами теоретических исследований являются:

- обобщение результатов исследований;
- нахождение общих закономерностей путем обработки и интерпретации опытных данных;
- расширение результатов исследований на ряд подобных объектов без повторения всего объема исследований;
- изучение объекта, недоступного для непосредственного исследования;
- повышение надежности экспериментального исследования объекта (обоснование параметров и условий наблюдения, точности измерений).

Методы теоретических исследований

1.1. Гипотетический метод основан на разработке гипотезы, научного предположения. Гипотеза должна объяснить явления и процессы и подтверждаться экспериментально. Этот метод исследования является основным в прикладных науках. Гипотеза составляет суть, методологическую основу, стержень теоретических исследований; является руководящей идеей всего исследования.

1.2. Дедуктивный – частные положения выводятся из общих.

1.3. Индуктивный – по частным факторам и явлениям устанавливаются общие принципы.

1.4. Анализ – расчленение явления на составные части, сведение его к простейшим элементам, чтобы упростить процесс изучения.

1.5. Синтез – исследование явления в целом на основе объединения связанных друг с другом элементов.

Критерии научной новизны результатов диссертационных работ:

- новое научное знание или новый способ (метод, методика);
- разработка нового теоретического или экспериментального метода научных исследований;
- формулировка и аналитическое решение новой задачи;
- разработка и обоснование новой (или усовершенствование существующей) математической (в широком смысле) модели;
- разработка и обоснование новых критериев;
- установление новых закономерностей;
- разработка и обоснование новой классификации (систематизации).

Критерии внедрения результатов диссертационных исследований:

- использование в научных исследованиях;
- включение в учебные программы вузов, учебники, пособия;
- включение в стандарты или отраслевые нормативно-технические документы;
- использование промышленным предприятием;
- использование при проектировании;
- принятие к внедрению проектной или научно-исследовательской организацией.

В названии темы диссертации следует отразить цель и метод ее достижения. При формулировках актуальности диссертации, основной идеи, научных положений рекомендуется учесть опыт, приведенный в [8, 9].

Рекомендуется ознакомиться с содержанием публикаций списка литературы и ссылаться на них при подготовке диссертации.

В списке рекомендуемой литературы значится монография [2], в которой на основе анализа основных закономерностей, особенностей и тенденций развития горнодобывающей промышленности в мире вскрыты и сформулированы некоторые глобальные и региональные особенности развития горного дела.

Горнодобывающая промышленность стоит в основании цепочки добыча – переработка – выпуск продукции – использование. В структуре себестоимости всех отраслей промышленности топливо, энергия, сырье и материалы занимают первое место и составляют 50–70 % и более. Поэтому успехи всей экономики зависят от повышения эффективности добывающей промышленности.

Уникальной закономерностью в развитии горнодобывающей промышленности является решающая зависимость ее технико-экономических показателей от природных горно-геологических и физико-географических условий (табл.1).

Таблица 1

Закономерности развития горнодобывающей промышленности

№ п/п	Закономерности	Причины, их порождающие, и способы учета при разработке методологии освоения георесурсов
1	Рост объемов добычи полезных ископаемых	Научно-технический прогресс, потребности человечества. Разрыв в уровнях потребления полезных ископаемых на душу населения в индустриально-развитых и развивающихся странах.
2	Рост глубины разработки месторождений полезных ископаемых	Рост глубины извлекаемых ежегодно запасов минерального сырья требует поэтапного перехода на новые параметры техники и технологии горного производства.
3	Уменьшение среднего содержания главных полезных компонентов в добываемом сырье	Для получения товарной продукции приходится увеличивать добычу и переработку более бедных руд во все больших объемах.
4	Распределение размеров месторождений полезных ископаемых	Чем крупнее месторождение по запасам, тем их меньше. По данным академика В.И. Вернадского: 65 % мировых запасов имеют низкое содержание минералов, 30 % – среднее и только 5 % – высокое, но они уже практически выработаны.
5	Запасы руды и металла есть функция бортового содержания (минеральное содержание в краевых пробах рудного тела)	Запасы руды и металла могут увеличиваться при принятии более низкого бортового содержания. Длительные сроки отработки месторождений и изменения показателей кондиций требуют периодической геолого-экономической переоценки месторождений.
6	Опережающий рост извлекаемых объемов горной массы по сравнению с ростом объемов основного конечного продукта	На железорудных карьерах РФ за период с 1990 по 2016 г. выход товарной руды снизился с 41,1 до 35,8 %, т.е. на 1 т товарной руды прирост сырой руды составил 2 т.
7	Повышение доли попутных компонентов в общей ценности минерального сырья и рост доли комплексных месторождений	Все месторождения полезных ископаемых являются потенциально комплексными, в процессе переработки основного полезного ископаемого (железа, меди) попутные компоненты накапливаются в полупродуктах или отходах производства.
8	Расширение и смена номенклатуры источников минерального сырья и направлений его использования	Еще 350 лет тому назад были известны всего 15 химических элементов. В XVIII в. были открыты 14 элементов, в т.ч. титан, хром, марганец, никель, стронций, иттрий, молибден, теллур, вольфрам, платина. Основная масса элементов была открыта в XIX в., а периодическая система элементов – в 1869 г.
9	Решающая зависимость технико-экономических показателей работы горных предприятий от природных условий	Горно-геологическая группа: запасы, их качество, категория сложности геологического строения, мощность покрывающих пород, угол падения залежи, глубина разработки, коэффициент вскрыши и др. Физико-географическая группа: температура воздуха района, рельеф, широта и долгота, наличие вечной мерзлоты. Значение имеют также производственная мощность, кондиции, системы вскрытия и разработки месторождения, характеристика инфраструктуры.

Особенности условий освоения запасов полезных ископаемых обусловлены, главным образом, уникальностью объекта освоения, многообразием природных условий районов расположения месторождений, состоянием экономики, науки и техники:

1. Исчерпаемость и невозобновимость запасов конкретных месторождений полезных ископаемых.
2. Комплексность месторождений и минерального сырья.
3. Разнообразие природных условий разработки одноименных видов минерального сырья.
4. Индивидуальность технологических свойств и условий переработки минерального сырья.
5. Высокая природная изменчивость геологических параметров в пределах одного месторождения.
6. Многопроцессность горного производства, рассредоточенность и нестационарность активной части основных фонтов.
7. Многообразие альтернативных способов обеспечения заданного объема выпуска продукции.
8. Нарастание информации о месторождении по мере его освоения и принятие основных решений в условиях неопределенности.

Изложенные в статье методические рекомендации по подготовке к защите докторских и кандидатских диссертаций по научной специальности «2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем» предлагается использовать при приеме диссертаций на защиту в диссертационном совете в ИГД УрО РАН.

Список литературы

1. Васильев М.В., Яковлев В.Л., 1972. *Научные основы проектирования карьерного транспорта*. Отв. ред. Мельников Н.В. Москва: Наука, 202 с.
2. Батугин С.А., Яковлев В.Л., 1992. *Закономерности развития горного дела*. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 116 с.
3. Трубецкой К.Н., Малышев Ю.Н., Пучков Л.А., Яковлев В.Л. и др., 1997. *Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли*. Москва: Изд-во Академии горных наук, 478 с.
4. Каплунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В., 2003. *Комбинированная геотехнология*. Москва: Издательский дом «Руда и металлы», 560 с.
5. Каплунов Д.Р., Болотов Б.В., 1988. *Особенности проектирования подземных рудников в системе комплексного освоения месторождений*. Москва: ИПКОН, 178 с.
6. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., 2008. Развитие теории проектирования и реализация идей комплексного освоения недр. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 4, С. 20 – 41.
7. Яковлев В.Л., 1965. *Исследование и выбор оптимальных режимов горно-транспортных работ рудных карьеров с помощью ЭЦВМ*: дис. ... канд. техн. наук / ИГД Госметаллургкомитета. Свердловск, 195 с.
8. Яковлев В.Л., 1978. *Теоретические основы выбора транспорта рудных карьеров*: дис. ... д-ра техн. наук / ИГД МЧМ СССР. Свердловск, 197 с.
9. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н., Федотенко В.С., 2024. Значение современных геотехнологических решений при обеспечении устойчивого развития горнодобывающих предприятий. *Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сборник научных трудов Института горного дела УрО РАН*. Екатеринбург: УрО РАН, Вып. 6 (96), С. 34-43.
10. Каплунов Д.Р., Помельников И.И., Левин В.И. и др., 1998. *Комплексное освоение рудных месторождений: проектирование и технология подземной разработки*. Москва: ИПКОН РАН, 383 с.
11. Мельников Н.Н., Козырев А.А., Лукичев С.В., 2009. Новая концепция разработки месторождений глубокими карьерами. *Горный журнал*, №11, С. 7 – 11.

12. *Проектирование, планирование и управление производством на карьерах посредством ЭВМ*. Под общ. ред. Ржевского В.В. Москва: Недра, 1966, 238 с.
13. Ржевский В.В., 1956. *Проектирование контуров карьеров*. Под ред. Шешко Е.Ф. Москва: Металлургиздат, 230 с.
14. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., 2012. Влияние показателей извлечения на эффективность технологии подземной разработки рудных месторождений. *Известия вузов. Горный журнал*, № 3, С. 4–11.
15. Соколов И.В. Антипин Ю.Г., Никитин И.В., 2021. *Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений*. Под общ. ред. д-ра техн. наук И.В. Соколова; Мин-во науки и высш. обр. РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 340 с.
16. Трубецкой К.Н., Корнилков С.В., Яковлев В.Л., 2012. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства. *Горный журнал*, № 1, С. 15 - 19.
17. Яковлев В.Л., Саканцев М.Г., Саканцев Г.Г., 2009. *Границы карьеров при проектировании сложноструктурных месторождений*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 302 с.
18. Яковлев В.Л., 2014. Исторический опыт развития научных идей и методологических подходов к обоснованию технологий, параметров горных работ. *Проблемы недропользования*, № 3, С. 15 – 26. DOI: 10.18454/2313–1586.2014.03.015.
19. Яковлев В.Л., 1989. *Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров*. Институт горного дела Севера СО АН СССР. Новосибирск: Наука СО, 238 с.
20. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В., 2018. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Под ред. член-корр. РАН Яковлева В.Л. Екатеринбург: УрО РАН, 360 с.
21. Яковлев В.Л., 2019. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов*. Екатеринбург, УрО РАН, 284 с. DOI: 10.25635/IM.2020.54.57311
22. *Выбор вида карьерного транспорта (методика)*. Москва: Недра, 1973, 192 с. (М-во черной металлургии СССР. Ин-т горного дела).

References

1. Vasil'ev M.V., Yakovlev V.L., 1972. *Nauchnye osnovy proektirovaniya kar'ernogo transporta [Scientific foundations of designing quarry transport]*. Otv. red. Mel'nikov N.V. Moscow: Nauka, 202 p.
2. Batugin S.A., Yakovlev V.L., 1992. *Zakonomernosti razvitiya gornogo dela [Patterns of mining developmen]*. Yakutsk: YaNTs SO RAN, 116 p.
3. Trubetskoi K.N., Malyshev Yu.N., Puchkov L.A., Yakovlev V.L. i dr., 1997. *Gornye nauki. Osvoenie i sokhranenie nedr Zemli [Mining sciences. Development and preservation of the Earth's interior]*. Moscow: Izd-vo Akademii gornykh nauk, 478 p.
4. Kaplunov D.R., Kalmykov V.N., Ryl'nikova M.V., 2003. *Kombinirovannaya geotekhnologiya [Combined geotechnolog]*. Moscow: Izdatel'skii dom "Ruda i metally", 560 p.
5. Kaplunov D.R., Bolotov B.V., 1988. *Osobennosti proektirovaniya podzemnykh rudnikov v sisteme kompleksnogo osvoeniya mestorozhdenii [Features of designing underground mines in the system of integrated field development]*. Moscow: IPKON, 178 p.
6. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., 2008. *Razvitie teorii proektirovaniya i realizatsiya idei kompleksnogo osvoeniya nedr [Elaboration of the theory of design and implementation of ideas of integrated development of mineral resourc]*. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 4, P. 20 – 41.
7. Yakovlev V.L., 1965. *Issledovanie i vybor optimal'nykh rezhimov gorno-transportnykh rabot rudnykh kar'erov s pomoshch'yu ETsVM [Research and selection of optimal modes of mining and transport operations of ore pits using electronic digital equipment]*:

dis. ... kand. tekhn. nauk / IGD Gosmetallurgkomiteta. Sverdlovsk, 195 p.

8. Yakovlev V.L., 1978. Teoreticheskie osnovy vybora transporta rudnykh kar'erov [Theoretical foundations of the choice of ore quarry transport]: dis. ... d-ra tekhn. nauk / IGD MChM SSSR. Sverdlovsk, 197 p.

9. Kaplunov D.R., Radchenko D.N., Fedotenko V.S., 2024. Znachenie sovremennykh geotekhnologicheskikh reshenii pri obespechenii ustoichivogo razvitiya gornodobyvayushchikh predpriyatii. Geotekhnologicheskie problemy kompleksnogo osvoeniya neдр [Importance of modern geotechnological solutions in ensuring the sustainable development of mining enterprises]: sbornik nauchnykh trudov Instituta gornogo dela UrO RAN. Ekaterinburg: UrO RAN, Vyp. 6 (96), P. 34-43.

10. Kaplunov D.R., Pomel'nikov I.I., Levin V.I. i dr., 1998. Kompleksnoe osvoenie rudnykh mestorozhdenii: proektirovanie i tekhnologiya podzemnoi razrabotki [Integrated development of ore deposits: design and technology of underground mining]. Moscow: IPKON RAN, 383 p.

11. Mel'nikov N.N., Kozyrev A.A., Lukichev S.V., 2009. Novaya kontseptsiya razrabotki mestorozhdenii glubokimi kar'erami [A new concept for the development of deposits by deep quarries]. Gornyi zhurnal, №11, P. 7 – 11.

12. Proektirovanie, planirovanie i upravlenie proizvodstvom na kar'erakh posredstvom EVM [Design, planning and management of production in quarries by computer]. Pod obshch. red. Rzhhevskogo V.V. Moscow: Nedra, 1966, 238 p.

13. Rzhhevskii V.V., 1956. Proektirovanie konturov kar'erov [Designing contours of quarries]. Pod red. Sheshko E.F. Moscow: Metallurgizdat, 230 p.

14. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., 2012. Vliyanie pokazatelei izvlecheniya na effektivnost' tekhnologii podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii [Influence of extraction indicators on the effectiveness of the technology of underground mining of ore deposits]. Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal, № 3, P. 4 – 11.

15. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., 2021. Metodologiya vybora pod-zemnoi geotekhnologii pri kombinirovannoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii [Methodology of selecting underground geotechnology for combined mining of ore deposits]. Pod obshch. red. d-ra tekhn. nauk I.V. Sokolova; Min-vo nauki i vyssh. obr. RF. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 340 p.

16. Trubetskoi K.N., Kornilkov S.V., Yakovlev V.L., 2012. O novykh podkhodakh k obespecheniyu ustoichivogo razvitiya gornogo proizvodstva [On new approaches to ensuring sustainable development of mining production]. Gornyi zhurnal, № 1, P. 15 – 19.

17. Yakovlev V.L., Sakantsev M.G., Sakantsev G.G., 2009. Granitsy kar'erov pri proektirovanii slozhnostrukturnykh mestorozhdenii [Boundaries of quarries in the design of complex-structured deposits]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 302 p.

18. Yakovlev V.L., 2014. Istoricheskii opyt razvitiya nauchnykh idei i metodologicheskikh podkhodov k obosnovaniyu tekhnologii, parametrov gornykh rabot [Historical experience of the development of scientific ideas and methodological approaches to the substantiation of mining technologies and parameters]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3, P. 15 – 26. DOI: 10.18454/2313–1586.2014.03.015.

19. Yakovlev V.L., 1989. Teoriya i praktika vybora transporta glubokikh kar'erov [Theory and practice of choosing the deep quarry's transport]. Institut gornogo dela Severa SO AN SSSR. Novosibirsk: Nauka SO, 238 p.

20. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya [Innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources]. Pod red. chlen-korr. RAN Yakovleva V.L. Ekaterinburg: UrO RAN, 360 p.

21. Yakovlev V.L., 2019. Issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiy metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov [The study of transitional processes



as a new direction in the development of the methodology of integrated exploration of georesources]. Ekaterinburg, UrO RAN, 284 p. DOI: 10.25635/IM.2020.54.57311

22. Vybora vida kar'ernogo transporta (metodika) [Choice of the type of quarry transport (methodology)]. Moscow: Nedra, 1973, 192 p. (M-vo chernoj metallurgii SSSR. In-t gornogo dela).



ГЕОТЕХНИКА ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 622.674

Николаев Павел Валентинович
ведущий инженер,
АО «ВНИИ Галургии»,
614002, г. Пермь, ул. Сибирская, 94
e-mail: Pavel.Nikolaev@uralkali.com

Тарасов Владислав Викторович
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией,
АО «ВНИИ Галургии»,
e-mail: Vladislav.Tarasov@uralkali.com

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ОЧИСТКИ ТЮБИНГОВОЙ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ ОТ СОЛЯНЫХ НАРОСТОВ

Аннотация:

Эксплуатация шахтных стволов калийных рудников сопровождается образованием на крепи и армировке соляных отложений. Площадь соляных отложений на стенках крепи ствола может достигать 8000 м². Наиболее интенсивному зарастанию подвержены вентиляционные шахтные стволы, оборудованные скиповыми подъемами. Соляные отложения на крепи вызывают коррозию металлических поверхностей в шахтных стволах, уменьшают зазоры между скипом и крепью, что может привести к зависанию сосуда, и затрудняют визуальный контроль крепи и армировки ствола. К тому же неконтролируемый рост соляных фрагментов большой массы в стволе представляет опасность для технологического оборудования и работников, занимающихся его обслуживанием. Поэтому своевременная очистка крепи от соляных наростов является важной задачей для безопасной и эффективной эксплуатации шахтных стволов.

В данной статье описывается механизм формирования соляных наростов на элементах крепи и армировки вертикальных стволов. Натурными наблюдениями установлено, что процесс зарастания тюбинговой крепи происходит стадийно. При этом на III и IV стадиях затруднен визуальный осмотр, регламентированный нормативными документами, а соляные наросты представляют серьезную опасность работы технологического оборудования, расположенного в стволе. Рассмотрены основные способы очистки крепи шахтного ствола от соляных наростов, их преимущества и недостатки, а также рекомендации по выбору технологии в зависимости от условий эксплуатации. Выполнен анализ мероприятий, направленных на снижение количества оседания пылевидных частиц и распространение соляных наростов. В заключении сделан вывод о необходимости развития комплексного подхода по проблеме очистки крепи и предотвращения образования соляных наростов.

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.021

Nikolaev Pavel V.
Leading Engineer,
JSC VNII Galurgii,
614002 Perm, 94 Sibirskaya Str.,
e-mail: Pavel.Nikolaev@uralkali.com

Tarasov Vladislav V.
Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory,
JSC VNII Galurgii,
e-mail: Vladislav.Tarasov@uralkali.com

ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR CLEANING THE TUBING SUPPORT OF VERTICAL MINE SHAFTS FROM SALT GROWTHS

Abstract:

The operation of mineshafts in potash mines is accompanied by the formation of salt deposits on the lining and reinforcement. The area of salt deposits on the shaft lining can reach 8,000 m². Ventilation shafts equipped with skip lifts are the most prone to overgrowth. Salt deposits on the shaft lining cause corrosion of metal surfaces in mineshafts, reduce the gaps between the skip and the lining, which can lead to the vessel getting stuck, and make it difficult to visually inspect the lining and reinforcement of the shaft. In addition, the uncontrolled growth of large salt fragments in the barrel poses a danger to the technological equipment and the workers who maintain it. Therefore, timely cleaning of the lining from salt deposits is an important task for the safe and efficient operation of mineshafts. This article describes the mechanism of salt growth on the lining and reinforcement elements of vertical shafts. Field observations have shown that the process of overgrowth of the tubing lining occurs in stages. At the same time, visual inspection, regulated by regulatory documents, is difficult at stages III and IV, and salt deposits pose a serious danger to the operation of technological equipment located in the shaft. The article discusses the main methods of cleaning the mineshaft lining from salt deposits, their advantages and disadvantages, as well as recommendations for choosing the appropriate technology based on the operating conditions. An analysis of measures aimed at reducing the amount of dust particles settling and the spread of salt deposits has been performed. It is concluded that it is an urgent task to develop a comprehensive approach to the problem of cleaning lining and of preventing the formation of salt deposits.

Ключевые слова: шахтный ствол; тюбинговая крепь; соляные наросты; механические, химические, гидравлические и комбинированные способы очистки.

Key words: mineshaft; tubing lining; salt deposits, mechanical, chemical, hydraulic, and combined cleaning methods.

Введение

Вертикальные шахтные стволы для горнорудных предприятий являются основными вскрывающими горными выработками и наиболее ответственными сооружениями, связывающими подземный и поверхностный комплекс шахты в единую систему. Крепь вертикальных стволов является одним из наиболее важных элементов шахтной конструкции, которая должна обеспечивать защиту подземного комплекса от возможного прорыва подземных вод в течение всего срока службы рудника [1]. В процессе эксплуатации скиповых и скипо-клетевых шахтных стволов на соляных и калийных рудниках наблюдается образование соляных отложений на крепи и армировке.

Известно [2], что при повышенной влажности воздуха в стволе, характерной для летнего периода года, происходит нарастание на элементах крепи соляной пыли, которая со временем образует плотные соляные наросты. Скопившиеся на крепи соляные массы способствуют коррозии металлической крепи и армировки ствола [3, 4], уменьшают зазоры между сосудом и крепью ствола, затрудняют визуальный контроль за состоянием крепи и армировки [5].

Как показывает практика, увеличение запыленности рудничной атмосферы намного выше предельно допустимых концентраций (ПДК) – 5 мг/м^3 . Согласно исследованиям [6], максимальная запыленность рудничной атмосферы на калийных рудниках может превышать 2500 мг/м^3 .

На сегодняшний день не существует универсальных способов добиться снижения концентрации соляной пыли до значения ПДК в 5 мг/м^3 . Поэтому борьба с пылью на калийных рудниках и последующая очистка крепи и армировки шахтных стволов от соляных наростов является важной задачей для обеспечения безопасных условий труда рабочих и условий, необходимых для бесперебойной работы всего технологического оборудования.

Механизм образования соляных наростов

В результате многолетних наблюдений установлено, что тюбинговая крепь и жесткая армировка наиболее подвержены зарастанию соляными отложениями в основном в стволах с исходящей струей, оборудованных скиповыми подъемами. Главная причина роста отложений в том, что тюбинговая крепь имеет ребристую поверхность, состоящую из большого числа ребер жесткости и фланцев с полками шириной до 190 - 230 мм. Ребристая поверхность тюбинговой крепи и наличие кессонов создают большое сопротивление воздушному потоку в пристеночном слое. Появляются условия оседания пыли, находящейся в воздушном потоке, на стенках крепи. При полном зарастании тюбинговой крепи интенсивность роста отложений уменьшается, так как крупные частицы просыпи не оседают на вертикальной поверхности. Толщина отложений в этих местах достигает 600 мм. Армировка ствола находится в самом воздушном потоке, и образование соляных отложений на ней происходит в зависимости от условий аэродинамического обтекания воздушного потока. Поверхность, перпендикулярная встречному воздушному потоку, имеет большое лобовое сопротивление, в результате чего над этой поверхностью образуется зона с незначительной скоростью воздушного потока. Образование нароста происходит в основном в этой зоне. Боковые поверхности армировки обдуваются потоком, скорость которого мало отличается от скорости основной воздушной струи, поэтому оседание пыли на этих поверхностях происходит в малых размерах и рост соляных отложений незначителен.

Основным источником соляных отложений (до 60 % от общего количества соляной пыли) для скиповых стволов является просыпь руды и тонкодисперсная пыль, образующиеся при разгрузке скипов в приемный бункер. Около 30 % соляной пыли в стволе появляется при загрузке скипов, в процессе движения скипов по стволу и при прохождении скипами сопряжений ствола с главными вентиляционными штреками. Незначительный источник соляной пыли (10 % от общего количества соляной пыли) выделяется при добыче и транспортировке полезного ископаемого, эта пыль перемещается по горным выработкам с воздухом от добычного участка к стволу и далее движется по стволу в восходящем потоке воздуха [7].

Схематичная карта интенсивности пылеобразования в скиповом вентиляционном стволе показана на рис. 1.

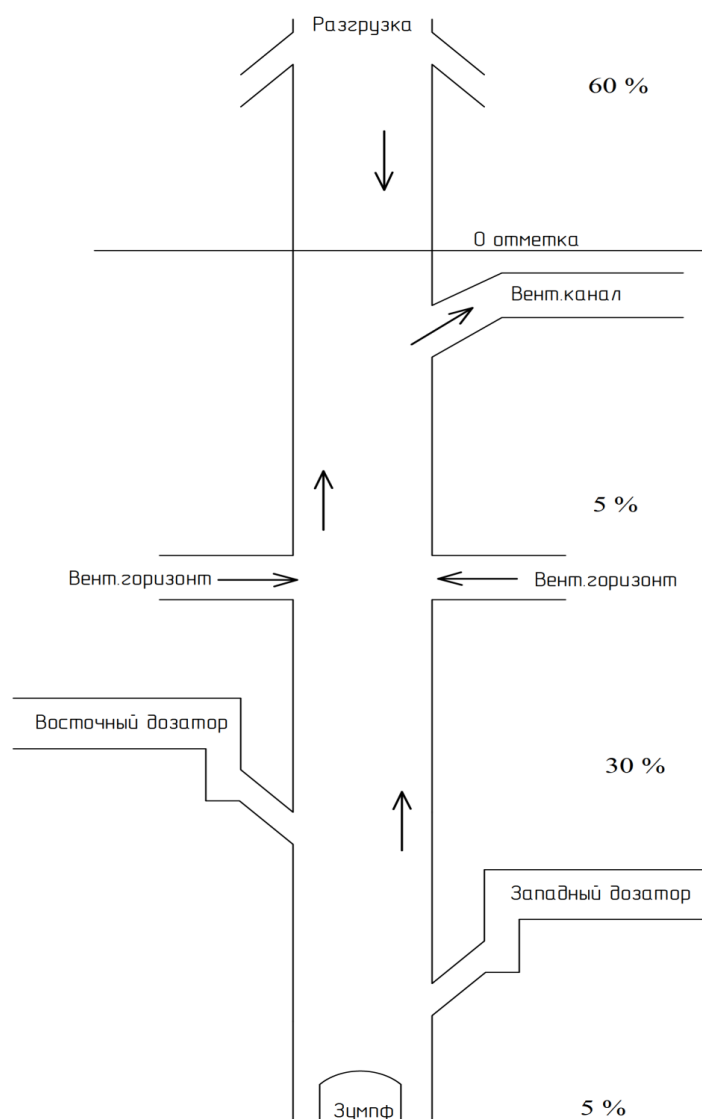


Рис. 1. «Карта» распределения основных очагов пылеобразования условного вентиляционного ствола

Для воздухоподающих стволов налипание на крепи соляных отложений происходит под воздействием влаги подаваемого в ствол воздуха и влаги, попадающей в ствол из закрепного пространства. Вследствие гигроскопичности соляной пыли и адсорбции влаги соляной поверхностью происходит увлажнение отложений. Избыток влаги приво-

дит к растворению мелких частиц соли, осевших на армировке и крепи ствола. Образовавшиеся рассолы и минерализованная вода, поступающая из закрепного пространства, заполняют пустоту между крупными частицами просыпи и пустоты от растворившихся частиц соли. Под влиянием изменившихся параметров нисходящего воздушного потока, в котором температура и влажность имеют значительные колебания, из рассолов выкристаллизовываются новые слои соли. Происходит периодический рост отложений, которые в результате имеют слоистую структуру. Срастание нижних и верхних наростов приводит к образованию сплошной корки отложений. Кессоны заполняются в дальнейшем за счет кристаллизации соли из рассолов, стекающих по поверхности крепи. Как правило, интенсивность образования отложений увеличивается летом, когда колебания температуры и влажности наибольшие, и уменьшается в зимний период, когда происходит высушивание отложений.

Натурными наблюдениями установлено, что процесс зарастания тубинговой крепи соляными наростами происходит в четыре стадии.

На I стадии соляные отложения заполняют горизонтальные ребра жесткости и нижнюю часть кессонов. На верхней части спинки оседает соляной налет пыли. Соляные отложения преимущественно рыхлые, легко поддаются процессу ручной очистки.

На II стадии поверхность кессонов заполняется примерно наполовину, в верхней части спинки толщина наростов минимальна, но по мере приближения к горизонтальной полке толщина нароста постепенно увеличивается до заполнения всей площади горизонтальной полки (ребра). На данном этапе происходит вторичная (неоднократная) кристаллизация отложений: соляные частицы из рыхлого состояния переходят в плотные формирования, что в дальнейшем затрудняет процесс очистки.

III стадия является потенциально опасной как для обслуживающего персонала, так и для всей работы оборудования ствола. Внутреннее пространство тубингов практически полностью заполнено соляными наростами. Процесс ручной очистки затруднен, возникает необходимость применения механизированной очистки сегментов крепи с предварительным смачиванием соляных отложений.

IV стадия является опасной и представляет прямую угрозу безопасной эксплуатации шахтного ствола как для персонала, так и для технологического оборудования. Отсутствует возможность в проведении визуального обследования крепи. Тубинги полностью покрыты соляными наростами одним сплошным слоем. При этом формируется дальнейшее послойное «налипание» соляных частиц на сформированные наросты. Процесс ручной очистки малоэффективен, возникает необходимость применения механизированной очистки сегментов крепи от соляных отложений с применением оборудования, работающего под большим давлением. Высока вероятность внезапного неконтролируемого обрушения соляных масс в больших объемах, достигающих одномоментно веса нескольких тонн.

Из вышеизложенного следует, что III и IV стадии являются критическими, т.е. соляные наросты представляют серьезную опасность для работы технологического оборудования, расположенного в стволе, а также затруднен визуальный осмотр крепи и армировки. Поэтому рекомендуется не допускать образование соляных наростов такой интенсивности с выполнением оперативных работ по очистке крепи.

Способы очистки

В результате обзора научной и технической литературы по мерам борьбы с наростами соли на поверхности крепи и армировки авторами статьи были выделены четыре основных способа очистки:

- механический;
- гидравлический;
- химический;
- комбинированный.

Механический способ очистки

В настоящее время очистка шахтных стволов калийных и соляных рудников производится ручным инструментом (скребок, топор, кувалда). Кувалдой производят разрушение верхней прочной корки за счет энергии единичного удара. Затем разрыхленную соляную массу удаляют скребками. Работа по очистке шахтных стволов ведется бригадой крепильщиков с крыши клетки и смотровой площадки скипа в стесненных условиях, что ограничивает число рабочих, производящих очистку крепи и армировки, а также уменьшает площадь очистки.

Недостатком применения ручного инструмента является крайне низкая производительность и высокая трудоемкость работ по очистке поверхности крепи обслуживающим персоналом, поэтому с целью механизации труда по очистке крепи начали применять пневматические отбойные молотки. Однако их использование ограничено вследствие большого веса инструмента и невозможности его использования при очистке участков крепи, отдаленных от подъемного сосуда (клетки, скипа). Преимуществом ручного механизированного инструмента можно считать такие качества, как маневренность, возможность очистки сложных поверхностей, повышение производительности до 2,5 раз и снижение трудоемкости работ.

В последние годы получила распространение ультразвуковая очистка поверхностей под воздействием очищаемой среды. Ультразвуковая вибрация очищающей среды позволяет значительно повысить качество и эффективность очистки, снизить энергоемкость процесса разрушения загрязнений. Объекты очистки могут иметь сложную форму. Недостаток способа очистки вибрирующей очищающей средой в емкости заключается в невозможности его использования для объектов больших размеров. Для очистки крупногабаритных деталей, когда требуется большая мощность ультразвуковых излучателей, практически нет мощных источников ультразвука, а при увеличении количества подводимой энергии возрастает вредное влияние вибрации на человека.

Способы очистки поверхностей от загрязнений, основанные на методах механического воздействия струи рабочего тела, получили более широкое распространение, чем механические инструменты. В качестве рабочего тела применяется воздух, вода, песок, дробь.

Гидравлический способ очистки

В шахтных стволах соляных рудников нередко предпринималась попытка очистки стволов смывом соляных отложений водой. С этой целью в стволе был смонтирован специальный став, а в зоне очистки с шагом по высоте в 3 м по периметру ствола проложено кольцо из полиэтиленовых труб. В кольцо со стороны тубинговой крепи просверлены отверстия диаметром 2,5 мм с шагом 200 мм. Отложения орошались в течение 60 – 90 мин до проведения очистки механическим инструментом. Но этот способ не нашел распространения. В результате большого расхода воды происходил размыв соляного пласта в сопряжении ствола с горизонтальной выработкой, что крайне негативно отразилось на состоянии конструктивной системы ствола. Преимуществом же этого способа является высокое качество очистки и возможность ведения работ без остановки подъемных установок.

В практике эксплуатации шахтных стволов производилась очистка крепи от соляных отложений гидравлической струей под избыточным давлением до 5,0 – 20,0 МПа. Жидкость подается в струеформирующее устройство и направляется на очищаемую поверхность. Гидроструйная очистка имеет большую производительность и экономичность. Способ обеспечивает высокое качество очистки поверхности и возможность работы в различных режимах. Применение передвижных моечных установок повышает маневренность и мобильность способа очистки. Однако для организации гидроструйной очистки необходимо сооружение сложных гидротехнических устройств для сбора и очистки загрязненной моеющей жидкости, что снижает эффективность способа.

Другим недостатком является повышенный коррозионный износ очищаемой поверхности и высокая трудоемкость обслуживания установки.

При очистке технологического оборудования от соляных отложений с высокой эффективностью нередко применяется вода, которая может быть разогрета до состояния пара [8]. Достоинством применения пара для очистки крепи является высокая эффективность его применения при небольшом расходе жидкости в отличие от стандартного применения воды. Соляные наросты при активном насыщении от водяных паров намного легче поддаются разрушению, возрастает скорость очистки. Из недостатков данного способа стоит выделить большой комплекс подготовительных работ по прокладке паропроводов и необходимого технологического оборудования, а также высокие квалификационные требования к персоналу, производящему данный вид работ.

Помимо применения воды в качестве жидкости для разрушения соляных наростов, известен способ очистки поверхности шахтного ствола [9], включающий их разрушение посредством бурения шпуров и нагнетания в них раствора поверхностно-активных веществ с антифрикционными свойствами. При этом шпуры бурят до очищаемой поверхности, а давление нагнетания устанавливают в пределах 0,3 – 0,5 МПа. Используемая жидкость снижает межмолекулярные силы сцепления между частицами материала загрязнений и очищаемой поверхностью. Раствор поверхностно-активных веществ улучшает смачиваемость контактного слоя и повышает качество очистки.

Пескоструйная и гидропескоструйная очистка. В качестве абразива применяют кварцевый песок, состоящий из частиц размером до 2,5 мм, оксид алюминия, карбид кремния. Способ очистки применим для прочных и незначительных по толщине загрязнений. Но для значительных загрязнений данный способ недостаточно эффективен, так как частицы абразива могут застревать в материале загрязнения. Также пескоструйная очистка ограничена в применении из-за вредного воздействия пылевых частиц, образующихся в процессе очистки, на здоровье работников.

Наиболее эффективной схемой разрушения соляных отложений является комбинированная. Это разрушение слоя загрязнений струей рабочего тела (вода, воздух, песок) и удаление их с очищаемой поверхности механическим способом (удар, вибрация, ультразвук) до определенного уровня чистоты.

Химический способ очистки

При рассмотрении химических способов борьбы с налипанием соляных наростов в первую очередь стоит рассмотреть вопрос о нанесении на элементы крепи и армировки современных антиадгезионных покрытий, снижающих силы сцепления материала с поверхностью, а также улучшающих условия скольжения относительно друг друга. Нанесение химических покрытий может быть выполнено как в период строительства стволов перед возведением тюбинговой крепи, так и в процессе его эксплуатации.

Антиадгезионные покрытия широко представлены в различных сферах производственной деятельности – химической, машиностроительной, пищевой и др. Однако при выборе химического покрытия следует руководствоваться параметрами, которые присущи шахтным стволам калийных рудников, – агрессивной средой, изменяющимися в течение года температурно-влажностными показателями и др.

На рис. 2 представлено технологическое оборудование сушильного агрегата с участком нанесения антиадгезионного покрытия. Помимо проблемы устранения налипания соляных наростов, антиадгезионное покрытие может решить и другую задачу – защиту металлических конструкций крепи и армировки от коррозионного износа. Альтернативным вариантом использования химически активных веществ является применение различных ингибиторов для уменьшения слеживаемости. В практике промышленного производства калийных удобрений широко применяются аминомасляные эмульсии. Данный вид эмульсии позволяет снизить гигроскопичность соляных отложений и уменьшить показатели запыленности.



Рис. 2. Внешний вид оборудования сушильного агрегата:
слева – необработанная поверхность; справа – обработанная антиадгезивом

Комбинированный метод очистки предполагает одновременное использование механических, химических и физических способов в совокупности. Предварительными исследованиями установлено, что прочность отложений на сжатие значительно снижается при увеличении их влажности, поэтому перед проведением механической очистки необходимо намочить водой или паром соляной нарост, тем самым ослабив связи между частицами соли. Последующие механические очистки крепи повышают производительность очистки крепи от наростов в 2 – 3 раза. Использование физических способов при одновременном или попеременном воздействии на отложения электрического, электромагнитного или теплового поля образуют комбинированную очистку поверхностей от загрязнений. В комбинированных способах устанавливают наиболее эффективное сочетание физических полей.

Комбинации воздействия физических полей одинаковой природы, но разного знака также представляют практический интерес. В этих случаях воздействия, сводящиеся к сжатию-растяжению или нагреву-охлаждению, приводят к усталости материала загрязнения и его более быстрому разрушению. К главному преимуществу комбинированной схемы следует отнести высокую эффективность, но при этом требуется проведение многоэтапных работ.

Таким образом, поиск способов и средств очистки поверхностей крепи целесообразно вести с учетом физико-механических свойств соляных отложений, условий проведения очистки и характеристик очищаемой поверхности.

Помимо основных способов очистки авторы считают необходимым рассмотреть и вопросы, касающиеся самого процесса предотвращения образования соляных наростов на поверхности крепи и армировки.

Поскольку одним из основных факторов образования соляных наростов является гранулометрический состав руды, транспортируемой по скиповым стволам, необходимо в первую очередь акцентировать внимание на исключении условий образования пылевидных частиц. Пылевидные частицы обладают повышенной влагоемкостью и увеличивают слеживаемость соли, что затрудняет последующий процесс очистки. В работе [10] авторы рассмотрели механизм интенсивности выделения соляной пыли при проходке

горных выработок очистными комбайнами. Предложен способ перекрестной схемы резания по сравнению с шахматной и последовательной, что позволит добиться снижения выхода мелких пылевидных классов. В исследованиях [11] отмечено, что пылеподавление достигается за счет применения водных эмульсий на основе акриловых и алкидных полимеров. При этом происходят процессы укрупнения (склеивания) частиц с последующим пленкообразованием.

Другим важным фактором, влияющим на формирование наростов, являются микроклиматические показатели воздушной среды. В работе [12] авторы рассматривают эффективность системы автоматического управления проветриванием. Оборудование данной системы рециркуляционными установками позволит производить осушение горных выработок и, как следствие, снизить прирост соляных наростов во влажные периоды года.

Дополнительными мерами по борьбе с наростами соли на крепи и армировке может являться установка устройств пылеподавления «сухой туман». В технологии «сухой туман» эффект пылеподавления достигается за счет «захвата» частиц пыли, витающих в воздухе, а не за счет увлажнения пересыпаемого материала. И эти частицы плотно обволакивают облако пыли мелкодисперсионной водо-воздушной смесью, не давая пыли распространяться по площади до момента ее осаждения [13, 14].

Система оросительного кольца

Из многолетней практики эксплуатации шахтных стволов на калийных рудниках известно, что снижение прочности соляных отложений и наростов, накопившихся на крепи стволов, достигается повышением их влажности до 6 – 6,5 %, время увлажнения соляных отложений толщиной 0,25 – 0,3 м составляет 1 – 1,5 ч.

В основе принципа действия механизма очистки тюбинговой крепи лежит способ, при котором участок соляного нароста увлажняется водой, подаваемой через специальную металлическую или полиэтиленовую трубу-ороситель различным диаметром (рекомендуемая величина диаметра составляет 25 – 50 мм), отрезком ориентировочной длины трубы 3,6 м (1/6 сектора ствола), 11 м (1/2 сектора ствола) или 22 м (по всему периметру ствола). На стенках трубы-оросителя со стороны тюбинговой крепи с шагом 200 мм сверлятся сквозные отверстия диаметром от 3 до 5 мм. Допускается на отверстия устанавливать металлические или пластиковые патрубки длиной до 100 мм для более точного направления водяного потока. На один торец трубы ставится заглушка, на другой крепится резиновый шланг, подходящий под диаметр трубы для последующего соединения с трубопроводом подачи воды. Далее труба-ороситель надежно крепится к расстрелам вдоль стенки кольца, охватывая определенный сектор крепи ствола, либо по всему периметру ствола. Предложенный способ механизации очистки шахтных стволов с предварительным увлажнением соляных отложений и последующим механическим их разрушением повышает производительность очистки в 3,5 раза.

Авторы исследования [4] предлагают рассмотреть вариант внесения изменений в конструкцию армировки в части установки обтекателя на поверхность расстрелов (рис. 3). Это позволит снизить величину аэродинамической тени и, как следствие, значительно уменьшить количество оседающей пыли на элементах армировки шахтного ствола.

Уменьшение вероятности оседания пыли на расстрелах и крепи ствола заключается в использовании пылеулавливающих устройств в местах интенсивного пылевыделения на участках загрузки и разгрузки скипов, а также на вентиляционных горизонтах.

Для минимизации риска оседания пыли на элементах армирования и крепи ствола можно предусмотреть отделение скипового подъема в стволе с помощью установки различных ширм или кожухов, уменьшающих вероятность оседания частиц пыли на поверхности крепи.

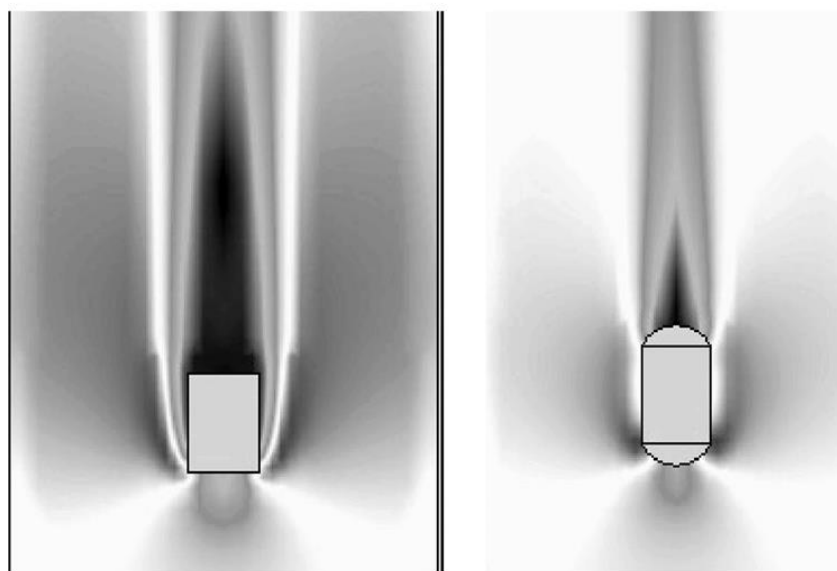


Рис. 3. Аэродинамическая тень:
слева – стандартный расстрел; справа – расстрел с обтекателем

В любом случае наибольший эффект может быть достигнут при использовании установки обтекателей в комплексе с пылеулавливающими устройствами в местах интенсивного пылевыделения и установкой защитного кожуха в скиповом отделении по длине ствола.

Заключение

Особенности технического обслуживания шахтных стволов калийных рудников связаны с необходимостью своевременного удаления соляных отложений с крепи и армировки. Процесс очистки является трудоемким, что приводит к большим затратам ручного труда, простоям подъемной установки и снижению производственной мощности рудника. Своевременная очистка крепи и армировки вертикальных шахтных стволов от соляных наростов является необходимым условием соблюдения безопасного производственного процесса. Для эффективной очистки крепи от наростов рекомендуется произвести работы по предварительному смачиванию соляных отложений в особенности на тех участках, где фиксируются III и IV стадии обрастания соляными наростами. После остановки подачи насыщенный водой участок соляного нароста следует обрушить ручным способом сверху вниз. После этого ороситель необходимо перенести на следующий сектор (ярус) крепи.

Для безопасной эксплуатации шахтного ствола перспективным решением проблемы образования и очистки соляных наростов на элементах крепи и армировки шахтных стволов является комплексный подход, заключающийся в проведении независимых друг от друга процессов:

- оптимизации процесса загрузки скипа в дозаторной камере и разгрузки в копровой части с целью минимизации просыпи рудной мелочи;
- создания условий по снижению количества оседаемой пыли на элементах армировки;
- очистки крепи механизированным и гидравлическим способами;
- нанесения химических реагентов (антиадгезионных присадок) на поверхность крепи и армировки для предотвращения дальнейшего «налипания» соляных отложений.

Приведенные в данной статье методы и способы борьбы с соляной пылью позволяют с высокой долей эффективности производить работы по устранению соляных наростов на элементах крепи и армировки шахтного ствола.

Список литературы

1. Ольховиков Ю.П., 1984. *Крепи капитальных выработок калийных и соляных рудников*. Москва: Недра, 238 с.
2. Черный К.А., Файнбург Г.З., 2025. Оценка изменения размера гигроскопического аэрозоля соляной пыли в зависимости от относительной влажности воздуха. *Горные науки и технологии*, № 10 (1), С. 34-44. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-283>.
3. Тарасов В.В., Пестрикова В.С., Иванов О.В., Чистяков А.Н., 2020. Влияние микроклиматических параметров воздуха на элементы крепи и армировки в стволах калийного рудника. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, № 2, С. 174-183.
4. Исаевич А.Г., Трушкова Н.А., 2011. Исследование и механизм возникновения соляных образований в скипо-вентиляционных стволах калийных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 4, С. 195-200.
5. Медведев И.И., А.Е. Красноштейн, 1977. *Борьба с пылью на калийных рудниках*. Москва: Недра, 189 с.
6. Семин М.А., Исаевич А.Г., Жихарев С.Я., 2021. Исследование оседания пыли калийной соли в горной выработке. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 2, С. 178-191. DOI: 10.15372/FTPRI20210218.
7. Белоусов В.И., Селезнев В.Н., Андреев В.И., 1988. *Технические решения по борьбе с пылью и внешними утечками воздуха на скипо-вентиляционных стволах калийных рудников*. Москва: ГИГХС.
8. RU 2764206C1. *Способ снижения налипания солей на поверхности валковых пресс-грануляторов*. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2764206C1/ru> (дата обращения 11.03.2026)
9. SU 1312176. *Способ очистки поверхности шахтного ствола от солевых наростов*. URL: <https://patents.google.com/patent/SU1312176A1/ru> (дата обращения 11.03.2026)
10. Суханов А.Е., Шишлянников Д.И., Исаевич А.Г., 2023. Использование перекрестной схемы резания для снижения пылевидных и небогатимых фракций при механизированной добыче калийной руды. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, Т. 334, № 2, С. 60-69.
11. Строкова В.В., Рязанова А.Ю., Маркова И.Ю., Степаненко М.А., Ишмухаметов Э.М., 2024. Оценка эффективности водных пылеподавляющих эмульсий на основе акриловых и алкидных полимеров. *Записки Горного Института*, Т. 270, С. 941-949.
12. Зайцев А.В., Агеева К.М., 2022. Осушение горных выработок калийных рудников с использованием средств систем автоматического управления проветриванием. *Недропользование*, Т. 22, № 1, С. 45-50. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.1.7.
13. Технология "сухой туман" - самая эффективная система пылеподавления в мире! *Горная промышленность*, 2021, № 4, С. 34.
14. Иванов А.В., Стриженов А.В., 2017. Исследование эффективности пылеподавления аэрозольными пушками-туманообразователями с пневмогидравлическими формунками. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 1, С. 165-170.

References

1. Ol'khovikov Yu.P., 1984. *Krepi kapital'nykh vyrobotok kaliinykh i solyanykh rudnikov* [Support of permanent workings in potash and salt mines]. Moscow: Nedra, 238 p.
2. Chernyi K.A., Fainburg G.Z., 2025. *Otsenka izmeneniya razmera gigroskopicheskogo aerolya solyanoi pyli v zavisimosti ot otnositel'noi vlazhnosti vozdukha* [Evaluation of variation of salt dust hygroscopic aerosol particle size as a function of relative air humidity]. *Gornye nauki i tekhnologii*, № 10 (1), S. 34-44. <https://doi.org/10.17073/2500-0632->

2024-07-283.

3. Tarasov V.V., Pestrikova V.S., Ivanov O.V., Chistyakov A.N., 2020. Vliyanie mikroklimaticheskikh parametrov vozdukha na elementy krepki i armirovki v stvolakh kaliinogo rudnika [Influencing microclimatic air parameters on fasteners and reinforcement elements in barks potassium mining]. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*, № 2, P. 174-183.

4. Isaevich A.G., Trushkova N.A., 2011. Issledovanie i mekhanizm vozniknoveniya solyanykh obrazovaniy v skipo-ventilyatsionnykh stvolakh kaliinykh rudnikov [Research and mechanism of salt formations in the skip-ventilation shafts of potash mines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, № 4, P. 195-200.

5. Medvedev I.I., A.E. Krasnoshtein, 1977. Bor'ba s pyl'yu na kaliinykh rudnikakh [Dust control in potassium mines]. Moscow: Nedra, 189 p.

6. Semin M.A., Isaevich A.G., Zhikharev S.Ya., 2021. Issledovanie osedaniya pyli kaliinoy soli v gornoy vyrabotke [Analysis of dust deposition of potash salt in a mineshaft]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 2, P. 178-191. DOI: 10.15372/FTPRPI20210218.

7. Belousov V.I., Seleznev V.N., Andreev V.I., 1988. Tekhnicheskie resheniya po bor'be s pyl'yu i vneshnimi utechkami vozdukha na skipo-ventilyatsionnykh stvolakh kaliinykh rudnikov [Technical solutions for dust control and external air leaks in the skip-ventilation shafts of potash mines]. Moscow: GIGKhS.

8. RU 2764206C1. Sposob snizheniya nalipaniya solei na poverkhnosti valkovykh press-granulyatorov [A method for reducing the adhesion of salts on the surface of roller press granulators]. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2764206C1/ru> (data obrashcheniya 11.03.2026)

9. SU 1312176. Sposob ochistki poverkhnosti shakhtnogo stvola ot solevykh narostov [A method of cleaning the surface of a mine shaft from salt deposits]. URL: <https://patents.google.com/patent/SU1312176A1/ru> (data obrashcheniya 11.03.2026)

10. Sukhanov A.E., Shishlyannikov D.I., Isaevich A.G., 2023. Ispol'zovanie perekrestnoi skhemy rezaniya dlya snizheniya pylevidnykh i neobogatimyykh fraktsii pri mekhanizirovannoy dobyche kaliinoy rudy [Application of a cross-cutting pattern to reduce dust emission and non-rich factions during mechanized mining of potash ore]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo uni-versiteta. Inzhiniring georesursov*, Vol. 334, № 2, P. 60-69.

11. Strokova V.V., Ryazanova A.Yu., Markova I.Yu., Stepanenko M.A., Ishmukhametov E.M., 2024. Otsenka effektivnosti vodnykh pylepodavlyayushchikh emul'sii na os-nove akrilovykh i alkidnykh polimerov [Evaluation of the effectiveness of water dust-suppressing emulsions based on acrylic and alkyd polymers]. *Zapiski Gornogo Instituta*, Vol. 270, P. 941-949.

12. Zaitsev A.V., Ageeva K.M., 2022. Osushenie gornyykh vyrabotok kaliinykh rudnikov s ispol'zovaniem sredstv sistem avtomaticheskogo upravleniya provetrivaniem [Drying of potassium mine workings using automatic air control systems]. *Nedropol'zovanie*, Vol. 22, № 1, P. 45-50. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.1.7.

13. Tekhnologiya "sukhoi tuman" - samaya effektivnaya sistema pylepodavleniya v mire! [Dry mist technology as the most effective dust suppression system in the world!] *Gornaya promyshlennost'*, 2021, № 4, P. 34.

14. Ivanov A.V., Strizhenok A.V., 2017. Issledovanie effektivnosti pylepodavleniya aerazol'nymi pushkami-tumanoobrazovatelyami s pnevmogidravlicheskimy formunkami [A study of the effectiveness of dust suppression by aerosol fog guns with pneumohydraulic formulas]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 1, P. 165-170.

УДК 622.6

Пашко Алексей Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой механики,
Технический университет УГМК
624091, г. Верхняя Пышма,
пр. Успенский, 3
e-mail: a.pashko@tu-ugmk.com

Великанов Владимир Семенович,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры механики,
Технический университет УГМК
e-mail: rizhik_00@mail.ru

**ПРОБЛЕМА РАЗРАБОТКИ
НАУЧНО-ОБОСНОВАННОЙ
МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ
МОБИЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ ПЛАТФОРМ
ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Аннотация:

Одним из основных направлений развития страны является реструктуризация и модернизация парка горно-металлургического оборудования. В статье рассматривается научная проблема, связанная с необходимостью разработки методологических принципов, моделей и алгоритмов для синтеза мобильных автономных транспортных платформ. Ключевая задача заключается в обеспечении соответствия таких платформ комплексу требований: маневренности, надежности восприятия окружающей среды, безопасности взаимодействия, адаптивности и экономической эффективности – особенно в условиях ограниченного пространства. В работе раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования, сформулированы его цель и задачи. Методический аппарат базируется на системном анализе; моделировании сложных динамических систем; классической и современной теории автоматического управления.

Итогом исследования стали практические рекомендации, способные внести вклад в решение актуальной научной проблемы в данной отрасли.

Ключевые слова: мобильные автономные платформы, ограниченное пространство.

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.032

Pashko Alexey D.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Head of the Department of Mechanics,
UMMC Technical University,
624091 Verkhnyaya Pyshma, 3 Uspensky ave.
e-mail: a.pashko@tu-ugmk.com

Velikanov Vladimir S.
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanics,
UMMC Technical University
e-mail: rizhik_00@mail.ru

**THE PROBLEM OF DEVELOPING
A SCIENTIFICALLY BASED
METHODOLOGY FOR CREATION
OF MOBILE AUTONOMOUS TRANSPORT
PLATFORMS FOR MINING INDUSTRY**

Abstract:

One of the main directions of the country's development is the restructuring and modernization of the mining and metallurgical equipment fleet. The article discusses a scientific problem related to the need to develop methodological principles, models and algorithms for the synthesis of mobile autonomous transport platforms. The key task is to ensure that such platforms meet a set of requirements: reliability, reliability of perception of the environment, safety of interaction, adaptability and economic efficiency - especially in conditions of limited space. The paper reveals the theoretical and practical significance of the research, formulates its purpose and objectives. The methodological framework is based on system analysis; modeling of complex dynamic systems; classical and modern theory of automatic control.

The research resulted in practical recommendations that can contribute to solving an urgent scientific problem in this industry.

Key words: mobile autonomous platforms, limited space.

Введение

Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» предусмотрено достижение национальной цели «Технологическое лидерство», в том числе путем обеспечения технологической независимости, увеличения к 2030 году индекса производства в промышленности не менее чем на 40 процентов по сравнению с уровнем 2022 года [1]. Для достижения национальной цели «Устойчивая и

динамичная экономика» необходимо вхождение к 2030 году Российской Федерации в число 25 ведущих стран мира по показателю плотности роботизации [1]. Кроме того, поставлена цель перехода не менее восьмидесяти процентов российских организаций ключевых отраслей экономики на использование базового и прикладного российского программного обеспечения в системах, обеспечивающих основные производственные и управленческие процессы [1].

Достижение указанных целей невозможно без принципиального обновления методологии проектирования, организации и управления процессом функционирования мобильных автономных транспортных платформ (МАТП) горно-металлургического комплекса. Указанные цели могут быть реализованы на научной основе теоретическими и методологическими средствами обоснования создания МАТП с использованием требований к контролю качества выполняемых технологических процессов.

Мировой рынок автономного горного оборудования быстро растет. Он оценивался в 4,48 млрд долларов в 2024 году и по прогнозам достигнет 11,86 млрд долларов к 2033 году, демонстрируя среднегодовой темп роста 11,6 %. Более узкий сегмент автономных карьерных самосвалов (близкая категория техники) оценивался в 1,12 - 1,7 млрд долларов в 2024 году с прогнозируемым 19 – 25,1 % до 2032 года [2, 3].

По состоянию на конец 2025 года в мире на карьерах работало более 3800 автономных самосвалов, и их парк продолжает расширяться. Регионом-лидером является Азиатско-Тихоокеанский регион, на долю которого в 2024 году приходилось 39 – 49 % мирового рынка. Особенно выделяются Австралия и Китай, где сосредоточено наибольшее количество единиц техники. Северная Америка и Европа также активно внедряют технологии, делая акцент на стандартизации и экологической устойчивости (табл. 1) [2, 3].

Таблица 1

Развитие сегментов рынка автономной горнодобывающей техники

Критерий	Тип оборудования	Уровень автономии	Тип двигателя	Тип работ
Лидирующий сегмент	Автономные самосвалы/тягачи (доля >50 %)	Полуавтономные системы (легче внедряются)	Дизельные (доля >70 %)	Открытые горные работы (доля >80 %)
Самый быстрорастущий сегмент	Автономные буровые установки	Полностью автономные системы	Электрические (включая гибриды)	Подземные горные работы

Автономные погрузочно-доставочные машины (ПДМ) и самосвалы функционируют благодаря комплексу технологий [4, 5]:

- используются лидары, радары, камеры и ультразвуковые датчики для построения 3D-карты пространства в реальном времени.
- основываются на спутниковых системах (GNSS, RTK) с дополнением инерциальными навигационными системами, что критично для подземных работ.
- ИИ-алгоритмы обрабатывают данные с датчиков для принятия решений о маршруте, обнаружения препятствий и управления системами машины.
- техника объединяется в единую сеть через выделенные каналы связи (LTE, 5G) и интегрируется с системами управления предприятием и «цифровыми двойниками».

Драйверами роста автономной горнодобывающей техники являются повышение безопасности (компании сообщают о снижении количества инцидентов до 50 %); рост производительности: автономная техника работает круглосуточно без перерывов, оптимизируя маршруты и скорость, что дает прирост эффективности грузоперевозок от 15 до 34 % и увеличение времени полезной работы; сокращение затрат: снижаются расходы на

оплату труда, топливо (на 20 – 25 %) и техническое обслуживание, что в совокупности уменьшает себестоимость тонны горной массы; дефицит квалифицированных кадров: для удаленных регионов это становится ключевым фактором [4, 5].

Однако существуют и весьма значительные препятствия для внедрения автономной техники: это высокие капитальные затраты (стоимость одного автономного самосвала может в 3 – 4 раза превышать стоимость обычного); сложность интеграции и нормативная неопределенность; социально-экономические последствия (автоматизация ведет к сокращению рабочих мест); кибербезопасность – увеличение доли цифровых систем делает объекты уязвимыми для хакерских атак.

Перспективами развития сегмента автономной горнодобывающей техники являются глубокая автономия и электрификация – тренд смещается к созданию полностью безлюдных рудников. К 2030 году до 30 % операций могут быть автоматизированы. Параллельно растет спрос на электрические и гибридные модели для снижения выбросов; распространение в подземной добыче и на малых предприятиях; развитие технологий позиционирования без GPS открывает путь для автономии под землей. Стандартизация и модульные решения делают технологии доступнее для средних и малых компаний; концентрация рынка и лидерство Китая (доля двух крупнейших производителей – Caterpillar и Komatsu – превышает 37 %). При этом Китай активно развивает собственные технологии и уже имеет самый большой парк автономной техники [4, 5].

Анализ развития производства автономной горнодобывающей техники показывает, что рынок переживает этап зрелого роста, движимый экономикой, безопасностью и господдержкой. Технологии стали надежными, а выгоды – измеримыми.

Исследование

Сегодня имеется достаточно научно-технической информации в области организации сложных технических систем [6 – 8]. Выполнение заданных объемов работ относится к области производственной эксплуатации, а обеспечение технического состояния МАТП – к технической эксплуатации. Существующая научная проблема связана с отсутствием проверенной методологии проектирования и эксплуатации МАТП. Это затрудняет их эффективное и безопасное применение в условиях ограниченного пространства, где необходимо одновременно учитывать ряд противоречивых требований.

Высокая маневренность и компактность – необходимость выполнения сложных траекторных движений в стесненных условиях при ограниченных габаритах платформы.

Надежность навигации и ситуационной осведомленности – потребность в достоверном восприятии окружающей среды в условиях

- ограниченной видимости (слабое освещение, запыленность);
- динамически изменяющейся обстановки (перемещение людей, техники, грузов);
- отсутствия стабильной инфраструктуры позиционирования (GPS-сигнал недоступен).

Гарантированная безопасность взаимодействия – требование предотвращения коллизий и аварийных ситуаций при

- совместном функционировании нескольких МАТП в едином пространстве;
- пересечении зон работы с людьми и другим транспортом;
- возникновении нештатных ситуаций (отказы датчиков, помехи в каналах связи).

Адаптивность к разнородным задачам – необходимость универсальной настройки платформы для выполнения различных операций (буровзрывные работы, выемочные работы, транспортировка, погрузочно-разгрузочные работы, инспекция) в условиях меняющихся требований к грузоподъемности, точности позиционирования и скорости перемещения.

Технологическая и экономическая целесообразность – потребность в сбалансированном решении, которое

- минимизирует стоимость аппаратно-программного комплекса;
- обеспечивает приемлемое время автономной работы;
- допускает масштабирование на парк из множества единиц техники.

Существующие подходы не позволяют комплексно разрешить эти противоречия:

- алгоритмы планирования траекторий зачастую не учитывают динамику изменений среды;
- сенсорные системы демонстрируют недостаточную надежность в сложных условиях;
- методы координации групп МАТП не гарантируют отсутствие конфликтов при высокой плотности движения;
- стандарты безопасности и сертификации для ограниченного пространства нуждаются в переработке.

Результаты исследования

Таким образом, научная проблема состоит в необходимости разработки методологических принципов, моделей и алгоритмов, обеспечивающих синтез МАТП, которые одновременно удовлетворяют требованиям маневренности, надежности восприятия, безопасности взаимодействия, адаптивности и экономической эффективности в условиях ограниченного пространства.

Критерием оценки решения научной проблемы будет являться комплексная верификация разработанной методологии по совокупности количественных и качественных показателей, отражающих степень удовлетворения пяти ключевых требований к МАТП в ограниченном пространстве (маневренность, надежность, безопасность, адаптивность, экономическая эффективность).

Вышеизложенное позволяет утверждать, что создание методологии синтеза МАТП для горно-металлургической отрасли является актуальной народно-хозяйственной проблемой, ее решение способно обеспечить реализацию национального проекта по достижению технологического суверенитета и увеличению индекса производства промышленности.

Высоко оценивая разносторонний и комплексный вклад российских и зарубежных ученых в историю и теорию исследуемого вопроса, необходимо отметить, что их работы намечают, однако не ограничивают поле деятельности для проведения научных изысканий, так как целый ряд аспектов создания и использования МАТП еще недостаточно рассмотрен и требует детального изучения.

Существующие подходы либо фокусируются на отдельных аспектах (например, маневренности или безопасности), либо не учитывают специфику работы в условиях ограниченного пространства. Это приводит к неоптимальным решениям: избыточным габаритам, высокой стоимости, низкой адаптивности или недостаточной надежности.

Цель исследования – разработать комплексную методологию синтеза МАТП, обеспечивающую сбалансированное выполнение требований маневренности, надежности восприятия, безопасности взаимодействия, адаптивности и экономической эффективности в условиях ограниченного пространства.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

1. Провести системный анализ существующих подходов к проектированию МАТП, выявить их ограничения и пробелы применительно к работе в условиях ограниченного пространства.
2. Сформулировать базовые принципы методологии, определяющие архитектуру, функциональную структуру и ключевые технологические решения для МАТП.
3. Разработать математические модели и алгоритмы:

- планирования траекторий с учетом динамических ограничений пространства;
- мультисенсорной интеграции для надежного восприятия среды в сложных условиях;
- координации группы МАТП и предотвращения коллизий при высокой плотности движения.

4. Создать методику адаптивного управления МАТП, обеспечивающую быструю перенастройку под различные операционные задачи.

5. Разработать методику технико-экономической оценки, позволяющую оптимизировать соотношение затрат и функциональных характеристик МАТП.

6. Провести экспериментальную верификацию методологии на физических и виртуальных моделях, подтвердить достижение целевых показателей эффективности.

В результате проведения исследования получим научный результат в виде целостной методологии, включающей

- систему принципов проектирования МАТП для ограниченного пространства;
- комплекс взаимосвязанных моделей и алгоритмов для реализации ключевых функций;
- алгоритмы адаптивного управления и трансформации;
- критерии и методики оценки и оптимизации технико-экономических показателей.

Практическая значимость предложенной методологии заключается в возможности

- повысить производительность горно-транспортных операций в ограниченном пространстве;
- снизить риски аварий и травматизма за счет автоматизированного контроля безопасности;
- оптимизировать затраты на внедрение и эксплуатацию автономных систем благодаря сбалансированному подбору аппаратно-программных решений.

Перспективы дальнейшего развития исследования связаны с

- экспериментальной апробацией методологии на физических прототипах МАТП;
- разработкой стандартов сертификации для автономных платформ в условиях ограниченного пространства;
- интеграцией предложенных решений в цифровые экосистемы горно-металлургических предприятий (включая системы предиктивной аналитики и цифровых двойников).

Заключение

Предложенная методология представляет собой комплексную систему принципов проектирования, математических моделей, алгоритмов адаптивного управления и методик оценки и оптимизации, обеспечивающую сбалансированное проектирование и эксплуатацию МАТП в условиях ограниченного пространства.

Отличительными особенностями методологии являются комплексность – одновременный учет всех пяти ключевых требований (маневренности, надежности, безопасности, адаптивности, экономической эффективности); адаптивность – способность платформы и системы управления подстраиваться под изменяющиеся условия и задачи без потери производительности; прогностичность – использование моделей прогнозирования для упреждающего выбора режимов работы; масштабируемость – применимость как к одиночным МАТП, так и к группам (паркам) платформ; ориентация на реальное применение – верификация на физических и виртуальных моделях, учет специфики горно-металлургических объектов (пыли, вибраций, перепадов температур, стесненных пространств).

Ее внедрение позволит горно-металлургическому комплексу России укрепить конкурентные позиции на глобальном рынке и приблизиться к достижению национальной цели «Технологическое лидерство», увеличив индекс производства в промышленности, показатель плотности роботизации, и осуществить переход на использование базового и прикладного российского программного обеспечения в системах, обеспечивающих основные производственные и управленческие процессы.

Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542> (дата обращения 20.01.2026)
2. Grand View Research: «Autonomous Mining Equipment Market Report, 2025-2033» (Аналитический отчет). URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/autonomous-mining-trucks-market> (дата обращения 20.01.2026)
3. Fortune Business Insights: «Autonomous Earthmoving Equipment Market, 2025-2032» (Аналитический отчет). URL: <https://www.globaldata.com/store/report/development-of-autonomous-trucks-in-mining-market-analysis/> (дата обращения 20.01.2026)
4. IM Mining: «Tonly & EACON launch cableless, electric & autonomous EQ100E truck» (Аналитический отчет). URL: <http://www.gruzovikpress.ru/article/25573-avtonomniy-gruzovoy-avtotransport-na-elektrotyage-dekarbonizatsiya-gruzovogo-transporta-ch-4/> (дата обращения 20.01.2026)
5. Megaproject / International Mining: «Eacon Mining Fleet Surpasses 800 Travelling >27 Million Kilometres Autonomously» (Декабрь 2024) (Аналитический отчет). URL: <https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/autonomous-mining-truck-market> (дата обращения 20.01.2026)
6. Смирнов Г.А., 1990. *Теория движения колёсных машин*. Москва: Машиностроение, 352 с.
7. Фурунжиев Р.И., Муравьев А.А., 2015. *Проектирование мобильных роботов: методы и алгоритмы*. Москва: Машиностроение, 416 с.
8. Лакота Н. А., Рудианов Н.А., Хрущёв В.В., 2018. *Управление мобильными роботами и робототехническими системами*. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 384 с.
9. Глебов А.В., 2025. Проблемы обеспечения технологического суверенитета горнодобывающей промышленности. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 28 – 35. DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.028
10. Ростехнадзор. *Статистические данные о производственном травматизме за 2020-2022 годы*. URL: <https://www.gosnadzor.ru/> (дата обращения: 15.10.2023).
11. *Правила по охране труда при работе в ограниченных и замкнутых пространствах* (утв. приказом Минтруда России от 15 декабря 2020 г. N 902н). URL: https://rzot.ru/files/npa/PrikazMinTrudaN902n_15122020.pdf (дата обращения 15.10.2026)
12. Карпушин А.В., Фролов М.С., 2022. Экономика цифровой трансформации горного предприятия: оценка потерь от простоев. *Горный журнал*, № 5, С. 67–73.
13. Головань В.И., Семенов Д.А., 2021. Моделирование динамики мобильного робота в средах со сложным рельефом. *Инженерный вестник*, № 4, С. 45–52.
14. Brooks R.A., 1986. A Robust Layered Control System For A Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, № 1, P. 14–23.
15. Thrun S., Burgard W., Fox D., 2005. *Probabilistic Robotics*. MIT Press, 647 p.
16. Pfeiffer M., Haghani T., 2023. Robotics for Mining: A Systematic Literature Review and TCO Analysis. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 37, № 3, P. 189–215.
17. Khamis A., Jiang J., 2022. Sensor Fusion and SLAM in Industrial Environments: Challenges and Solutions. *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 28, P. 100354.

References

1. Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 07.05.2024 g. № 309 "O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda i na perspektivu do 2036 goda" [Decree of the President of the Russian Federation dated 05/07/2024 No. 309 "On the National Development Goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the future up to 2036"]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542> (data obrashcheniya 20.01.2026)
2. *Grand View Research: «Autonomous Mining Equipment Market Report, 2025-2033» (Аналитический отчет)*. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/autonomous-mining-trucks-market> (data obrashcheniya 20.01.2026)
3. *Fortune Business Insights: «Autonomous Earthmoving Equipment Market, 2025-2032» (Аналитический отчет)*. URL: <https://www.globaldata.com/store/report/development-of-autonomous-trucks-in-mining-market-analysis/> (data obrashcheniya 20.01.2026)
4. *IM Mining: «Tonly & EACON launch cableless, electric & autonomous EQ100E truck» (Аналитический отчет)*. URL: <http://www.gruzovikpress.ru/article/25573-avtonomniy-gruzovoy-avtotransport-na-elektrotyage-dekarbonizatsiya-gruzovogo-transporta-ch-4/> (data obrashcheniya 20.01.2026)
5. *Megaproject / International Mining: «Eacon Mining Fleet Surpasses 800 Travelling >27 Million Kilometres Autonomously» (Dekabr' 2024) (Аналитический отчет)*. URL: <https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/autonomous-mining-truck-market> (data obrashcheniya 20.01.2026)
6. Smirnov G.A., 1990. *Teoriya dvizheniya kolesnykh mashin* [Theory of movement of wheeled vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 352 p.
7. Furunzhiev R.I., Murav'ev A.A., 2015. *Proektirovanie mobil'nykh robotov: metody i algoritmy*. [Designing mobile robots: methods and algorithms]. Moscow: Mashinostroenie, 416 p.
8. Lakota N. A., Rudyanov N.A., Khrushchev V.V., 2018. *Upravlenie mobil'nymi robotami i robototekhnicheskimi sistemami* [Management of mobile robots and robotic systems]. Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 384 p.
9. Glebov A.V., 2025. *Problemy obespecheniya tekhnologicheskogo suvereniteta gornodobyvayushchei promyshlennosti* [Problems of ensuring the technological sovereignty of the mining industry]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4, P. 28 – 35. DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.028
10. Rostekhnadzor. *Statisticheskie dannye o proizvodstvennom travmatizme za 2020-2022 gody* [Rostekhnadzor. Statistical data on occupational injuries for the years 2020-2022]. URL: <https://www.gosnadzor.ru/> (data obrashcheniya 15.10.2023).
11. *Pravila po okhrane truda pri rabote v ogranichennykh i zamknytykh prostranstvakh (utv. prikazom Mintruda Rossii ot 15 dekabrya 2020 g. N 902n)* [Rules on labor protection when working in confined and confined spaces (approved by Order of the Ministry of Labor of the Russian Federation dated December 15, 2020 No. 902n)]. URL: https://rzot.ru/files/npa/PrikazMinTrudaN902n_15122020.pdf (data obrashcheniya 15.10.2026)
12. Karpushin A.V., Frolov M.S., 2022. *Ekonomika tsifrovoi transformatsii gornogo predpriyatiya: otsenka poter' ot prostoev* [Economics of digital transformation of a mining enterprise: assessment of losses from downtime]. *Gornyi zhurnal*, № 5, P. 67–73.
13. Golovan' V.I., Semenov D.A., 2021. *Modelirovanie dinamiki mobil'nogo robota v sredakh so slozhnym rel'efom* [Simulation of mobile robot dynamics in environments with complex terrain]. *Inzhenernyi vestnik*, № 4, P. 45–52.
14. Brooks R.A., 1986. *A Robust Layered Control System For A Mobile Robot*. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, № 1, P. 14–23.
15. Thrun S., Burgard W., Fox D., 2005. *Probabilistic Robotics*. MIT Press, 647 p.
16. Pfeiffer M., Haghani T., 2023. *Robotics for Mining: A Systematic Literature Review and TCO Analysis*. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 37, № 3, P. 189–215.
17. Khamis A., Jiang J., 2022. *Sensor Fusion and SLAM in Industrial Environments: Challenges and Solutions*. *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 28, P. 100354.

УДК 622.271.4:629.7.063.7

Колпаков Владимир Олегович

аспирант кафедры машиностроения,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург,
21 линия Васильевского острова, 2-4/45

Шибанов Даниил Александрович

кандидат технических наук,
доцент кафедры машиностроения,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Хамидов Ойбек Угли

аспирант кафедры машиностроения,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

ЗАВИСИМОСТЬ ГОТОВНОСТИ КАРЬЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ ОТ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ СМАЗКИ

Аннотация.

В статье представлены результаты исследования влияния эффективности автоматических централизованных систем смазки (АЦСС) на надежность карьерных электрических экскаваторов большой единичной мощности, эксплуатируемых в тяжелых условиях железорудных карьеров. Обоснована актуальность оптимизации работы систем смазки для обеспечения безотказности и снижения эксплуатационных затрат. Существующие регламенты технического обслуживания систем смазки, основанные на эмпирическом опыте, не адаптированы к реальным условиям эксплуатации, что приводит к нерациональному планированию обслуживания и увеличению интенсивности аварийных отказов. Проведен статистический анализ простоев и отказов, акцентированный на узлах седлового подшипника. Установлена прямая корреляция между неработоспособностью АЦСС и частотой аварийных отказов. На основе выявленных тенденций разработана структура дифференцированного регламента технического обслуживания и ремонта (ТОиР) АЦСС, интегрируемого в систему планово-предупредительного обслуживания парка горных машин. Данные проиллюстрированы таблицами и диаграммами, показывающими влияние состояния АЦСС на общее время простоев машины. Предложен переход к системе планово-предупредительного обслуживания с мониторингом состояния узлов автоматических централизованных систем смазки в реальном времени.

Ключевые слова: электрический карьерный экскаватор, автоматическая централизованная система смазки, аварийные отказы, рабочее оборудование, техническое обслуживание и ремонт, надежность.

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.039

Kolpakov Vladimir O.

Postgraduate student,
of Mechanical Engineering,
Empress Catherine II Saint Petersburg
Mining University,
St. Petersburg, 21 Vasilyevsky Island line, 2-4/45

Shibanov Daniil A.

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Chair of Mechanical Engineering,
Empress Catherine II Saint Petersburg
Mining University

Khamidov Oibek U.

Postgraduate student of Mechanical Engineering,
Empress Catherine II Saint Petersburg
Mining University

INFLUENCE OF AUTOMATIC CENTRALIZED LUBRICATION SYSTEMS READINESS ON THE RELIABILITY OF CRITICAL COMPONENTS IN WORKING EQUIPMENT OF ELECTRIC EXCAVATOR

Abstract:

This article presents the results of a study on the impact of automatic centralized lubrication systems (ACLS) performance on the reliability of high-capacity electric mining excavators operating under severe conditions in iron ore open pits. The study substantiated the relevance of optimizing lubrication system operation to ensure reliability and reduce operational costs. Existing maintenance schedules for lubrication systems, based on empirical experience, are not adapted to real-world operating conditions, leading to inefficient maintenance planning and an increased rate of emergency failures. We have conducted the statistical analysis of downtime and failures, focusing on the saddle bearing assembly. A direct correlation was established between ACLS malfunction and the frequency of emergency failures. Based on the identified trends, a structure for a differentiated ACLS maintenance and repair (M&R) regulation has been developed for integration into a scheduled preventive maintenance system for the fleet of mining equipment. The data are illustrated with tables and charts demonstrating the impact of the ACLS condition on overall machine downtime. The paper proposes a transition to a scheduled preventive maintenance system with real-time condition monitoring of automatic centralized lubrication system components.

Key words: electric mining excavator, automatic lubrication system, centralized lubrication system, emergency failures, working equipment, maintenance and repair, regulation, reliability.

Введение

Эксплуатация электрических карьерных экскаваторов с объемом ковша 18 и 20 м³ в тяжелых условиях эксплуатации приводит к интенсивному расходованию ресурса узлов [1, 2], реализованных парами трения. В этих условиях эффективность смазывания становится ключевым фактором, определяющим безотказность работы экскаватора. Полученные зависимости показывают, что нерациональная организация технического обслуживания (ТО) систем смазки является одной из основных причин возникновения аварийных отказов и высоких эксплуатационных затрат [3 – 5].

Анализ руководства по эксплуатации подтвердил отсутствие четких методик корректировки режимов смазывания в зависимости от эксплуатационных условий работы: горно-геологических характеристик пород, нагрузок и гранулометрического состава горной массы. Существующая практика определения объемов и интервалов подачи смазки, основанная на эмпирическом опыте и визуальной оценке, не обеспечивает требуемой эффективности процесса смазывания. Установленная прямая корреляция между состоянием автоматической централизованной системы смазки (АЦСС) и интенсивностью аварийных отказов горных машин доказывает, что некорректная работа или отказ элементов АЦСС являются одними из ключевых причин, сокращающих эксплуатационную производительность и увеличивающих общие эксплуатационные затраты [6, 7].

Целью настоящего исследования является повышение безотказности карьерных экскаваторов типа ЭКГ путем разработки и внедрения оптимизированной системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) автоматических централизованных систем смазки. На основе комплексного анализа эксплуатационных данных и выявленных закономерностей предлагается переход от обслуживания по факту отказа к системе планово-предупредительного ТО систем АЦСС, основанной на структурированном регламенте [8, 9]. Данный регламент позволит формализовать полный цикл работ по обслуживанию АЦСС, синхронизировать его с общим графиком ТОиР экскаватора и установить обоснованные нормативы, что позволит минимизировать внеплановые простои, увеличить межремонтные интервалы и снизить совокупную стоимость владения электрическим карьерным экскаватором [10, 11].

Методы и материалы

В основу исследования лег анализ статистических данных эксплуатации парка экскаваторов ЭКГ-20 за период 2024 – 2025 гг. на железорудном месторождении. Была сформирована репрезентативная выборка отказов, отражающая их характер и структуру. Основными причинами простоев, как показал анализ, являются аварийные механические отказы, доля которых составляет 87 – 93 %. Пример статистических данных представлен в табл. 1. Анализ проводился с акцентом на отказы, связанные с элементами седлового подшипника, классифицируемого как ресурсопределяющий узел. На основе статистических данных построены диаграммы соотношения количества отказов и времени простоев по основным группам узлов экскаваторов (рис. 1). На узлы седлового подшипника приходится 21 % по количеству отказов и 31 % по суммарному времени ремонта, что подтверждает их критическую важность.

Акцент при проведении анализа статистических данных был сделан на отказы элементов седлового подшипника, который позиционируется как ресурсопределяющий узел рабочего оборудования карьерного экскаватора. Работоспособное состояние данного узла является критическим фактором, детерминирующим общую работоспособность экскаватора. Для наглядной визуализации вклада различных узлов в общие потери времени и структуру отказов на основе обработанных статистических данных была построена диаграмма (см. рис. 1).

Таблица 1

Статистические данные аварийных простоев (составлено автором)

Типы машины	Тип оборудования	Начало простоя	Конец простоя	Наименование простоя	Длительность простоя, ч	Вид простоя
Экскаватор	ЭКГ-20	01.09.25 1:13:00	01.09.25 1:31:00	Механизм напора	0,3	Аварийный механический
Экскаватор	ЭКГ-20	19.08.25 21:37:00	19.08.25 23:37:00	Стрела, седловой подшипник	2	Аварийный механический
Экскаватор	ЭКГ-20	19.08.25 11:23:00	19.08.25 15:17:00	Двигатель хода	3,9	Аварийный механический
Экскаватор	ЭКГ-20	18.08.25 14:58:00	18.08.25 15:41:00	Стрела, седловой подшипник	0,7	Аварийный механический
Экскаватор	ЭКГ-20	18.08.25 14:00:00	18.08.25 14:58:00	Механизм подъема	0,96	Аварийный механический
Экскаватор	ЭКГ-20	16.08.25 16:00:00	16.08.25 17:40:00	Цепь МОДК	1,66	Аварийный механический
Экскаватор	ЭКГ-20	16.08.25 10:34:00	16.08.25 12:50:00	Пневмосистема	1,26	Аварийный механический

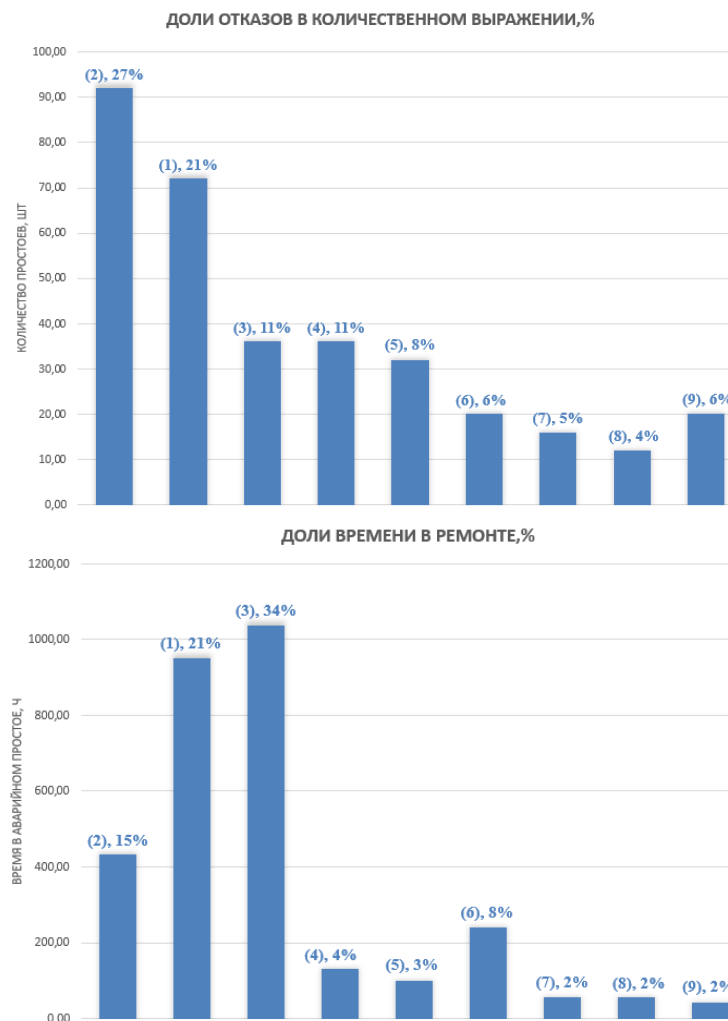


Рис. 1. Доли времени в ремонте и доли времени по отказам машин с объемом ковша 20 м³ за период 2024 – 2025 гг.

(1 – узлы седлового подшипника; 2 – подвеска ковша;
 3 – опорно-поворотное устройство; 4 – замена тросика ОДК; 5 – прочие пары трения;
 6 – механизм подъема; 7 – механизм напора; 8 – пневмосистема; 9 – прочее (составлено автором)

В результате комплексного анализа данных систем мониторинга за 2024–2025 гг., аварийные отказы были классифицированы по ключевым узлам машины. Особое внимание уделялось элементам рабочего оборудования и узлам, сформированным парами трения, в число которых вошли седловой подшипник, подвеска ковша, опорно-поворотное устройство (ОПУ), механизм открывания днища ковша (МОДК), а также опорно-поворотный круг, механизмы подъема и напора, пневмосистема и прочие сопряжения.

Анализ статистических данных показал, что по частоте возникновения инцидентов лидирует узел подвески ковша. Это закономерно, поскольку данный элемент воспринимает прямые ударные нагрузки в момент внедрения ковша в забой. Одним из существенных факторов, усугубляющих износ подвески, является неидеальное состояние забоя после буровзрывных работ, приводящее к локальному превышению допустимых нагрузок и ускоренному расходованию ресурса [12].

В то же время по совокупной продолжительности вынужденных простоев абсолютным лидером является опорно-поворотное устройство. Первое место по этому показателю объясняется исключительной сложностью и высокой трудоемкостью его ремонтно-восстановительных работ [13].

Узлы седлового подшипника демонстрируют сбалансированно высокую значимость по обоим критериям: на их долю приходится 21 % от общего количества отказов и 31 % от суммарного времени ремонта. Данное соотношение в общем ранжировании по отказам подтверждает, что данный узел имеет статус критического ресурсопределяющего элемента, чье состояние напрямую влияет на общую работоспособность экскаватора и его эксплуатационную производительность.

Результаты

Проведено исследование состояния систем АЦСС на горных машинах исходя из дефектных ведомостей и общего времени простоев в часах. Тенденция указывает на то, что состояние АЦСС, как и смазывание узлов карьерного экскаватора, напрямую или косвенно влияет на количество и продолжительность простоев его узлов. С увеличением доли неработоспособных элементов смазочной системы наблюдается статистически значимый рост количества аварийных отказов и времени в простое карьерного экскаватора (рис. 2).

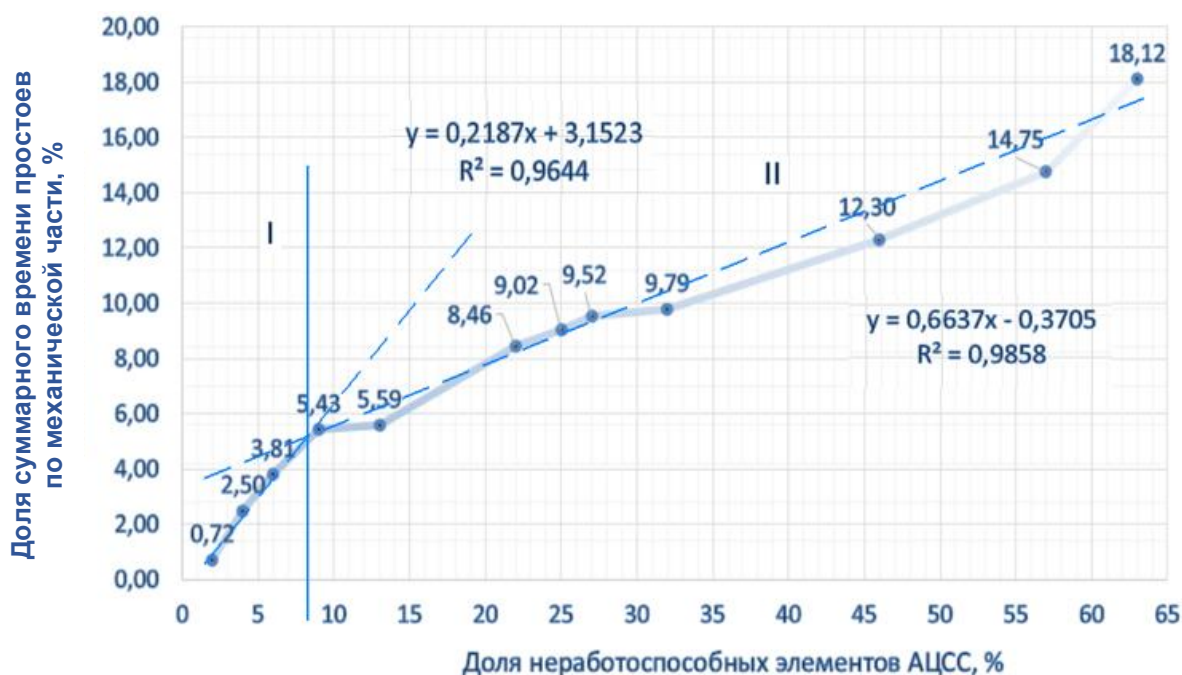


Рис. 2. Изменение доли суммарного времени простоев карьерных экскаваторов от доли неработоспособных элементов АЦСС за период 2024 – 2025 гг. (составлено автором)

Выявленная зависимость является подтверждением тезиса о том, что в тяжелых условиях эксплуатации железорудных месторождений отклонения от требуемого графика проведения ТОиР систем АЦСС или дозировки подачи смазочного материала ведут к увеличению времени аварийных простоев машины по причине увеличения интенсивности расходования ресурса основных ресурсопределяющих узлов рабочего оборудования.

Выявленная прямая корреляционная зависимость между работоспособным состоянием АЦСС и интенсивностью аварийных отказов экскаватора (см. рис. 2) обусловила необходимость перехода от обслуживания по факту отказа к регламентированному подходу. Статистика показывает, что даже незначительная доля (2 %) неработоспособных элементов АЦСС в начальном диапазоне (0 – 10 %) приводит к практически двухкратному росту времени в простоях. Для систематизации и повышения эффективности работ по поддержанию АЦСС в работоспособном состоянии был разработан регламент ТОиР, согласованный регламентом ТОиР электрических карьерных экскаваторов. Данный регламент структурирует все операции, привязывает их к видам ТОиР экскаватора (ЕО, ТО1, ТО2, ППР, КР) и устанавливает обоснованные временные нормативы, позволяя интегрировать обслуживание смазочной системы в общую систему планово-предупредительного обслуживания. Регламент построен по иерархическому принципу и охватывает полный цикл работ, сгруппированных по функциональным блокам системы. Общий осмотр и диагностика включают ежедневный и периодический визуальный контроль целостности магистралей, соединений, состояния сигнальных устройств. ТО блока управления и кабельной сети предусматривает проверку крепления, целостности, чистоты и работоспособности контроллера, реле, индикаторов, кабелей. ТО заправочного комплекса детально регламентирует обслуживание блока подготовки воздуха, заправочного насоса, смазочного фильтра (контроль давления, уровня смазки, герметичности, необходимость промывки). ТО основной системы смазки горной машины является наиболее ответственным блоком, включающим обслуживание основного насоса (DU1), проверку и регулировку дозирующих распределителей, контроль маслопроводной сети на отсутствие течей и повреждений, а также обязательную функциональную проверку подачи смазки к наиболее удаленным точкам. Завершающие и ремонтные работы включают операции по переводу в автоматический режим, а также перечень планово-предупредительных (ППР: замена фильтров, уплотнений) и капитальных (КР: ремонт насосов, замена блока управления, промывка распределителей) работ с установленными нормами времени и составом звена. Ключевыми частями регламента являются дифференциация по видам ТО для оптимального планирования, нормирование труда (нормо-час, состав звена), комплексность покрытия всех компонентов АЦСС и адаптивность как базы для дальнейшей оптимизации на основе данных мониторинга и испытаний [14, 15].

Заключение

На основании проведенного анализа эксплуатационных данных и сопоставления регламентированных и фактических режимов смазывания карьерных электрических экскаваторов сформулированы следующие основные выводы. Установлена и статистически подтверждена прямая корреляционная зависимость между состоянием АЦСС и интенсивностью возникновения аварийных отказов, в частности узлов седлового подшипника. В качестве практического инструмента для устранения выявленных проблем и перехода к планово-предупредительной системе обслуживания разработана и представлена структура дифференцированного регламента ТОиР АЦСС. Регламент формализует полный цикл работ, обеспечивает нормирование и планирование, и предназначен для интеграции в общий график ТОиР экскаватора. Для дальнейшего повышения эффективности необходима разработка окончательных оптимизированных режимов смазывания на основе предлагаемой методологии, включающей натурные наблюдения, стендовые и ускоренные испытания пар трения. Внедрение предложенного подхода, интегрированного в си-

стему планово-предупредительного технического обслуживания с мониторингом состояния в реальном времени позволит минимизировать перерасход смазочных материалов, сократить внеплановые простои, увеличить межремонтные интервалы и снизить совокупные эксплуатационные затраты, подтверждая, что оптимизация работы систем АЦСС и их обслуживания является действенным инструментом повышения эксплуатационной надежности и экономической эффективности карьерных экскаваторов.

Список литературы

1. Валиев Н.Г., Разоренов Ю.И., Голик В.И., Лебзин М.С., 2024. Комбинирование технологий выщелачивания с традиционными технологиями горного передела руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 4, С. 33-43. DOI 10.25018/0236_1493_2024_4_0_33.
2. Кузнецов Д.В., Косолапов А.И., 2022. Методология обоснования горнотранспортного оборудования для рудных карьеров. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, Т. 20, № 3, С. 54-63. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-54-63.
3. Knyazkina V.I., Ivanov S., 2022. Improvement of the system of maintenance and repair of mining machines according to the actual state. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, V. 6-2, P. 223-236. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_223.
4. Kazakov Y.A., Kozachkov G.S., 2025. Technological requirements for the processing of excavated organic raw material. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 12, P. 85-99. DOI:10.25018/0236_1493_2025_123_0_85
5. Агагена Абдельвахаб, Репкина К.С., Михайлов А.В., 2024. Корректировка регламента технического обслуживания карьерного гидравлического экскаватора на руднике Бухадра. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*, № 24, С. 146–151. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24–146–151
6. Колпаков В.О., Шибанов Д.А., Селезнев М.С., Хамидов О.У., 2025. Анализ функционирования систем централизованного смазывания узлов карьерных экскаваторов. *ТГуСМ НуП*, № 34, С. 122. DOI: 10.26160/2658-3305-2025-34-122-128
7. Иванов С.Л., Дудко П.П., Дмитриев Г.Ю., Подхалюзин С.П., 2008. Автоматические централизованные системы смазки. Опыт применения, проблемы и перспективы использования. *Записки Горного института*, Т. 178, С. 22-26.
8. Хамидов О.У., Шибанов Д.А., 2025. Техническое обслуживание и ремонт карьерных экскаваторов по регламенту с учетом фактических условий и режимов их эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12-3, С. 152–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_152.
9. Ковалев М.А., Москвичев В.В., 2024. Надежность карьерных экскаваторов на угольных разрезах Кузбасса. *Целостность и ресурс в экстремальных условиях*, № 1, С. 300–303. DOI: 10.24412/c1-37269–2024–1-300–303
10. Курганов В.М., Грязнов М.В., Колобанов С.В., 2020. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере. *Записки Горного института*, Т. 241, С. 10–21. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.10
11. Грабский А.А., Сергеев В.Ю., Грабская Е.П., 2021. Обоснование выбора стратегии технического обслуживания и ремонтов карьерных экскаваторов. *Уголь*, № 2, С. 14–17. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14–17
12. Сурина Н.В., Мнацаканян В.У., 2019. Система автоматизированного проектирования технологических процессов при ремонте горной техники. *Горный журнал*, № 7, С. 90–95.
13. Шешукова Е.И., Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Недашковская Е.С., 2024. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 1). *Горная промышленность*, № 3, С. 143–148. DOI:10.30686/1609-9192-2024-3-143-148

14. Khalimonenko A.D., Admakina O.N., KufaeV V.G., Shmakova Y.R., 2024. HIGH-SPEED FACE MILLING FEATURES OF DEFORMABLE ALUMINUM ALLOYS. *Tsvetnye Metally*, 6, 81-88. DOI:10.17580/tsm.2024.06.10

15. Kuvshinkin S., Ivanova P., 2021. Impact analysis of bucket capacity and boom length of mining excavators on hoisting mechanism life. *E3S. Web of Conferences*, 326, Article 00032. DOI:10.1051/e3sconf/202132600032

References

1. Valiev N.G., Razorenov Yu.I., Golik V.I., Lebzin M.S., 2024. Kombinirovanie tekhnologii vyshchelachivaniya s traditsionnymi tekhnologiyami gornogo peredela rud [Combination of leaching technologies with traditional mining technologies]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 4, P. 33-43. DOI 10.25018/0236_1493_2024_4_0_33.

2. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I., 2022. Metodologiya obosnovaniya gorno-transportnogo oborudovaniya dlya rudnykh kar'erov [Methodology of substantiation of mining and transportation equipment for ore pits]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, Vol. 20, № 3, P. 54-63. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-54-63.

3. Knyazkina V.I., Ivanov S., 2022. Improvement of the system of maintenance and repair of mining machines according to the actual state. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, V. 6-2, P. 223-236. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_223.

4. Kazakov Y.A., Kozachkov G.S., 2025. Technological requirements for the processing of excavated organic raw material. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 12, P. 85-99. DOI:10.25018/0236_1493_2025_123_0_85

5. Agagena Abdel'vakhab, Repkina K.S., Mikhailov A.V., 2024. Korrektyrovka reglamenta tekhnicheskogo obsluzhivaniya kar'ernogo gidravlicheskogo ekskavatora na rudnike Bukhadra [Correction of the maintenance regulations for a quarry hydraulic excavator at the Bukhadra mine]. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*, № 24, P. 146–151. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24–146–151

6. Kolpakov V.O., Shibanov D.A., Seleznev M.S., Khamidov O.U., 2025. Analiz funktsionirovaniya sistem tsentralizovannogo smazyvaniya uzlov kar'ernykh ekskavatorov [Analysis of the functioning of centralized lubrication systems for mining excavators]. *TGiSM NiP*, № 34, P. 122. DOI: 10.26160/2658-3305-2025-34-122-128

7. Ivanov S.L., Dudko P.P., Dmitriev G.Yu., Podkhalyuzin S.P., 2008. Avtomaticheskie tsentralizovannyye sistemy smazki [Automatic centralized lubrication systems. Application experience, problems and prospects of use]. *Opyt primeneniya, problemy i perspektivy ispol'zovaniya. Zapiski Gornogo instituta*, Vol. 178, P. 22-26.

8. Khamidov O.U., Shibanov D.A., 2025. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont kar'ernykh ekskavatorov po reglamentu s uchetom fakticheskikh uslovii i rezhimov ikh ekspluatatsii [Maintenance and repair of quarry excavators according to the regulations, taking into account the actual conditions and modes of their operation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 12-3, P. 152–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_152.

9. Kovalev M.A., Moskvichev V.V., 2024. Nadezhnost' kar'ernykh ekskavatorov na ugol'nykh razrezakh Kuzbassa [Reliability of quarry excavators at Kuzbass coal mines]. *Tselostnost' i resurs v ekstremal'nykh usloviyakh*, № 1, P. 300–303. DOI: 10.24412/cl-37269–2024–1-300–303

10. Kurganov V.M., Gryaznov M.V., Kolobanov S.V., 2020. Otsenka nadezhnosti funktsionirovaniya ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov v kar'ere [Assessment of the reliability of excavator-automobile complexes in the quarry]. *Zapiski Gornogo instituta*, Vol. 241, P. 10–21. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.10

11. Grabskii A.A., Sergeev V.Yu., Grabskaya E.P., 2021. Obosnovanie vybora strategiitekhnicheskogo obsluzhivaniya i remontov kar'ernykh ekskavatorov [Justification of the choice of a strategy for technical maintenance and repairs of quarry excavators]. *Ugol'*, № 2, P. 14–17. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14–17.

12. Surina N.V., Mnatsakanyan V.U., 2019. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov pri remonte gornoj tekhniki [The system of automated design of technological processes in the repair of mining equipment]. *Gornyi zhurnal*, № 7, P. 90–95.

13. Sheshukova E.I., Shibanov D.A., Ivanov S.L., Nedashkovskaya E.S., 2024. Otsenka nagruzok privodov rabocheho oborudovaniya kar'ernogo ekskavatora (chast' 1) [Assessment of drive loads of working equipment of a quarry excavator (part 1)]. *Gornaya promyshlennost'*, № 3, P. 143–148. DOI:10.30686/1609-9192-2024-3-143-148.

14. Khalimonenko A.D., Admakina O.N., KufaeV V.G., Shmakova Y.R., 2024. HIGH-SPEED FACE MILLING FEATURES OF DEFORMABLE ALUMINUM ALLOYS. *Tsvetnye Metally*, 6, 81-88. DOI:10.17580/tsm.2024.06.10.

15. Kuvshinkin S., Ivanova P., 2021. Impact analysis of bucket capacity and boom length of mining excavators on hoisting mechanism life. *E3S. Web of Conferences*, 326, Article 00032. DOI:10.1051/e3sconf/202132600032.

УДК 621.86:531.8

Афанасьев Анатолий Ильич

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технической механики
Уральский государственный
горный университет,
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru

Зубов Владимир Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры эксплуатации горного оборудо-
вания,
Уральский государственный
горный университет
e-mail: v.zubov.r66@yandex.ru

Симисин Денис Иванович

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой эксплуатации горного
оборудования,
Уральский государственный
горный университет,
e-mail: 7sinov@mail.ru

**АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ
И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
УДАРНЫХ ИЗМЕЛЬЧАЮЩИХ
УСТРОЙСТВ***Аннотация:*

На горно-обогатительном производстве процессы дробления и измельчения являются самыми энергоемкими. Доля затрат энергии на эти процессы составляет до 50 % всех затрат по переработке руд и нерудных материалов. В работе приведен обзор конструкций дезинтеграторов и лабораторных измельчителей. Выполнено сравнение измельчительных машин по производительности, энергопотреблению, показателям готовой продукции (крупности продукта, распределению по классам крупности), удельной энергии измельчения продукта. Показано, что измельчители горных пород, использующие удар, истирание, раздавливание и скол имеют большую эффективность, чем просто удар. При оценке эффективности работы измельчителя следует учитывать крепость горных пород, непосредственно связанную с дробимостью.

Ключевые слова: горная порода, степень дробления, удельный расход энергии, эффективность.

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.047

Afanasyev Anatoliy I.

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Technical Mechanics Department,
Ural State Mining University,
620144 Ekaterinburg,
30 Kuibysheva Str.,
e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru

Zubov Vladimir V.

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Mining Equipment Operation Department,
Ural State Mining University
e-mail: v.zubov.r66@yandex.ru

Simisinov Denis I.

Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor,
Head of the Mining Equipment
Operation Department
Ural State Mining University
e-mail: 7sinov@mail.ru

**ANALYSIS OF DESIGN SOLUTIONS
AND EVALUATION
OF THE EFFECTIVENESS OF IMPACT
SHREDDING DEVICES***Abstract:*

In mining and processing plants, crushing and grinding processes are the most energy-intensive. The share of energy costs for these processes is up to 50% of all costs for processing ores and non-metallic materials. The paper provides an overview of the designs of disintegrators and laboratory shredders. A comparison of shredding machines in terms of productivity, energy consumption, indicators of finished products (product size, distribution by size classes), and specific energy of crushing the product was performed. The study illustrates that rock shredders using impact, abrasion, crushing and chipping have greater efficiency than just impact. When evaluating the efficiency of the shredder, the rock strength, which is directly related to crushing capacity, should be taken into account.

Key words: rock, degree of crushing, specific energy consumption, efficiency.

Введение

Актуальность. Рудоподготовительные процессы в строительной и горной промышленности практически все малоэффективны, так как характеризуются относительно высоким энергопотреблением. В частности, на горно-обогатительном производстве процессы дробления и измельчения являются самыми энергоемкими. Доля затрат энергии

на эти процессы составляет до 50 % всех затрат по переработке руд. Это объясняется необходимостью перед обогащением иметь относительно большую степень измельчения, а также относительно низкой эффективностью применяемого оборудования, КПД которого составляет 2 – 3 %. В связи с этим совершенствование дробильно-размольного оборудования всегда является важной задачей.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе разработки месторождения операции по дроблению и измельчению горной породы играют ключевую роль в подготовке образцов для анализа и последующего обогащения полезных ископаемых [1 – 3].

Анализ проб необходим для контроля добычи, оценки потерь полезных ископаемых, изменения их качества и, как следствие, корректировки цены готовой продукции. Для получения аналитических образцов применяются специализированные дробилки и измельчители, обеспечивающие требуемую гранулометрию материала.

Конструкция оборудования для дробления и измельчения полезных ископаемых зависит от метода разрушения породы, который, в свою очередь, определяется видами деформации материала [4 – 9]. Наиболее распространенными способами разрушения являются раздавливание, скол, истирание, стесненным ударом, свободным ударом. Хрупкие материалы лучше всего разрушать свободным ударом. Этот метод обладает рядом преимуществ:

- высокой степенью измельчения, что может исключить среднюю стадию дробления;
 - высокой производительностью и компактными размерами по сравнению с конусными дробилками;
 - хорошей балансировкой ротора, что снижает уровень вибраций и позволяет использовать легкие фундаменты;
 - простой системой обеспыливания;
 - хорошей ремонтпригодностью;
 - надежной защитой от попадания инородных тел в зону дробления;
 - высокой энергоэффективностью.
- Недостатки ударных дробилок:
- необходимость постоянной подачи материала для поддержания рационального режима работы;
 - низкий ресурс разгонных лопастей и отражательных плит из-за износа, что ограничивает применение этих дробилок для пород с высокой прочностью и абразивностью;
 - значительное выделение пыли, требующее установки циклонов или камер обеспыливания.

Для решения этих проблем применяются следующие технические решения:

- самофутеровка, уменьшающая площадь интенсивного износа;
- использование износостойких материалов для изготовления брони;
- рациональная геометрия лопастей и диска;
- повышение ремонтпригодности брони.

На рис. 1 приведена классификация дробилок, разрушающих горную породу свободным ударом.

Из классификации, приведенной на рис. 1, видно, что в настоящее время существуют центробежные дробилки, различные по кинематике движения куска. Подробное описание основных конструкций машин ударного и ударно-отражательного действия представлено в работах различных авторов [10 – 14]. По общепринятой терминологии измельчительное оборудование представлено дезинтеграторами, дисмембраторами, истирателями и измельчителями. Одним из технических решений, заслуживающих внимания, является центробежная дробилка [15], изображенная на рис. 2.

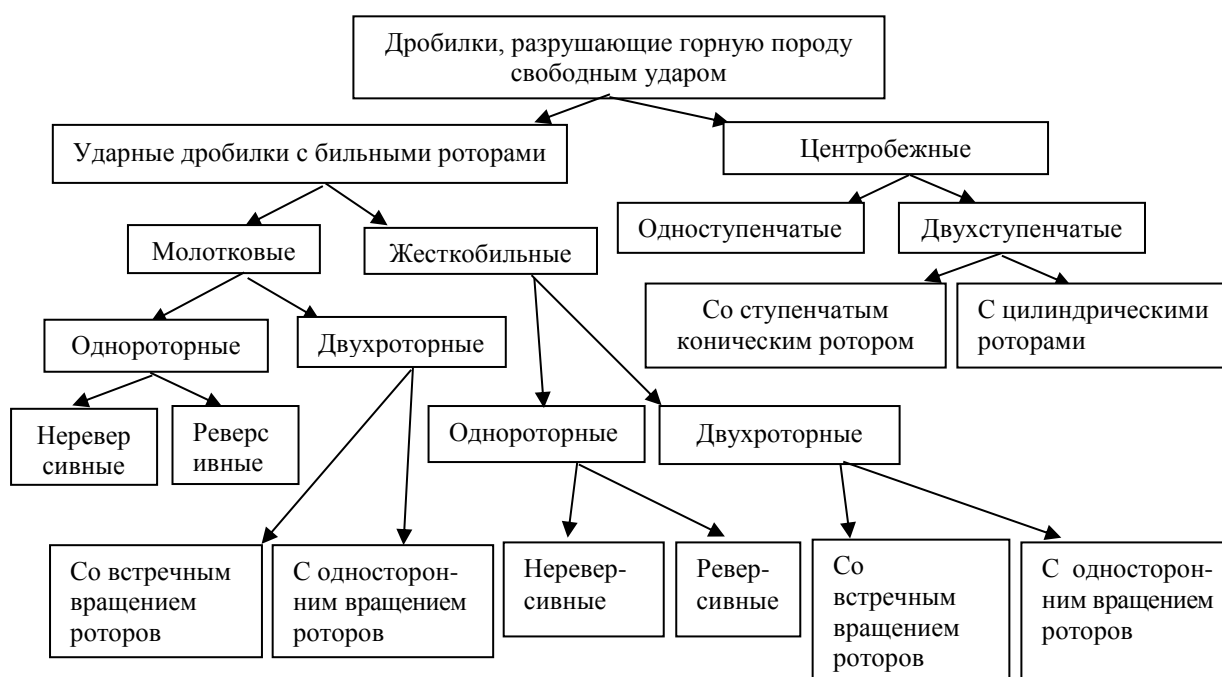


Рис. 1. Классификация дробилок, использующих разрушение свободным ударом

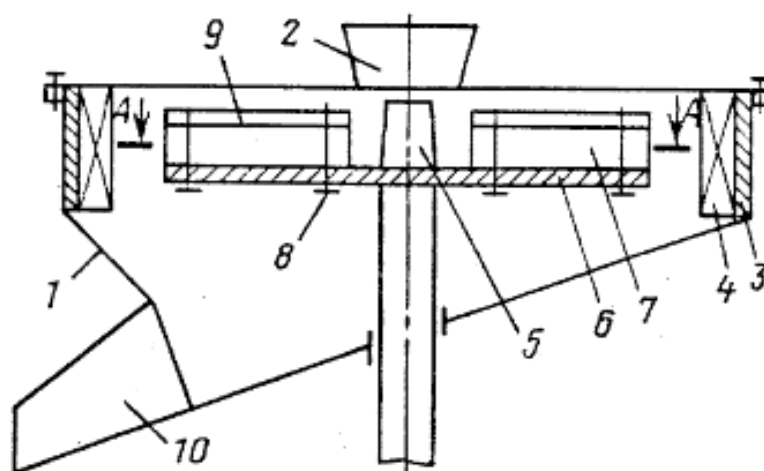


Рис. 2. Центробежная дробилка

Цетробежная дробилка состоит из корпуса 1, загрузочной воронки 2, отбойного кольца 3 с внутренними зубьями 4. Внутри корпуса 1 расположен ведущий вал 5, на котором жестко закреплен диск 6 с разгонными рабочими органами 7, которые закреплены на диске болтами 8 и клиньями 9. Выгрузка дробленого материала осуществляется через желоб 10. Исходный материал поступает в рабочую зону через загрузочную воронку 2 корпуса 1 и попадает на диск 6. Куски материала разгоняются радиально установленными разгонными рабочими органами 7 и выбрасываются на зубья 4 отбойного кольца 3, разрушаются, а затем попадают в течку 10.

Достоинством данной дробилки является простота конструкции, недостатком – относительно низкая эффективность разрушения кусков материала, обусловленная тем, что удар частиц о зубья практически невозможно сделать по нормали к поверхности

окружности, проведенной через вершины зубьев, кроме того, разрушение кусков горной породы происходит за один удар.

Многokратное ударное воздействие на куски горной породы происходит в центробежном измельчителе [16]. Типичным представителем машин этого типа является приведенный на рис. 3 центробежный измельчитель встречного удара.

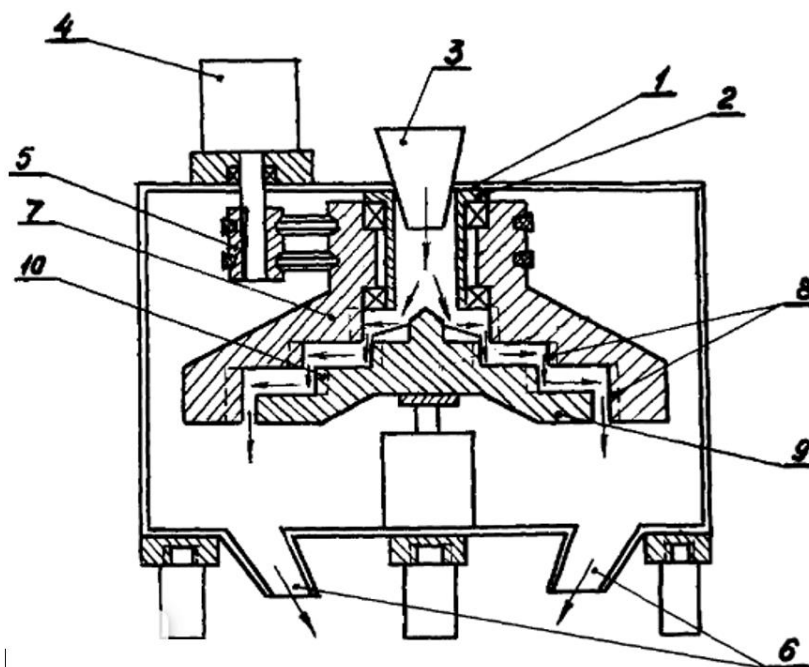


Рис. 3. Центробежный измельчитель встречного удара [16]

Центробежный измельчитель встречного удара состоит из двух (7 и 9) вращающихся в противоположные стороны роторов с приводом верхнего ротора 7 от двигателя 4 через клиноремennую передачу 5. Верхний ротор 7 выполнен ступенчатым, на вертикальной стенке каждой ступени размещены отбойные плиты 8, ориентированные по нормали к направлению вектора сообщения импульса нижнему ротору. Нижний, разгонный ротор 9 представляет собой ступенчатый конус, на каждой ступени которого расположены радиальные ребра 10. Роторы закрыты цилиндрическим разборным корпусом 1. Загрузочной частью является втулка 2 с бункером 3 и нижними разгрузочными 6 отверстиями. Материал загружается в бункер 3 и поступает через загрузочную втулку 2 на верхнюю часть нижнего ротора 9. Куски породы за счет радиальных разгонных ребер 10 разгоняются и затем ударяются об отбойные плиты 8, закрепленные на внутренней стенке верхнего ротора 7. Нераздробленные куски отскакивают от отбойных плит 8 и повторно получают удары. Раздробленные куски попадают на последующую ступень разгонного диска, и процесс дробления повторяется, пока разрушенная порода не удалится через разгрузочные отверстия 6 на днище корпуса 1.

Недостатком данного технического решения является невысокая радиальная составляющая скорости материала, обусловленная относительно небольшой величиной длины разгонных ребер 10, и, соответственно, низкая эффективность измельчения, так как на каждой последующей стадии дробления необходимо нелинейно увеличивать скорость удара, что выполнить в данном устройстве затруднительно.

На рис. 4 приведена конструктивная схема [17] дезинтегратора встречного удара с соосным расположением ударных элементов, в котором происходит многokратное ударное воздействие на куски горной породы.

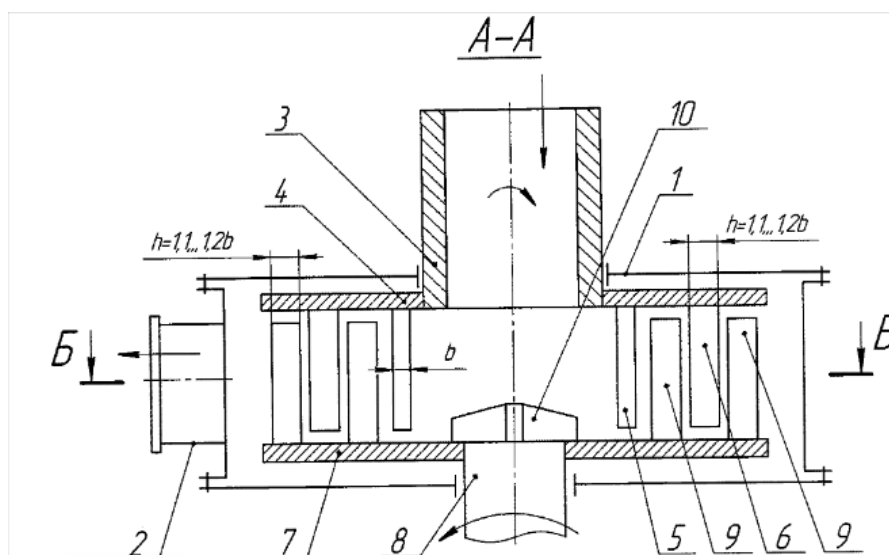


Рис. 4. Дезинтегратор [17]

Дезинтегратор состоит из корпуса 1 с осевым загрузочным 3 и тангенциальным разгрузочным 2 патрубками. В корпусе 1 установлены верхний 4 и нижний 7 диски, на которых concentрично жестко закреплены ударные элементы 5, 6, 9 прямоугольного сечения. Диски 4 и 7 вращаются в разные стороны.

Недостатком данного дезинтегратора является относительно низкая эффективность разрушения кусков материала, вследствие малой вероятности обеспечения центрального удара кусков об ударные элементы. Как правило, удар куска об ударные элементы является косым, что существенно уменьшает степень дробления и, соответственно, эффективность процесса.

Эти выводы подтверждаются результатами эксперимента, полученными при дроблении свободным ударом сульфидной руды крупностью +10 – 60 мм и скорости 40 – 100 м/с. Статистическая зависимость минимально необходимой для разрушения скорости (V) куска перед ударом от его эквивалентного диаметра (d) имеет следующий вид:

$$V = 140d^{-0,37}, \quad (1)$$

где d – эквивалентный диаметр кусков в мм.

Относительно большое корреляционное отношение $R^2 = 0,93$ указывает на наличие существенной связи, минимально необходимой для разрушения скорости куска перед ударом от его размеров.

При проведении экспериментов на дробилке, имеющей такую же схему, что и изображенная на рис. 2 [15], степень дробления кусков сульфидной руды крупностью 50 – 55 мм при однократном воздействии свободным ударом достигала 3,8. Если исходное питание уменьшить до -10 мм, то согласно (1) скорость удара во второй стадии разрушения должна быть в 1,6 раза больше, а в третьей – в 2,5 раза. При этом должен быть обеспечен угол встречи куска с броней, близкий к 90° , что выполнить на существующих дезинтеграторах практически невозможно.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что дробление в центробежных дробилках должно включать не только удар, но и раздавливание и истирание.

Этому в определенной мере отвечает центробежный измельчитель [18]. Предлагаемый центробежный измельчитель позволяет разрушать куски горной породы ударом, раздавливанием, сколом, а также истиранием, что позволяет получить заданную крупность продукта.

Как правило, сравнение измельчительных машин осуществляется по производительности, энергопотреблению, показателям готовой продукции (крупности продукта,

распределению по классам крупности). Кроме этих показателей сравниваются массы машин, сложность конструкции, износостойкость рабочих органов (по данным эксплуатации аналогичных машин), стоимость изготовления и эксплуатации. Наиболее «весомыми» являются первые три показателя. Отношение энергии, затраченной на единицу массы продукции, есть не что иное, как половина квадрата скорости куска, т. е. удельная энергия. Для различных материалов при одинаковом значении удельной энергии степень измельчения может существенно отличаться друг от друга.

В табл. 1 приведены технические характеристики дезинтеграторов и лабораторных измельчителей.

Таблица 1

Технические характеристики дезинтеграторов

№	Тип измельчителя	Производительность, Q , кг/ч	Мощность двиг., N , кВт	Крепость по Протодюконову	Размер кусков исходного питания, мм	Степень измельчения, i	$N*(Q*i)^{-1}$, кВт*ч/т	Область использования	Способ разрушения
1	Ударник-18	3000	18,5	14-15	1,5	7,5	0,82	Промышленные	Удар + истирание
2	ИНТЕХ-ГмБХ	1000	120	10	10	40	3		
3	Горизонт 380185Z	1000	29,5	7	10	66,6	0,44		
4	МД 4*3	600	7,5	9	50	3 - 16	4,1-0,78		
5	ИЛЭ-200-50	30	2,2	14-15	4	40	1,8	Лабораторные	Истирание
6	DESI-11	10-20	4,1	6	1,5	10	20-41		Удар
7	ИД-130	8	1,1	10	1,5	34	4		Истирание
8	ИД-175	15	2,2	10	2,5	25	5,8		
9	ИД-250	30	4	10	2,5	25	5,3		
10	ИЛА-2	30	1,1	9	4	36	1		Удар + истирание
11	ИЛА-3	10	2,2	9	3,5	36	5,1		Истирание
12	ИД-200	30	2,2	10	2,5	25	2,9		

Данные таблицы показывают, что при одинаковой степени измельчения удельная энергия для разных измельчителей может иметь существенное различие. Более объективной оценкой эффективности измельчителя, как это отмечено в работе [19], будет отношение удельной работы к степени измельчения. Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что для рассмотренных измельчителей наиболее эффективными будут такие, которые используют для разрушения удар и истирание. В частности, у измельчителя «Горизонт 380185Z» отношение удельной работы к степени измельчения минимальное, однако он способен дробить материал крепостью до 7 ед. по Протодюконову, а измельчитель «Ударник 18» дробит горные породы крепостью 14 – 15 ед.

Выводы

1. Измельчители горных пород, использующие удар, истирание, раздавливание и скол, имеют большую эффективность, чем просто удар.
2. При оценке эффективности работы измельчителя следует учитывать крепость горных пород, которая непосредственно связана с дробимостью.

Список литературы

1. Альбов М.Н., 1975. *Опробование месторождений полезных ископаемых: учебник для вузов*. Москва: Недра, 221 с.
2. Козин В.З., 2011. *Опробование минерального сырья*. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 316 с.
3. Чечотт Г.О., 1932. *Опробование и испытание полезных ископаемых*. Москва, Ленинград: ГНТГГИ, 114 с.
4. Барон Л.И., Хмельковский И.Е., 1971. *Разрушаемость горных пород свободным ударом*. Москва: Наука, 203 с.
5. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В., 1980. *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых*. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Недра, 415 с.
6. Андреев С.Е. и др., 1959. *Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава*. Москва: «Металлургиздат», 437 с.
7. Андреев С.Е., 1962. О законах дробления. *Горный журнал*, № 4, С. 66-70.
8. Серго Е.Е., 1977. *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых*. Москва: Недра, 285 с.
9. Сиденко П.М., 1977. *Измельчение в химической промышленности: издание 2-е, переработанное*. Москва: Химия, 368 с.
10. Беренс Д., 1966. Новые конструкции машин ударного действия для тонкого и сверхтонкого размола. *Труды Европейского совещания по измельчению*. Москва: Стройиздат, С. 444 – 470.
11. Смирнов Н.М., 1997. *Совершенствование процессов и оборудования для ударного измельчения материалов различной абразивности: дис. ... д-ра техн. наук*. Иваново, 390 с.
12. Олевский В.А., 1963. *Размольное оборудование обогатительных фабрик*. Москва: Государственное научно-техническое издательство по горному делу, 12 с.
13. Левенсон Л.Б., Прейгерзон Б.И., 1940. *Дробление, грохочение полезных ископаемых*. Москва-Ленинград: Гостоптехиздат, 771 с.
14. Борщев В.Я., 2004. *Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учебное пособие*. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 75 с.
15. Авторское свидетельство №1827285, МПК 7 В02С 13/14. *Центробежная дробилка*: опубл. 15.07.93, бюл. 26 / Королев П.П., Онопченко А.Н., Левченко Э.П.
16. Патент № 2150323 Российская Федерация, МПК В02, С 13/20. *Центробежный измельчитель встречного удара*: заявл. 28.10.1997; опубл. 10.06.2000 / Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Филиппов В.Е.; заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера.
17. Патент №2630936 Российская Федерация, МПК 7 В02С 13/22. *Дезинтегратор*: заявл. 13.05.2016; опубл. 14.09.2017, бюл. № 26 / Семикопенко И.А., Горбань Т.Л., Ченцов А.Е., Беляев Д.А., Трофимов И.О.; заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
18. Патент №2819684 Российская Федерация, МПК 7 В02С 13/24. *Центробежный измельчитель*: заявл. 10.08.23; опубл. 20.05.2024, бюл. № 15 / Афанасьев А.И., Зубов В.В., Потапов В.Я., Потапов В.В., Чиркова А.А.; заявитель и патентообладатель Уральский государственный горный университет.
19. Зубов В.В., 2025. Критерий эффективности рабочего процесса роторной центробежной дробилки. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 5, С. 27-35. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-27-35.

References

1. Al'bov M.N., 1975. Oprobovanie mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: uchebnik dlya vuzov [Testing of mineral deposits: a textbook for universities.]. Moscow: Nedra, 221 p.
2. Kozin V.Z., 2011. Oprobovanie mineral'nogo syr'ya [Testing of mineral raw materials]. Ekaterinburg: Izd-vo UGGU, 316 p.
3. Chechott G.O., 1932. Oprobovanie i ispytanie poleznykh iskopaemykh [Testing and proving of minerals]. Moscow, Leningrad: GNTGGI, 114 p.
4. Baron L.I., Khmel'kovskii I.E., 1971. Razrushaemost' gornykh porod svobodnym udarom [Destructibility of rocks by free impact]. Moscow: Nauka, 203 p.
5. Andreev S.E., Perov V.A., Zverevich V.V., 1980. Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh [Crushing, milling and screening of minerals]. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow: Nedra, 415 p.
6. Andreev S.E. i dr., 1959. Zakonomernosti izmel'cheniya i ischisleniya kharakteristik granulometricheskogo sostava [Patterns of grinding and calculation the characteristics of the granulometric composition]. Moscow: "Metallurgizdat", 437 p.
7. Andreev S.E., 1962. O zakonakh drobleniya [About the patterns of crushing]. Gornyi zhurnal, № 4, S. 66-70.
8. Sergo E.E., 1977. Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh [Crushing, milling and screening of minerals]. Moscow: Nedra, 285 p.
9. Sidenko P.M., 1977. Izmel'chenie v khimicheskoi promyshlennosti: izdanie 2-e, pererabotannoe [Grinding in the chemical industry]. Moscow: Khimiya, 368 p.
10. Berens D., 1966. Novye konstruksii mashin udarnogo deistviya dlya tonkogo i sverkh-tonkogo razmola [New designs of impact machines for fine and ultrafine grinding]. Trudy Evropeiskogo soveshchaniya po izmel'cheniyu. Moscow: Stroizdat, P. 444 – 470.
11. Smirnov N.M., 1997. Sovershenstvovanie protsessov i oborudovaniya dlya udarnogo izmel'cheniya materialov razlichnoi abrazivnosti [Improvement of processes and equipment for impact grinding of materials of various abrasiveness]: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Ivanovo, 390 p.
12. Olevskii V.A., 1963. Razmol'noe oborudovanie obogatitel'nykh fabrik [Grinding equipment of processing plants]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo po gornomu delu, 12 p.
13. Levenson L.B., Preigerzon B.I., 1940. Droblenie, grokhochenie poleznykh iskopaemykh [Crushing and screening of minerals]. Moscow-Leningrad: Gostoptekhizdat, 771 p.
14. Borshchev V.Ya., 2004. Oborudovanie dlya izmel'cheniya materialov: drobilki i mel'nitsy: uchebnoe posobie [Equipment for crushing materials: crushers and mills: a textbook]. Tambov: Izd-vo TGTU, 75 p.
15. Avtorskoe svidetel'stvo №1827285, MPK 7 V02S 13/14. Tsentrobezhnaya drobilka [Copyright certificate No. 1827285, IPC 7 B02C 13/14. Centrifugal crusher]: opubl. 15.07.93, byul. 26 / Korolev P.P., Onopchenko A.N., Levchenko E.P.
16. Patent № 2150323 Rossiiskaya Federatsiya, MPK V02, S 13/20. Tsentrobezhnyi izmel'chitel' vstrechnogo udara [Patent No. 2150323 Russian Federation, IPC B02, From 13/20. Centrifugal counterimpact shredder]: zayavl. 28.10.1997; opubl. 10.06.2000 / Matveev A.I., Grigor'ev A.N., Filippov V.E.; zayavitel' i patentoobladatel' Institut gornogo dela Severa.
17. Patent №2630936 Rossiiskaya Federatsiya, MPK 7 V02S 13/22. Dezintegrator [Patent No.2630936 Russian Federation, IPC 7 B02C 13/22. Disintegrator]: zayavl. 13.05.2016; opubl. 14.09.2017, byul. № 26 / Semikopenko I.A., Gorban' T.L, Chentsov A.E., Belyaev D.A., Trofimov I.O.; zayavitel' i patentoobladatel' Belgorod-skii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova.
18. Patent №2819684 Rossiiskaya Federatsiya, MPK 7 V02S 13/24. Tsentrobezhnyi izmel'chitel' [Patent No. 2819684 Russian Federation, IPC 7 B02C 13/24. Centrifugal shredder]: zayavl. 10.08.23; opubl. 20.05.2024, byul. № 15 / Afanas'ev A.I., Zubov V.V., Potapov



V.Ya., Potapov V.V., Chirkova A.A.; zayavitel' i patentoobladatel' Ural'skii gosudarstvennyi gornyi universitet.

19. Zubov V.V., 2025. Kriterii effektivnosti rabocheho protsessa rotornoii tsentrobezhnoi drobilki [Criterion of the efficiency of the rotary centrifugal crusher working process]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal, № 5, P. 27-35. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-27-35.



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

УДК 622.831:550.83

Ломов Михаил Андреевич
младший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51
e-mail: 9241515400@mail.ru

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА МАССИВА
НИКОЛАЕВСКОГО РУДНИКА
ПО ДАННЫМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ***

Аннотация:

В условиях истощения запасов минерального сырья на малых глубинах мировая горнодобывающая промышленность вынуждена переходить к освоению глубокозалегающих месторождений. Главным вызовом для безопасности на глубоких горизонтах становится рост геодинамической активности. Несмотря на технологический прогресс, проблема внезапных динамических проявлений горного давления остается до конца не решенной, требуя перехода от статических оценок к анализу рисков в режиме реального времени.

Целью настоящей работы является повышение безопасности подземной добычи на Николаевском месторождении посредством детальной интерпретации данных автоматизированной системы контроля горного давления «Prognoz-ADS». В апреле 2025 г. была запущена первая очередь наблюдательной сети из 20 датчиков, охватывающая горизонты 348–446 м и зону активного разлома ТН-3. В статье представлены результаты анализа 967 акустических событий, зафиксированных в период с апреля по декабрь 2025 г. Особое внимание уделено исследованию крупного горного удара энергией 71 кДж, произошедшего в блоке ОПБ на пересечении тектонических нарушений. Выполнено сопоставление динамики акустической эмиссии с объемами добычных работ в рудных зонах «Восток-1» и «Харьковская», а также с региональной сейсмической обстановкой в радиусе 500 км, включая акваторию Японского моря.

Установлено, что распределение событий во времени носит волнообразный характер. Статистический анализ показал слабую корреляцию внутришахтных событий с региональной естественной сейсмичностью. При этом выявлена устойчивая связь с техногенными факторами: пики акустической активности коррелируют с изменениями интенсивности горных работ. Подтверждено, что большинство событий

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.057

Lomov Mikhail A.
Junior Researcher,
Institute of Mining FEB RAS,
680000 Khabarovsk, 51 Turgenev Str.
e-mail: 9241515400@mail.ru

**RESULTS ANALYSIS OF SEISMIC
AND ACOUSTIC MONITORING
OF THE NIKOLAEVSKY FIELD MASSIF
ACCORDING TO THE DATA
OF THE AUTOMATED ROCK PRESSURE
CONTROL SYSTEM**

Abstract:

In conditions of depletion of mineral reserves at shallow depths, the global mining industry is forced to move to the development of deep-lying deposits. The main challenge to safety at deep horizons is the growth of geodynamic activity. Despite technological progress, the problem of sudden dynamic manifestations of rock pressure remains unresolved, requiring a transition from static assessments to real-time risk analysis.

The purpose of this work is to increase the safety of underground mining at the Nikolaevsky field through a detailed interpretation of data from the automated rock pressure monitoring system "Prognoz-ADS". In April 2025, the first stage of the observation network of 20 sensors was launched, covering horizons 348–446 m and the active fault zone TN-3. The article presents the results of the analysis of 967 acoustic events recorded in the period from April to December 2025. Special attention is paid to the study of a large rock impact with an energy of 71 kJ that occurred in the OPB block at the intersection of tectonic faults. The dynamics of acoustic emissions were compared with the volumes of mining operations in the Vostok-1 and Kharkiv ore zones, as well as with the regional seismic situation within a radius of 500 km, including the Sea of Japan.

The study has established that the distribution of events in time has a wave-like character. Statistical analysis showed a weak correlation of in-mine events with regional natural seismicity. At the same time, a stable relationship with man-made factors was revealed: peaks of acoustic activity correlate with changes in the intensity of mining operations. It has been confirmed that most of the events are concentrated in zones of geological heterogeneities. The data obtained indicate the effectiveness of the implemented system for detecting potential impact hazards and substantiate the need for further expansion of the geophone network.

* Технологические и аналитические исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ЦИМС» ХФИЦ ДВО РАН, финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2025-621.

концентрируется в зонах геологических неоднородностей. Полученные данные свидетельствуют об эффективности внедренной системы для выявления очагов потенциальной удароопасности и обосновывают необходимость дальнейшего расширения сети геофонов.

Ключевые слова: геомеханика, горное давление, напряженное состояние, горные удары, прогноз, методы, контроль.

Key words: geomechanics, rock pressure, state of stress, rock bursts, prediction, methods, control.

Введение

В условиях истощения запасов минерального сырья на малых глубинах мировая горнодобывающая промышленность вынуждена переходить к освоению глубокозалегающих месторождений. Эта тенденция, продиктованная растущим спросом на ресурсы, неизбежно ведет к усложнению условий ведения горных работ. Специфика разработки на больших глубинах заключается не только в логистических трудностях, но и в качественном изменении физического состояния недр: воздействие высоких температур и колоссальное давление создают предпосылки для термомеханического разрушения пород, что делает опыт поверхностной добычи малоприменимым в новых реалиях [1 – 3].

Главным вызовом для безопасности на глубоких горизонтах становится рост геодинамической активности. Горный массив, представляющий собой не сплошной монолит, а сложную систему блоков и тектонических разломов, реагирует на вмешательство человека непредсказуемым перераспределением напряжений. В зонах повышенной концентрации нагрузок это приводит к опасным явлениям – от деформации выработок до катастрофических горных ударов. Прогнозирование подобных событий осложняется неоднородностью геологической среды, где несущая способность участков варьируется в зависимости от типа трещиноватости и напряженного состояния [2, 4 – 5].

Современная геомеханика рассматривает природу горных ударов как результат критического накопления энергии. Разрушение происходит в момент, когда суммарное воздействие статических сил горного давления и динамических нагрузок превышает предел прочности массива. Наибольшую угрозу представляют зоны вблизи тектонических разломов и выработанных пространств, где геологические нарушения выступают катализаторами мгновенного высвобождения энергии. С учетом внезапности и разрушительной силы таких явлений разработка методов их ранней диагностики является приоритетной задачей индустрии [3, 6 – 7].

Для минимизации рисков на практике применяется широкий спектр инженерных решений, направленных на управление горным давлением. К ним относятся технологии принудительного обрушения кровли для разгрузки массива, использование методов гидроразрыва для создания зон ослабления, а также постоянный мониторинг деформаций с помощью инклинометрии и реперных точек. Однако выбор конкретной методики всегда зависит от уникальных характеристик месторождения, и на данный момент универсальной стратегии, гарантирующей полную безопасность, не существует [8 – 10].

Фундаментальные исследования показывают, что макроскопическому разрушению породы всегда предшествует процесс образования микротрещин. Именно этот факт делает акустический метод мониторинга одним из наиболее перспективных инструментов прогноза. Регистрация сигналов акустической эмиссии (АЭ) позволяет «услышать» процессы деформации внутри массива задолго до визуальных проявлений. Фактически АЭ представляет собой аналог сейсмических волн при землетрясениях, но в микромасштабе, сигнализируя о накоплении упругой энергии и приближении критической точки разрушения [7, 11– 12].

Если ранее прогнозы строились на фиксации уже случившихся предвестников, таких как звуковые щелчки или шелушение, то современные подходы ориентированы на

анализ данных, получаемых в периоды относительного сейсмического затишья. Однако огромные массивы информации, поступающие с датчиков, делают ручную обработку неэффективной. Это стимулировало внедрение интеллектуальных систем анализа. Использование нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения позволяет выявлять скрытые закономерности в микросейсмической активности, учитывая при этом исторические данные о ранее произошедших событиях для повышения точности моделей [13 – 15].

Несмотря на технологический прогресс, проблема внезапных динамических проявлений горного давления остается до конца не решенной, требуя перехода от статических оценок к динамическому анализу рисков в режиме реального времени. Актуальность темы обусловлена необходимостью совершенствования алгоритмов интерпретации геофизических данных для предотвращения аварийных ситуаций. Целью настоящей работы является повышение безопасности подземной добычи посредством детального анализа данных системы акустического мониторинга. Исследование направлено на выявление прогностических признаков, позволяющих заблаговременно предупреждать возникновение горных ударов и иных динамических явлений.

Геомеханический мониторинг на Николаевском месторождении

На Николаевском месторождении в 2025 г. проводилась модернизация наблюдательной сети АСКГД «Prognoz-ADS», по результатам которой в апреле запущена в эксплуатацию ее первая часть, состоящая из 20 датчиков. Приемные преобразователи (акселерометры) установлены на горизонтах -446; -433; -420; -409; -400; -390; -375; -348 м. Первая очередь наблюдательной сети обеспечивает контроль горного массива в районе рудной зоны «Восток-1» и Блока 8 и зоны «Харьковская». В зоне контроля АСКГД находится геодинамически активный разлом ТНЗ, фактически делящий рудничное поле на западную и восточную часть.

По данным геомеханического мониторинга АСКГД «Prognoz-ADS» за период наблюдений апрель – декабрь 2025 г. зафиксировано 967 акустических событий. Помесячное распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий в массиве Николаевского рудника показано на рис. 1, а на рис. 2 – их пространственное расположение в 3D модели месторождения.

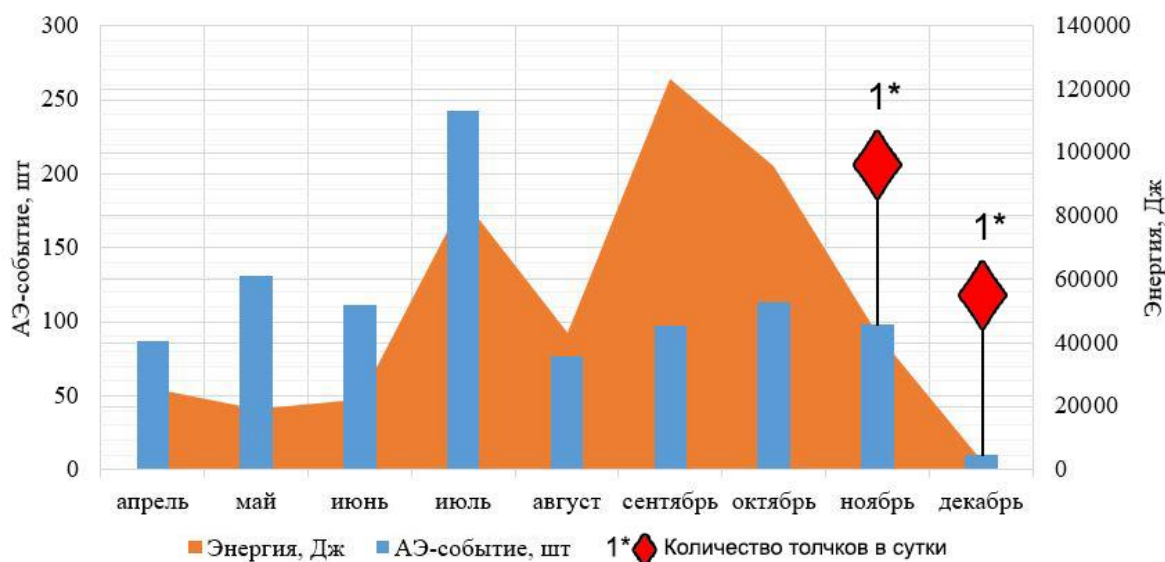


Рис. 1. Помесячное распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий в массиве Николаевского рудника за период с апреля по декабрь 2025 г.

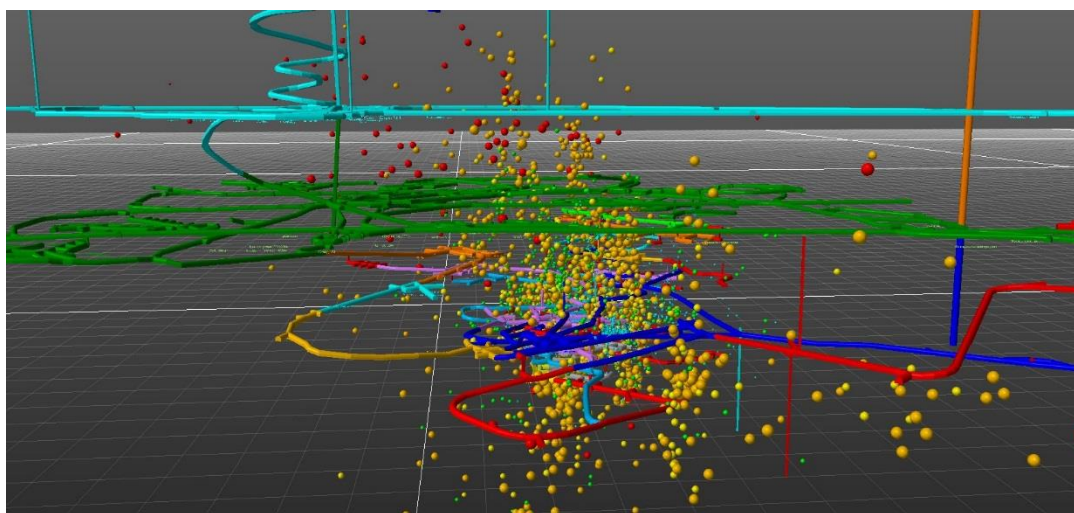


Рис. 2. Результаты сейсмоакустического мониторинга участка массива Николаевского рудника за период с апреля по декабрь 2025 г. в 3D модели

Наиболее крупное сейсмоакустическое событие энергией 71 кДж зарегистрировано в 04:29 10.12.2025 в районе ОПБ на гор. -432 м в месте пересечения блока с рядом тектонических нарушений. Событие сопровождалось резким звуком, сотрясанием массива на гор. -320, -420, -450 м, а также здания поверхностного комплекса. Было выброшено более 10 м^3 породы.

Анализ результатов сейсмоакустического мониторинга

На Николаевском месторождении в 2025 г. работы велись преимущественно на горизонтах -375 м в пределах Блока 8 камеры 2, Харьковской рудной зоны, -433 и 446 м в районах Блоков Северный и ОПБ рудной зоны Восток-1. Объемы добычных работ в 2025 г. в пределах Блока 8 камеры 2 Харьковской рудной зоны составили 61678 т, в пределах блока ОПБ – 45279 т, блока Северный – 24072 т. Распределение количества АЭ-событий, зарегистрированных АСКГД «Prognoz-ADS» по времени, имеет волнообразный характер с пиками в июле и сентябре (рис. 3).

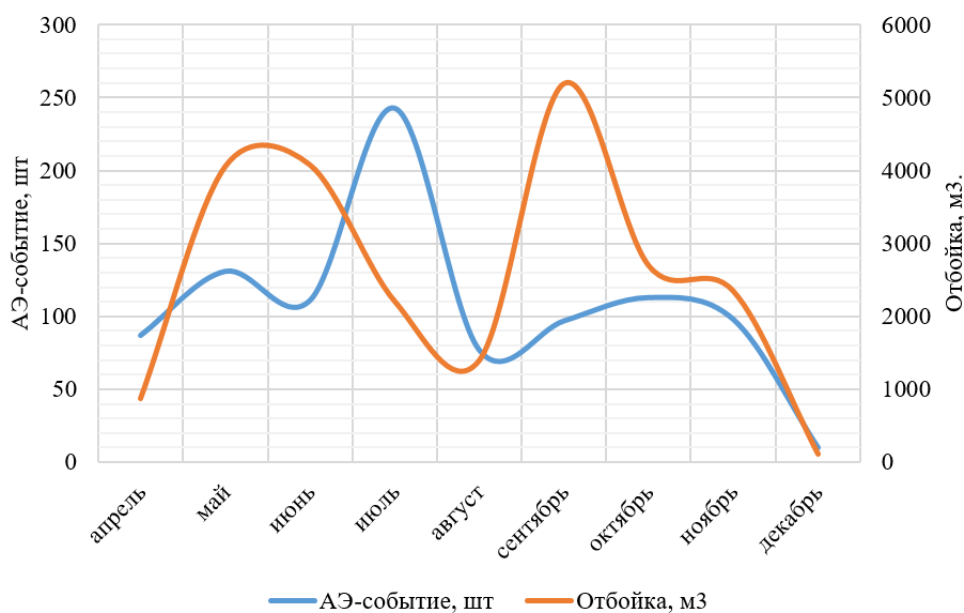


Рис. 3. Помесячное распределение количества АЭ-событий и объема отбитой руды в массиве Николаевского рудника за период с апреля по декабрь 2025 г.

На основе проведенного анализа установлено следующее: проявления АЭ-событий на месторождении имеют волнообразный характер и коррелируют с изменениями в интенсивности и объеме добычных работ с периодом в 1–2 месяца. Наибольшее количество АЭ-событий расположено в зоне пересечения горных выработок с геологическими разломами (рис. 4).

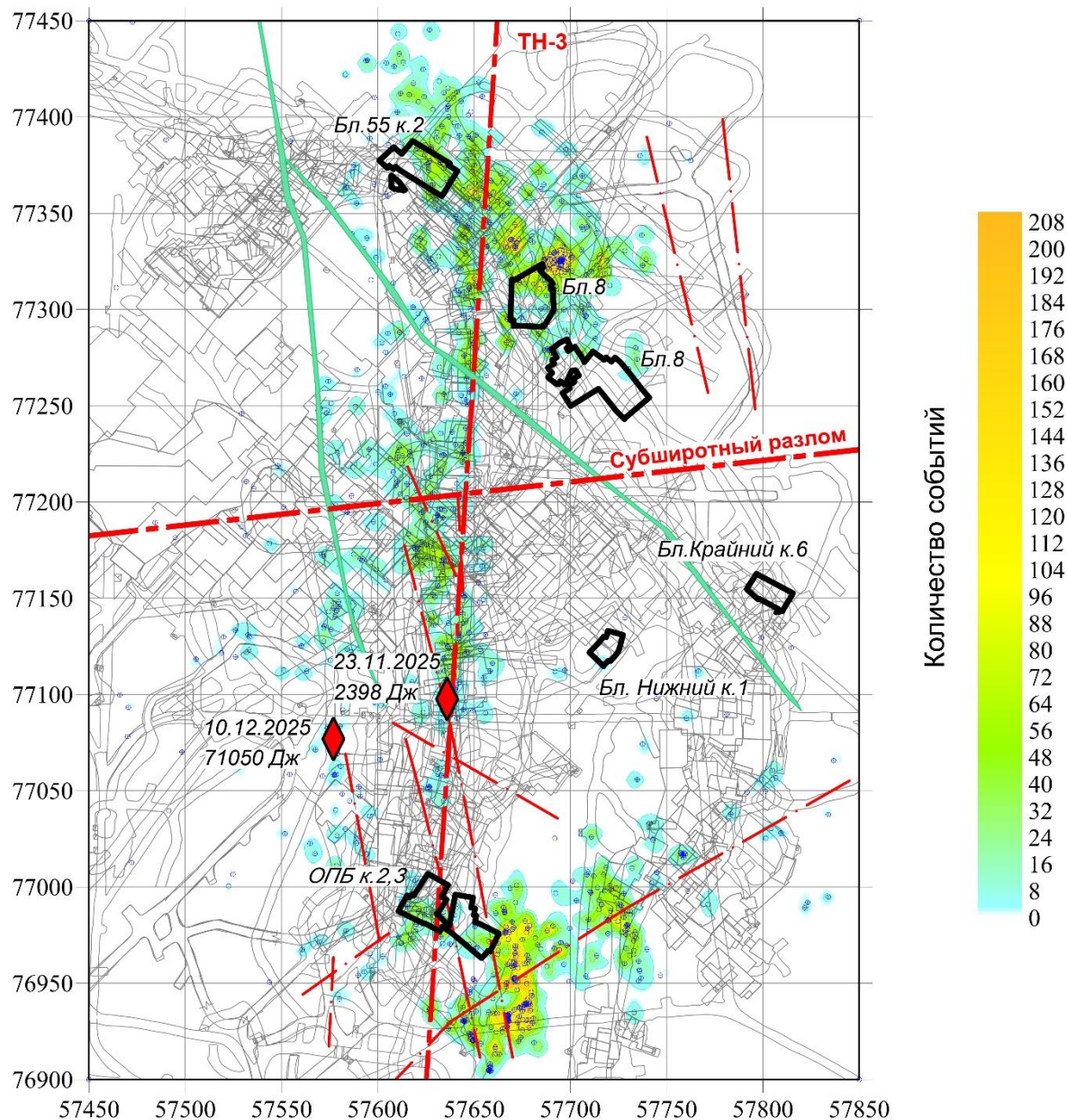


Рис. 4. Карта сейсмоакустической активности, зарегистрированной в массиве Николаевского рудника за период с апреля по декабрь 2025 г. в проекции на совмещенный план горизонтов

Возможными внешними триггерами, способными влиять на напряженно-деформированное состояние горного массива месторождения (в частности повышения количества АЭ-событий), традиционно рассматриваются изменения горнотехнических условий, геодинамической обстановки в регионе. Поэтому был проведен анализ региональной сейсмической обстановки. В выборку землетрясений попали события магнитудой от 3 до 6, зарегистрированные в 2025 г. по данным ФИЦ ЕГС РАН в радиусе 500 километров от г. Дальнегорск (рис. 5).

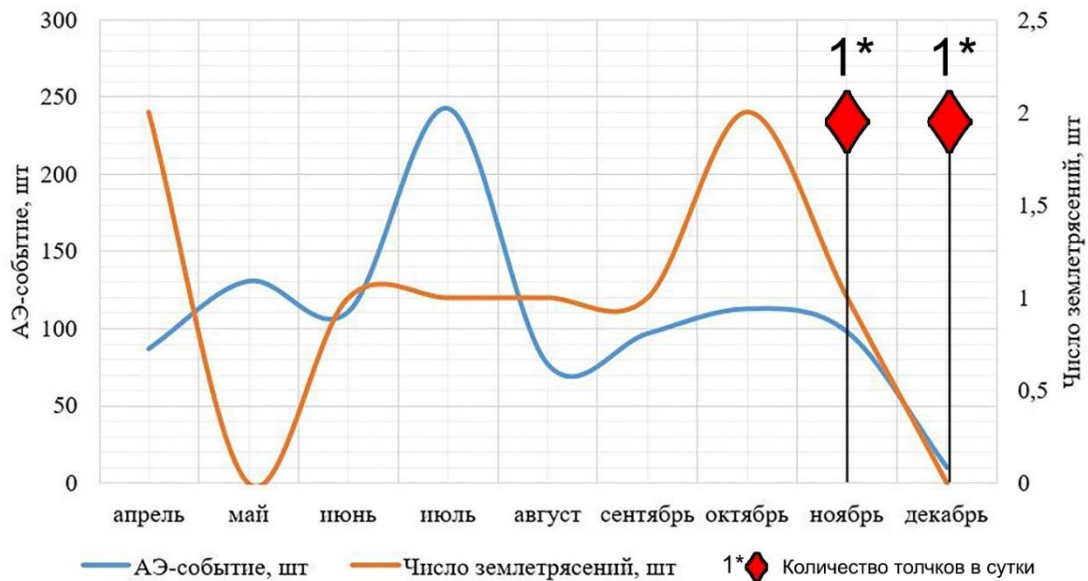


Рис. 5. Помесячное распределение количества АЭ-событий в массиве Николаевского рудника и количества землетрясений

На основе проведенного анализа установлено следующее: региональная сейсмичность так же, как и проявления АЭ-событий на месторождении, имеет волнообразный характер, но слабую корреляцию.

Эпицентр наибольшего количества землетрясений располагается в восточной части Японского (Восточного) моря. На рис. 6 показано их пространственное распределение.

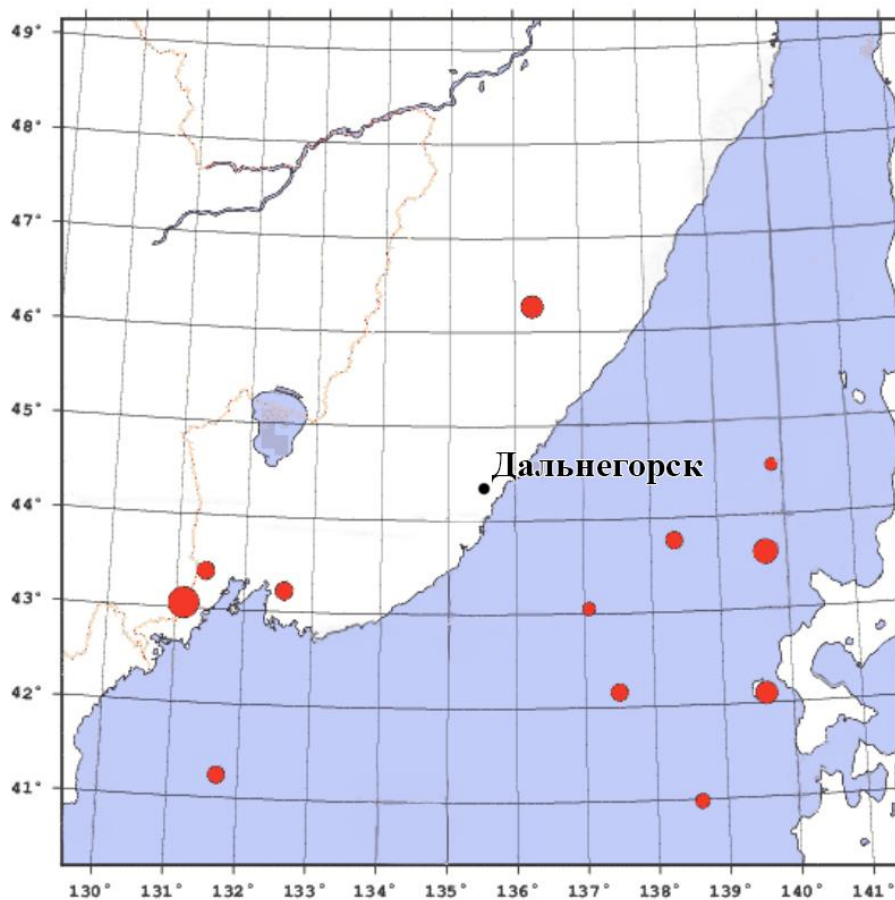


Рис. 6. Пространственное распределение землетрясений, зарегистрированных в 2025 г. по территории юга Дальнего Востока по данным ФИЦ ЕГС РАН

Выводы

На Николаевском месторождении в 2025 г. проводилась модернизация наблюдательной сети АСКГД «Prognoz-ADS», по результатам которой в апреле запущена в эксплуатацию ее первая часть, состоящая из 20 датчиков. В дальнейшем планируется расширение сети геофонов для повышения качества и надежности геомеханического мониторинга.

По результатам экспериментальных исследований удароопасности в условиях месторождения Николаевское получены новые данные о параметрах формирующихся полей напряжений и очагах потенциальной удароопасности в массивах горных пород. Установлено, что проявления АЭ-событий на месторождении имеют волнообразный характер и коррелируют с изменениями в интенсивности и объеме добычных работ с периодом в 1–2 месяца.

Список литературы

1. Zhang J., Bai X., Song Z. et al., 2025. Research Progress and Perspectives on Prevention and Control Technologies for Coal–Rock–Gas Composite Dynamic Disasters: New Types of Induced Classifications, Discriminant Criteria, and Structural Control Schemes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, V. 58, p. 10143–10181. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-04657-8>
2. Ломов М.А., Бурдинская А.А., 2025. Экспериментальные исследования удароопасности на рудниках Дальневосточного региона. *Проблемы недропользования*, № 1(44), С. 53-63. DOI 10.25635/2313-1586.2025.01.053.
3. Кирсанов А.К., Вохмин С.А., Бархатов Д.В., 2025. Оценка рисков при подготовке к разработке месторождения на глубоких горизонтах (на примере шахты «Глубокая» рудника «Скалистый»). *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 1, С. 66-77.
4. Жабко А.В., 2025. Устойчивость трещиновато-блочного горного массива при открытой и подземной разработке месторождений. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 1, С. 39-54. DOI 10.21440/0536-1028-2025-1-39-54.
5. Ломов М.А., 2023. Аварии в горной промышленности в России, произошедшие вследствие динамических проявлений в горном массиве. Контроль горного давления на месторождении «Южное» (Приморский край). *Проблемы недропользования*, № 1(36), С. 85-92. DOI 10.25635/2313-1586.2023.01.085.
6. Liu Wj., Hou Mj., Dong Ss. et al., 2024. Rock burst prevention and control of multifield coupling in longwall working face. *Applied Geophysics*, V. 21, P. 119–132. <https://doi.org/10.1007/s11770-023-1013-3>
7. Lu A., Song D., Li Z. et al., 2025. Numerical Simulation Study on Microseismic Characteristics and Rockburst Hazard Prediction in Deep Mining of Steeply Inclined Coal Seams. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, V. 58, P. 2465–2486. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04288-5>
8. Konurin A.I., Orlov D.V., 2025. Artificial Intelligence in Prediction of Geodynamic Phenomena in Rock Masses. *Journal of Mining Science*, V. 61, P. 507–517. <https://doi.org/10.1134/S1062739125030184>
9. Eneyew D.M., Adamu A.Y., Ejigu A.A. et al., 2026. Stability Assessment and Pillar Design of Underground Drift in Opal-Bearing Rock Masses: A Case Study from Wollo Opal Mining, Ethiopia. *Geotechnical and Geological Engineering*, V. 44, article number 19. <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03309-6>
10. Арно В.В., Миккельсен Е.А., Колесниченко Е.П., 2025. Управление горным давлением при подземной отработке на примере месторождения «Купол». *Вестник Северо-Восточного государственного университета*, № 43, С. 104-108.

11. Sheehan J., Zhai Q., Chuang L.Y. et al., 2025. Applying EQTransformer to laboratory earthquakes: detecting and picking acoustic emissions with machine learning. *Earth Planets Space*, V. 77, P. 116. <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02237-2>
12. Потапчук М.И., Сидляр А.В., Бурдинская А.А., Ломов М.А., 2025. Оценка склонности к горным ударам нижней части месторождения «Красивое». *Горная промышленность*, № S4, С. 116-121. DOI 10.30686/1609-9192-2025-4S-116-121.
13. Zhang S., Mu C., Feng X. et al., 2024. Intelligent Dynamic Warning Method of Rockburst Risk and Level Based on Recurrent Neural Network. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, V. 57, P. 3509–3529. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03715-3>
14. Ломов М.А., Гладырь А.В., 2020. Графическое представление результатов сейсмоакустического мониторинга на Расвумчоррском и Объединенном Кировском рудниках. *Проблемы недropol'zovaniya*, № 2(25), С. 154-159. DOI 10.25635/2313-1586.2020.02.154.
15. Прохоров К.В., Гладырь А.В., Рассказов М.И., 2020. Центр коллективного пользования «Центр исследования минерального сырья». *Горная промышленность*, № 4, С. 120–124. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2020-4-120-124>. - ISSN: 1609-9192.

References

1. Zhang J., Bai X., Song Z. et al., 2025. Research Progress and Perspectives on Prevention and Control Technologies for Coal–Rock–Gas Composite Dynamic Disasters: New Types of Induced Classifications, Discriminant Criteria, and Structural Control Schemes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, V. 58, p. 10143–10181. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-04657-8>
2. Lomov M.A., Burdinskaya A.A., 2025. Eksperimental'nye issledovaniya udaroopasnosti na rudnikakh Dal'nevostochnogo regiona [Experimental studies of the impact hazard in the mines of the Far Eastern region]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1(44), P. 53-63. DOI 10.25635/2313-1586.2025.01.053.
3. Kirsanov A.K., Vokhmin S.A., Barkhatov D.V., 2025. Otsenka riskov pri podgotovke k razrabotke mestorozhdeniya na glubokikh gorizontakh (na primere shakhty "Glubokaya' rudnika "Skalystyi") [Risk assessment in preparation for the development of a deposit on deep horizons (using the example of the mine Glubokaya of the Skalysty pit)]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 1, P. 66-77.
4. Zhabko A.V., 2025. Ustoichivost' treshchinovato-blochnogo gornogo massiva pri otkrytoi i podzemnoi razrabotke mestorozhdenii [Stability of a fractured-block mountain range during open and underground mining]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 1, P. 39-54. DOI 10.21440/0536-1028-2025-1-39-54.
5. Lomov M.A., 2023. Avarii v gornoi promyshlennosti v Rossii, proizoshedshie vsledstvie dinamicheskikh proyavlenii v gornom massive. Kontrol' gornogo davleniya na mestorozhdenii "Yuzhnoe" (Primorskii krai) [Accidents in the mining industry of Russia, which occurred as a result of dynamic manifestations in the mountain range. Monitoring of rock pressure at the Yuzhnoye field (Primorsky Krai)]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1(36), P. 85-92. DOI 10.25635/2313-1586.2023.01.085.
6. Liu Wj., Hou Mj., Dong Ss. et al., 2024. Rock burst prevention and control of multifold coupling in longwall working face. *Applied Geophysics*, V. 21, P. 119–132. <https://doi.org/10.1007/s11770-023-1013-3>
7. Lu A., Song D., Li Z. et al., 2025. Numerical Simulation Study on Microseismic Characteristics and Rockburst Hazard Prediction in Deep Mining of Steeply Inclined Coal Seams. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, V. 58, P. 2465–2486. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04288-5>
8. Konurin A.I., Orlov D.V., 2025. Artificial Intelligence in Prediction of Geodynamic Phenomena in Rock Masses. *Journal of Mining Science*, V. 61, P. 507–517. <https://doi.org/10.1134/S1062739125030184>

9. Eneyew D.M., Adamu A.Y., Ejigu A.A. et al., 2026. Stability Assessment and Pillar Design of Underground Drift in Opal-Bearing Rock Masses: A Case Study from Wollo Opal Mining, Ethiopia. *Geotechnical and Geological Engineering*, V. 44, article number 19. <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03309-6>
10. Arno V.V., Mikkel'sen E.A., Kolesnichenko E.P., 2025. Upravlenie gornym davleniem pri podzemnoi otrabotke na primere mestorozhdeniya "Kupol" [Rock pressure management during underground mining using the example of the Kupol field]. *Vestnik Severo-Vostochnogo gosudarstvennogo universiteta*, № 43, P. 104-108.
11. Sheehan J., Zhai Q., Chuang L.Y. et al., 2025. Applying EQTransformer to laboratory earthquakes: detecting and picking acoustic emissions with machine learning. *Earth Planets Space*, V. 77, P. 116. <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02237-2>
12. Potapchuk M.I., Sidlyar A.V., Burdinskaya A.A., Lomov M.A., 2025. Otsenka sklonnosti k gornym udaram nizhei chasti mestorozhdeniya "Krasivoe" [Assessment of the propensity to rock impacts in the lower part of the Krasivoye deposit]. *Gornaya promyshlennost'*, № S4, P. 116-121. DOI 10.30686/1609-9192-2025-4S-116-121.
13. Zhang S., Mu C., Feng X. et al., 2024. Intelligent Dynamic Warning Method of Rockburst Risk and Level Based on Recurrent Neural Network. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, V. 57, P. 3509–3529. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03715-3>
14. Lomov M.A., Gladyr' A.V., 2020. Graficheskoe predstavlenie rezul'tatov seismoakusticheskogo monitoringa na Rasvumchorrskom i Ob"edinennom Kirovskom rudnikakh [Graphical representation of the results of seismic and acoustic monitoring at the Rasvumchorrsky and United Kirovsky mines]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2(25), P. 154-159. DOI 10.25635/2313-1586.2020.02.154.
15. Prokhorov K.V., Gladyr' A.V., Rasskazov M.I., 2020. Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya "Tsentr issledovaniya mineral'nogo syr'ya" [Collective use center "Center for research of mineral raw materials"]. *Gornaya promyshlennost'*, № 4, P. 120–124. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2020-4-120-124>. - ISSN: 1609-9192.

УДК 550.837

Шиндин Алексей Владимирович

кандидат физико-математических наук,
директор,
научно-исследовательский радиофизический
институт ННГУ им. Лобачевского,
603950, г. Нижний Новгород,
ул. Большая Печерская, д. 25/12а
e-mail: shindin@rf.unn.ru

Котик Дмитрий Самойлович,

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
отдел распространения радиоволн и
дистанционного зондирования,
научно-исследовательский радиофизический
институт ННГУ им. Лобачевского
e-mail: dmitry.kotik@nirfi.unn.ru

**НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ НЕДР
КОНТРОЛИРУЕМЫМ ИОНОСФЕРНЫМ
ИСТОЧНИКОМ НИЗКОЧАСТОТНЫХ
РАДИОВОЛН***

Аннотация:

Разработана новая технология электромагнитного зондирования недр, основанная на эффекте генерации низкочастотных электромагнитных волн ионосферными токами под воздействием на ионосферу модулированного радиоизлучения наземного передатчика. Предложено устройство для формирования ионосферного источника, базовый модуль которого состоит из двух средневолновых передатчиков, настраиваемых на частоту гирорезонанса электронов в ионосфере на высоте порядка 80 – 90 км и соответствующей широте, на которой предстоит использование устройства. Каждый передатчик нагружается на свою антенну типа вертикальный диполь. Расстояние между антеннами составляет четверть длины волны на рабочей частоте. Использование гирочастоты и вертикальных диполей позволяет сформировать протяженный на несколько сотен километров ионосферный источник. Устройство, составленное из двух базовых модулей, содержит четыре диполя, расположенных по углам квадрата со стороной, равной четверти длины СВ волны. Такая конфигурация антенной системы позволяет получить увеличение мощности СВ излучения за счет двух дополнительных усилителей и увеличение коэффициента усиления антенной системы за счет двух дополнительных излучателей, что предоставляет возможность управления сектором излучения СВ волн по сторонам света. Теоретические расчеты и наши эксперименты с гирочастотными установками показывают, что при мощности предлагаемого устройства в 100 кВт (два усилителя по 50 кВт или 4 по 25 кВт) диаметр обла-

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.066

Shindin Aleksey V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Director, Radiophysical Research Institute,
State University of Nizhny Novgorod
n.a. Lobachevsky,
603950 Nizhny Novgorod,
25/12a Bolshaya Pecherskaya Str.
e-mail: shindin@rf.unn.ru

Kotik Dmitry S.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Leading Researcher,
Department of Radio Wave Propagation and
Remote Sensing,
Radiophysical Research Institute,
State University of Nizhny Novgorod
n.a. Lobachevsky,
e-mail: dmitry.kotik@nirfi.unn.ru

**NEW TECHNOLOGY
OF ELECTROMAGNETIC SUBSURFACE
SOUNDING BY A CONTROLLED
IONOSPHERIC SOURCE
OF LOW-FREQUENCY RADIO WAVES**

Abstract:

A new technology of electromagnetic probing of the subsurface has been developed, based on the effect of generation of low-frequency electromagnetic waves by ionospheric currents under the influence of modulated radio emission of a ground transmitter on the ionosphere. A device for forming an ionospheric source is proposed, the basic module of which consists of two medium-wave transmitters tuned to the frequency of electron gyro resonance in the ionosphere at an altitude of about 80-90 km and the corresponding latitude at which the device is to be used. Each transmitter is loaded onto its own vertical dipole antenna. The distance between the antennas is a quarter of the wavelength at the operating frequency. The use of gyro frequency and vertical dipoles allows forming an ionospheric source extended for several hundred kilometers. The device, composed of two basic modules, contains four dipoles located at the corners of a square with a side equal to a quarter of the length of a medium-frequency wave. This configuration of the antenna system allows to increase the power of the microwave radiation due to two additional amplifiers and to increase the gain of the antenna system due to two additional emitters, which provides the ability to control the sector of microwave radiation by the cardinal directions. Theoretical calculations and our experiments with gyro-frequency installations show that with the power of the proposed device of 100 kW (two amplifiers of 50 kW or 4 of 25 kW), the diameter of the area in which geological exploration is supposed to be carried out can reach up to 1000 km in middle latitudes. In high latitudes, the size of such an area can be 2-3 times larger due to the presence of intense current jets dependent on magnetic activity.

* Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания Минобрнауки России № FSWR-2026-0011.

сти, в которой предполагается проведение геолого-разведки, может достигать до 1000 км в средних широтах. В высоких широтах размеры такой области могут быть в 2 – 3 раза больше благодаря наличию интенсивных токовых струй, зависящих от магнитной активности.

Ключевые слова: ионосфера, геологическая разведка, нефть, газ, руда, электромагнитное зондирование, низкочастотные радиоволны, гирочастота, мобильная установка.

Key words: ionosphere, geological exploration, oil, gas, ore, electromagnetic sounding, low-frequency radio waves, gyro-frequency, mobile installation.

Введение

Из мировой практики применения геофизических методов разведки полезных ископаемых известно о широком распространении метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ), в котором источником служат естественные низкочастотные шумы магнитосферы и грозовые помехи и аудио-частотное магнитотеллурическое зондирование (АМТЗ) с контролируемым источником (передатчик в ОНЧ/СНЧ диапазонах). Геофизические методы поиска полезных ископаемых предваряют исследования недр дорогостоящим методом бурения разведочных скважин ввиду их сравнительной дешевизны. В данной статье рассматривается новая технология электромагнитного зондирования недр с использованием ионосферного источника, формируемого в нижней ионосфере мощным модулированным радиоизлучением наземного средневолнового передатчика радиоволн [1 – 3].

Современное состояние метода электромагнитного зондирования

Метод электромагнитного зондирования в сочетании с традиционным методом МТЗ получил широкое распространение в мире. В данном методе измеряется магнитными и электрическими датчиками поверхностный импеданс в зависимости от частоты (см., например, Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ). URL: <https://sibgeotech.ru/mtz> (дата обращения 01.03.2026)),

Расширенный на диапазон до нескольких килогерц (диапазон аудио частот) с применением передатчиков в этом же диапазоне получил название метод АМТЗ с контролируемым источником. В английской литературе данный метод получил название «Controlled-source audio-frequency magneto telluric (CSAMT) sounding». В совокупности с известными дополняющими методами (геохимия, гравиметрия) решается ряд практически важных задач [4, 5].

Мировой лидер в применении на суше АМТЗ – канадская компания Phoenix Geophysics – лет 20 назад использовала мощные низкочастотные генераторы с выходной мощностью 160 кВт, весом порядка 5 т и с дизельным энергопитанием, которые не смогли обеспечить значительных размеров исследуемых территорий. В настоящее время они перешли к малогабаритному оборудованию весом 10 – 15 кг и с выходной мощностью 1 – 2 кВт. Малогабаритные генераторы имеют очень ограниченный радиус действия и требуют частого перебазирования. Мощные генераторы требуют больших дорогостоящих антенн (см. World Leader in Magnetotellurics. URL: <https://www.phoenixgeophysics.com/> (дата обращения 01.03.2026)). Большие трудности возникают также при интерпретации данных, что связано с положением источника на поверхности земли и в результате широким пространственным спектром волновых векторов э/м поля в Земле.

Аналогичные методы развиваются и в геофизической разведке на морском шельфе. В этом направлении лидером является лаборатория ЭМ исследований Института океанографии им. Скриппса, США (см. Scripps Institution of Oceanography, Marine EM Laboratory Research. URL: <https://marineemlab.ucsd.edu/research.html> (дата обращения 01.03.2026)). Пример результатов, выполненных данной лабораторией зондирований на шельфе, изложен в работе [6].

Существует также методика, при которой передатчик устанавливается непосредственно на судне, антенной служит вертикальный диполь, опускаемый с борта судна до дна. Этот метод разработан в университете Торонто (Канада) и подробно описан в работе [7].

В данной работе мы не рассматриваем вопросы обработки данных э/м зондирования (решение обратной задачи) полагая, что существующие математические методы [8, 9] могут быть легко редуцированы к новому источнику. При этом отметим, что ионосферный источник возбуждает главную волну волновода Земля – ионосфера, у которой под поверхностью существует только вертикально распространяющаяся компонента. Напомним, что в случае размещения антенн непосредственно на поверхности в Земле будет присутствовать полный пространственный спектр волн.

Ионосферный источник низкочастотных радиоволн

Ниже будет рассмотрена новая технология электромагнитного зондирования недр с использованием ионосферного источника, формируемого в нижней ионосфере мощным модулированным радиоизлучением наземного передатчика в СВ/КВ диапазонах радиоволн, авторское свидетельство на данный способ было получено еще в 1983 г. [1, 2].

Нами в 2024 г. получен патент RU 2822002 на установку для формирования ионосферного источника, которая может быть выполнена в мобильном варианте [3]. Аналогичный изложенному в [2] способу, позднее, в 1998 г., был представлен способ в патенте US 5777476 [10], в котором в качестве устройства для выполнения геологического картографирования недр использовался КВ-передатчик с излучением в зенит для нагрева ионосферных электронов, вызывающий модуляцию струи электрического тока на высотах E-слоя, переизлучающего из области нагрева электронов низкочастотное радиоизлучение (НЧР) на частоте модуляции КВ передатчика в волновод Земля – ионосфера (ВЗИ).

Согласно американскому патенту, мощный КВ-передатчик с частотой в диапазоне 2 – 15 МГц располагается под авроральной или экваториальной электроструей. В качестве такого устройства в соответствии с изобретением предлагается использовать стенд на Аляске HAARP (см. HAARP. URL: https://www.academia.edu/30673299/HAARP_Research_and_Applications, (дата обращения 20.12.2025)).

Датчики могут располагаться на поверхности земли, морском дне, на низколетящих самолетах или под землей. Измеряются как амплитуда, так и фаза низкочастотных полей. Электромагнитное поле, генерируемое взаимодействием модулированного КВ излучения с ионосферной плазмой, эквивалентно полю, генерируемому горизонтальным магнитным диполем (ГМД), расположенным в области взаимодействия.

Экспериментальные исследования показали, что размещение устройства в авроральной ионосфере не позволило получить интенсивный низкочастотный сигнал, наблюдаемый в глобальных масштабах. Прежде всего, это связано с большой вариабельностью положения и интенсивности авроральной электроструи. Ее положение зависит от магнитной активности и может находиться на удалении 500 – 600 км к северу от стенда при слабой магнитной активности и настолько же к югу – при высокой. Антенная решетка стенда содержит 180 диполей и обладает высокой направленностью. Вследствие этого область ионосферы, подвергаемая нагреву, имеет размеры порядка 10 – 30 км в диаметре (в зависимости от несущей частоты).

Существуют еще две установки для воздействия на ионосферу (среднеширотная – стенд СУРА в РФ и высокоширотная – EISCAT Heater в Норвегии, Тромсё). Эти установки также обладают большими антенными решетками со 144 диполями каждая. Все указанные установки являются капитальными сооружениями и, естественно, не могут быть приближены к районам, нуждающимся в геологических изысканиях. Строить новые подобного рода установки в таких районах также не представляется экономически обоснованным ввиду их высокой стоимости. Отметим, что на момент ввода в строй уста-

новка HAARP (по состоянию на 2008 г.) понесла около 250 млн долл. строительных, эксплуатационных и налоговых затрат, а само строительство длилось более 10 лет (см. HAARP. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/HAARP> (дата обращения 01.03.2026)). Более того, отсутствует такого рода установка на экваторе. Ввиду данных обстоятельств, в США возникла идея разработки мобильной установки морского базирования, которая могла бы быть использована для исследований на любой широте, в том числе и на магнитном экваторе. Однако этот проект исходил из той же парадигмы, что и стационарные стенды. Предложена достаточно большая антенная решетка (24 диполя на двух океанских баржах), диапазон воздействия 5 – 10 МГц, и передатчик мощностью 800 кВт. Основные результаты разработки этого проекта опубликованы в статьях [11, 12].

Механизм генерации НЧР в ионосфере был впервые предложен в работе [13]. Там же было указано на резонансное усиление эффекта при использовании нагрева на частоте, близкой к гирочастоте электронов в нижней ионосфере. Отметим, что циклотронная частота электронов в нижней ионосфере зависит от широты и изменяется от 0,8 МГц на экваторе до 1,5 МГц в высоких широтах.

Экспериментальная проверка данного утверждения была проведена на подмосковном нагревном стенде НИИ Радио (передатчик мощностью $P=80$ кВт работал на синфазную антенную решетку с коэффициентом усиления $G=100$ на частоте $f=1,35$ МГц) и на стенде СУРА с использованием гирочастотного нагревного передатчика с синфазной решеткой из восьми скрещенных диполей ($G=35$, $P=150$ кВт, полоса рабочих частот 1,2 – 1,4 МГц) [14, 15].

Большой массив данных позволил провести детальное сравнение эффективности генерации на частотах 4,8 и 1,4 МГц, результат совместной обработки представлен в работе [15]. В результате было установлено, что эффективность использования нагрева на гирочастоте выше в среднем в 4 раза в дневное время, до 8 раз – в утренние часы и безальтернативна ночью. Экспериментальное подтверждение приема сигнала от гирочастотного передатчика стенда СУРА на удалении в 500 км к югу представлено в [16].

В эксперименте с мощной широкоэвещательной радиостанцией «Коминтерн», работавшей на частоте 236 кГц, была доказана возможность эффективного использования антенны в виде вертикального диполя для ионосферной генерации НЧ радиоволн [17].

Автором патента US 5053783 [18] указывается, что генерируемая мощность низкочастотного сигнала пропорциональна квадрату эффективного дипольного момента источника:

$$M = I_{\Omega} L, \quad (1)$$

где I_{Ω} – полный модулированный ток в области взаимодействия – источник низкочастотного поля в ВЗИ; L – линейный размер модулированной области.

Эффективный момент горизонтального тока M можно оценить интегрированием по высоте плотности тока \vec{j}_{Ω}^{ct} на частоте модуляции Ω .

$$\vec{j}_{\Omega}^{cm} = \Delta \hat{\sigma}_{\Omega} * \vec{E}_0 = \frac{d\hat{\sigma}_{\Omega}}{dv_e} \Delta v_e * \vec{E}_0, \quad (2)$$

где $\Delta \sigma_{\Omega}$ – амплитуда модуляции проводимости; Δv_e – амплитуда модуляции частоты столкновений электронов с молекулами; E_0 – стороннее электрическое поле является динамо полем $\vec{E}_0 = \vec{E}_D = -\frac{m_e v_e}{e} \vec{U}_{0m}$ на средних широтах (\vec{U}_{0m} – скорость нейтрального

ветра), для высоких широт или экватора это поле поляризации токовой струи $\vec{E}_0 = \vec{E}_P$. Эффективный момент M оценим, интегрируя (2) с использованием теоремы о среднем:

$$\vec{M} = L_{\parallel} \vec{I}_{\Omega} = L_{\parallel} * \int_S \vec{j}_{\Omega}^{cm} dx dz \approx \left\langle \frac{d\hat{\sigma}_{\Omega}}{dv_e} \Delta v_e \right\rangle L_{\parallel} L_{\perp} \Delta z * \vec{E}_0, \quad (3)$$

где Δz – протяженность эффективного излучающего слоя по высоте: L_{\parallel}, L_{\perp} – продольная и поперечная протяженность ионосферного источника. Выражение (3) практически совпадает с выражением (2) в описании к патенту US 5053783 [18].

В патенте US 5053783 [18] предлагается увеличить размеры области нагрева ионосферы путем быстрого сканирования узким лучом (полуширина луча $7,5^{\circ}$ в конусе с полушириной размером в $35,5^{\circ}$ [18]), поскольку эффективный момент ионосферного источника пропорционален размерам этой области. Сканирование производится в течение первого полупериода низкочастотного сигнала и во время второго полупериода передатчики установки выключаются для остывания ионосферы (так называемая пространственная модуляция). Такая манипуляция позволяет увеличить диаметр области источника с 20 до 120 км на высоте 80 км. Отметим, что подобное управление лучом – достаточно сложная техническая задача.

С другой стороны, устройство, предлагаемое согласно нашему изобретению (рис. 1), использует антенную систему из двух вертикальных диполей 6 и 7, разнесенных на расстояние d (назовем данное устройство Базовый модуль – БМ). Диаграмма направленности такой системы представлена на рис. 2, где показано, что эта диаграмма определяет размеры области ионосферы 15, нагреваемой радиоизлучением наземной установки на циклотронной частоте. На высоте E-слоя (70 – 100 км) протекают постоянные токи 14. Излучение такой системы направлено вдоль линии, соединяющей диполи (ось X) в секторе шириной 179° (при сдвиге фазы диполя 6 на -90° относительно диполя 7). В случае сдвига фазы диполя 6 на $+90^{\circ}$ направление излучения сместится на противоположное.

Расчеты показывают, что продольный размер источника на высоте 80 км по уровню 0,5 составляет $L_{\parallel}=300$ км, а поперечный – $L_{\perp}=300$ км. Площадь ионосферного источника составит 120 000 кв. км. Это почти на порядок превышает площадь, образуемую сканированием лучом коротковолновой нагревной установки в пространстве по патенту US 5053783 [18] и равную ~ 14400 кв. км. Отметим, что такой результат достигается намного более простой антенной системой по сравнению с антенной решеткой стенда HAAR.

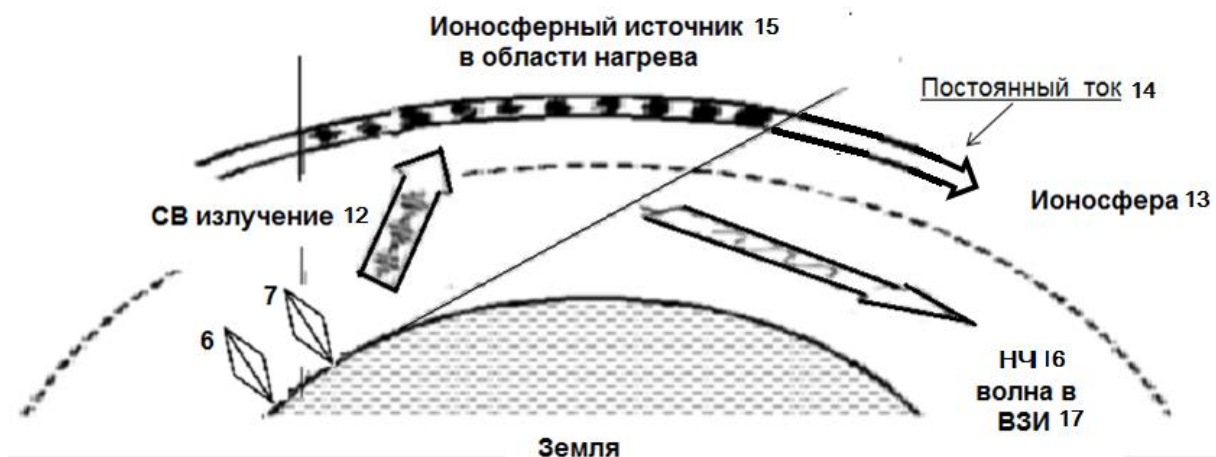


Рис. 1. Концепция устройства для формирования ионосферного источника НЧР согласно изобретению

Рассмотрим устройство, составленное из двух базовых модулей. Четыре диполя в этом случае располагаются по углам квадрата, сторона которого также равна четверти длины СВ радиоволны. В данном устройстве оба основных модуля объединены общим блоком управления и общей станцией контроля характеристик НЧР. Такая конфигурация антенной системы позволяет получить увеличение мощности СВ излучения за счет двух

дополнительных передатчиков и увеличение коэффициента усиления антенной системы за счет двух дополнительных излучателей. Дополнительные возможности предоставляет управление сектором излучения СВ волн для переключения направления по сторонам света.

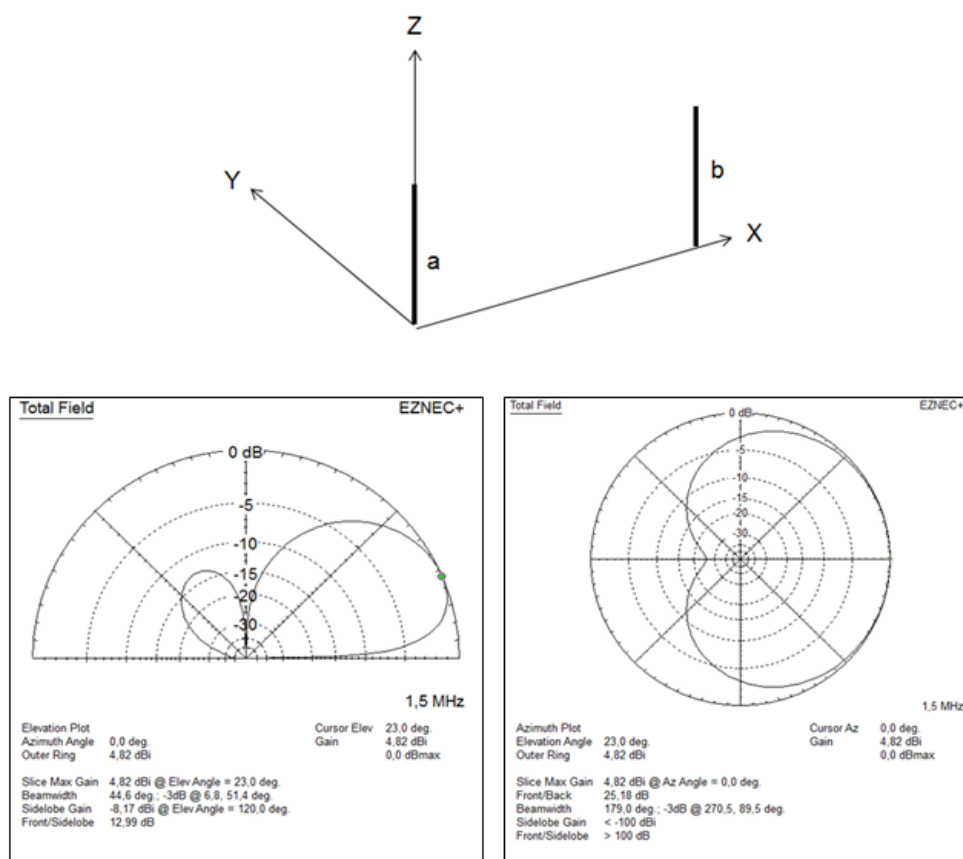


Рис. 2. Диаграммные свойства устройства БМ для формирования ионосферного источника НЧР (вверху схематическое изображение антенной системы модуля)

Теоретические расчеты и наши эксперименты с гирочастотными установками показывают, что при мощности предлагаемого устройства в 100 кВт (два усилителя по 50 кВт или 4 по 25 кВт) диаметр области, в которой предполагается проведение геолого-разведки, может достигать до 1000 км от пункта размещения устройства в средних широтах. В высоких широтах размеры такой области могут быть в 2 – 3 раза больше благодаря наличию интенсивных токовых струй, зависящих от магнитной активности.

Отдельно отметим современные возможности построения мощных передатчиков в СВ диапазоне. Революция в элементной базе силовой электроники привела к созданию множества мощных твердотельных малогабаритных устройств в различных областях народного хозяйства, от двигателей электромобилей до радиопередатчиков [19]. Так, например, передатчик производства канадской компании NAUTEL мощностью 25 кВт в диапазоне 531 – 1605 кГц имеет размеры 184 см × 96 см × 120 см при весе 567 кг. Такие массогабаритные параметры позволяют установить четыре таких передатчика в морской контейнер и перевозить автомобильным тягачом. Вариант такого мобильного размещения передатчика мощностью 100 кВт предлагает хорватская компания RIZ, выпускающая аналогичные канадским передатчиками (см. Mobile MW & SW Broadcasting Programme, URL: <https://riz.hr/en/transmitters/mobile-program.html> (дата обращения 01.03.2026)). Антенна в виде телескопической мачты, высотой в несколько десятков мет-

ров, размещается на прицепе. Таким образом, становится очевидной возможность создания мобильного варианта устройства, предлагаемого согласно данному изобретению в автомобильном, железнодорожном или морском варианте. Предлагаемая новая технология основана на создании нового устройства для наземных и шельфовых геофизических исследований: разведки нефти и газа, полезных рудных ископаемых, геотермальных ресурсов, подземных вод, карстов, инженерно-экологических и археологических изысканий, общей геолого-томографической съемки. Техническим результатом является увеличение размеров ионосферного источника при одновременном уменьшении массогабаритных параметров устройства, уменьшение стоимости расходов на его сооружение и эксплуатацию, возможность создания мобильных вариантов устройства, увеличении размеров района, в котором возможно проведение геологической разведки с использованием одной мобильной установки для воздействия на ионосферу (МУВИ).

Ниже представлено несколько концептуальных рисунков, поясняющих суть метода (рис. 3 – 5).

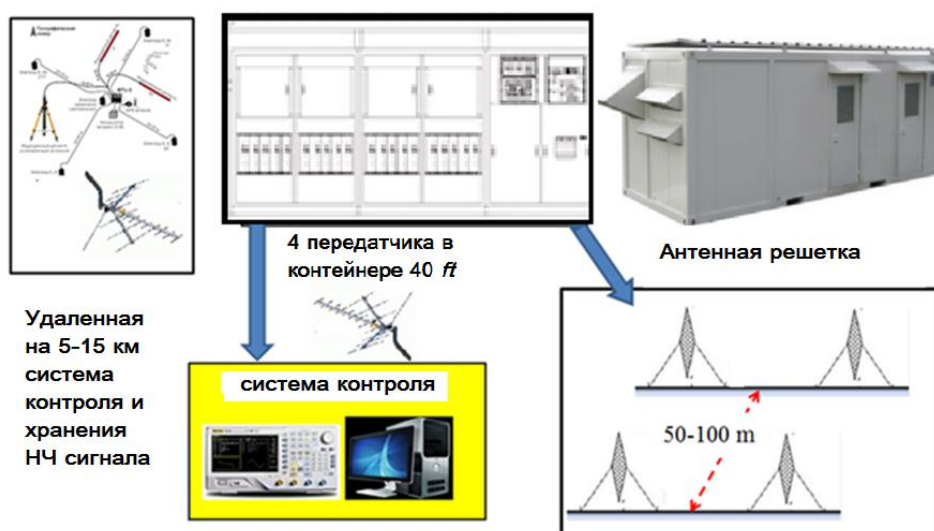


Рис. 3. Блок-схема мобильной установки для воздействия на ионосферу (МУВИ), формирующей ионосферный источник

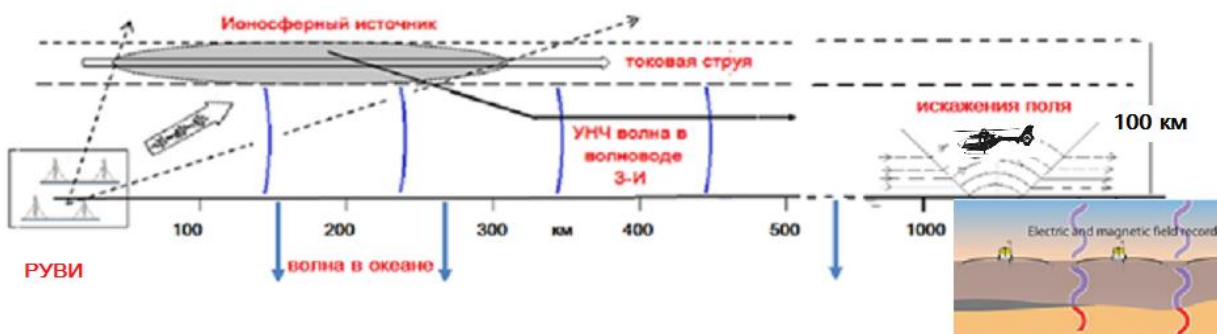


Рис. 4. Концепция применения МУВИ для геологоразведки. В высоких широтах струя может перемещаться по широте на +/- 1000 км относительно берегового МУВИ

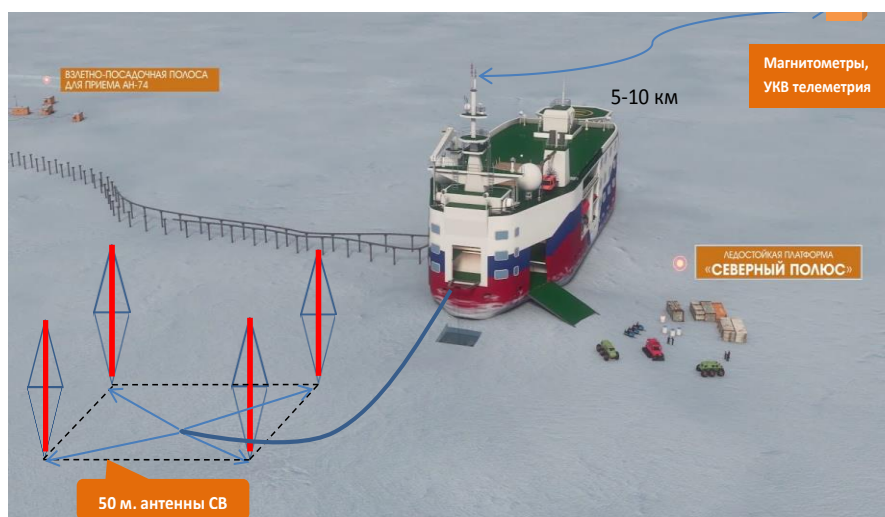


Рис. 5. Использование дрейфующей платформы СП для электромагнитных зондирований в Арктике. Как передающие антенны, так и датчики устанавливаются непосредственно на лед

Заключение

Ионосферный метод генерации низкочастотных радиоволн, предлагаемый в данном проекте, обладает рядом несомненных преимуществ.

1. Габариты установки типа МУВИ будут иметь размеры в сотни раз меньше, чем традиционные СНЧ/СДВ радиостанции и в сотни раз дешевле в производстве. Это позволит создавать мобильные и быстро разворачиваемые (в течение нескольких дней) установки или размещать их на судовых или железнодорожных платформах, рассредоточивать их на расстояниях нескольких сотен километров или агрегировать несколько МУВИ в одну более мощную установку, резервировать их на складах.

2. Частота ионосферного источника может мгновенно перестраиваться в широком диапазоне частот от долей герца до нескольких килогерц, а в некоторых режимах работы и до десятков килогерц, что особенно полезно для применения зондирований в различных задачах на море и на суше.

3. Дополнительную возможность предоставляет использование МУВИ на рабочих частотах в СВ диапазоне в режиме поверхностной волны для резервной связи (навигации) с судами, проходящими по северному морскому пути, в частности при потере КВ или спутниковой связи во время магнитных бурь и других технических катаклизмах.

4. Еще одна дополнительная возможность – использование установки для радиовещания на северных территориях или в регионах вне работы установки для проводки судов на СМП или Э/М зондирований.

5. При создании морского носителя МУВИ представляется целесообразным создание специализированной организации (государственной или коммерческой), предлагающей услуги по геофизической разведке на шельфах в первую очередь стран БРИКС.

6. Согласно нашим оценкам три береговых установки в Арктике и по одной на Камчатке, Сахалине, в Крыму и Калининградской области обеспечат разведку на шельфе и в прибрежных районах РФ на долгие годы, а использование возможностей по пп. 3 и 4 обеспечит их круглогодичную эксплуатацию при разумном решении межведомственных вопросов.

В настоящее время на полигоне НИРФИ «Васильсурск» создается стационарный действующий образец базового модуля устройства на базе существующего передатчика «Шторм», мощность двух моноблоков 2x75 кВт. Разработан проект антенной системы,

названной нами «Большой Квадрат», стоимость которой оценена в 12 млн руб. Ориентировочно строительство антенн возможно в течение 2026 – 2027 гг. при наличии финансирования. Собственно целью данной работы является привлечение внимания МТЗ общества и потенциальных заказчиков к новой технологии электромагнитного зондирования.

Список литературы

1. Авторское свидетельство № 987552 СССР. *Способ геоэлектрической разведки* № 3323145/18-25; заявл. 24.07.81; опубл. 07.01.83, бюл. 1 / Котик, Д.С., Поляков С.В., Рапопорт В.О., заявитель: Горьковский научно-исследовательский институт.
2. Бабиченко, А.М., Котик Д.С., Клайн Б.И., и др., 1984. Электромагнитное зондирование Земли с использованием эффекта Гетманцева. *Докл. АН СССР*, 276:4 (1984), С. 840–842.
3. Патент № 2822002 Российская Федерация, МПК НО 4В 7/22. *Устройство для формирования ионосферного источника низкочастотных радиоволн*; заявл. 06.12.2023; опубл. 28.06.2024, бюл. № 19 / Котик Д.С., Рябов А.В., Яшнов В.А., патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского». [Электронный охраняемый документ 2822008.eod.pdf](#)
4. Qiu N., Pan C., Zhang Y. et al. 2024. Sensitivity of Marine Controllable Source Electromagnetic Soundings for Identifying Plume Migration in Offshore CO₂ Storage. *J. Marine. Sci. Appl.*, 23, P. 656–673. <https://doi.org/10.1007/s11804-024-00601-4>
5. Tveit S., Mannseth T., Park J., Sauvin G., Agersborg R., 2020. Combining CSEM or gravity inversion with seismic AVO inversion, with application to monitoring of large-scale CO₂ injection. *Computational Geosciences* 24: 1201–1220. <https://doi.org/10.1007/s10596-020-09934-9>
6. Constable S. and Cox C., 1996. Marine controlled source electromagnetic sounding – II: The PEGASUS experiment. *Journal of Geophysical Research*, V. 97, P. 5519-5530, DOI:10.1029/95JB03738.
7. Edwards N., 2005. Marine controlled source electromagnetic: principles, methodologies, future commercial applications. *Surveys in Geophysics*, V. 26, P. 675–700, DOI 10.1007/s10712-005-1830-3.
8. O Castillo-Reyes et al., 2025. Inverse geo-electromagnetic modeling: a systematic review and bibliometric assessment, *Front. Earth Sci., Sec. Solid Earth Geophysics*, V. 13. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1645896>.
9. Kim Y.H., Park Y.G., 2023. A review of CO₂ plume dispersion modeling for application to offshore carbon capture and storage. *Journal of Marine Science and engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/jmse12010038>
10. Papadopoulos K., 1998. *Ground global tomography (GGT) using modulation of the ionospheric electrojets*, US 5777476, Date of Patent: Jul. 7.
11. Esser B. et al, 2017. The Path to a Transportable Ionospheric Heater—Tuning Methods. *IEEE Transactions on Plasma Science*. V. 45, (6).
12. Brian L. Beaudoin et al., 2018. Experimental studies on radio frequency sources for ionospheric heaters, *Physics of Plasmas*, 25, 103116); <https://doi.org/10.1063/1.5052183>.
13. Котик Д.С., Трахтенгерц В.Ю., 1975. О механизме возбуждения комбинационных частот в ионосферной плазме. *Письма в ЖЭТФ*, Т. 21, № 2, С. 114.
14. Котик, Д.С., Петров С.М., Поляков С.В и др., 1984. Экспериментальные исследования сигналов комбинационных частот при резонансном гирочастотном нагреве ионосферы. *Труды XIV Всесоюзной конференции по распространению радиоволн*. Москва: Наука.
15. Беляев П.П., Котик Д.С., Митяков С.Н. и др., 1987. Генерация сигналов комбинационных частот в ионосфере. *Известия вузов. Радиофизика*, т. 30, № 2, С. 248-268.

16. Kotik D., 1994. ELF/VLF emissions generated in the ionosphere by heating facilities – A new tool for ionospheric and magnetospheric research, *Radiophysics and Quantum Electronics*, Vol. 37, (6).

17. Котик Д.С. и др., 1986. Генерация ОНЧ сигналов в области авроральной электроструи среднеширотным длинноволновым передатчиком. *Низкочастотное излучение в магнитосфере земли*. Москва: ИЗМИРАН, С. 71-75.

18. Papadopoulos K., 1990. High power low frequency communications by ionospheric modification, Patent US5053783A.

19. Макушин М., 2019. Тенденции развития силовой электроники. *Электроника*, № 8. DOI: 10.22184/1992-4178.2019.189.8.50

References

1. Avtorskoe svidetel'stvo № 987552 SSSR. Spособ geoelektricheskoi razvedki № 3323145/18-25 [Copyright certificate No. 987552 of the USSR. Geoelectric exploration method No. 3323145/18-25]; zayavl. 24.07.81; opubl. 07.01.83, byul. 1 / Kotik, D.S., Polyakov S.V., Rapoport V.O., zayavitel': Gor'kovskii nauchno-issledovatel'skii institut.

2. Babichenko, A.M., Kotik D.S., Klain B.I., i dr., 1984. Elektromagnitnoe zondirovanie Zemli s ispol'zovaniem effekta Getmantseva . [Electro-magnetic sensing of the Earth using the Getmantsev effect]. Dokl. AN SSSR, 276:4 (1984), P. 840–842.

3. Patent № 2822002 Rossiiskaya Federatsiya, MPK NO 4V 7/22. Ustroistvo dlya formirovaniya ionosfernogo istochnika nizkochastotnykh radiovoln [Patent No. 2822002 Russian Federation, IPC NO 4B 7/22. A device for forming an ionospheric source of low-frequency radio waves]; zayavl. 06.12.2023; opubl. 28.06.2024, byul. № 19 / Kotik D.S., Ryabov A.V., Yashnov V.A., patentoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Natsional'nyi issledovatel'skii Nizhegorodskii gosudarstvennyi universitet im. N.I. Lobachevskogo". Elektronnyi okhrannyi dokument 2822008.eod.pdf.

4. Qiu N., Pan C., Zhang Y. et al. 2024. Sensitivity of Marine Controllable Source Electromagnetic Soundings for Identifying Plume Migration in Offshore CO₂ Storage. *J. Marine. Sci. Appl.*, 23, P. 656–673. <https://doi.org/10.1007/s11804-024-00601-4>

5. Tveit S., Mannseth T., Park J., Sauvin G., Agersborg R., 2020. Combining CSEM or gravity inversion with seismic AVO inversion, with application to monitoring of large-scale CO₂ injection. *Computational Geosciences* 24: 1201–1220. <https://doi.org/10.1007/s10596-020-09934-9>

6. Constable S. and Cox C., 1996. Marine controlled source electromagnetic sounding – II: The PEGASUS experiment. *Journal of Geophysical Research*, V. 97, P. 5519-5530, DOI:10.1029/95JB03738.

7. Edwards N., 2005. Marine controlled source electromagnetic: principles, methodologies, future commercial applications. *Surveys in Geophysics*, V. 26, P. 675–700, DOI 10.1007/s10712-005-1830-3.

8. O Castillo-Reyes et al., 2025. Inverse geo-electromagnetic modeling: a systematic review and bibliometric assessment, *Front. Earth Sci., Sec. Solid Earth Geophysics*, V. 13. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1645896>.

9. Kim Y.H., Park Y.G., 2023. A review of CO₂ plume dispersion modeling for application to offshore carbon capture and storage. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/jmse12010038>

10. Papadopoulos K., 1998. *Ground global tomography (GGT) using modulation of the ionospheric electrojets*, US 5777476, Date of Patent: Jul. 7.

11. Esser B. et al, 2017. The Path to a Transportable Ionospheric Heater—Tuning Methods. *IEEE Transactions on Plasma Science*. V. 45, (6).

12. Brian L. Beaudoin et al., 2018. Experimental studies on radio frequency sources for ionospheric heaters, *Physics of Plasmas*, 25, 103116); <https://doi.org/10.1063/1.5052183>.

13. Kotik D.S., Trakhtengerts V.Yu., 1975. O mekhanizme возбужdeniya kombinatsionnykh chastot v ionosfernoi plazme [On the mechanism of excitation of combination frequencies in ionospheric plasma]. *Pis'ma v ZhETF*, V. 21, № 2, P. 114.
14. Kotik, D.S., Petrov S.M., Polyakov S.V i dr., 1984. Eksperimental'nye issledovaniya signalov kombinatsionnykh chastot pri rezonansnom girochastotnom nagreve ionosfery [Experimental studies of combination frequency signals during resonant gyro-frequency heating of the ionosphere]. *Trudy XIV Vsesoyuznoi konferentsii po rasprostraneniyu radiovoln*. Moscow: Nauka.
15. Belyaev P.P., Kotik D.S., Mityakov S.N. i dr., 1987. Generatsiya signalov kombinatsionnykh chastot v ionosfere [Generation of combination frequency signals in the ionosphere]. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, Vol. 30, № 2, P. 248-268.
16. Kotik D., 1994. ELF/VLF emissions generated in the ionosphere by heating facilities – A new tool for ionospheric and magnetospheric research, *Radiophysics and Quantum Electronics*, Vol. 37, (6).
17. Kotik D.S. i dr., 1986. Generatsiya ONCh signalov v oblasti avroral'noi elektrostrui sredneshirotnym dlinnovolnovym peredatchikom [Generation of very low-frequencies signals in the field of an auroral electric jet a medium-latitude long-wave transmitter]. *Nizkochastotnoe iz-luchenie v magnitosfere zemli*. Moscow: IZMIRAN, P. 71-75.
18. Papadopoulos K., 1990. High power low frequency communications by ionospheric modification, Patent US5053783A.
19. Makushin M., 2019. Tendentsii razvitiya silovoi elektroniki [Trends in the development of power electronics]. *Elektronika*, № 8. DOI: 10.22184/1992-4178.2019.189.8.50.

УДК 681.178.1

Леуткин Александр Аркадьевич

инженер,
отдел горной и строительной геотехники,
Институт горного дела СО РАН,
630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54
e-mail: leutkin-alexandr@rambler.ru

Симонов Борис Феропонтович

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
отдел горной и строительной геотехники,
Институт горного дела СО РАН

Кордубайло Алексей Олегович

кандидат технических наук, научный сотрудник,
отдел горной и строительной геотехники,
Институт горного дела СО РАН

Барсуков Василий Романович

техник, отдел горной
и строительной геотехники,
Институт горного дела СО РАН

ДАТЧИК КООРДИНАТЫ БОЙКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОЛОТА

Аннотация:

Электромагнитные молоты нашли широкое применение в промышленности, строительстве и горном деле. Для ведения исследований в области ударной энергии, частоты, производительности и энергоэффективности молотов необходимо создание систем определения координаты и скорости бойка. Зачастую конструкция и условия работы молота не позволяют использовать оптические, резистивные и контактные датчики координаты. В статье рассмотрена конструкция системы определения координаты бойка электромагнитного молота с двумя силовыми катушками, позволяющей рассчитывать скорость и кинетическую энергию бойка. Система разработана на базе датчика положения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания. Установлено, что для корректной работы системы определения координаты необходимо нарезать канавки на поверхности бойка. Испытания разработанной системы производились на физической модели молота. В статье определены оптимальные ширина и глубина канавок, составляющие по 1,5 – 2 мм. Торец датчика должен располагаться на расстоянии 1–2 мм от поверхности бойка. Установлено, что расстояние между канавками должно составлять не менее 20 мм для корректного определения координаты и упрощения математической обработки сигнала с датчика. В ходе испытаний исследовано движение бойка с нулевой начальной скоростью под действием силы тяжести. По осциллограмме сигнала, снятого с датчика, построены графики зависимости скорости и перемещения бойка от времени. Форма графиков соответствует равноускоренному движению. Кроме того, анализ графиков позволил определить ускорение бойка, которое отличается от ускорения свободного падения вследствие влияния компрессионно-вакуумного сопротивления и силы трения. Это подтверждает корректную работу созданной системы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.077

Leutkin Alexander A.

Engineer,
Department of mining and construction geotechnics,
Institute of Mining, Siberian Branch of RAS,
54 Krasny Prospekt, Novosibirsk 630091,
e-mail: leutkin-alexandr@rambler.ru

Simonov Boris F.

Doctor of Technical Sciences,
Leading Researcher,
Department of mining and construction geotechnics,
Institute of Mining, Siberian Branch of RAS

Kordubailo Alexey O.

Candidate of Technical Sciences, Researcher,
Department of mining and construction geotechnics,
Institute of Mining, Siberian Branch of RAS

Barsukov Vasily R.

Technician,
Department of mining and construction geotechnics,
Institute of Mining, Siberian Branch of RAS

ELECTROMAGNETIC HAMMER STRIKER'S COORDINATE SENSOR

Abstract:

Electromagnetic hammers are widely used in industry, construction, and mining. Research into hammer impact energy, frequency, productivity, and energy efficiency requires the development of systems for determining the striker's position and velocity. Hammer design and operating conditions often preclude the use of optical, resistive, and contact position sensors. This article examines the design of position detection system of the electromagnetic hammer striker with two power coils, which allows for calculating the striker's velocity and kinetic energy. The system is based on an internal combustion engine crankshaft position sensor. It was established that, for the position detection system to function correctly, grooves must be cut into the striker's surface. Tests of the developed system were conducted on a physical model of the hammer. The article determines the optimal groove width and depth, which are 1.5-2 mm each. The sensor end should be located 1-2 mm from the striker's surface. It was determined that the distance between the grooves should be at least 20 mm to accurately determine the coordinate and simplify the mathematical processing of the sensor signal. During testing, the striker's motion with zero initial velocity under the influence of gravity was studied. Using the oscillogram of the signal collected from the sensor, graphs were constructed showing the striker's velocity and displacement as a function of time. The shape of the graphs corresponds to uniformly accelerated motion. Furthermore, analysis of the graphs allowed us to determine the striker's acceleration, which differs from the gravity acceleration due to the influence of compression and vacuum resistance and friction. This confirms the correct operation of the developed system.

Ключевые слова: электромагнитный молот, индуктивный датчик, математическая обработка, немагнитный зазор, канавки, ферромагнитные материалы, датчик координаты.

Key words: electromagnetic hammer, inductive sensor, mathematical processing, non-magnetic gap, grooves, ferromagnetic materials, coordinate sensor.

Введение

В строительстве, промышленности и горном деле широко применяются ударные машины как часть буровых и копровых установок [1, 2], а также для разрушения обломков породы в карьерах [3] и роботизированной добычи полезных ископаемых в шахтах [4]. Значительная часть этих машин имеет гравитационные, пневматические, гидравлические приводы. По сравнению с ними электромагнитный привод имеет ряд преимуществ: способность работы в любом положении, относительную простоту изготовления, возможность управления энергией и частотой ударов без внесения изменений в конструкцию, устойчивую работу в условиях низких температур, экологическую безопасность в применении [5, 6].

Электромагнитная ударная машина (рис. 1) с двумя силовыми катушками состоит из диамагнитной направляющей 2, верхней 4 и нижней 8 силовых катушек. Боек 11 изготавливается из ферромагнитного материала и перемещается внутри направляющей. Для снижения влияния компрессионно-вакуумного сопротивления по оси бойка просверлено отверстие. Корпус 5, полюсы 3, 6, 7 и 9 катушек изготовлены из магнитной стали, что предотвращает рассеяние магнитного поля катушек за пределы конструкции молота и обеспечивает замыкание силовых линий магнитного поля через боек. В пространстве 12, не занятом катушками, размещается дополнительное оборудование, например, в нем можно установить датчик координаты бойка. Движение бойка происходит под действием электромагнитных сил катушек. Боек совершает возвратно-поступательное движение и наносит удары по инструменту 10, смонтированному в подшипнике скольжения 13. Применение упругого демпфера 1 позволяет снизить габариты молота и повысить частоту ударов.

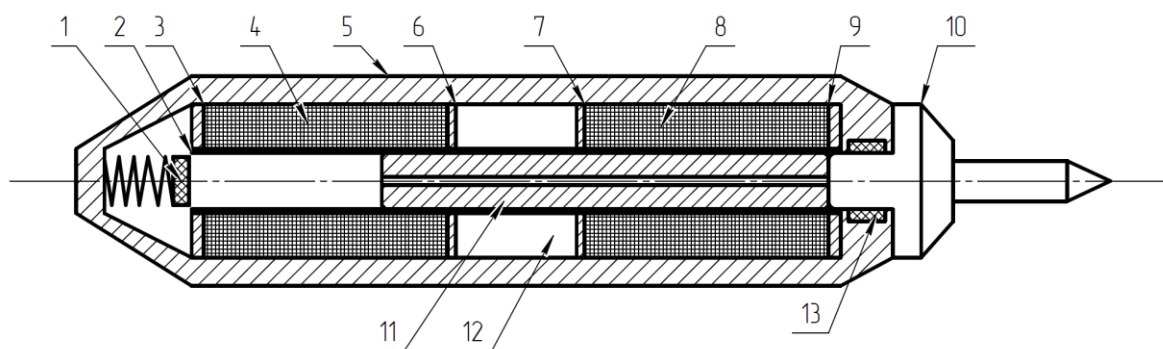


Рис. 1. Конструкция электромагнитного молота

В состав современных промышленных конструкций электромагнитных молотов входит система управления, отслеживающая только крайние положения бойка, так как этой информации достаточно для своевременной коммутации катушек. Для ведения более гибкого управления молотом в течение рабочего цикла с целью регулирования ударной энергии и частоты ударов, а также исследований в области энергоэффективности, необходимо отслеживать координату и скорость бойка на всех этапах движения. Наиболее простым решением этой задачи является математическое [7] и имитационное моделирование рабочих процессов электромагнитного молота [8, 9]. Однако в модели невозможно учесть абсолютно все особенности молота, которых достаточно много: характеристики материалов, динамические силы трения и сопротивления, вихревые токи, нагрев, магнитные поля рассеяния.

Решению этой проблемы посвящены работы [10, 11], в которых описаны системы отслеживания координаты бойка на базе герконовых или индуктивных датчиков. Такие системы имеют следующие недостатки: смещение центра тяжести бойка, необходимость создания дополнительных отверстий или прорезей в направляющей, высокая стоимость всей системы.

Цель исследования – разработка датчика, позволяющего определять координату и скорость бойка на всем пути его перемещения.

Материалы и методы исследований

В работе предлагается отслеживание фиксированных точек на поверхности бойка с помощью индуктивного датчика положения. В качестве прототипа может быть рассмотрен датчик положения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания. В состав конструкции созданного датчика (рис. 2) входит немагнитный корпус 1, внутри которого размещена катушка индуктивности 3. Катушка имеет ферромагнитный сердечник 5, соединенный с мощным постоянным магнитом 2. Силовые линии 4 магнитного поля замыкаются благодаря ферромагнитному бойку 6. Датчик работает так: при перемещении бойка канавки 7, нарезанные на его поверхности, перемещаются вблизи сердечника, что приводит к изменению ширины немагнитного зазора между бойком и сердечником. Возникает изменение магнитного поля, и в обмотке датчика наводится ЭДС индукции. Полученный сигнал по кабелю выводится к осциллографу.

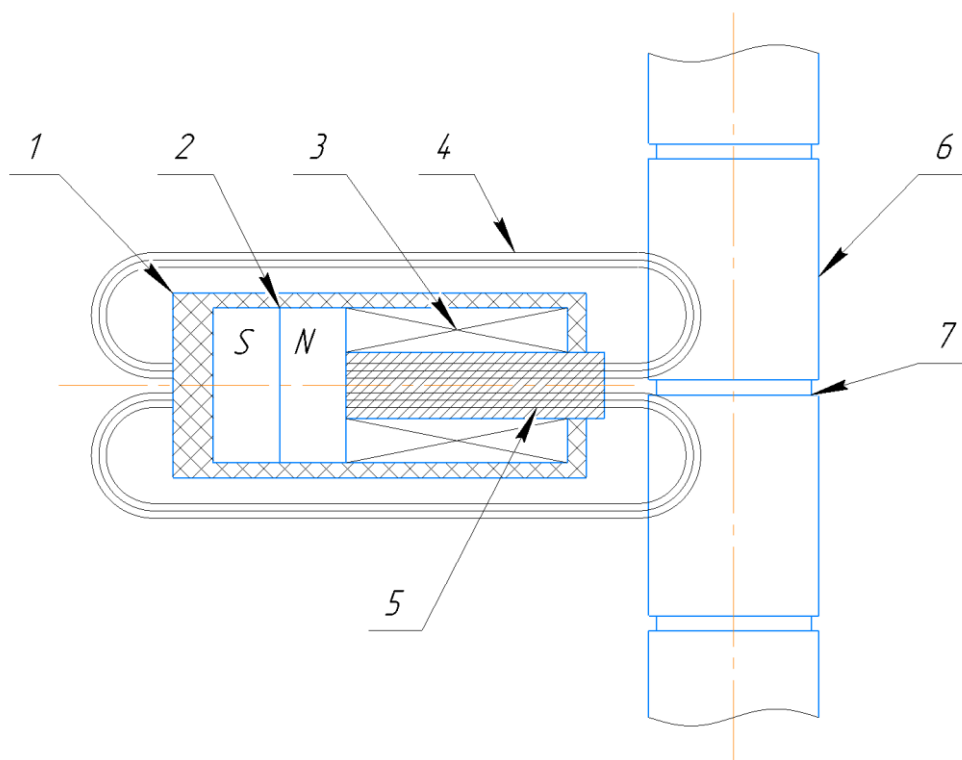


Рис. 2. Схема датчика положения бойка

В ходе предварительных исследований установлено, что расстояние между торцом датчика и поверхностью бойка влияет на амплитуду сигнала. Размещение датчика на расстоянии менее 1 мм позволяет обеспечить величину сигнала датчика до 0,5 В, чего хватает для обработки микроконтроллером без использования усилительных устройств. В то же время существует вероятность физического контакта между сердечником датчика и бойком, что может привести к повреждению сердечника или крепления датчика. Удаление датчика на расстояние более 2 мм от поверхности бойка снижает амплитуду сигнала и увеличивает влияние помех в сигнальной линии. Таким образом, оптимально

размещать датчик на расстоянии 1 – 2 мм от поверхности бойка.

Для снижения влияния помех на сигнал целесообразно выполнять канавки шириной 1,5 – 2 мм.

Расстояние между канавками должно составлять не менее 20 мм, так как сигнал от одной канавки накладывается на другой. Это усложняет обработку результатов экспериментов при больших перемещениях бойка. Поэтому желательно иметь участок нулевого сигнала, который соответствует гладкой цилиндрической поверхности бойка. Большое расстояние может снизить точность измерений. Оптимальный шаг канавок составляет 20 – 30 мм.

С учетом результатов экспериментов изготовлен стенд (рис. 3), содержащий индуктивный датчик и обеспечивающий движение бойка под действием силы тяжести (свободное падение) при нулевой начальной скорости бойка. Стенд состоит из двух одинаковых модулей, имеющих стальные корпуса 15 и 18 и диаманитные направляющие 14 и 17. Боек 13 с канавками шириной 2 мм и глубиной 1,5 мм фиксируется в верхней части стенда за узел подвеса 11 с помощью монтажного пальца 12. Шаг канавок составляет 25 мм. Между модулями размещен датчик 16 координаты бойка. Под стендом располагается жесткая наковальня 19, ограничивающая ход бойка. Для удобства обработки осциллограмм канавки на схеме пронумерованы.

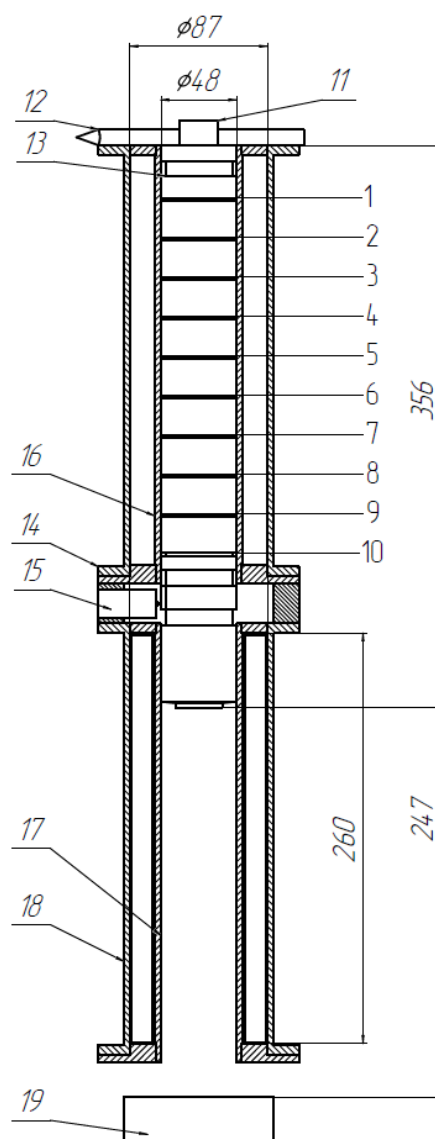


Рис. 3. Схема стенда

Эксперимент проходит следующим образом. При резком извлечении монтажного пальца предварительно закрепленный боек начинает движение с нулевой начальной скоростью под действием ускорения свободного падения. Сигнал с датчика регистрируется осциллографом и выводится на персональный компьютер. Осциллограмма сигнала с датчика координаты бойка представлена на рис. 4. Номера отметок соответствуют номерам канавок на рис. 3. Первой мимо датчика проходит широкая канавка, предназначенная для размещения подшипника скольжения. Это происходит с низкой скоростью, поэтому сигнал с датчика незначительный.

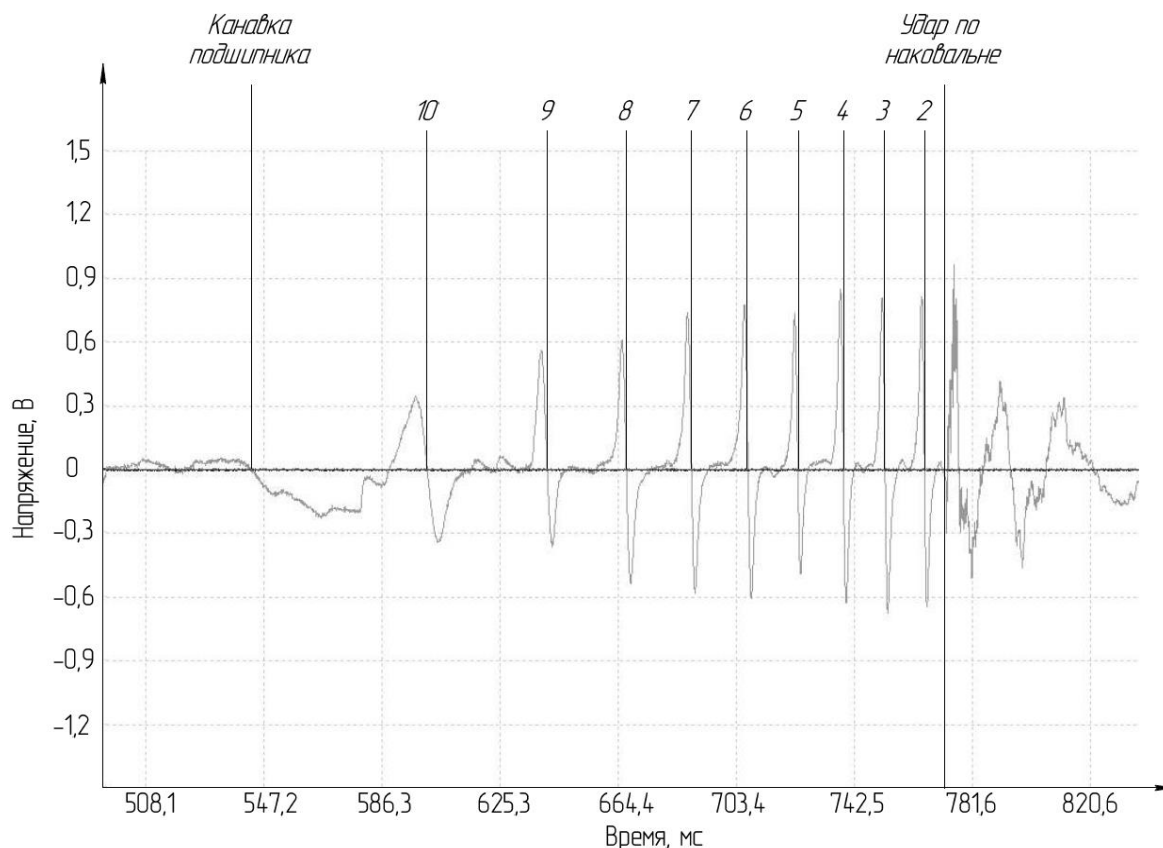


Рис. 4. Осциллограмма сигнала с датчика координаты бойка

Измерение временных промежутков между импульсами (t_{ki}) на осциллограмме позволяет производить вычисление скорости, координаты и кинетической энергии бойка.

Результаты исследований и их обсуждение

Скорость бойка на каждом участке между канавками вычисляется по формуле (1):

$$V_i = \frac{B}{t_{ki}}, \quad (1)$$

где $B=25$ мм – расстояние между канавками; t_{ki} – длительность движения бойка на i -м участке.

По положению бойка на конец каждого участка движения, совпадающему по времени с импульсами на осциллограмме, вычисляется перемещение. Таким образом определяется характер зависимости перемещения бойка от времени. Интервалы времени t_{ki} определялись по вершинам положительных полуволн сигнала датчика из условия, что за этот интервал боек перемещается на расстояние, равное шагу канавок.

График скорости представлен на рис. 5.

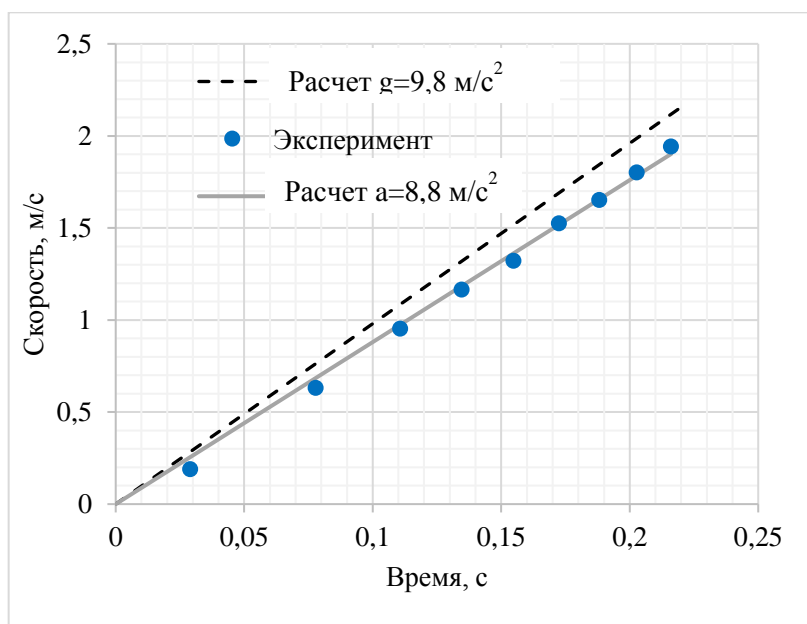


Рис. 5. Графики расчетной и экспериментальной зависимостей скорости бойка от времени при движении под действием силы тяжести

Зависимость скорости от времени описывается прямой линией. Реальная скорость движения бойка меньше расчетной, что может свидетельствовать о действии сил трения и компрессионно-вакуумного сопротивления. Экспериментальные данные аппроксимируются прямой, соответствующей зависимости скорости от времени при ускорении $8,8 \text{ м/с}^2$, что показано на рис. 5.

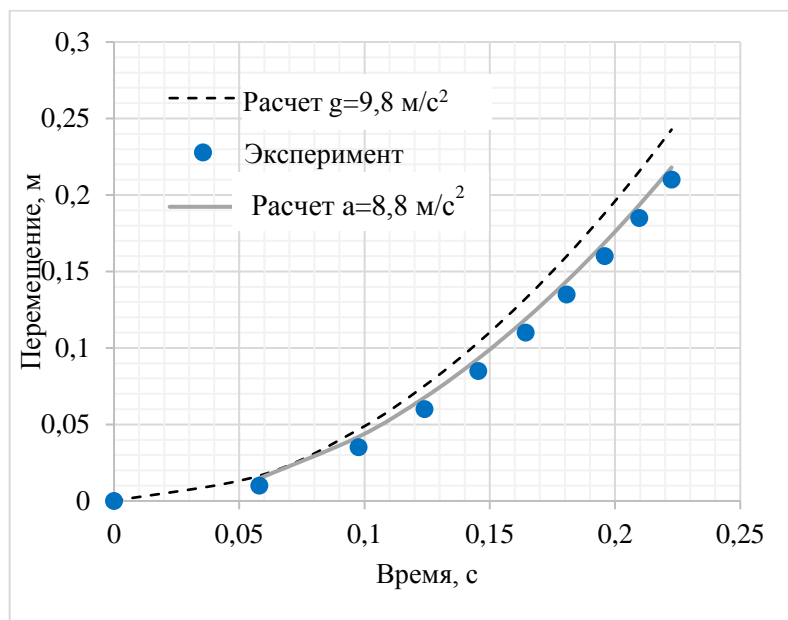


Рис. 6. График расчетной и экспериментальной зависимостей координаты бойка от времени при движении под действием силы тяжести

График экспериментальной зависимости перемещения бойка от времени (рис. 6) параболический. Перемещение бойка, измеренное экспериментально, меньше расчетного. Это хорошо согласуется с графиком на рис. 5. Кроме того, график зависимости перемещения от времени, рассчитанной для ускорения $8,8 \text{ м/с}^2$, соответствует результатам эксперимента.

Форма графиков соответствует равноускоренному движению, что подтверждает применимость разработанной системы для отслеживания координаты и скорости бойка. Импульс напряжения с датчика не имеет крутых фронтов и спадов. Это позволяет сделать предположение о том, что можно создать систему измерения, которая будет рассчитывать координату бойка, используя сигналы индуктивного датчика.

Заключение

Анализ результатов экспериментов позволяет сделать следующие выводы:

1. Система отслеживания координаты и скорости бойка электромагнитного молота может быть создана на основе индуктивного датчика положения.
2. Для реализации этой идеи необходимо нарезать на поверхности бойка канавки шириной 1,5 – 2 мм и глубиной до 1,5 мм. Более широкие и глубокие канавки выполнять нерационально. При уменьшении глубины падает амплитуда сигнала с датчика, что может потребовать применения усилителей.
3. Между канавками должен быть участок нулевого сигнала длиной не менее 20 мм, облегчающий обработку осциллограмм. Длина участка более 30 мм ухудшит точность. Поэтому оптимальный шаг канавок на бойке составляет 20 – 30 мм.
4. Оптимальное расстояние между торцом датчика и поверхностью бойка составляет 1 – 2 мм. Расстояние менее 1 мм создает опасность контакта между бойком и датчиком. Удаление торца датчика от поверхности бойка более 2 мм уменьшает амплитуду полезного сигнала.
5. Графики зависимостей скорости и перемещения бойка от времени при движении с нулевой начальной скоростью под действием силы тяжести соответствуют равноускоренному движению, что свидетельствует о корректной работе разработанной системы.

Список литературы

1. Городилов Л.В., Кудрявцев В.Г., Пашина О.А., 2014. Разработка и создание гидромолотов для исполнительных органов горных и строительных машин. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, № 4.
2. Тищенко И.В., 2024. Использование пневмоударной техники для сооружения опор легких мостовых переходов. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 1, № 1, С. 102-108.
3. G. Wang, X. Liu, Y. Chang, L. Song, C. Zhou, and Z. Wang, 2023. Analysis on rockburst failure energy evolution of model specimen under stress gradient. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 56, No. 10, pp. 7255–7268.
4. Плохих В.В., 2022. Создание пневматической ударной машины для реализации адаптивных технологических процессов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, С. 91–103.
5. Симонов Б.Ф., Погарский Ю.В., Кадышев А.И., Вовк В.С., 2019. Электромагнитные молоты для морского нефтегазопромыслового строительства. *PRO Нефть*, № 2, С. 59-65.
6. Wróblewski A., Krot P., Zimroz R., Mayer T. and Peltola J., 2023. Review of linear electric motor hammers – an energy-saving and eco-friendly solution in industry. *Energies*, Vol. 16, No. 2, p. 959.
7. Repetto M., Dimauro L. and Bonisoli E., 2023. Multicriteria design of an electromagnetic hammer. *2023 14th International Symposium on Linear Drivers for Industry Applications (LDIA), Hannover, Germany*, pp. 1-5.
8. Jawdat S. Alkasassbeh, Vlademer E. Pavlov, Khalaf Y. Al-Zyoud, Tareq A. Al-Awneh, Osamah Alkasassbeh, Ayman Y. Al-Rawashdeh, 2024. Design and performance analysis of a long-stroke electromagnetic double-reel hammer. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 137-152.

9. Ayman Y. Al-Rawashdeh, Vlademer E. Pavlov, 2024. Study of operating modes of electromagnetic hammer with adjustable impact energy and blow frequency. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, Vol. 15, No. 1, pp. 64-73.

10. Vassin K., Yedygenov Y., Aldiyarov N., Voronin V., 2018. Development of an electronic control module and research of dynamic and power characteristics of an electromagnetic hammer for destruction of boulders. *E3S Web of Conferences*. URL:https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1772531575&tld=ru&lang=en&name=e3sconf_pcdg2018 (дата обращения 3.03.2026)

11. Vassin K., Yedygenov Y., Aldiyarov N., Voronin V., 2020. Development and bench tests of a programmable logic controller "Simens Logo" based control system of an electro-magnetic hammer for destruction of boulders. *E3S Web of Conferences*. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=MOSjhp8AAAAJ&citation_for_view (дата обращения 3.03.2026)

References

1. Gorodilov L.V., Kudryavtsev V.G., Pashina O.A., 2014. Razrabotka i sozдание gidromolotov dlya ispolnitel'nykh organov gornykh i stroitel'nykh mashin [Development and creation of hydraulic hammers for executive bodies of mining and construction machines]. *Interesko Geo-Sibir'*, № 4.

2. Tishchenko I.V., 2024. Ispol'zovanie pnevmoudarnoi tekhniki dlya sooruzheniya opor legkikh mostovykh perekhodov [Use of pneumatic impact equipment for the construction of supports for light bridge crossings]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, Vol. 1, № 1, P. 102-108.

3. G. Wang, X. Liu, Y. Chang, L. Song, C. Zhou, and Z. Wang, 2023. Analysis on rockburst failure energy evolution of model specimen under stress gradient. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 56, No. 10, pp. 7255–7268.

4. Plokhikh V.V., 2022. Sozдание pnevmaticheskoi udarnoi mashiny dlya realizatsii adaptivnykh tekhnologicheskikh protsessov [Development of a pneumatic impact machine for the implementation of adaptive technological processes.]. *Gorni informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 7, P. 91–103.

5. Simonov B.F., Pogarskii Iu.V., Kadyshev A.I., Vovk V.S., 2019. Elektromagnitnye moloty dlya morskogo neftegazopromyslovogo stroitel'stva [Electromagnetic hammers for offshore oil and gas field construction]. *PRO Neft'*, № 2, P. 59-65.

6. Wróblewski A., Krot P., Zimroz R., Mayer T. and Peltola J., 2023. Review of linear electric motor hammers – an energy-saving and eco-friendly solution in industry. *Energies*, Vol. 16, No. 2, p. 959.

7. Repetto M., Dimauro L. and Bonisoli E., 2023. Multicriteria design of an electromagnetic hammer. *2023 14th International Symposium on Linear Drivers for Industry Applications (LDIA), Hannover, Germany*, pp. 1-5.

8. Jawdat S. Alkasassbeh, Vlademer E. Pavlov, Khalaf Y. Al-Zyoud, Tareq A. Al-Awneh, Osamah Alkasassbeh, Ayman Y. Al-Rawashdeh, 2024. Design and performance analysis of a long-stroke electromagnetic double-reel hammer. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 137-152.

9. Ayman Y. Al-Rawashdeh, Vlademer E. Pavlov, 2024. Study of operating modes of electromagnetic hammer with adjustable impact energy and blow frequency. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, Vol. 15, No. 1, pp. 64-73.

10. Vassin K., Yedygenov Y., Aldiyarov N., Voronin V., 2018. Development of an electronic control module and research of dynamic and power characteristics of an electromagnetic hammer for destruction of boulders. *E3S Web of Conferences*. URL:https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1772531575&tld=ru&lang=en&name=e3sconf_pcdg2018 (data obrashcheniya 3.03.2026)

11. Vassin K., Yedygenov Y., Aldiyarov N., Voronin V., 2020. Development and bench tests of a programmable logic controller "Simens Logo" based control system of an electromagnetic hammer for destruction of boulders. *E3S Web of Conferences*. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=MOSjhp8AAAAJ&citation_for_view (data obrashcheniya 3.03.2026)

УДК 550.8.08:550.34.016

Грицаенко Антон Юрьевич

научный сотрудник,
отдел эколого-геофизических исследований,
Республиканский академический
научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт горной
геологии, геомеханики, геофизики
и маркшейдерского дела (ФГБНУ «РАНИМИ»)
283004, ДНР, г. Донецк, ул. Челюскинцев, 291
e-mail: anthony.yuriev.ya.ru

Мартынов Геннадий Павлович

старший научный сотрудник,
отдел эколого-геофизических исследований,
Республиканский академический
научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт горной
геологии, геомеханики, геофизики
и маркшейдерского дела
e-mail: oemi@list.ru

Твердохлеб Владислав Павлович

инженер,
отдел эколого-геофизических исследований,
Республиканский академический
научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт горной
геологии, геомеханики, геофизики
и маркшейдерского дела
e-mail: vladislavtverdohleb@gmail.com

**МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ
АКТИВНОСТИ РАЗЛОМОВ
НА ШАХТНЫХ ПОЛЯХ ДОНБАССА***Аннотация:*

Изучение геодинамики и прогнозирование опасных геологических процессов в тектонических разломах позволяют определять положение коллекторов метана на шахтных полях. Так, изучение систем разломов в Донбассе позволяет прогнозировать газодинамические явления в горных выработках, так как случайное вскрытие аномального скопления метана при проведении горных работ создает аварийную ситуацию на шахте. Поэтому выявление тектонических нарушений до начала ведения добычи угля является актуальной задачей.

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

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.086

Gritsaenko Anton Y.

Researcher,
Environmental and Geophysical
Research Department,
Republican Academic Scientific,
Research and Design Institute for Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying
(RANIMI),
283004 Donetsk, DPR, 291 Chelyuskintsev Str.
e-mail: anthony.yuriev@ya.ru

Martynov Gennadiy P.

Senior Researcher,
Environmental and Geophysical
Research Department,
Republican Academic Scientific,
Research and Design Institute for Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics
and Mine Surveying
e-mail: oemi@list.ru

Tverdokhle Vladislav P.

Engineer,
Environmental and Geophysical
Research Department,
Republican Academic Scientific,
Research and Design Institute for Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics
and Mine Surveying
e-mail: vladislavtverdohleb@gmail.com

**MICROSEISMIC STUDIES INTO
THE GEODYNAMIC ACTIVITY
OF TECTONIC FAULTS
AT DONBASS MINE FIELDS***Abstract:*

The study of geodynamics and prediction of dangerous geological processes in tectonic faults make it possible to determine the position of methane reservoirs in mine fields. Thus, the study of tectonic fault systems in the Donbas makes it possible to predict gas-dynamic phenomena in mining operations, because the accidental encountering an abnormal accumulation of methane during mining creates an emergency situation at the mine. Therefore, the identification of tectonic dislocations before the start of coal mining is a topical task.

Modern methods of solving this problem include methods of active and passive seismic exploration. Active seismic exploration is able to identify geological disturbances and methane accumulations that differ from the host rocks in their dynamic and kinematic characteristics of elastic waves. Passive seismic exploration is based on a different physical basis. In this case, tectonic dislocations and host methane reservoirs are detected not by their physical properties, but by microseismic events caused by fracturing in fractured zones.

Thus, the mechanism of seismic events formation is determined by the methods of seismology and microseismics. This makes it possible to identify sections

Методами сейсмологии и микросейсмики определяется механизм образования сейсмических событий. Это позволяет по микросейсмическому излучению в зоне динамического влияния разломов выделить участки горного массива, находящиеся в состоянии горизонтального сжатия или растяжения.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по разработке аппаратуры и обработке данных микросейсмического зондирования при проведении опытных работ по оценке геодинамической активности, газозносности и изменения во времени геофизических полей разломов на шахтах Донбасса для эффективной и безопасной добычи угля в рамках выполнения государственного задания по теме № FRSR-2026-0006. Особое внимание уделено разработке специальных методов анализа спектров микросейсмических колебаний, записанных различными модификациями сейсмических датчиков SM-3KV.

Ключевые слова: разломы, геодинамическая активность, угольные шахты, микросейсмическое зондирование, микросейсмический регистратор, амплитудно-частотный спектр.

of the rock mass in a state of horizontal compression or stretching by microseismic radiation in the zone of dynamic influence of faults.

This paper presents the results of experimental research on the equipment development and obtained data processing of the microseismic sounding method during experimental work on the assessment of geodynamic activity, gas content and time changes in the geophysical fields of tectonic faults in the mines of Donbass for efficient and safe coal mining within the framework of the state assignment No. FRSR-2026-0006. Special attention is paid to the development of methods for analyzing microseismic spectra recorded by various modifications of the SM-3KV seismic sensors.

Key words: tectonic faults, geodynamic activity, coal mines, microseismic sounding, microseismic recorder, amplitude-frequency spectrum.

Введение

Работы по изучению угольных месторождений Донбасса с помощью сейсморазведки были начаты еще в 1970-х годах. Основанием для их развития стало то, что разрывные нарушения пластов с относительным смещением блоков пород величиной менее 10 м практически не выявляются данными разведочного бурения. При изучении кернового материала помимо тектонического строения производится оценка трещиноватости горных пород и выделение систем трещин, но при наклонном залегании пород разрешающая способность геологоразведки существенно падает [1, 2].

Непредвиденное вскрытие коллекторов метана при проведении подземных работ на шахтах в горном массиве приводит к внезапным выбросам газа и авариям. Малозатратным геофизическим методом поиска скоплений метана является мониторинг низкочастотного сейсмического фона, который позволяет исследовать пространственные характеристики газоносных трещинных структур. Это возможно благодаря тому, что спектр естественного низкочастотного сейсмического фона тектонических структур с дизъюнктивной нарушенностью в зонах динамического влияния разломов существенно отличается от спектра относительно однородных ненарушенных участков породы [3].

Перспективным геофизическим методом поиска скоплений метана является мониторинг низкочастотного сейсмического фона (микросейсмика), который позволяет оценить напряженно-деформированное состояние углепородного массива, а также исследовать динамику образования и пространственные характеристики газоносных трещинных структур [4]. Это возможно благодаря тому, что амплитудно-частотная характеристика (спектр) (АЧХ) естественного сейсмического фона в частотном диапазоне 0,05 – 20 Гц для геологических структур, содержащих газ, существенно отличается от спектра структур, вмещающих воду. Тем более существенные отличия в спектрах появляются над областью горных выработок за счет большого количества искусственных пустот в толще пород. Кроме этого, микросейсмические исследования позволяют выявлять закономерности проявления и источники сейсмичности в условиях сильных техногенных помех, исходящих от наземного и подземного оборудования [5].

Датчики микросейсмических колебаний и сейсмостанции регистрируют низкоамплитудные сигналы в низкочастотном диапазоне [6]. В качестве сейсмоприемников чаще всего используют достаточно чувствительные широкополосные датчики с малым уровнем собственных шумов. При этом микросейсмические записи упругих колебаний горных пород «зашумлены» всевозможными помехами природного и техногенного происхождения, что затрудняет выделение как нормального фона, так и малоамплитудных сигналов и определение их частот.

Аппаратура для исследований

Датчик сейсмических сигналов – это сейсмоприемник, преобразующий вертикальную или горизонтальную составляющую вектора упругих колебаний земной поверхности в электрический сигнал. Сейсмоприемник фиксирует форму и время прихода волны, что позволяет вычислить ее частоту, амплитуду и другие параметры. Для записи данных с датчиков используются регистраторы в одноканальном [7], многоканальном [8, 9] или модульном [10] исполнении. Количество аналоговых каналов, диапазон частот дискретизации, динамический диапазон и другие параметры сейсмостанции зависят от ее назначения, т.е. вида проводимого геофизического исследования (активная сейсморазведка или пассивный микросейсмический мониторинг).

Для пассивного микросейсмического (сейсмологического) мониторинга существует тенденция построения универсальных автономных сейсмических регистраторов с возможностью выбора количества каналов и параметров записи данных [11]. Наиболее важным параметром сейсмостанции является ее динамический диапазон, который определяется не только разрядностью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), но и характеристиками аналогового тракта усиления и фильтрации низкоамплитудных сигналов с датчиков. В случае использования низкочастотных широкополосных сейсмоприемников их выходной сигнал находится в диапазоне частот $0,001 \div 100$ Гц, что создает ряд затруднений при проектировании схем усиления, фильтрации и аттенюации при обработке сигналов датчиков перед АЦП.

Поэтому к аналоговому тракту микросейсмических регистраторов предъявляются жесткие требования по уровню шумов и линейности АЧХ при выбранном значении аттенюации и коэффициенте усиления. Тип и порядок фильтров низких частот также имеет большое значение, поскольку в качестве сейсмоприемников используют высокочувствительные широкополосные датчики с малым уровнем собственных шумов.

Например, чувствительность маятниковых сейсмоприемников типа СМ-3КВ находится на уровне 300 В/(м/с) при пороге чувствительности $1,25 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$ в диапазоне частот $0,5 \div 20$ Гц. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики некоторых сейсмоприемников, используемых совместно с сейсмическими регистраторами.

Таблица 1

Основные параметры некоторых сейсмоприемников

Параметр	Тип датчика				
	GS-ONE	СМЕ-4211	СМЕ-4311 СМЕ-6111	STS-25	СМ-3КВ
Чувствительность, В/(м/с)	89	2000	2000	1500	300
Частотный диапазон, Гц	4,5 – 120	0,033 – 50	0,0083 – 50	0,0027 – 50	0,5 – 100
Интегральный шум, мкВ	-	57,8 – 152	18 – 71,2	-	< 0,037

На основании многолетнего опыта проектирования сейсмостанций в отделе геофизических исследований в ФГБНУ «РАНИМИ» (г. Донецк) создан 3-канальный автономный регистратор низкочастотных малоамплитудных сейсмических сигналов [12], структурная схема которого приведена на рис. 1.

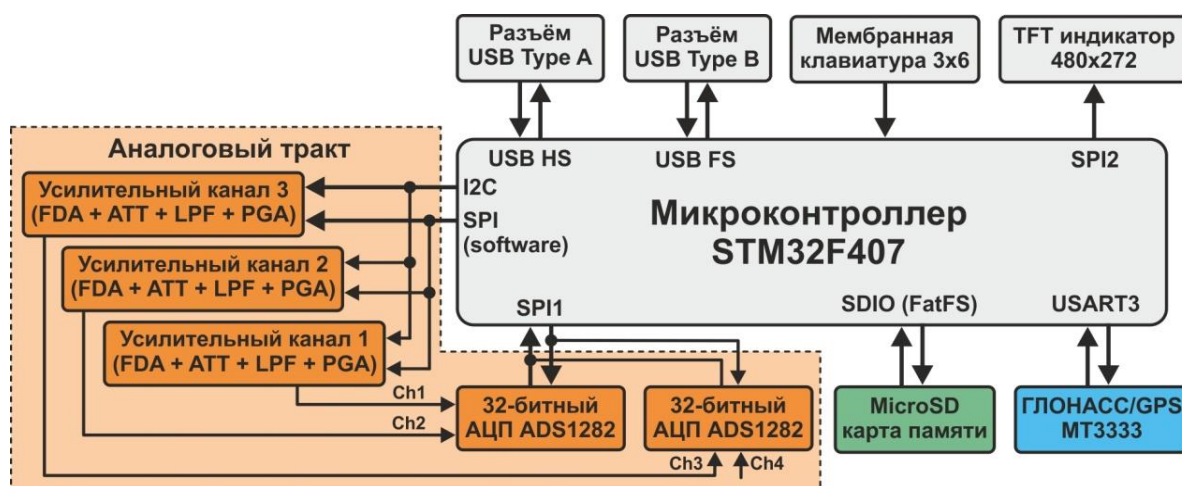


Рис. 1. Структурная схема микросейсмического регистратора на ARM микроконтроллере: FDA – дифференциальный усилитель (Fully Differential Amp); ATT – аттенюатор (Attenuator); LPF – фильтр низких частот (Low Pass Filter); PGA – усилитель с программируемым коэффициентом усиления (Programmable Gain Amplifier)

Для опытно-методических полевых работ было изготовлено несколько экспериментальных образцов. В схеме микросейсмического регистратора (сейсмостанции) использован высокопроизводительный микроконтроллер (МК) с 32-битным ARM ядром. Запись данных производится на карту памяти microSD, файловая система реализована посредством библиотеки FatFS. Сейсмостанция ориентирована на длительную автономную работу (суточный и недельный мониторинг), максимальная длительность записи данных зависит от текущих настроек и объема карты памяти. Синхронизация внутренних таймеров МК при одновременной работе многих регистраторов осуществляется с помощью микросхемы ГЛОНАСС/GPS приемника, чему посвящена отдельная статья авторов [13].

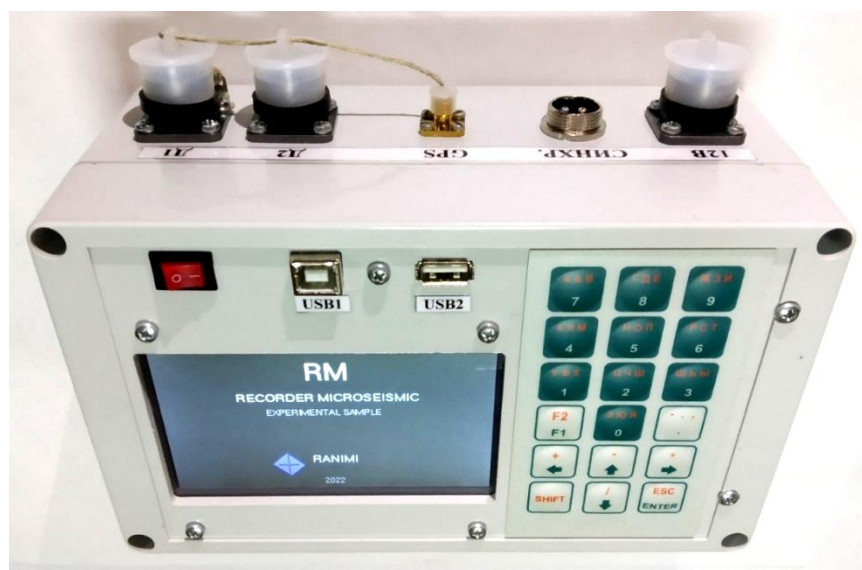


Рис. 2. Микросейсмический регистратор, разработанный в ФГБНУ «РАНИМИ»

Регистратор (рис. 2) предназначен для использования с перечисленными выше низкочастотными трехкомпонентными датчиками микросейсмических сигналов с аналоговым выходом. Данный прибор является переносной аппаратурой общего применения

с электропитанием от внутренней аккумуляторной батареи. При необходимости регистрации микросейсмических сигналов на протяжении нескольких часов или суток к разъему «12В» регистратора подключают внешний аккумулятор достаточной емкости. Подключение и замена отработанного внешнего аккумулятора на новый не нарушает работу регистратора. Возможность переподключения аккумулятора в режиме «горячей замены» позволяет не прерывать процесс регистрации при многосуточных наблюдениях.

Управление всеми режимами и параметрами регистратора выполняется оператором, посредством клавиатуры и дисплея, расположенных на корпусе. Запись зарегистрированных данных производится в энергонезависимую память (microSD карту). Визуализация сигналов на цветном дисплее позволяет делать предварительный анализ принимаемых данных.

Регистратор имеет два входа для датчиков «Д1» и «Д2», каждый из которых реализует три независимых канала усиления и оцифровки. Первый ориентирован на пассивные геофоны типа GS-ONE или СМЗ-КВ. Второй предназначен для датчиков, требующих напряжения питания – это молекулярно-электронные датчики или пьезоэлектрические сейсмоприемники.

К разъему «GPS» подключается антенна GPS900-1 для приема сигналов со спутниковых группировок глобального позиционирования GPS/ГЛОНАСС. Определение координат места и синхронизация по времени выполняется по сигналам GPS.

Во время полевых работ при отсутствии возможности приема сигналов от спутников в зонах расположения группы регистраторов, закрытых для приема GPS сигналов, можно обеспечить синхронную работу нескольких регистраторов во времени с помощью синхросигнала, подаваемого на разъемы «СИНХР» от внешнего блока синхронизации.

Разъем «USB1» типа USB-B используется для подключения компьютера (регистратор находится в режиме Slave), а разъем «USB2» типа USB-A – для подключения внешнего накопителя, например, флэш-накопителя с USB (регистратор находится в режиме Master). Данные регистрируемых сигналов можно снимать в поле USB флэш-накопителем или по окончании измерений в месте обработки данных непосредственным подключением регистратора к компьютеру.

Корпус регистратора изготовлен из сверхпрочного АБС-пластика и обеспечивает защиту от пыли и влаги. Внутри корпуса расположены аккумуляторный блок с платой защиты от недопустимого низкого разряда и перезаряда аккумуляторов; плата питания с интерфейсами и модулем GPS; плата аналого-цифрового преобразования с усилителями, фильтрами, аттенюаторами, преобразователями напряжения питания, микросхемами АЦП разрядностью в 31 бит; процессорная плата на основе STM32 с microSD; плата-переходник для подключения клавиатуры и плата-переходник для подключения цветного дисплея.

Методы исследований

Для анализа геодинамических явлений при формировании аномальных скоплений метана на угольных шахтах в приразломных зонах на поле шахты «Калиновская-Восточная» проводились сейсмические исследования с использованием методов активной сейсморазведки и непрерывного пассивного микросейсмического мониторинга [14]. Далее в работе приведен анализ массива данных, полученных пассивным способом наблюдений в 2024 – 2025 годах по профилям, заданным вкрест простирания надвигов Тимошенко и Французского на поле шахты «Калиновская-Восточная».

Опытные сейсмические пассивные наблюдения проводились с использованием разработанных сейсмостанций и датчиков СМ-3КВ, в том числе и смонтированных на шасси системы Гальперина (рис. 3), расположенных на точках зондирования МС (рис. 4) и ориентированных строго по вертикали (компонента Z), северу (North) и востоку (East). Расположение на местности точек МС выбиралось с учетом минимального воздействия на результаты наблюдений техногенных факторов и близости известных геологоразведочных скважин. Все сейсмические работы проводились в течение нескольких часов в дневное время.



Рис. 3. Устройство пунктов микросейсмических наблюдений с датчиками МС-3КВ на поле шахты «Калиновская-Восточная»

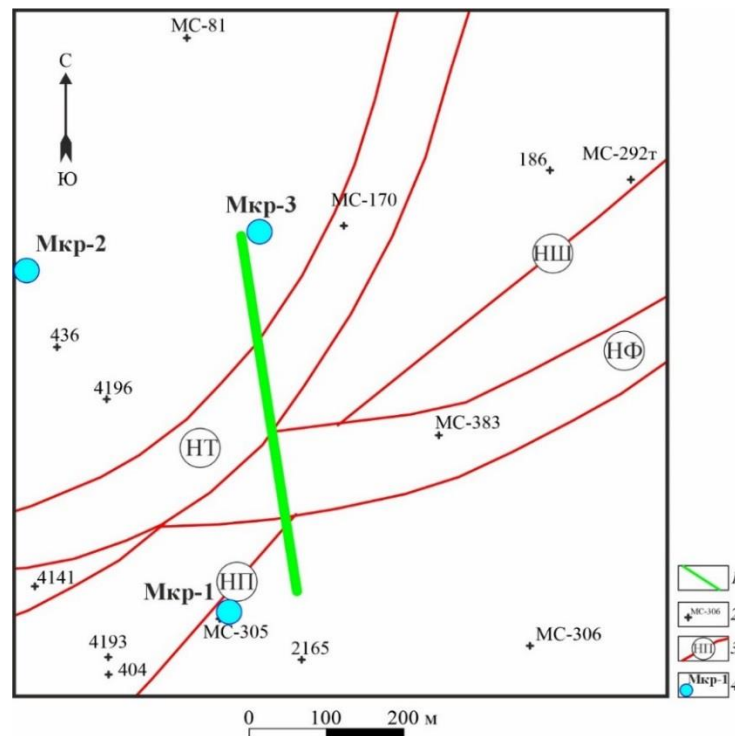


Рис. 4. Расположение сейсморазведочного профиля и пунктов микросейсмических наблюдений:
1 – линия сейсмометрических наблюдений; 2 – устье геологоразведочной скважины, ее номер;
3 – линия выхода разрывного нарушения под наносы;
4 – пункт микросейсмических наблюдений.

Разрывные нарушения: НП – надвиг Промежуточный, НШ – надвиг Шахтный, НТ – надвиг Тимошенко, НФ – надвиг Французский

По результатам проведенных полевых геофизических исследований на поле шахты «Калиновская-Восточная» методами пассивной сейсморазведки установлено, что записи пассивных сейсмических сигналов разными датчиками соответствуют классическим представлениям о формах и амплитудах микросейсмического сигнала. Характерный глобальный пик между 0,1 ÷ 0,3 Гц и провал спектра в диапазоне частот от 0,7 до 1,4 Гц является общим для разных регионов, в том числе и для Донбасса [15 – 17].

На рис. 5 показана суточная трехкомпонентная запись микросейсмических колебаний на поверхности шахты «Калиновская-Восточная», зашумленная техногенными помехами. Выделенная на рис. 5 вертикальная область длительностью всего один час содержит как информативную составляющую естественного микросейсмического поля, так и случайные всплески техногенного происхождения с амплитудами существенно выше нормального фона.

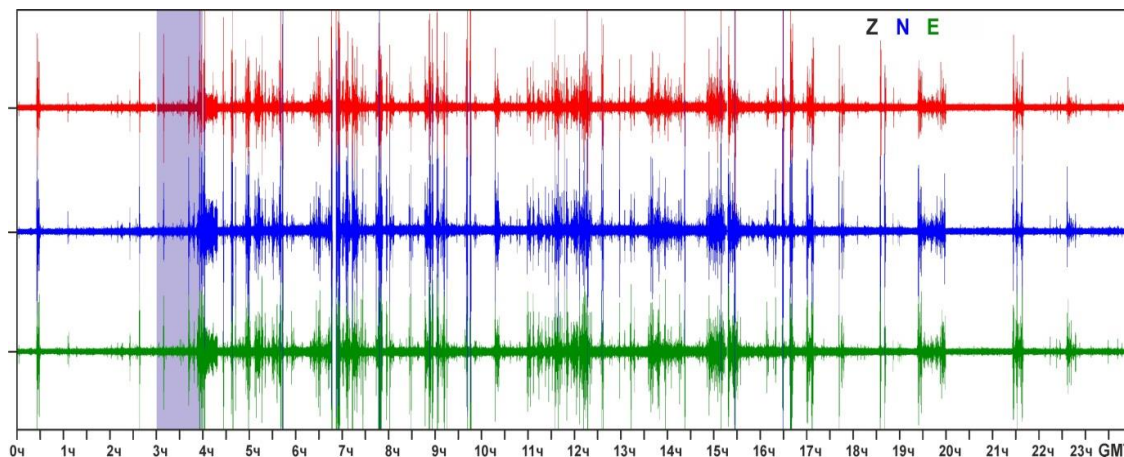


Рис. 5. Трехкомпонентная запись микросейсмических колебаний на пункте наблюдения, зашумленная техногенными помехами

Для достоверного выделения фоновых значений помимо низкочастотной фильтрации высокоамплитудных помех применяют специальные методы цифровой обработки данных – это статистическое усреднение спектров или различные морфологические подходы [18, 19].

Усреднение амплитудных спектров

Один из подходов – это усреднение амплитудных спектров сигналов, когда запись разделяется на блоки, для каждого из которых с использованием преобразования Фурье вычисляются и усредняются единичные амплитудные спектры [20, 21]. Тогда с ростом длины записи микросейсмического шума спектры сглаживаются, но при достижении определенного числа блоков (предела усреднений) спектры не меняются. На рис. 6 показан типовой усредненный спектр одного из пунктов микросейсмических наблюдений на территории шахты «Калиновская-Восточная».

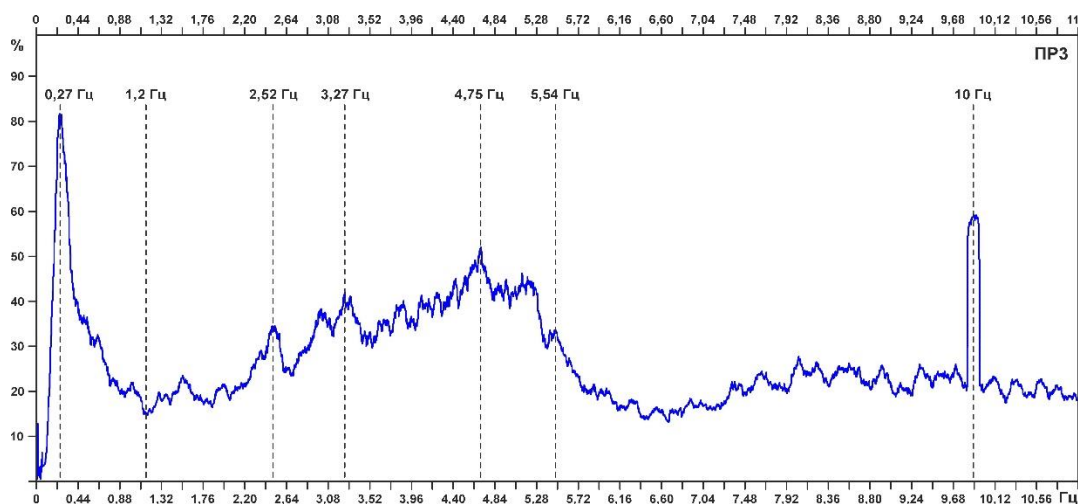


Рис. 6. АЧХ вертикальной составляющей микросейсмического сигнала на территории шахты «Калиновская-Восточная»

Результаты исследований и их обсуждение

В практике поверхностных наблюдений микросейсм соотношение сигнал/шум много меньше единицы из-за интенсивных объемных и поверхностных волн, источником которых являются транспорт и технологическое оборудование. Хотя во время предобработки данных пассивного мониторинга частотный анализ позволяет отфильтровать данные гармонические сигналы, проблемным остается выделение и локализация на фоне естественного шумового фона низкоэнергетических событий, порождаемых разломами и коллекторами метана. Установлено, что поверхностные волны от заглубленных источников формируются в верхней части разреза в результате интерференции на многослойной структуре пачек и представляют собой сложные колебания различной природы, но основной составляющей являются волны Рэлея разной частоты [22, 23].

Для достоверного выделения фоновых значений естественных микросейсм разработан алгоритм усреднения амплитудных спектров сигналов с вычислением и усреднением мгновенных амплитудных спектров. Хотя такая предобработка данных пассивного мониторинга позволяет отфильтровать паразитные квазигармонические сигналы, проблемным остается выделение и локализация на фоне естественного шумового фона низкоэнергетических событий.

Заключение

Установлено, что существует зависимость между скоростями упругих волн (сейсмической жесткостью массива) и амплитудами спектра на разных частотах. Благодаря этому становится возможным выделение нормальной составляющей микросейсмического поля, в спектрах которого прослеживается корреляция с шахтными выработками или же отдельными участками трещиноватости пород в приразломных зонах.

На рис. 7 показаны восстановленные АЧХ микросейсмического фона, полученные при обработке многочасовых наблюдений в разных точках шахтного поля. Видно, что отчетливая характеристика протяженных аномалий проявляется в диапазоне частот 2 – 4 Гц. В более низкочастотной области 0,5 – 2 Гц, как и в более высокочастотной 4 – 30 Гц, поведение семейств АЧХ повторяется.

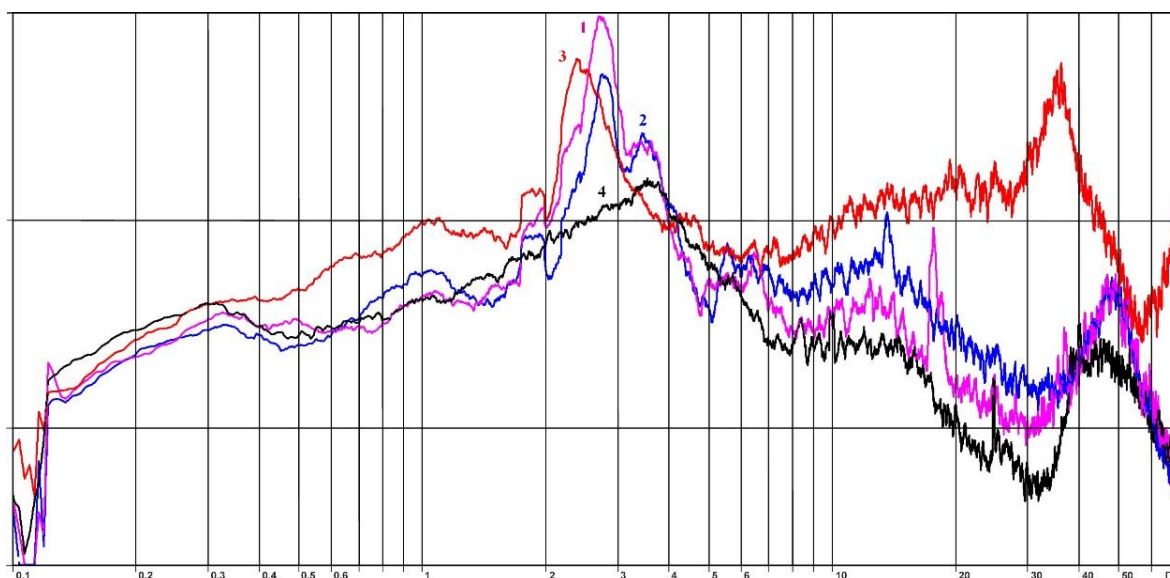


Рис. 7. Восстановленные АЧХ микросейсмических сигналов естественного фона на границах подработанного углепородного массива и тектонического разлома (кривые 1 – 3).

АЧХ микросейсмического фона ненарушенного участка массива вдали от регионального надвига (кривая 4)

Список литературы

1. Анциферов А.В., Тиркель М.Г., Хохлов М.Т. и др., 2004. *Газоносность угольных месторождений Донбасса*. Монография. Киев: Наукова думка, 232 с.
2. Анциферов А.В., 2003. *Теория и практика шахтной сейсморазведки*. Донецк, 312 с.
3. Горбатиков А.В. и др., 2008. Технология глубинного зондирования земной коры с использованием естественного низкочастотного микросейсмического поля. *Изменение окружающей среды и климата*: монография. Т.1. Ч.2. Москва: ИФЗ РАН, С. 223-236.
4. Иванов Л.А., Туманов В.В., Савченко А.В., 2022. Структурно-геодинамические предпосылки использования микросейсм для поиска аномальных скоплений метана. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, № 16-17 (31-32)*, С. 46-59.
5. Анциферов А.В., Туманов В.В., Новгородцева Л.А., Мартынов Г.П., Бородин Д.С., Ялпуга Е.А., 2023. Помехи и шумы микросейсмических сигналов на примере мониторинговых наблюдений в Донбассе. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, № 22-23 (37-38)*, С. 137-147.
6. Райфельд М.А., Соколова Д.О., Спектор А.А., 2016. Пассивная сейсмическая локация: аппаратное и базовое программное обеспечение. *Вычислительные технологии: журн. ФИЦ ИВТ СО РАН*, Новосибирск. Т. 21, № 1, С. 116-126.
7. Шмыков А.Н., Сагайдачная О. М., Сальников А.С., Вершинин А.В., 2018. Автономный одноканальный сейсмический регистратор для выполнения наземно-подземных исследований. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, Т. 4, С. 204-210.
8. Туманов В.В., Мартынов Г.П., 2017. Развитие автономного аппаратно-аналитического комплекса ААК12 для шахтной сейсморазведки. *50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли: сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф.* Москва: ИПКОН РАН, С. 251 – 254.
9. Анциферов А.В., Камбурова Л.А., Туманов В.В., Мартынов Г.П., Гладков А.Ю., Балакин Ю.А., 2021. Модульная шахтная сейсморазведочная станция. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 8, № 2, С. 7-12.
10. Бутырин П.Г., 2021. Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5». Пять лет развития. *Российский сейсмологический журнал*, Т. 3, № 3, С. 84-94.
11. Анциферов А.В., Туманов В.В., Мартынов Г.П., Горбунов И.Э., Молошникова Н.Б., Деговцов И.В., Сафин А.А., 2022. Сейсмометры и регистраторы низкочастотных малоамплитудных сейсмических сигналов. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, № 16-17 (31-32)*, С. 18-32.
12. Туманов В.В., Мартынов Г.П., Молошникова Н.Б., Деговцов И.В., Горбунов И.Э., Сафин А.А., 2023. Регистратор микросейсм. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, № 20-21 (35-36)*, С. 27-32.
13. Мартынов Г.П., Грицаенко А.Ю., Донченко Э.В., Молошникова Н.Б., 2024. Синхронизация геофизической аппаратуры на микропроцессорах с микросекундной точностью. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, № 2 (40)*, С. 123-134.
14. Мартынов Г.П., Туманов В.В., Грицаенко А.Ю., Бородин Д.С., 2024. Анализ пассивных и активных сейсмических наблюдений на поле шахты «Калиновская-Восточная». *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, Т.1, № 3 (41)*, С. 232 – 245.
15. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Шахов Е.В., 2008. *Исследования активности платформенных территорий с использованием микросейсм*. Екатеринбург: УрО РАН. 128 с.
16. Надежка Л.И., Орлов Р.А., Пивоваров С.П., Сафронич И.Н., М.А. Ефременко, 2003. О связи параметров сейсмического шума с геологическими и геодинамическими особенностями воронежского кристаллического массива. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*, № 2, С. 179–185.
17. Орлов Р.А., 2011. Опыт использования микросейсмического шума для реше-

ния геологических задач в условиях платформы (на примере Воронежского кристаллического массива). *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*, № 1, С. 184–192.

18. Азаров А.В., Сердюков А.С., 2023. Комплекс программ обработки данных микросейсмического мониторинга разработки месторождений полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 2, С. 58-71.

19. Сафронич И.Н., 2023. Выделение нормальной и аномальной составляющей сейсмического поля на урбанизированных территориях. *Материалы II Международной научно-практической конференции «Куражковские чтения»*. Астрахань, С. 397-401.

20. Сафронич И.Н., Красилов С.А., Колесников С.И., Савенков А.В., 2013. Повышение эффективности использования процессора обработки сигналов программы WSG в научно-исследовательской работе. *Сборник материалов Восьмой Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных»*. Обнинск, С. 372-385.

21. Сафронич И.Н., 2022. Использование спектра Накамуры для зондирования пород в кровле докембрийского фундамента. *Сборник статей III Международного научно-исследовательского конкурса «Лучший исследовательский проект 2022»*. Петрозаводск, С. 114-124.

22. Данилов К.Б., 2017. *Выявление геологических неоднородностей в верхней части земной коры на основе анализа низкочастотных микросейсм (на примере Архангельской области)*: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.10. Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Академика Н.П. Лаверова. Архангельск, 181с.

23. Горбатиков А.В., Заалишвили В.Б., Харазова Ю.В., Степанова М.Ю., Кошевой Н.Г., Андреева Н.В., Цуканов А.А., Шманатов Г.В., Мерзлякин Т.И., 2025. Исследование глубинного строения и тектоники северного склона Большого Кавказа и западной части Терско-Каспийского прогиба по результатам микросейсмического зондирования. *Геология и геофизика Юга России*, № 15(2), С. 87–102.

References

1. Antsiferov A.V., Tirkel' M.G., Khokhlov M.T. i dr., 2004. Gazonosnost' ugol'nykh mestorozhdenii Donbassa [Gas content of Donbass coal deposits]. Monografiya. Kiev: Naukova dumka, 232 p.

2. Antsiferov A.V., 2003. Teoriya i praktika shakhtnoi seismorazvedki [Theory and practice of mine seismic engineering]. Donetsk, 312 p.

3. Gorbatikov A.V. i dr., 2008. Tekhnologiya glubinnoho zondirovaniya zemnoi kory s ispol'zovaniem estestvennogo nizkochastotnogo mikroiseismicheskogo polya [Technology of deep sounding of the Earth's crust using a natural low-frequency micro-seismic field]. *Izmenenie okruzhayushchei sredy i klimata: monografiya. Vol.1. Ch.2*. Moscow: IFZ RAN, P. 223-236.

4. Ivanov L.A., Tumanov V.V., Savchenko A.V., 2022. Strukturno-geodinamicheskie predposylki ispol'zovaniya mikroiseism dlya poiska anomal'nykh skoplenii metana [Structural and geodynamic prerequisites for using microseisms to search for anomalous methane accumulations]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk, № 16-17 (31-32)*, P. 46-59.

5. Antsiferov A.V., Tumanov V.V., Novgorodtseva L.A., Martynov G.P., Borodin D.S., Yalputa E.A., 2023. Pomekhi i shumy mikroiseismicheskikh signalov na primere monitoringovykh nablyudenii v Donbasse [Interference and noise of microseismic signals on the example of monitoring observations in Donbass]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk, № 22-23 (37-38)*, P. 137-147.

6. Raifel'd M.A., Sokolova D.O., Spektor A.A., 2016. Passivnaya seismicheskaya lokatsiya: apparatnoe i bazovoe programmnoe obespechenie [Passive seismic location: hardware and basic software]. *Vychislitel'nye tekhnologii: zhurn. FITs IVT SO RAN, Novosibirsk*.

Vol. 21, № 1, P. 116-126.

7. Shmykov A.N., Sagaidachnaya O. M., Sal'nikov A.S., Vershinin A.V., 2018. Avtonomnyi odnokanal'nyi seismicheskii registrator dlya vypolneniya nazemno-podzemnykh issledovaniy [Autonomous single-channel seismic recorder for performing surface-underground research]. *Interesko Geo-Sibir*, Vol. 4, P. 204-210.

8. Tumanov V.V., Martynov G.P., 2017. Razvitie avtonomnogo apparatno-analiticheskogo kompleksa AAK12 dlya shakhtnoi seismorazvedki [Development of the AAK12 autonomous apparatus and analytical complex for mine seismic exploration]. 50 let Rossiiskoi nauchnoi shkole kompleksnogo osvoeniya nedr Zemli: sb. trudov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Moscow: IPKON RAN, P. 251 – 254.

9. Antsiferov A.V., Kamburova L.A., Tumanov V.V., Martynov G.P., Gladkov A.Yu., Balakin Yu.A., 2021. Modul'naya shakhtnaya seismorazvedochnaya stantsiya [Modular mine seismic survey station]. *Funda-mental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, Vol. 8, № 2, P.7-12.

10. Butyrin P.G., 2021. Tsifrovoy seismicheskii registrator "Ermak-5". Pyat' let razvitiya [Digital seismic recorder "Ermak-5". Five years of development]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, Vol. 3, № 3, P. 84-94.

11. Antsiferov A.V., Tumanov V.V., Martynov G.P., Gorbunov I.E., Moloshnikova N.B., Degovtsov I.V., Safin A.A., 2022. Seismometry i registry nyzkochastotnykh maloamplitudnykh seismicheskikh signalov [Seismometers and recorders of low-frequency low-amplitude seismic signals]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk*, № 16-17 (31-32), P. 18-32.

12. Tumanov V.V., Martynov G.P., Moloshnikova N.B., Degovtsov I.V., Gorbunov I.E., Safin A.A., 2023. Registrator mikrozeism [Microseismic recorder]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk*, № 20-21 (35-36), P. 27-32.

13. Martynov G.P., Gritsaenko A.Yu., Donchenko E.V., Moloshnikova N.B., 2024. Sinkhronizatsiya geofizicheskoi apparatury na mikroprotssorakh s mikrosekundnoi tochnost'yu [Synchronization of geophysical equipment on microprocessors with microsecond accuracy]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk*, № 2 (40), P. 123-134.

14. Martynov G.P., Tumanov V.V., Gritsaenko A.Yu., Borodin D.S., 2024. Analiz passivnykh i aktivnykh seismicheskikh nablyudenii na pole shakhty "Kalinovskaya-Vostochnaya" [Analysis of passive and active seismic observations in the field of the Kalinovskaya-Vostochnaya mine]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk*, Vol.1, № 3 (41), P. 232 - 245.

15. Yudakhin F.N., Kapustyan N.K., Shakhov E.V., 2008. Issledovaniya aktivnosti platformennykh territorii s ispol'zovaniem mikrozeism [Research on the activity of platform territories using microseisms]. *Ekaterinburg: UrO RAN*. 128 p.

16. Nadezhka L.I., Orlov R.A., Pivovarov S.P., Safronich I.N., Efremenko M.A., 2003. O svyazi parametrov seismicheskogo shuma s geologicheskimi i geodinamicheskimi osobennostyami voronezhskogo kristallicheskogo massiva [On the relationship of seismic noise parameters with geological and geodynamic features of the Voronezh crystalline massif]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, № 2, P. 179–185.

17. Orlov R.A., 2011. Opyt ispol'zovaniya mikrozeismicheskogo shuma dlya resheniya geologicheskikh zadach v usloviyakh platformy (na primere Voronezhskogo kristallicheskogo massiva) [Experience of using microseismic noise to solve geological problems in the conditions of the platform (using the example of the Voronezh crystal massif)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, № 1, P. 184–192.

18. Azarov A.V., Serdyukov A.S., 2023. Kompleks programm obrabotki dannykh mikrozeismicheskogo monitoringa razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [A set of programs for processing microseismic monitoring data for mining of mineral deposits]. *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 2, P. 58-71.

19. Safronich I.N., 2023. Vydelenie normal'noi i anomal'noi sostavlyayushchei seismicheskogo polya na urbanizovannykh territoriyakh [Identification of the normal and abnormal components of the seismic field in urbanized areas]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Kurazhkovskie chteniya". Astrakhan'*, P. 397-401.

20. Safronich I.N., Krasilov S.A., Kolesnikov S.I., Savenkov A.V., 2013. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya protsessora obrabotki signalov programmy WSG v nauchno-issledovatel'skoi rabote [Improving the efficiency of using the signal processing processor of the WSG program in research work]. *Sbornik materialov Vos'moi Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh". Obninsk*, P. 372-385.

21. Safronich I.N., 2022. Ispol'zovanie spektra Nakamury dlya zondirovaniya porod v krovle dokembriiskogo fundamenta [Using the Nakamura spectrum to probe rocks in the roof of the Precambrian basement]. *Sbornik statei III Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa "Luchshii issledovatel'skii proekt 2022". Petrozavodsk*, P. 114-124.

22. Danilov K.B., 2017. Vyyavlenie geologicheskikh neodnorodnostei v verkhnei chasti zemnoi kory na osnove analiza nizkochastotnykh mikrozeism (na primere Arkhangel'skoi oblasti) [Identification of geological inhomogeneities in the upper part of the Earth's crust based on the analysis of low-frequency microseisms (using the example of the Arkhangelsk region): dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 25.00.10. Federal'nyi issledovatel'skii tsentr kompleksnogo izucheniya Arktiki im. Akademika N.P. Laverova. Arkhangel'sk, 181p.

23. Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Kharazova Yu.V., Stepanova M.Yu., Koshevoi N.G., Andreeva N.V., Tsukanov A.A., Shmanatov G.V., Merzlikin Vol. I., 2025. Issledovanie glubinnogo stroeniya i tektoniki severnogo sklona Bol'shogo Kavkaza i zapadnoi chasti Tersko-Kaspiiskogo progiba po rezul'tatam mikrozeismicheskogo zondirovaniya [Investigation of the deep structure and tectonics of the northern slope of the Greater Caucasus and the western part of the Tersko-Caspian trough based on the results of microseismic sounding]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, № 15(2), P. 87–102.



ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 622.8:504

Лонский Олег Васильевич

кандидат технических наук, доцент
кафедры Безопасность жизнедеятельности,
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет,
614990, Пермский край, г. Пермь,
Комсомольский проспект, д.29
e-mail lov000@yandex.ru

Третьякова Полина Сергеевна

магистрант очной формы обучения направления
подготовки 20.04.01 Техносферная безопас-
ность, программа "Организация и управление
охраной труда и безопасностью производства",
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
e-mail info@tplusgroup.ru

**К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ
ОПТИМАЛЬНОГО
МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ
АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ
ФОРМИРОВАНИЙ НА ОПАСНЫХ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ
С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА**

Аннотация:

На предприятиях России более 340 тыс. опасных производственных объектов, в процессе эксплуатации которых высока вероятность аварий или аварийных ситуаций. Наряду с риском гибели людей и материального ущерба от аварии существуют и экологические риски (загрязнение природной среды, гибель фауны и флоры, изменение ландшафта местности (провалы) и т.д.). Главная задача аварийно-спасательного формирования на предприятии, где имеются опасные производственные объекты, – при возникновении чрезвычайной ситуации максимально быстро оказаться на месте аварийной ситуации, осуществить ее локализацию, спасение людей, предотвращение или уменьшение воздействия аварии на экологию (удаление загрязняющих веществ, тушение пожара и т.д.). Очевидно, что чем раньше аварийно-спасательное формирование прибывает на аварийный объект, тем меньше будет негативных последствий. Наличие на предприятии аварийно-спасательного формирования является одним из действенных методов управления экологическим риском, защищающих от аварий на опасных производственных объектах.

Многие предприятия (химические, нефтехимические, бурения и добычи нефти и газа, горно-обогатительные, пороховые и т.д.) имеют в своем составе ряд опасных производственных объектов, находящихся на территории предприятия на различных расстояниях.

В настоящее время нет официального документа, регулирующего порядок размещения ава-

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.099

Lonsky Oleg V.

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor
of the Department of Life Safety,
Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Prospekt, Perm, 614990
Perm Region,
e-mail lov000@yandex.ru

Tretyakova Polina S.

full-time Master's student
in the field of training 20.04.01
Technosphere safety,
program "Organization and management
of occupational safety and industrial safety",
Perm National Research Polytechnic University
e-mail info@tplusgroup.ru

**ON THE ISSUE OF CHOOSING
THE OPTIMAL LOCATION
FOR EMERGENCY RESCUE UNITS
AT HAZARDOUS PRODUCTION
FACILITIES IN ORDER TO REDUCE
ENVIRONMENTAL RISK**

Abstract:

There are more than 340 thousand hazardous production facilities at Russian enterprises. There is a high probability of accidents or emergency situations during the operation of these facilities. Along with the risk of loss of life and material damage from an accident, there are also environmental risks (pollution of the natural environment, loss of fauna and flora, changes in the landscape (sinkholes), etc.). The main task of an emergency rescue unit at an enterprise where there are hazardous production facilities is in case of an emergency at the facility. — to be at the scene of an emergency as quickly as possible, to localize it, rescue people, prevent or reduce the impact of an accident on the environment (removal of pollutants, fire extinguishing, etc.). Obviously, the sooner the rescue team arrives at the emergency facility, the fewer negative consequences there will be. The presence of an emergency rescue unit at the enterprise is one of the most effective methods of managing the environmental risk from accidents at hazardous production facilities. Many enterprises (chemical, petrochemical, mining, powder, etc.) include a number of hazardous production facilities that are located on the territory of the enterprise at various distances. Currently, there is no official document regulating the procedure for the deployment of an emergency rescue unit, in particular, at enterprises with several hazardous production facilities. In the studied literature, no methods have been proposed for solving the problem of determining the optimal location of an emergency rescue unit at enterprises. The paper considers three options for determining the conditionally optimal location of an emergency rescue unit at enterprises with a number of hazardous production facilities under certain assumptions.

рийно-спасательного формирования, в частности, на предприятиях, имеющих в своем составе несколько опасных производственных объектов. В литературе не предложено методов решения задачи определения оптимального расположения аварийно-спасательного формирования на предприятиях.

В работе рассмотрены три варианта определения условно оптимального расположения аварийно-спасательного формирования на предприятиях, имеющих в своем составе ряд опасных производственных объектов при определенных допущениях.

Ключевые слова: опасный производственный объект, расположение, оптимальность, расчет, экологический риск, координаты, взрывоопасность, радиус.

Key words: hazardous production facility, optimality, calculation, environmental risk, coordinates, explosion hazard, radius.

Введение

Экологический риск – вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды, вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера [1].

Критерии риска определяются вероятностью (или частотой) реализации неблагоприятных, опасных или катастрофических явлений и размером ущерба от реализации этих явлений. Управление риском – это разработка и реализация мероприятий по снижению риска.

В процессе эксплуатации опасных производственных объектов (ОПО) на предприятиях России высока вероятность аварий или аварийных ситуаций [2]. Существуют риски гибели людей и экологические риски (загрязнение природной среды, гибель фауны и флоры, изменение ландшафта местности (провалы) и т.д.), а также материальный ущерб от аварий. Основная задача аварийно-спасательного формирования (АСФ) на предприятии, где имеются ОПО, – при возникновении чрезвычайной ситуации максимально быстро оказаться на месте аварийной ситуации, осуществить ее локализацию, спасение людей, предотвращение или уменьшение воздействия аварии на экологию (удаление загрязняющих веществ, тушение пожара и т.д.). Очевидно, что чем раньше АСФ прибудет на аварийный объект, тем меньше будет негативных последствий. Наличие на предприятии АСФ является одним из действенных методов управления экологическим риском, защищающих от аварий на ОПО.

Около 100 млн человек или 70 % населения государства постоянно проживает в зонах возможных техногенных аварий. Поэтому обеспечение экологической безопасности является одной из главных задач для государства [3].

Техногенные аварии сегодня в России составляют около 80 % всех чрезвычайных ситуаций. При этом МЧС РФ отмечает, что, например, в период с 2003 по 2015 г. в авариях погибло более 26 человек, а пострадало свыше 5 млн человек.

При этом в большинстве случаев у пострадавших в авариях людей негативные последствия для здоровья возникают со временем и сразу после аварии не фиксируются [4].

В соответствии с Федеральным законом № 116-ФЗ [5] предприятия, имеющего ОПО 1, 2 класса опасности, обязаны иметь АСФ.

Изложение рассматриваемого вопроса

Размещение АСФ на предприятиях, имеющих в своем составе несколько ОПО, никакими нормативными документами конкретно не регулируется и чаще всего далеко не оптимальное. Это часто связано с тем, что предприятия развиваются и на их территории возникают новые ОПО, которые раньше не учитывались.

В процессе изучения литературных источников по данной тематике были обнаружены публикации по размещению АСФ на территории крупных объектов (районов, поселков, городов и т.д.) [6 – 11].

Цель работы – методика выбора оптимального места расположения АСФ на предприятиях.

При этом учитывается, что расстояния от одной точки до другой на плане предприятия при прямоугольной транспортной сети отличаются от расстояния по прямой.

Первый вариант

Постановка задачи:

1. Найти оптимальное расположение АСФ на предприятии.
2. Критерий оптимальности – минимальное расстояние от АСФ до самых удаленных ОПО.

Принятые допущения:

- 1) на предприятии прямоугольная сетка дорог;
- 2) скорость движения транспорта АСФ по предприятию одинакова;
- 3) все ОПО равноопасны и не взрывоопасны.

Решение

Решение задачи методами, предложенными в работах [12 – 14], невозможно.

На план предприятия наносим координатную сетку с шагом (например, 50 м). Координатные оси должны совпадать (быть параллельными) дорогам предприятия. Далее определяем координаты всех ОПО и точки 0 возможного расположения АСФ. Пример первого варианта расположения ОПО на территории предприятия представлен на рис. 1

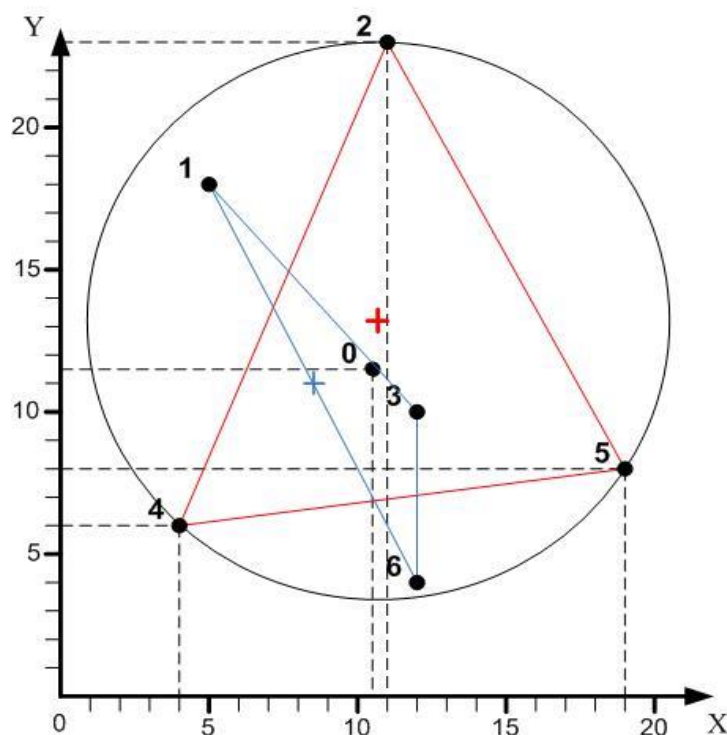


Рис. 1. Пример первого варианта расположения ОПО на территории предприятия

Расстояние $d_{1,2}$ от одной точки на предприятии до другой с учетом прямоугольной сетки дорог рассчитывается по следующей формуле:

$$d_{1,2} = |(X_1 - X_2)| + |(Y_1 - Y_2)|, \quad (1)$$

где X_1Y_1, X_2Y_2 – координаты точек 1 и 2 на плане предприятия.

Если есть координаты уже существующего АСФ, то можно проверить, насколько его расположение оптимально, путем расчета расстояний от каждого ОПО до АСФ. Необходимо так расположить АСФ, чтобы расстояния от наиболее удаленных ОПО до места предполагаемого расположения АСФ были равными.

Определить приблизительно координаты предполагаемого места расположения АСФ можно, определив центр окружности, описанной вокруг трех выбранных наиболее удаленных друг от друга ОПО. Это точки с координатами $X_2=11, Y_2=23, X_4=4, Y_4=6, X_5=19, Y_5=8$ (см. рис. 1), а координаты центра окружности будут $X=10,7, Y=13,2$ (крестик на рис. 1). Но расстояния до АСФ от ОПО на самом деле будут другие, так как сетка дорог прямоугольная.

Для нахождения координат точки 0 составим следующие равенства:

$$|(X_2 - X_0)| + |(Y_2 - Y_0)| = |(X_4 - X_0)| + |(Y_4 - Y_0)| = |(X_5 - X_0)| + |(Y_5 - Y_0)|, \quad (2)$$

где $X_2, Y_2, X_4, Y_4, X_5, Y_5, X_0, Y_0$, соответственно, координаты трех ОПО (2, 4, 5) и точки (0).

Исходя из этих равенств находим координаты т. 0.

Для нашего примера $X_0=10,5; Y_0=11,5$.

Остальные ОПО будут ближе к АСФ, чем самые удаленные ОПО. В реальных условиях АСФ надо располагать на территории предприятия в месте с координатами, близкими к координатам расчетной точки 0.

Такое решение справедливо, если точки расположения выбранных 3 ОПО образуют остроугольный треугольник. При тупоугольном треугольнике точка 0 находится посередине длинной стороны треугольника. На рис. 1 это показано на треугольнике с вершинами ОПО 1, 3, 6.

Второй вариант

Постановка задачи:

- 1) то же, что в 1 варианте;
- 2) критерий оптимальности – минимальное расстояние от АСФ до наиболее удаленных взрывоопасных ОПО.

Принятые допущения:

- 1) на предприятии прямоугольная сетка дорог;
- 2) скорость движения транспорта АСФ по предприятию одинакова;
- 3) ряд ОПО взрывоопасны.

Предварительно рассчитав координаты точки 0, как в нашем примере в первом варианте (см. рис. 1), при наличии взрывоопасных ОПО 1 и 2 из точек их расположения рисуем окружности радиусом, равным радиусу действия взрывной волны, например, для ОПО 1, 2. (рис. 2.)

Данные о радиусах взрывной волны имеются в ПЛАС этих ОПО или декларации промышленной безопасности каждого ОПО. Если точка 0, рассчитанная по первому варианту, попадает в зону действия взрывной волны хотя бы от одного ОПО, то будет необходимо перенести точку 0 в ближайшее место, где нет действия взрывной волны от ОПО, например, в точку 0_1 . Проверку можно выполнить, если рассчитать по формуле (3) расстояние по прямой между взрывоопасными объектами и выбранной точкой расположения АСФ и сравнить их с радиусом зоны разрушения взрывной волной:

$$d = \sqrt{(X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2}, \quad (3)$$

где d – расстояние между точками на плоскости по прямой; X_0Y_0, X_iY_i – координаты, соответственно, точки расположения АСФ и координаты i ОПО производственного объекта предприятия.

Расстояния от ОПО до точки 0_1 должны быть больше радиуса зоны разрушения.

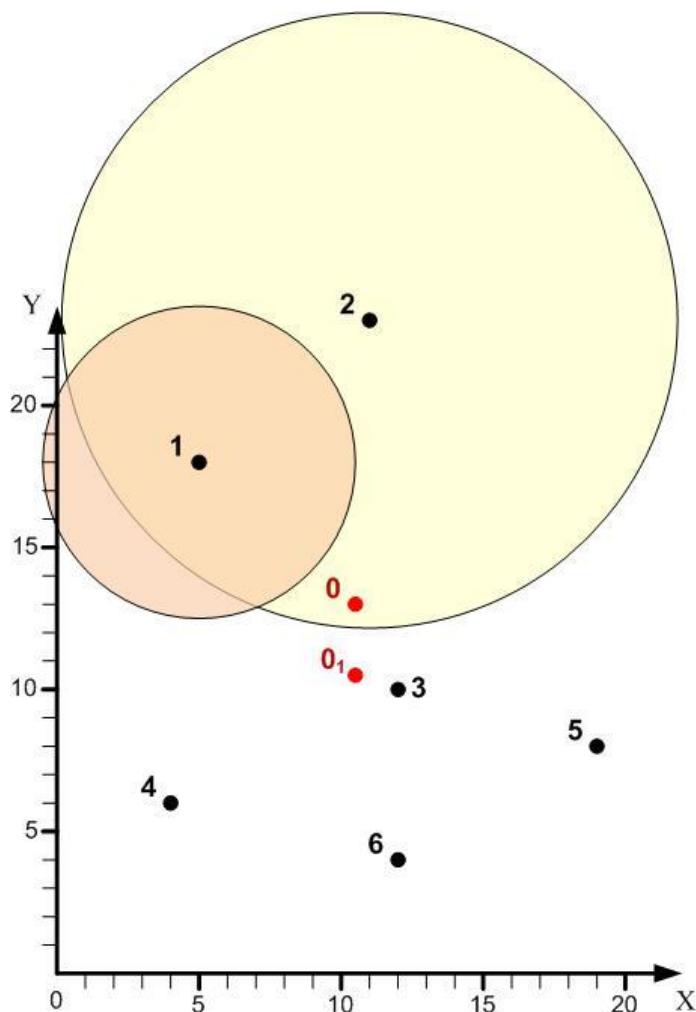


Рис. 2. Пример второго варианта расположения ОПО на территории предприятия

Третий вариант

Постановка задачи:

- 1) то же, что в 1 варианте;
- 2) критерий оптимальности – минимальное расстояние от АСФ до наиболее удаленных ОПО.

Принятые допущения:

- 1) на предприятии прямоугольная сетка дорог;
- 2) скорость движения транспорта АСФ по предприятию одинакова;
- 3) ОПО невзрывоопасны;
- 4) Предприятие, на котором невзрывоопасные ОПО располагаются практически на одной прямой (рис. 3).

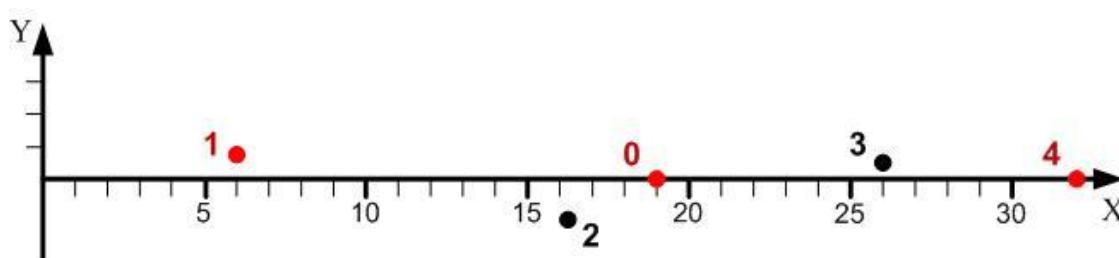


Рис. 3. Пример третьего варианта расположения ОПО на территории предприятия

Тогда точка 0, где должно располагаться АСФ, будет находиться посередине расстояния между наиболее удаленными ОПО.

Возможны и другие комбинации расположения различных ОПО на территории предприятия.

Предложенная методика, основанная на известных формулах аналитической геометрии и элементарной логике, может использоваться для проверки оптимальности расположения газоспасательных, пожарных, горноспасательных, других АСФ на химических, нефтехимических, горных, иных предприятиях, эксплуатирующих ОПО.

Крупные предприятия могут иметь не одну АСФ. Тогда площадка разбивается на несколько участков. В этом случае придется условно разбить территорию предприятия на участки, которые будут обслуживать отдельные АСФ и решать задачу для них.

Заключение

Таким образом, рассмотрены методы практического определения или проверки оптимального месторасположения АСФ на предприятиях, эксплуатирующих несколько ОПО при определенных допущениях.

Список литературы

1. *Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 28.12.2025) "Об охране окружающей среды"* URL: https://rpn.gov.ru/upload/iblock/67a/kdnkvwxgx3eu6q7_nn029g40uxe034z05/1.-Federalnyy-zakon-ot-10.01.2002-N-7_FZ-_red.-ot-28.12.2025_.pdf (дата обращения 04.03.2026)
2. Хан К.А., 2017. Влияние эксплуатации опасных производственных объектов на современное состояние экологии в России. *Вопросы российского и международного права*, Том 7, № 2А, С. 151-159
3. Воробьев Ю.Л., Владимиров В.А., 2016. *Катастрофы и государство*. Москва: Энергоатомиздат, 318 с.
4. Шахраманьян М.А., Акимов В.А., Козлов К.А., 2016. *Оценка природной и техногенной безопасности России. Теория и практика*. Москва: ФИД «Деловой экспресс», 422 с.
5. *Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 № 116-ФЗ*. URL: <http://nvol.gosnadzor.ru/activity/control/prombez/fz116.pdf> (дата обращения 04.03.2026)
6. Гусев С.А., 2017. Оптимальное расположение спасательных служб. *Транспортное дело России*, № 6, С. 72–79.
7. В.В. Харин и др., 2022. Технологии математического моделирования для определения оптимальных мест дислокации специализированных пожарно-спасательных частей. *Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф.* Красноярск, С. 12-18. EDN: FXHTPE.
8. Матюшев П.А., Зарипова С.Н., 2021. О моделировании оптимального размещения аварийно-спасательных формирований на территории субъекта Российской Федерации. *Моделирование сложных процессов и систем: сб. трудов секции № 12 XXXI Междунар. науч.-практ. конф.* Химки, С. 5–16. EDN: MBZYVE.
9. Дурнев Р.А. и др., 2025. Обоснование рациональных мест размещения аварийно-спасательных сил на основе риск-ориентированных подходов. *Проблемы анализа риска*, Т. 22, № 2, С. 58–65. EDN CCFUXS.
10. T. Ferrari et al., 2018. Analysis of the location of rescue ambulance dispatch bases: a case study in Rio de Janeiro, Brazil. *Geographical Analysis*, Vol. 50, № 4, P. 397–421.
11. Akbari A., Eiselt H.A., Pelot R.A., 2018. Maritime search and rescue location analysis considering multiple criteria, with simulated demand. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, Vol. 56, № 1, P. 92–114.

12. Просветов Г.И., 2008. *Математические методы в логистике: задачи и решения: Учебно-практическое пособие*. Москва: Изд-во «Альфа-Пресс», 304 с.

13. Бурков В.Н. и др., 2001. *Теория графов в управлении организационными системами*. Москва: СИНТЕГ, 124 с.

14. Кузнецов О.П., 2009. *Дискретная математика для инженера*. Санкт-Петербург: Изд-во «Лань», 400 с.

References

1. Federal'nyi zakon ot 10.01.2002 N 7-FZ (red. ot 28.12.2025) "Ob okhrane okruzhayushchei sredy" [Federal Law No. 7-FZ of 10.01.2002 (as amended on 12/28/2025) "On Environmental Protection"] URL: https://rpn.gov.ru/upload/iblock/67a/kdnkvwxgx3eu6q7nn029g40uxe034z05/1.-Federalnyy-zakon-ot-10.01.2002-N-7_FZ-_red.-ot-28.12.2025_.pdf (data obrashcheniya 04.03.2026)

2. Khan K.A., 2017. Vliyanie ekspluatatsii opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov na sovremennoe sostoyanie ekologii v Rossii [Impact of the operation of hazardous production facilities on the current state of the environment in Russia]. *Voprosy rossiiskogo i mezhdunarodnogo prava*, Vol. 7, № 2A, P. 151-159

3. Vorob'ev Yu.L., Vladimirov V.A., 2016. *Katastrofy i gosudarstvo* [Disasters and the state]. Moscow: Energoatomizdat, 318 p.

4. Shakhraman'yan M.A., Akimov V.A., Kozlov K.A., 2016. *Otsenka prirodnoi i tekhnogennoi bezopasnosti Rossii* [Assessment of natural and man-made safety of Russia. Theory and practice]. *Teoriya i praktika*. Moscow: FID "Delovoi ekspres", 422 p.

5. Federal'nyi zakon "O promyshlennoi bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov" [Federal Law "On Industrial Safety of Hazardous Industrial Facilities"] ot 21.07.1997 № 116-FZ. URL: <http://nvol.gosnadzor.ru/activity/control/prombez/fz116.pdf> (data obrashcheniya 04.03.2026)

6. Gusev S.A., 2017. Optimal'noe raspolozhenie spasatel'nykh sluzhb [The optimal location of rescue services]. *Transportnoe delo Rossii*, № 6, P. 72–79.

7. V.V. Kharin i dr., 2022. *Tekhnologii matematicheskogo modelirovaniya dlya opredeleniya optimal'nykh mest dislokatsii spetsializirovannykh pozharno-spasatel'nykh chastei* [Mathematical modeling technologies for determining the optimal locations of specialized fire and rescue units]. *Monitoring, modelirovanie i prognozirovaniye opasnykh prirodnykh yavlenii i chrezvychainykh situatsii: sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Krasnoyarsk*, P. 12-18. EDN: FXHTPE.

8. Matyushev P.A., Zaripova S.N., 2021. *O modelirovanii optimal'nogo razmeshcheniya avariino-spasatel'nykh formirovaniy na territorii sub"ekta Rossiiskoi Federatsii* [On modeling the optimal deployment of emergency rescue units on the territory of a constituent entity of the Russian Federation]. *Modelirovanie slozhnykh protsessov i sistem: sb. trudov sektsii № 12 XXXI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Khimki*, P. 5–16. EDN: MBZYVE.

9. Durnev R.A. i dr., 2025. *Obosnovaniye ratsional'nykh mest razmeshcheniya avariino-spasatel'nykh sil na osnove risk-orientirovannykh podkhodov* [Justification of rational locations of emergency rescue forces based on risk-oriented approaches]. *Problemy analiza riska*, Vol. 22, № 2, P. 58–65. EDN CCFUXS.

10. T. Ferrari et al., 2018. Analysis of the location of rescue ambulance dispatch bases: a case study in Rio de Janeiro, Brazil. *Geographical Analysis*, Vol. 50, № 4, P. 397–421.

11. Akbari A., Eiselt H.A., Pelot R.A., 2018. Maritime search and rescue location analysis considering multiple criteria, with simulated demand. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, Vol. 56, № 1, P. 92–114.
12. Prosvetov G.I., 2008. *Matematicheskie metody v logistike: zadachi i resheniya: Uchebno-prakticheskoe posobie [Mathematical methods in logistics: tasks and solutions: An educational and practical guide]*. Moscow: Izd-vo "Al'fa-Press", 304 p.
13. Burkov V.N. i dr., 2001. *Teoriya grafov v upravlenii organizatsionnymi sistemami [Graph theory in the management of organizational systems]*. Moscow: SINTEG, 124 p.
14. Kuznetsov O.P., 2009. *Diskretnaya matematika dlya inzhenera [Discrete mathematics for an engineer]*. Sankt-Peterburg: Izd-vo "Lan", 400 p.