**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

**ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ**

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ ГОРНЫХ НАУК**

# ОТЧЕТ

# О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНОГО СОВЕТА РАН ПО ПРОБЛЕМАМ ГОРНЫХ НАУК И КРАТКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ УЧРЕЖДЕНИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ ГОРНОГО ПРОФИЛЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И СТРАН СНГ В 2025 ГОДУ

Председатель Научного совета РАН
академик РАН **В.Н.Захаров**

Ученый секретарь
канд.техн.наук **А.Г.Красавин**

МОСКВА 2026

УДК 622.01

**Отчет о деятельности Научного совета РАН по проблемам горных наук и краткие результаты научно-исследовательских работ учреждений и организаций горного профиля Российской Федерации и стран СНГ в 2025 году. Составители: акад. В.Н.Захаров, канд. техн. наук А.Г.Красавин. – М.: ИПКОН РАН, 2026. – 140 с.**

Приведены сведения о деятельности Научного совета РАН по проблемам горных наук в 2024 году и результаты научно-исследовательских работ в данной области по материалам академических, отраслевых и учебных институтов и других организаций горного профиля Российской Федерации и ряда стран СНГ. Материалы, представленные в Отчете, приведены в редакции организаций, приславших краткие результаты важнейших исследований в области горных наук. Качество печати иллюстраций полностью соответствует качеству представленных оригиналов. Отчет не претендует на полноту изложения научной деятельности учреждений, представивших информацию, его цель – дать представление широкой горной общественности о проводимых в организациях исследованиях.

ISBN 978-5-6047951-1-5

**© В.Н.Захаров, А.Г.Красавин**

**© ИПКОН РАН, 2026**

# СОДЕРЖАНИЕ


Стр.

**I. ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НАУЧНОГО СОВЕТА** 5

**II. РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

2.1. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР ИМ. АКАДЕМИКА Н.В.МЕЛЬНИКОВА РАН (ИПКОН РАН) ..... 18

2.2. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР ИМЕНИ АКАДЕМИКА М.А.САДОВСКОГО РАН (ИДГ РАН) ..... 25

2.3. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ХАБАРОВСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА ДВО РАН (ИГД ДВО РАН) ..... 31

2.4. ИНСТИТУТ УГЛЯ ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА УГЛЯ И УГЛЕХИМИИ СО РАН (ИУ ФИЦ УУХ СО РАН) ..... 36

2.5. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ЯКУТСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СЕВЕРА ИМ. Н.В.ЧЕРСКОГО СО РАН (ИГДС СО РАН) ..... 45

2.6. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА УрО РАН (ИГД УрО РАН) ..... 52

2.7. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР. ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ УрО РАН (ГИ УрО РАН) ..... 60

2.8. ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ – ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР» РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ГоИ КНЦ РАН) ..... 66

2.9. ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ СЕВЕРА – ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИППЭС КНЦ РАН) ..... 70

2.10. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ВСЕРОССИЙСКИЙ ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ РАН (ВИНИТИ РАН) ..... 72

2.11. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУК ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ДВО РАН ..... 77

2.12. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ ИМ. О.Ю.ШМИДТА РАН ..... 80

2.13. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ АКАДЕМИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ГОРНОЙ ГЕОЛОГИИ, ГЕОМЕХАНИКИ, ГЕОФИЗИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ..... 82

2.14. ИНСТИТУТ «ЯКУТНИПРОАЛМАЗ» ..... 92

2.15. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРЖДОНИКИДЗЕ ..... 106

2.16. САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМПЕРАТРИЦЫ ЕКАТЕРИНЫ II ..... 116

2.17. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ТулГУ) ..... 124

2.18. ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (ДГФУ) ..... 126

2.19. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» ..... 128

2.20. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И.НОСОВА» ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА И ТРАНСПОРТА ..... 130

2.21. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (УГГУ) ..... 131

2.22. КУЗБАСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т.Ф.ГОРБАЧЕВА ..... 132

2.23. ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ИНСТИТУТ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ» ..... 136

# I. ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НАУЧНОГО СОВЕТА РАН ПО ПРОБЛЕМАМ ГОРНЫХ НАУК

Основная деятельность Научного совета РАН по проблемам горных наук заключается в обобщении и популяризации новых знаний в области горных наук, содействии выполнения научных работ по комплексному эффективному освоению недр Земли, организации и проведении конференций и симпозиумов по актуальным проблемам, поддержке практического использования результатов исследований (в соответствии с Положением о Научном совете (утверждено Постановлением Бюро Отделения наук о Земле РАН 09.07.2003г. №3000/7-55.6).

В соответствии с Постановлениями Бюро Отделения наук о Земле РАН от 31 января 2023г. № 13000/2-3 были внесены дополнения в состав Научного совета РАН по проблемам горных наук, связанные с организационными изменениями. На основании представления председателя Научного совета РАН по проблемам горных наук при Отделении наук о Земле РАН академика РАН В.Н.Захарова утвержден следующий состав Совета:

***Бюро научного совета***

| | |
|---|---|
| **Захаров Валерий Николаевич** | академик РАН, директор Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН (ИПКОН РАН), **председатель Совета** |
| **Барях Александр Абрамович** | академик РАН, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, **заместитель председателя Совета** |
| **Каплунов Давид Родионович** | член-корреспондент РАН, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, (ИПКОН РАН), **заместитель председателя Совета** |
| **Красавин Александр, Германович** | к.т.н., Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН (ИПКОН РАН), **ученый секретарь Совета** |
| **Бортников Николай Стефанович** | академик РАН, Отделение наук о Земле РАН (ОНЗ РАН) |
| **Клишин Владимир Иванович** | член-корреспондент РАН, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН |
| **Литвиненко Владимир Стефанович** | д.т.н., Санкт-Петербургский горный университет |
| **Лукичев Сергей Вячеславович** | д.т.н., Горный институт федерального исследовательского центра КНЦ РАН (ГоИ КНЦ РАН) |
| **Панов Юрий Петрович** | к.т.н., Российский геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (РГГРУ) |
| **Рассказов Игорь Юрьевич** | член-корреспондент РАН, Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН |
| **Соколов Игорь Владимирович** | д.т.н., Институт горного дела УрО РАН (ИГД УрО РАН) |
| **Трубецкой Климент Николаевич** | академик РАН, советник РАН, принимает участие в работе Президиума РАН |
| **Чантурия Валентин Алексеевич** | академик РАН, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН (ИПКОН РАН) |
| **Черникова Алевтина Анатольевна** | д.э.н., НИТУ «МИСиС» |

***Члены научного совета***

| | |
|---|---|
| **Артемьев Владимир Борисович** | д.т.н., ПАО «Еврохим» |

| | |
|---|---|
| **Викторов Сергей Дмитриевич** | д.т.н., Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН (ИПКОН РАН) |
| **Владимиров Дмитрий Ярославович** | к.т.н., Группа компаний «Цифра» |
| **Грабский Анатолий Адольфович** | д.т.н., Российский геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (РГГРУ) |
| **Душин Алексей Владимирович** | д.э.н., Уральский государственный горный университет (УГГУ) |
| **Казанин Олег Иванович** | д.т.н., Санкт-Петербургский горный университет |
| **Калабин Геннадий Валерианович** | д.т.н. Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН (ИПКОН РАН) |
| **Качурин Николай Михайлович** | д.т.н., Институт горного дела и строительства Тульского государственного университета |
| **Клебанов Алексей Феликсович** | к.т.н., Группа компаний «Цифра» |
| **Коваленко Виктор Сергеевич** | д.т.н., Горный институт НИТУ «МИСиС» |
| **Козырев Анатолий Александрович** | д.т.н., Горный институт федерального исследовательского центра КНЦ РАН (ГоИ КНЦ РАН) |
| **Корнилков Сергей Викторович** | д.т.н., Институт горного дела УрО РАН (ИГД УрО РАН) |
| **Курленя Михаил Владимирович** | академик РАН, Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН (ИГД СО РАН) |
| **Левин Лев Юрьевич** | член-корреспондент РАН, Горный институт Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (ГИ УрО РАН) |
| **Мясков Александр Викторович** | д.э.н., Горный институт НИТУ «МИСиС» |
| **Санфиров Игорь Александрович** | д.т.н., Горный институт Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (ГИ УрО РАН) |
| **Сорокин Андрей Анатольевич** | член-корреспондент РАН, Институт геологии и природопользования ДВО РАН (ИГиП ДВО РАН) |
| **Тихоцкий Сергей Андреевич** | член-корреспондент РАН, Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (ИФЗ РАН) |
| **Ткач Сергей Михайлович** | д.т.н., Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского федерального исследо-вательского центра «Якутский научный центр СО РАН» (ИГДС СО РАН) |
| **Турунтаев Сергей Борисович** | д.ф.-м.н., Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН) |
| **Хмелинин Алексей Павлович** | к.т.н., Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН (ИГД СО РАН) |
| **Черкасов Сергей Владимирович** | д.т.н., Государственный геологический музей им В.И.Вернадского РАН |
| **Шулюпин Александр Николаевич** | д.т.н., Институт горного дела Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН (ИГД ДВО РАН) |
| **Яковлев Виктор Леонтьевич** | член-корреспондент РАН, Институт горного дела УрО РАН (ИГД УрО РАН) |
| **Яковлев Алексей Николаевич** | к.ф.-м.н., Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф.Горбачева (КузГТУ) |

В состав Научного совета РАН по проблемам горных наук вошли директора академических, отраслевых и учебных институтов горного профиля, 6 академиков РАН,

7 членов-корреспондентов РАН, представители ведущих вузов и отраслевых институтов: всего 39 специалистов горного и геологического профиля.

• С 04.02.2025г. по 07.02.2025г. члены Научного совета РАН принимали участие в организации и проведении XXXIII Международного симпозиума «Неделя горняка - 2025» на базе Горного института НИТУ «МИСиС».

Международный научный симпозиум «Неделя горняка» — крупнейшее ежегодное научно-практическое мероприятие горнопромышленной направленности в России.

Уже более 30 лет симпозиум объединяет представителей бизнеса, власти, научного и образовательного сообществ со всего мира. На «Неделе горняка» обсуждаются современные проблемы и инновации горнопромышленного комплекса, представляются ведущие разработки и исследования представителей горных школ России и Европы.

**Научные направления Симпозиума**

- инженерная геология и маркшейдерское дело;
- инженерная геофизика, геомеханика, геодинамика;
- геотехнология подземная и открытая;
- безопасность горного производства;
- охрана окружающей среды в промышленных регионах;
- роботизированные технологии и механизация горных предприятий;
- обогащение и глубокая переработка полезных ископаемых;
- информационные технологии в горном деле;
- управление и экономика на горных предприятиях;
- энергетика и повышение энергоэффективности промышленных предприятий;
- строительство подземных сооружений и горных предприятий.

В рамках программы научного симпозиума «Неделя горняка - 2025» 05 февраля 2025 года под руководством председателя Научного совета РАН по проблемам горных наук академика РАН ***В.Н.Захарова*** было проведено заседание Научного совета РАН по проблемам горных наук с участием сотрудников ИПКОН РАН, ведущих специалистов Горного института НИТУ «МИСиС» и ряда отечественных представителей организаций горного профиля. Заседание проходило как очно, так и в ОНЛАЙН режиме.

**Очно присутствовали:** ***академик РАН В.Н.Захаров*** (директор ИПКОН РАН, председатель НС РАН по проблемам горных наук), ***академик РАН А.А.Барях*** (научный руководитель ГИ УрО РАН, зам. председателя НС РАН по проблемам горных наук), ***проф., д.э.н. А.В.Мясков*** (директор Горного института НИТУ «МИСиС), ***д.т.н. В.С.Коваленко*** (в.н.с. ИПКОН РАН), ***к.т.н. А.П.Хмелинин*** (директор ИГД СО РАН), ***к.т.н. А.Г.Красавин*** (ученый секретарь НС РАН, с.н.с. ИПКОН РАН), ***к.т.н. А.Ф.Клебанов*** (директор по науке ГК «Цифра»), ***д.т.н. С.В.Лукичев*** (директор ГоИ КНЦ РАН), ***чл.-корр. РАН И.Ю.Рассказов*** (директор ХФИЦ ДВО РАН)***, д.т.н. С.М.Ткач*** (директор ИГДС СО РАН), ***проф., д.т.н. И.И.Айнбиндер*** **(**гл.н.с. ИПКОН РАН**)***, проф., д.т.н. С.С.Кубрин (зав.лаб., ИПКОН РАН), к.т.н. А.В.Шляпин*** (зам. директора ИПКОН РАН), ***д.т.н. О.Н.Малинникова*** (в.н.с. ИПКОН РАН),), ***проф., д.т.н. С.Б.Кулибаба*** (в.н.с. ИПКОН РАН), ***к.т.н. Е.В.Федоров*** (зав. отделом ИПКОН РАН), ***к.т.н. Е.В.Мазаник*** (ООО «Сибкор»), ***к.т.н. А.В.Подгаецкий*** (с.н.с. ИПКОН РАН), ***д.т.н. А.В.Зайцев*** (зам.директора ГИ УрО РАН), ***д.т.н. А.А.Глухов*** (зам.директора ФГБНУ РАНИМИ), ***д.т.н. В.А.Атрушкевич*** (в.н.с. ИПКОН РАН), ***д.т.н. В.А.Еременко (***лиректор НИЦ НИТУ «МИСиС»).

Участвовали в ОНЛАЙН режиме: ***чл.-корр. РАН Д.Р.Каплунов*** (зам. председателя НС РАН по проблемам горных наук, г.н.с. ИПКОН РАН), ***чл.-корр. РАН Л.Ю.Левин*** (зам. директора ГИ УрО РАН), представители и специалисты из других организаций горного профиля.

Как отметил председатель НС РАН по проблемам горных наук акад. РАН В.Н.Захаров, Научный совет традиционно встречается и проводит свои заседания во время работы Международного симпозиума «Неделя горняка». В.Н.Захаров поблагодарил ректора НИТУ «МИСиС» д.э.н. А.А.Черникову и директора Горного института НИТУ «МИСиС» д.э.н. А.В.Мяскова за предоставление возможности проведения заседания в прекрасно оснащенной аудитории и создание деловой и дружеской атмосферы.

Традиционная повестка заседания Научного совета в 2025 г. была немного скорректирована. Повестка заседаний в прежние годы предполагала чередование докладов из Горного института НИТУ «МИСиС» и ИПКОН РАН. В 2025г. попросили сделать доклад коллег из Перми, акад. РАН А.А.Барях любезно согласился на это предложение, была сформусформулирована рассматриваемая для обсуждения проблема и кто ее будет докладывать.

На заседании Научного совета РАН по проблемам горных наук был заслушан и обсужден доклад заместителя директора Горного института УрО РАН докт. техн. наук ***Зайцева Артема Вячеславовича*** на тему: ***«Современные решения обеспечения аэрологической безопасности на горнодобывающих предприятиях».***

Современные условиях добычи твердых полезных ископаемых характеризуются тенденциями увеличения глубины и ширины фронта ведения горных работ, вовлечением в отработку все более труднодоступных запасов. Это приводит к усложнению сети горных выработок и технологий вентиляции подземных рабочих зон. В качестве примера можно привести системы вентиляции рудников Норильского промышленного района, некоторые из которых характеризуются одновременной работой несколько главных вентиляторных установок и использованием для подачи и выдачи воздуха более чем десяти вскрывающих выработок. Наряду с этим для увеличения технико-экономических показателей добычи, особенно при отработке наиболее удаленных фланговых запасов месторождений, внедряются новые схемы подготовки и очистной выемки. Например, сейчас на практике все чаще применяются способ отработки с применением тупиковых очистных камер, элементы последовательного проветривания участков ведения горных работ в силу разветвленной сети горных выработок. При этом увеличение глубины разработки месторождений приводит к необходимости вести горные работы с учетом фактора теплового режима, когда температура окружающего породного массива достигает +40 °С и выше.

Все эти особенности требуют разработки и реализации современных решений в части обеспечения аэрологической безопасности разработки месторождений в новых усложняющихся условиях. С точки зрения вентиляции обоснование безопасных параметров проветривания сложных систем вентиляции требует научного подхода и разработки соответствующих компенсирующих мероприятий.

Для обоснования параметров проветривания тупиковых камер большого сечения активно применяются современные численные методы, которые верифицируются результатами экспериментальных исследований с возможностями современной приборной базы. На рисунок 1 приведены результаты измерений газовой динамики атмосферы рабочей зоны у тупиковой очистной камеры и результаты численного моделирования параметров ее проветривания. По результатам исследований установлены различные механизмы проветривания объемов очистного пространства до и после развала отбитой горной массы, что позволило обосновать параметры проветривания и предельные времена технологических процессов.

В тоже время, обеспечение безопасности разработки такого рода новых объектов проветривания требует учета всех факторов, что в настоящее время реализуется через механизм разработки Обоснования безопасности опасного производственного объекта согласно требованиям Федерального закона 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

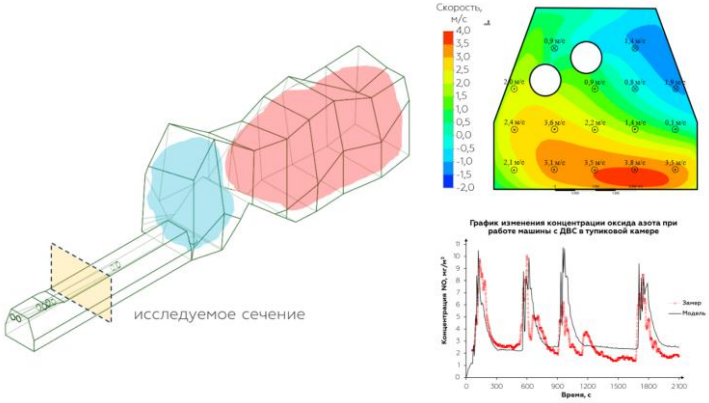



**Рисунок 1 – Результаты теоретических и экспериментальных исследований аэрогазодинамики тупиковых очистных камер**

На основании выполненных исследований было установлено, что для исключения рисков возникновения опасных ситуаций в сложных системах вентиляции требуется реализация компенсирующих мероприятий на основе систем автоматического контроля и управления параметрами проветривания. Данные системы включают в себя специально разработанные средства: автоматическую замерную станцию, позволяющую в непрерывном режиме контролировать подачу воздуха и газовый состав воздуха в рабочей зоне, и автоматическую вентиляционную дверь, обеспечивающую регулирование подачи воздуха и его перераспределение в нормальном и аварийном режимах вентиляции рудника (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Автоматическая замерная станция (слева) и автоматическая вентиляционная дверь (справа)**

На сегодняшний день разработаны оригинальные алгоритмы обработки данных измерений с автоматических замерных станций, позволяющие контролировать не только данные прямых измерений, но и осуществлять прогнозирование расходов воздуха и концентраций газов во всей сети горных выработок на основе цифровой вентиляционной модели рудника. Кроме того, разработаны алгоритмы автоматического управления проветриванием, которые могут обеспечивать снижение энергопотребления главных вентиляторных установок, а в аварийных режимах резко уменьшать объем задымленных выработок за счет локализации продуктов горения.

Решение задачи обеспечения теплового режима при освоении глубокозалегающих запасов также основано на научном подходе, включающем экспериментальные исследования, численное моделирование и разработку оригинальных решений, отвечающих текущим горнотехническим условиям рудников. На рисунок 3 представлен интерфейс специально разработанного на основе многолетних экспериментальных и теоретических исследованиях модуль прогнозирования теплового режима глубоких шахт и рудников, реализованный в программном комплексе «АэроСеть».

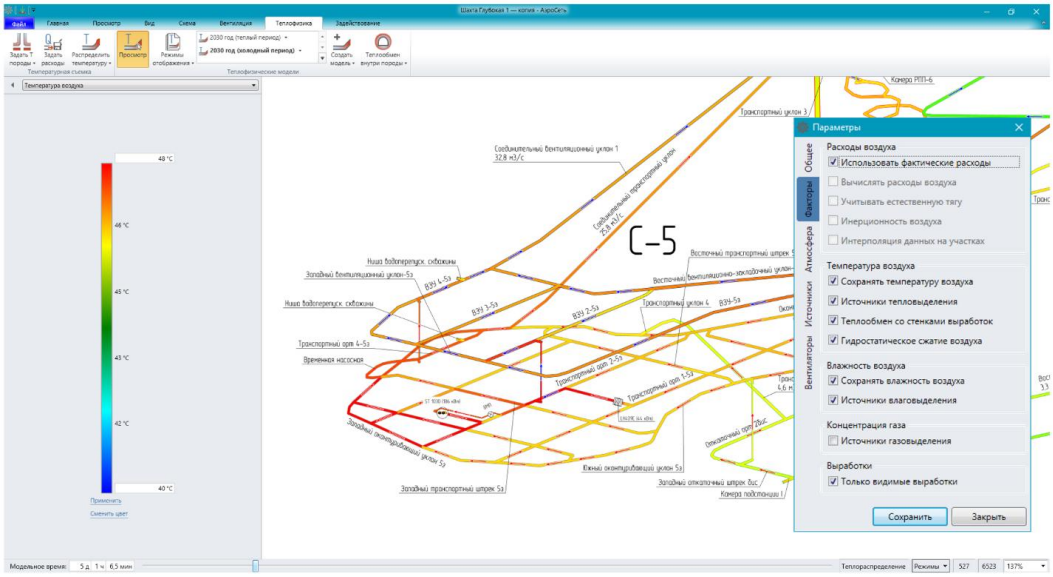



**Рисунок 3 – Модуль теплогазодинамического расчета программного комплекса «АэроСеть» для прогнозирования теплового режима глубокого рудника**

На основе данного модуля разработаны и внедрены в практику ряд систем кондиционирования глубоких рудников мощностью от 180 кВт (локально для забоя) до 6 МВт (центральные системы с распределенной подачей на залежи). На рисунок 4 приведены технические элементы одной из разработанных систем для подземного охлаждения воздуха при освоении запасов богатых руд на глубинах до 1600 метров с температурой горных пород до +39°С.



**Рисунок 4 – Воздухоохладитель подземной рабочей зоны (слева) и центральная холодильная машина (справа) на глубоком руднике**

Наибольшую эффективность мероприятия по обеспечению теплового режима глубоких рудников имеют в случае дифференцированного подхода, когда их разработка ведется с учетом индивидуальных горнотехнических и теплофизических условий рудника. Так, при высоких температурах окружающего породного массива актуальным является учет механизма лучистого теплообмена, для расчета которого разработана специальная математическая модель, учитывающая непосредственно механизм лучистого теплообмена, движение забоя горной выработки, тепловыделения от горных машин и вентиляторов местного проветривания. Пример результатов такого динамического расчета приведен на рисунок 5.

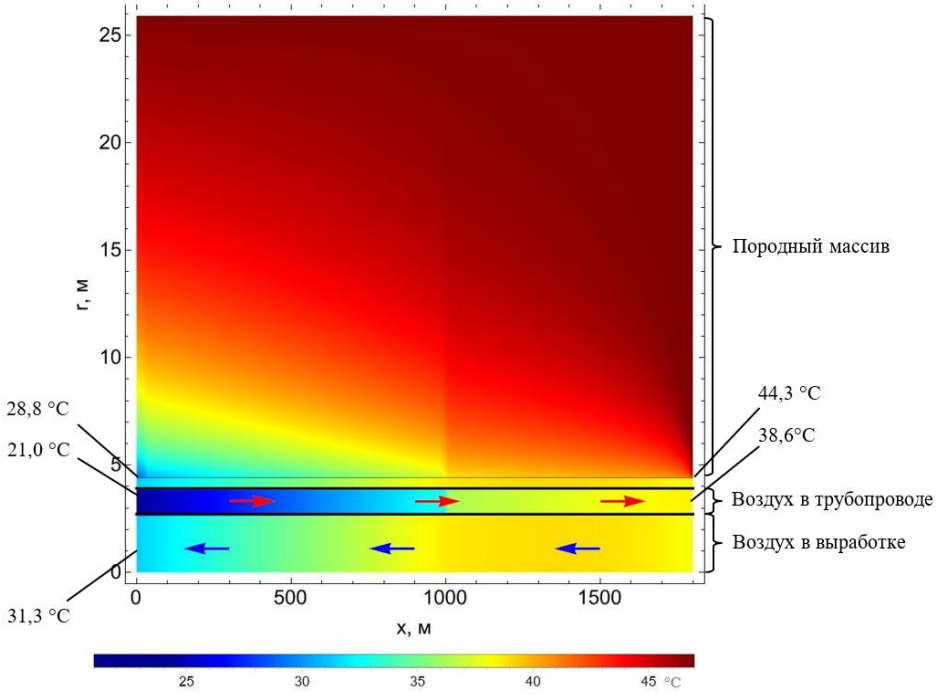



**Рисунок 5 – Динамический расчет теплораспределения в массиве горных пород, рудничной атмосфере и вентиляционном трубопроводе с учетом лучистого теплообмена и движения забоя горной выработке**

Такие детальные модели позволяют производить адекватное моделирование теплового режима горных выработок на этапе их строительства и эксплуатации, разрабатывать оригинальные горнотехнические мероприятия, основанные, например, на теплоизоляции вентиляционных трубопроводов. Это позволяет как максимальным образом улучшить

микроклиматические условия в забоях до момента применения систем кондиционирования, так и минимизировать нагрев охлажденного воздушного потока при работе подземных воздухоохладителей, тем самым повышая эффективность их работы.

Также актуальным является обоснование системы нормирования микроклиматических условий с учетом особенностей формирования теплового режима шахты или рудника и тяжести выполняемых работ. Такого рода системы нормирования разработаны совместно со специалистами по гигиене труда, внедрены на глубоких рудниках нашей страны и получили нормативное обоснование через разработку Обоснований безопасности опасных производственных объектов. Компенсирующие мероприятия при этом включают как технические решения по улучшению микроклиматических условий, так и организационные решения, предусматривающие мероприятия по контролю параметров воздушной среды, обеспечение рабочих питьевой водой и регламентирование режима труда и отдыха.

Вопросы к докладчику:

***Д.т.н. Атрушкевич В.А. (ИПКОН РАН).*** Влажность и на поверхности, и в моделях должна учитываться. Плотность меняется от влажности и теплоперенос тоже. Учитывалась в Ваших исследованиях запыленность?

***Д.т.н. Малинникова О.Н. (ИПКОН РАН).*** Вы в своем докладе сообщили, что наблюдаются разные температуры на разной глубине. С чем это связано? Просматривается ли это с глубиной, разные потоки воздуха, флюиды? На угольных шахтах получены результаты, свидетельствующие о том, что на глубине значительно теплее. А здесь как происходит?

***Д.т.н. Ткач С.М. (ИГДС СО РАН).*** В докладе не прозвучала информация о проветривании горных выработок, аэрология горных пород, все то, что не только обеспечивает безопасность горных работ, но и безопасность с точки зрения отдельных горных выработок.

***Чл.-корр. РАН Каплунов Д.Р. (ИПКОН РАН).*** Глубокая констатация существующего положения на сегодняшний день при разработке руд на больших глубинах, Скажите, пожалуйста, какими технологическими мероприятиями можно было бы снизить влияние тех негативных факторов, о которых Вы докладывали? Роботизация очистной выемки полностью снимет вопросы комфортного тепла в горных выработках?

***Д.э.н. Мясков А.В. (Горный институт НИТУ «МИСиС»).*** Могут получаться какие-то дополнительные эффекты, если их представить системно или разрозненно, и могут ли они быть в системе? 40% затрат при добыче полезных ископаемых – затраты, связанные с аэрологией и вентиляцией. Затрагивали ли Вы в своих исследованиях данные вопросы? Оценивались ли они, как предложения можно их «продать» компаниям, потому что помимо технических решений можно считать и экономические эффекты, что позволит продвинуть рассматриваемую технологи.

***Д.т.н. Мазаник Е.В. (ООО «Сибкор»).*** Спасибо за хороший доклад. Я угольщик и Ваша система мониторинга и моделирования учитывает естественную тягу воздуха или Вы в своих исследованиях пренебрегаете этим? При таком раскладе температуры рознятся, возникает естественная тяга, оказывающая влияние на ведение горных работ. Если у Вас были какие-то наблюдения, то какая сходимость результатов была при этом по натурным наблюдениям и путем аналитических расчетов?

***Д.т.н. Еременко В.А. (НИТУ «МИСиС»).*** Я не специалист в вопросах вентиляции, но у меня возникли два вопроса. Вы использовали современные механизмы моделирования, Но у нас есть нормативные документы, которые регламентируют все производственные действия. Как Вы решаете эти вопросы? Насколько отличны получаемые Вами результаты от реальных? Вы решаете свои вопросы и проводите исследования на глубоких горизонтах. А как рассматриваются вопросы о проведении работ на верхних горизонтах?

***Д.т.н. Айнбиндер И.И. (ИПКОН РАН).*** В летний период в Норильске температура на поверхности бывает до 25°С в породах. По Вашим расчетам с глубиной температура растет. А как быть при разработке руд в летний период? В выработках на глубине будет 30-40°С? Как можно работать в таких условиях в забоях? 32°С – максимальная температура при работе в забое. Эта норма принята? Есть какие-нибудь обоснования экспертизы? При отработке руды в выработках могут быть газопроявления. Предусматривается ли Вами

использования в работе газоанализаторов, датчиков? Сколько это может продолжаться по времени? Не будет ли это как на угольных шахтах?

***Д.т.н. Кулибаба С.Б. (ИПКОН РАН).*** Есть ли у Вас комплексный подход к использованию отводимого тепла из горных выработок для бытового использования, обогрева производственных и жилых помещений? Используется ли газ для заправки машин?

***Акад. РАН Захаров В.Н. (ИПКОН РАН).*** В исходных моделях в базовом построении используются уравнения Стокса и уравнение Фурье? Но насколько я понимаю, это линейные уравнения, а каким образом учитывается турбулентность? При тепловых потоках турбулентность учитывается? Если для всей вентиляционной сети выполняются расчеты, тем более в динамике, для этого требуются достаточно большие мощности. В этой связи какие-то ограничения у Вас существуют с точки зрения расчетов модели? Кондиционирование воздуха, большие затраты, но от этого никуда не уйти. Какие-то соотношения оценивались с точки зрения объемов и затрат, которые необходимы для того, чтобы было нормальное состояние на развитую сеть рудника эти затраты распространялись. Может быть в этой ситуации рассматривались какие-то схемы движения при отсутствии людей?

***Акад. РАН Барях А.А. (ПФИЦ УрО РАН).*** Где-то экономика станет такой, что с глубины станет экономически нецелесообразно добывать полезные ископаемые. Отдельные полезные ископаемые, например, золото, платина и ряд других, можно добывать и с глубины в 4 км, но я плохо себе представляю, как калийную руду добывать с такой глубины. Такая дилемма все время существует.

***Акад. РАН Захаров В.Н.*** Это вопрос очень непростой, это отдельная тема и отдельная дискуссия, но проблема, безусловно, существует.

***Выступления***

***Д.т.н. С.М.Ткач*** С уральскими институтами мы давно сотрудничаем в отношении теплофизических исследований, помогали в решении этих вопросов. Рад, что научная школа, к которой относится и докладчик, поддерживается и развивается. Я уверен, что и дальше наши теплофизики будут сотрудничать, решая вопросы, не только связанные с высокой температурой на глубоких горизонтах, влияющих на процесс добычи полезных ископаемых, но и по ряду других не менее важных вопросах.

***Акад. РАН А.А.Барях*** Мне довелось быть хорошо знакомым с Иннокентием Иннокентьевичем Медведевым, который занимался рассмотрением данных вопросов. Эта школа нашла хорошее продолжение от Политехнического института в Горный институт УрО РАН. В прошлые годы таких проблем, о которых говорилось в докладе, не было, в связи с тем, что не было такой глубины отработки рудных месторождений. Кажется, что коллеги занимают сейчас такую хорошую нишу потому, что работы эти весьма актуальны. Гремячинской рудник – глубина разработки 1100 м, в Белоруссии тоже глубины разработок калиевых солей растут, и это сплошь и рядом. Все эти исследования проводятся, эта программа востребована, ряд лицензий проданы Разработки с использованием моделирования, численными оценками, доведены до простой автоматизации, чем можно пользоваться на рудниках.

***Акад. РАН В.Н.Захаров.*** В развитие выступления А.А.Баряха могу добавить, что работу рассматривали на заседании Госгортехнадзора о возможности данного софта и требованиям к нему.

***Д.т.н. С.М.Лукичев.*** Данное направление исследований долго развивалось, но, к сожалению, ушли сотрудники и направление «затухло». На сегодня это направление исследований, наверное, наиболее активно развивается в Горном институте УрО РАН. Но есть опасение, что если этот продукт будет развиваться как научный проект, то с элементами внедрения на предприятиях может не выдержать конкуренции с коммерческими продуктами, которые рано или поздно придут из-за рубежа, и фирмы, работающие на коммерческой основе, тоже развиваются. Об этом надо задуматься.

***Д.т.н. С.С.Кубрин.*** Я могу подтвердить, что данные исследования могут применяться не только на горных предприятиях, но и в ВГСЧ. Я знаком со многими частями представленной работы, выполняемой в Пермском Горном институте. Я думаю, что это важная работа, которая учитывает микроклимат и возможность работы человека на больших глубинах.

Я думаю, что это направление развивается благодаря нашим уважаемым коллегам. Думаю, что надо поддержать выполненные исследования.

***Чл.-корр. РАН Д.Р.Каплунов.*** Ни один экономический расчет не заставит человечество отказаться от необходимости добычи полезных ископаемых. Этого не может быть по определению. Я видел, что из себя представляют глубокие горизонты и как там работается. Тяжелейшая картина. Работа – найти пути эффективной борьбы с высокой температурой, но с другой стороны – эффективного ее использования. Тепло – один из важнейших георесурсов недр. Это является вопросом комплексного освоения недр, с одной стороны используются георесурсы полезных ископаемых, а с другой стороны – используемое тепло. Что касается решения этой проблемы, то мне представляется, что принципиальное решение этой проблемы возможно только на основе роботизации горных работ и разговоры об использовании всевозможного оборудования в данном случае не должны рассматриваться. Должны быть совершенно новые подходы к роботизированным системам. Главное в докладе – создание такой роботизированной системы, которая определит необходимость прямого участия человека в виде рабочих по добыче полезных ископаемых. Считаю, что доклад очень интересен и его обсуждение было очень полезным.

***Д.т.н. В.А.Еременко.*** Несколько лет назад я был на Таймырском руднике, глубина разработки которого на тот момент составляла 1340 м и рабочим разрешалось работать ½ смены, поскольку работать 8 часов в тех условиях невозможно. Жарко, и я понял, что вопросы с вентиляцией и аэрологией необходимо решать, и я думаю, что заслушанная работа весьма актуальна, она современная и своевременная.

***Акад. РАН В.Н.Захаров.*** Так складывается мировая конъюнктура, что большая часть богатых поверхностных месторождений уже разведаны, либо отработаны и в этой ситуации возник вопрос: нужно ли и можно ли уходить глубже? И здесь ответ очевиден, что уходить на глубину придется по нескольким причинам, что доказано и в ЮАР, и в Китае по уходу на глубины более 2 км и заставляет находить богатые и очень объемные месторождения. И в этой связи вопрос остается актуальным и в развитии человечества и его существования. Те опытные эксперименты, которые существуют и те результаты, которые мы обсуждаем с геологами эти вопросы подтверждают, и здесь скорее всего это будет развиваться, увязывая с технологиями вопросы, которые будут трансформировать технологические решения. Данные вопросы в полной мере касаются работы горных компаний, ведущих и уходящих при добыче полезных ископаемых на глубину. Напрашиваются различные технико-технологические решения, роботизация и автоматизация, применение различных геотехнологий, связанных со скважинными методами добычи полезных ископаемых, с подземными технологичными заводами. Такой опыт тоже существует. Новые технологические процессы, схемы безусловно будут возникать, и эти направления исследований становятся все более актуальными. В этом направлении теоретические разработки необходимы, потому что без теоретического анализа переход к экспериментальным и прикладным исследованиям не получится и это подтверждено в различных областях деятельности человека.

Что касается сегодняшнего доклада. Большое спасибо коллегам за тот материал, который они показали и те подходы, которые они использовали в своей работе. Это действительно передовая школа на сегодняшний день в России и многие вопросы нам надо перенимать, учиться и использовать их на практике. Что касается софта, как мы обсуждали с чл.-корр. РАН Л.Ю.Левиным, эффективное сотрудничество бизнеса и науки, которое позволяет им дополнительно иметь определенные доходы, которые позволяют в том числе и развивать рассматриваемые на заседании вопросы. Спасибо коллегам за интересный доклад, спасибо за полученные результаты, и я надеюсь, что мы будем расширять практику взаимодействия и подбирать на заседания Научного совета РАН по проблемам горных наук достаточно актуальные и важные доклады и не только в «Неделю горняка».

### *Разное*

***Акад. РАН В.Н.Захаров.*** Исходя из тех подходов и поручений, которые сейчас формируются в РАН, Научным советам все больше уделяется внимание в Президиуме РАН, и в этой связи на Научные советы планируется переложить определенные задачи, которые связаны со стратегией научно-технологического развития России и по каждому конкретному

Научному совету есть определенный сектор или область и по этому направлению этот вопрос в РАН постоянно возникает: чем занимается Научный совет, как в них проводится научно-исследовательская работа, как решаются вопросы и как они продвигают стратегию развития, которая существует на текущий момент.

В этой связи есть предложение, которое я озвучу, а если необходимо, то далее его обсудим.

В рамках Научного совета можно спланировать работу более конкретно в соответствии с определенным планом, и мы с акад. РАН А.А.Баряхом этот вопрос немного обсуждали. Я предлагаю на заседаниях Научного совета не заслушивать отчеты, а спланировать его работу таким образом, что мы проводим его применительно к каким-то значимым мероприятиям у наших коллег с Дальнего Востока, Якутска, Сибири, Урала, Кольского полуострова и тематику актуальных тем обсуждали более интенсивно и дифференцированно. В этой связи в результате этих обсуждений появятся протоколы и некие предложения и решения, которые позволят более четко взаимодействовать между собой и в случае решения по каким-то глобальным вопросам координировать эти вопросы и их решать.

Думаю, что нам такую программу надо сделать и попытаться эту работу выстроить в более интенсивном и спланированном варианте.

Второй момент касается того, что сейчас идет достаточно много запросов, которые по горным наукам «сваливаются» на меня. Они, как правило, идут из РАН либо из Минобрнауки РФ, из ведомств через РАН и не всегда заранее, хотя вопросы бывают достаточно серьезные и на их решение необходимо время. Думаю, что в данной ситуации есть смысл эту информацию распространять среди членов Научного совета, чтобы они были в курсе того, что «спускается» сверху и в каких-то моментах координируя эти направления деятельности для формирования ответа. Это иногда надо делать достаточно оперативно, но компетенции решения вопросов ближайшего окружения не всегда хватает.

Более глубокое погружение в те направления, которые сейчас на нас РАН возлагает, придется делать сообща.

Все больше поднимается вопрос о том, что РАН и Министерство будут анализировать важнейшие результаты деятельности институтов и будет определено, в правильном ли мы направлении двигаемся. Направлять будут в сторону взаимодействия с государственными структурами и бизнесом. С бизнесом взаимодействовать можно, но к фундаментальной науке это практически не имеет никакого отношения. Это, как правило, вопросы оказания услуг или разработки пред проектными вариантами решений, регламентов. Но эта работа все равно будет продолжаться для того, что возможно будут корректироваться государственные задания. Здесь мы должны понимать, что свою позицию надо отстаивать. Есть «горячие головы», которые могут заявить о том, что давайте заниматься конкретными прикладными вещами, но в это уходить ни в коей мере нельзя, потому что тогда потеряем тот задел, который у нас существует, и который мы развиваем и совершенно очевидно, что он необходим.

Такой подход предлагается, и в этой связи если есть предложения или вопросы, давайте их обсудим.

***Акад. РАН А.А.Барях.*** Сложилась ситуация, что РАН возвращается к тому вопросу, что методическое руководство ОНЗ РАН, которое записано в Уставе, должна как-то реализовываться. Вообще говоря, отчеты институтов заслушиваются на Бюро ОНЗ РАН, в регионах. Занят при этом широкий круг специалистов, а непосредственно связанных с горными науками, там практически никого нет. Рассматриваются при этом формальные вопросы, связанные с финансированием организаций, публикационной активностью и др. Поэтому мне казалось, что, если бы перейти к такому режиму, где можно было бы послушать в большей степени научные разработки институтов, их не так уж и много.

Все мы выполняем госбюджетные работы и сейчас в РАН создана структура, которая отслеживает НИР институтов, в т.ч. горного профиля, занимающихся решением одной и той же проблемы. Нам надо найти при этом свою нишу, чтобы формально не попасть в руки не всегда компетентных рецензентов. Если будем вовремя получать по этим вопросам необходимую информацию, то есть надежда, что мы сохраним свою индивидуальность.

***Чл.-корр. РАН И.Ю.Рассказов.*** В 2024 году Дальний Восток посетил Президент РАН Красников Г.Я., состоялась встреча, на которой он озвучил мысль, что Программа фундаментальных исследований, рассчитанной до 2023 года, подвергнется корректировкам в связи с тем, что выяснилось, что рассматриваемые программы работы институтов выполняются лишь на 30% от заявленных в ней работах, а по остальным – не работают. Предлагалось сделать из работ выборку, определить институты, которые дублируют друг друга и какие-то передовые институты оставят, и другие переведут на другие направления деятельности, которые в данный момент не охвачены или закроют. В этих условиях координация необходима и необходимо отстаивать свои направления НИР.

Надо встречаться чаще для обсуждения необходимых вопросов.

***Акад. РАН А.А.Барях.*** По Уральскому отделению РАН ведется работа, чем организации занимаются. Каждый пишет, что он сделал в гидрогеологии, геоэкологии с указанием прерогатив институтов. Но потом можно попасться на удочку. Дальше передаются важнейшие результаты научных исследований. Проанализировав ряд результатов, я понял, что оказалось, с моей точки зрения, 10% того, что было заявлено, выполнено. Надо скорректировать свои планы, понять, что делают коллеги и как-то аккуратнее заявлять о своих достигнутых результатах.

***Акад. РАН В.Н.Захаров.*** Есть определенная бюрократия, которая трактует в Министерстве – одно, в РАН – другое и все это не «бьется». И это, к сожалению, все есть. В Научном совете есть представители университетов. Обсуждение важно, сейчас все мы не обсудим и не решим все проблемы, но то, что затронули И.Ю.Рассказов и А.А.Барях, это очень важный момент, но при формировании РФНИ, который составляется в кратчайшие сроки в узком кругу, но то, что мы захватили достаточно широкий спектр решаемых вопросов, а это необходимо на перспективу, поэтому это надо обсуждать и выходить на коллектив.

***Д.э.н. А.В.Мясков.*** Третья часть нашего Научного совета – представители университетов, а с университетов запрос такой, что наука, которая требуется в учебном процессе, В программе приоритетов и др. должна заканчиваться продуктивным подходом. Сделал что-то – покажи полученный продукт. На сегодняшнем заседании мы убедились, что научный продукт может быть окончательным получением сотни лицензий. Не нужно этого бояться, делать фундаментальную науку только ради нее, а может быть довести ее до получения конечного продукта? Может быть есть смысл поставить для себя какие-то ориентиры, какой же продукт будет исследоваться.

Касательно горняков внутри университета. Вроде бы есть результаты исследований, но они не афишируются за пределами учебного заведения, в то время, как маленькие организации больше пиарятся и создают впечатление об их несомненных результатах. Нашему Совету надо больше о себе заявлять, даже в прессе и в Интернете. Может быть есть смысл ведения информационной нагрузки как в МГИ НИТУ «МИСиС», так и в других институтах горного профиля.

Как предложение – приглашать на заседания нашего Научного совета представителей из ОНЗ РАН, академика-секретаря ОНЗ РАН, вице-президента РАН, других ученых. Важно показать, что в заседаниях участвуют и делятся своими результатами НИР представители многих организаций горного профиля из разных регионов.

Можем оказать поддержку в информационном размещении материалов Научного совета.

***Акад. РАН В.Н.Захаров.*** Я полностью поддерживаю предложение А.В.Мяскова, мы действительно имеем большие наработки, которые на сегодняшний день могут показываться т демонстрироваться горной общественности. То, что касается не продуктивного подхода, то я с этим тоже согласен и когда термин «продукт» мы определяем, он может быть довольно широкого трактования и в этой связи то, что фундаментальные исследования в любой сфере деятельности должны в обязательном порядке давать понимание, а как они переходят в прикладные и как переходят в ОКР и др. Это вопрос серьезный. И еще один момент, с которым мы сталкиваемся на сегодняшний день, что взаимодействие с бизнесом в таком формате у нас пока слабо отработано. И в основном с бизнесом мы взаимодействуем

на их условиях и требованиях. С одной стороны, это понятно, они заказчики, но я считаю, что мы должны в какой-то мере проводить работу с бизнесом и объяснять, что определенные направления НИР не могут быть реализованы в течение короткого времени, а ведь есть программы, которые бизнес планирует реализовывать через 2-3 года. Если на 3 года (СУЭК) мы делаем определенную тематику, результат получается совершенно другой, и он намного полезнее и экономически выгоднее, и надежнее по безопасности ведения горных работ и другим направлениям, более эффективен. Поэтому с бизнесом нужно работать, устанавливать с ними взаимоотношение, вникая и в их проблемы. Когда у бизнеса инвестиционные финансы урезаются и куда-то исчезают, то для них это тоже не просто. Но другого варианта просто нет. Если мы найдем нормальное взаимоотношение и понимание, как выстраивать совместную работу, будем страдать и мы, и бизнес.

Просьба ко всем присутствующим на нашем заседании дать свои предложения по ведению сегодняшнего заседания. Протокол заседания Научного совета будет в ближайшее время подготовлен, и мы его перешлем всем членам Научного совета РАН по проблемам горных наук.

***Чл.-корр. РАН Д.Р.Каплунов.*** Мы ежегодно проводим заседания Научного совета по проблемам горных наук. Попадают ли эти материалы в Отчет Научного совета и посылаются ли они в организации горного профиля?

***Акад. РАН В.Н.Захаров.*** Отчеты выпускаем и пересылаем их в организации горного профиля, участвующих в подготовке материалов. Но это очень краткие аннотации результатов деятельности организаций, которые не всегда раскрывают суть и содержание выполненных работ. В этом плане я попросил бы всех присутствующих сегодня на заседании сформулировать проблематику, а не те результаты, которые собираем в течение какого-то времени, нужно расширять спектр выполняемых НИР.

***Д.т.н. С.М.Ткач.*** Д.Р.Каплунов меня опередил. Я хотел сказать о популяризации деятельности горной науки. В 90-х годах прошлого века краткий аннотационный Отчет, куда входили результаты ряда институтов уже иностранных государств были насыщенными и более объемными. Но и нынешние Отчеты НС РАН по проблемам горных науку, я считаю, весьма полезны для горной общественности. У меня есть вопрос о сайте НС РАН по проблемам горных наук. Он есть или его нет? Одно время Отчеты НС имели гриф «Для служебного пользования», сейчас, я думаю, в этом нет необходимости. Отчеты можно цифровать и размещать на сайте Научного совета. В нашем институте в библиотеке Отчеты НС есть и их с интересом читают наши сотрудники.

***Д.т.н. В.А.Еременко.*** С.С.Кубрин нам сообщил, что сведения о НС РАН по проблемам горных наук есть на сайте ИПКОН РАН. А кто заходит на сайт института? Может быть есть смысл сделать рассылку по горняцким организациям с указанием адреса Научного совета? Чтобы люди заходили, интересовались результатами деятельности институтов горного профиля.

***Акад. РАН В.Н.Захаров.*** Мысль правильная, надо подумать о том, в какой форме рассылку запускать, потому что тот материал, который мы у себя собираем и аккумулируем, а потом делаем Отчет, он получается специфическим и узко специализированным и тем более аннотационным.

**2.** 27–31 октября 2025 года в г. Москве на базе Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН состоялась 17-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», далее Школа.

Организаторы Школы – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Российская академия наук, Отделение наук о Земле, Научный совет РАН по проблемам горных наук, Научный совет РАН по проблемам обогащения полезных ископаемых, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, Совет молодых ученых и специалистов ИПКОН РАН.

В работе Школы приняли участие более 150 человек - представители академических и отраслевых институтов, ВУЗов, горно-обогатительных предприятий России, Китая,

Казахстана, Вьетнама, Мьянмы, Монголии, Узбекистана, Ирака и Ирана. Было заявлено 135 докладов, доложено – 88, из них – 7 пленарных. В работе Школы приняли участие: 1 академик, 27 докторов наук, 37 кандидатов наук, более 45 аспирантов и студентов.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ СЕКЦИИ:

1. Гидрогеология и инженерная геология.
2. Проблемы геомеханики и газодинамических явлений
3. Разрушение горных пород.
4. Совершенствование техники и технологии освоения месторождений полезных ископаемых.
5. Аэрогазопылединамика.
6. Геоинформационные технологии.
7. Цифровые технологии при недропользовании.
8. Проблемы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья.
9. Управление производством, экономические и социальные проблемы освоения недр.
10. Охрана окружающей среды при недропользовании.

В рамках Школы докладчики, сделавшие лучшие и содержательные доклады, были награждены дипломами и ценными призами от организаторов и спонсоров Школы – группы компаний «Эвобласт» и городского проекта «В ЦЕНТРЕ НАУКИ». Также для участников Школы были проведены экскурсии по научным лабораториям ИПКОН РАН.

**Решение школы молодых ученых и специалистов**

1. Продолжить развитие фундаментальных и прикладных исследований по приоритетным направлениям комплексного освоения и сохранения недр Земли.
2. Расширить сотрудничество Совета молодых ученых и специалистов ИПКОН РАН с молодыми учеными России, Китая, Казахстана, Вьетнама, Мьянмы, Монголии, Узбекистана, Ирака, Ирана и др. странами.
4. Поддержать предложение о сотрудничестве с Институтом Европы РАН.
3. Наиболее интересные доклады, отмеченные по результатам работы секций, опубликовать в виде статей в журналах Маркшейдерия и недропользование.
4. Провести 18 Международную научную школу молодых ученых и специалистов в октябре-ноябре 2027 г.
5. Отметить высокий уровень подготовки и проведения конференции и вынести благодарность ее организаторам, а также организациям, оказавшим информационную поддержку - журнал «Маркшейдерия и недропользование», оказавшим финансовую поддержку – ГК «Эвобласт», а также проекту «В центре науки» Центра педагогического мастерства г. Москвы.

В целях укрепления научного и образовательного сотрудничества, обмена информацией и рекламы достижений институтов горного профиля в 2025 году Научным советом РАН по проблемам горных наук был подготовлен «Отчет о научной деятельности Научного совета РАН по проблемам горных наук и краткие результаты научно-исследовательских работ учреждений и организаций горного профиля РФ и стран СНГ в 2024 году» и размещен на сайте ИПКОН РАН на странице Научного совета РАН по проблемам горных наук.

## 2.1. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР ИМ. АКАДЕМИКА Н.В.МЕЛЬНИКОВА РАН

**Тема FMMS-2024-0006 Фундаментальные основы развития процессов извлечения ценных компонентов при комплексной и глубокой переработке минерального сырья сложного вещественного состава**

**Научный руководитель темы:** Чантурия В.А., гл. науч. сотрудник, академик РАН

*Краткая характеристика научного результата:*

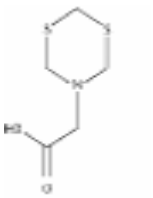
*Сущность результата*: научно обоснованы и апробированы новые селективные реагенты группы дитиазинов и дитиокарбаматов, оказывающие избирательное воздействие на поверхность сульфидных минералов в процессе флотации и обеспечивающие повышение извлечения цветных и благородных металлов при комплексной переработке руд сложного вещественного состава.

*Новизна результата*: Методами аналитической электронной РЭМ и лазерной микроскопии ЛСМ, УФ- и ИК-Фурье-спектроскопии, измерением краевого угла смачивания и расчетом свободной энергии поверхности установлен механизм избирательной хемосорбции реагентов группы дитиазинов (КПДЭ) и дитиокарбаматов (ПирроДТК) на галените, халькопирите и золотосодержащих сульфидах в процессе флотации, приводящий к усилению их гидрофобных свойств и росту извлечения цветных металлов и золота при комплексной переработке руд сложного вещественного состава.

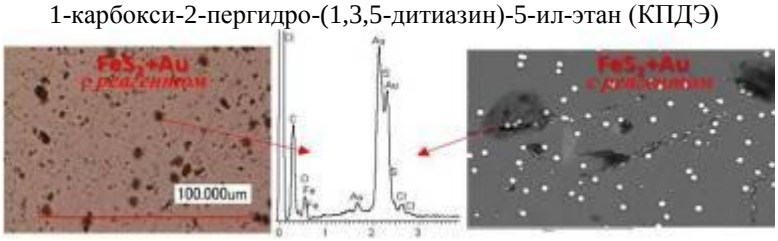
*Значимость результата*: применение разработанных отечественных реагентов группы дитиазинов и дитиокарбаматов в процессах флотации обеспечит импортонезависимость российских горно-обогатительных комбинатов от поставок зарубежных реагентов, повышение извлечения цветных и благородных металлов из руд сложного вещественного состава при комплексной переработке руд сложного вещественного состава.

*Возможные сферы практического применения результата*: комплексная переработка руд сложного вещественного состава с применением новых селективных реагентов отечественного производства.

1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дитиазин)-5-ил-этан (КПДЭ)

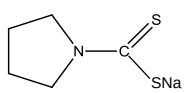


Структурная формула КПДЭ

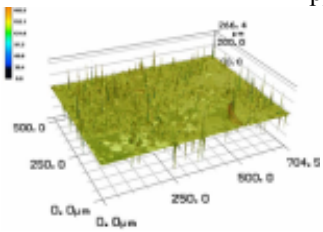


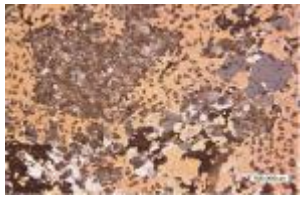

LSM- и ASEM-снимки пирита с Au после контакта с КПДЭ

ПирроДТК



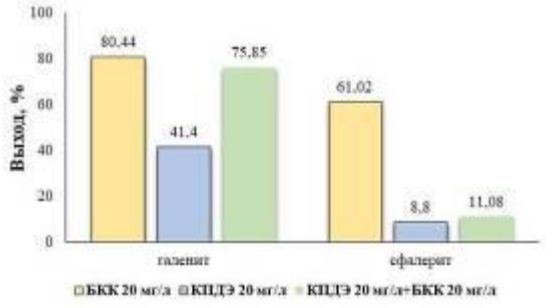

Структурная формула ПирроДТК



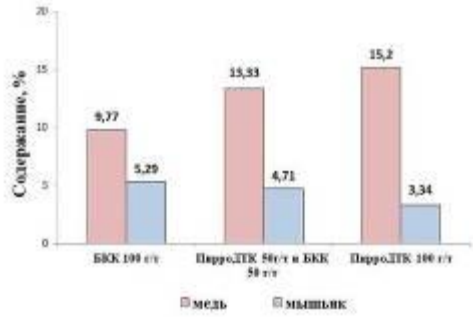





LSM-снимок и 3D изображение рудного аншлифа после воздействия ПирроДТК




Результаты флотации галенита и сфалерита реагентами БКК, КПДЭ и их сочетанием




Зависимость содержания меди и мышьяка от расхода ПиррроДТК и БКК при флотации комплексной руды

Сведения об опубликовании:

1. Matveeva T.N., Gromova N.K., Minaev V.A. Bis-Piperazine Dithiocarbamate Interaction with Sulfide Minerals in Complex Gold Ore // Journal of Mining Science. – 2025. – Vol. 61. – № 3. – pp. 470-477. DOI: 10.1134/S1062739125030147. WOS-Q4, Scopus-Q3, ВАК, РИНЦ, Белый список.

Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Минаев В.А. Экспериментальное исследование воздействия реагента бис-пиперазиндитиокарбамата на поверхность сульфидных минералов в составе комплексной золотосодержащей руды // ФТПРПИ. – 2025. – № 3. – С.142-151. DOI: 10.15372/FTPRPI20250314. EDN: RAPQRG. RSCI, ВАК, РИНЦ, Белый список.

2. Getman V.V., Karkeshkina A.Yu. Application of New Dithiazine-Class Complexing Agent in Galena and Sphalerite Separation in Flotation// Journal of Mining Science. – 2025. – Vol. 61. – № 3. – pp. 487-496. DOI: 10.1134/S1062739125030160. WOS-Q4, Scopus-Q3, ВАК, РИНЦ, Белый список.

Гетман В.В., Каркешкина А.Ю. Применение нового комплексообразующего реагента группы дитиазинов при флотационном разделении галенита и сфалерита // ФТПРПИ. – 2025. – № 3. – С.161-171. DOI: 10.15372/FTPRPI20250316. EDN: WLCVHX. RSCI, ВАК, РИНЦ, Белый список.

3. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б. Обоснование применения пирролидиндитиокарбамата для извлечения сульфидных минералов цветных и благородных металлов из комплексных руд // Горная промышленность. – 2025. – № 5S. – С.28-34. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-5S-28-34. SCOPUS-Q3, ВАК, РИНЦ, Белый список.

**Тема FMMS-2024-0007 «Развитие фундаментальных основ разрушения геоматериалов, управления геомеханическим состоянием и обоснование технологий взрывного дробления массива горных пород с применением энергоэффективных взрывчатых материалов»**

**Научный руководитель темы**: д.т.н. Викторов С.Д.

*1. Краткая характеристика научного результата:*

*Сущность результата.* В рамках концепции предразрушения как процесса накопления дефектов и протекающем на микроуровне разработана методика и проведены экспериментальные исследования с применением методов электронной, атомно-силовой микроскопии, микро- и наноиндентирования. По результатам исследований получены изображения и определены параметры микротрещин, образовавшихся после взрывного воздействия (рисунок 1), оценена шероховатость поверхности горных пород (рисунок 2) и определены их упругие и прочностные свойства на микро- и наноуровнях (рисунок 3).

*Новизна результатов* исследований заключается в определении численных значений показателей свойств, степени неоднородности горных пород и микроструктурных изменений при динамическом воздействии на микроуровне. Шероховатость поверхности горных пород рассматривается как новых показатель, характеризующий и влияющий на процесс разрушения. Методика исследований, базирующаяся на совместном применении данных экспериментальных методов, позволяющая оценивать структурную неоднородность горных пород, также отличается новизной.

*Значимость результата.* Исследования показали перспективность использования методов для оценки структурных и физико-механических параметров горных пород применительно к изучению процесса разрушения, открывают новые возможности для изучения этого процесса в области геологических и горных наук. Возможность получить и количественно оценить структурно-механические параметры минералов и горных пород на микроуровне особенно актуально и значимо в связи с развитием современных методов анализа и обработки цифровой информации для описания горных пород как объектов разрушения.

*Возможные сферы практического применения результата.*

Развитие представлений о процессе предразрушения позволяют:

• прогнозировать момент перехода от накопления микродефектов к макроразрыву и тем самым предотвратить катастрофическое разрушение;

• оптимизировать параметры горных работ, например взрывных работ (расход ВВ, схему инициирования и др.);

• повышать безопасность горных работ за счёт контроля состояния массива;

• управлять процессом разрушения;

• повышать эффективность добычи и переработки горных пород.

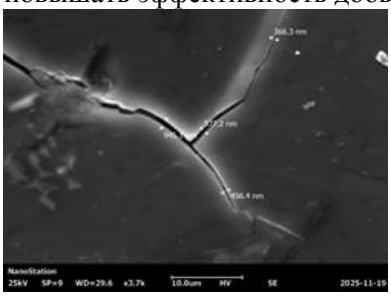


**Рисунок 1 - Определение параметров микротрещин в граните после динамического воздействия по данным электронной микроскопии**



**Рисунок 2 - Томография поверхности гранита (а) и кварцита (б) по данным атомно-силовой микроскопии (размер кадра 8,8х8,8 мкм)**

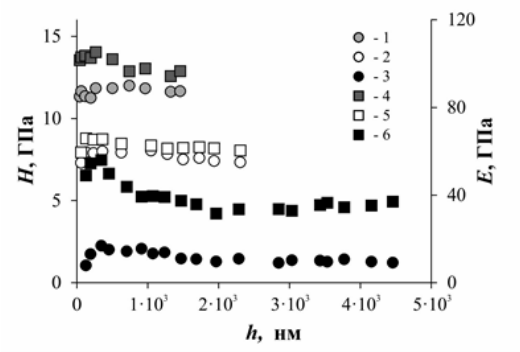



**Рисунок 3 - Зависимость твердости H и модуля Юнга E от глубины отпечатка h для гранита (фаза 1: 1 – H, 4 – E; фаза 2: 2 – H, 5 – E; фаза 3: 3 – H, 6 – E)**

Сведения об опубликовании

1. Кочанов А.Н. Экспериментальные исследования структурных и физико-механических параметров минералов и горных пород //Новые идеи в науках о Земле: в 9 т. Материалы XVII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» - М.: Издательство МГРИ, 2025. Т. 2: Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минералогия/ ред. коллегия: Ю.П. Панов, Р.Н. Мустаев. - М.: Издательство МГРИ, 2025. С. 196-199.

2. Кочанов А.Н., Бунин И.Ж. Исследование нано- и микромеханизмов разрушения горных пород в процессах динамических высокоинтенсивных воздействий Разрушение горных пород и минералов: Сборник материалов второй всероссийской конференции (г. Екатеринбург, 1 апреля 2025 г.) / отв. редактор Д.В. Зайцев. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2025.С. 35-36.

3. Кочанов А.Н. Структура трещины в граните и оценка шероховатости горных пород методом атомно-силовой микроскопии материалы XXYI международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИГЕМ РАН. 2025. - С. 92-95.

4. Бунин И.Ж., Кочанов А.Н. Исследование поверхности разрушения геоматериалов методами АСМ, РЭМ и наноиндентирования / Тезисы докладов XIV Международной конференции «Методические аспекты сканирующей зондовой микроскопии» (БелСЗМ-2025) 21-24 октября, Минск. - С. 89-94.

5. Бунин И.Ж., Кочанов А.Н. Исследование методами электронной микроскопии структурных изменений поверхности горных пород в результате динамических воздействий // Черноголовская конференция по электронной микроскопии КЭМ-25 с международным участием. Тезисы докладов – М., - «Гефест», - 2025. - С. 120.

6. Головин Ю.И, Тюрин А.И., Викторов С.Д., Кочанов А.Н., Пирожкова Т.С. Размерные эффекты и картирование физико-механических свойств отдельных фаз и межфазных границ поликристаллических материалов // Известия РАН. Серия физическая. - 2018. - Т.82. - №7. - С. 945-950.

*2. Краткая характеристика научного результата:*

*Сущность, результаты и новизна работы.* Впервые сформирована методика совместного применения физических экспериментов и метода SPH для оценки дробящего и сейсмического действия взрывов и установления закономерностей влияния различных технологических факторов и характера трещиноватости на изменение во времени показателей действия взрыва во времени и пространстве.

В ходе проведённых полигонных и численных исследований, в частности, получены зависимости средних значений результирующей вектора скорости смещения грунта (РВС) от расстояния до свободной поверхности и от скорости детонации зарядов во взрываемом блоке. Установлен полиноминальный характер зависимости численных значений РВС от расстояния до заряда. Впервые получены зависимости влияния расстояния между скважиной и бровкой уступа на результирующую среднюю вектора скорости, которые свидетельствуют о наличии зон максимального прироста и снижения сейсмического воздействия на массив горных пород. Впервые установлено, что зависимость результирующей вектора скорости смещения грунта от скорости детонации зарядов носят полиномиальный характер. Во всех рассмотренных случаях выявлена нелинейность зависимости результирующей вектора скорости смещения от скорости детонации взрывчатого вещества, расстояний от заряда до свободной поверхности. Установлено, что при увеличении скорости детонации наблюдается неравномерный рост или снижение результирующей вектора скорости смещения, причём в отдельных диапазонах возможны экстремальные значения – максимумы или минимумы, указывающие на точки повышенной чувствительности массива к параметрам взрыва. Такие участки требуют особого внимания при проектировании взрывных работ, так как могут приводить как к усиленному воздействию на окружающую среду, так и к неэффективному расходованию энергии заряда. Это свидетельствует о сложной, нелинейной природе процесса выделения взрывчатым веществом энергии и ее поглощения неоднородным массивом горных пород по мере удаления от заряда. Такая закономерность подразумевает возможность существования экстремумов - участков максимального или минимального эффекта, что важно учитывать при прогнозировании и оптимизации параметров взрывных работ. Степень нелинейности усиливается в трещиноватых массивах, где наблюдаются процессы отражения и дифракции волн. При этом важную роль имеет рассеяние энергии на структурных неоднородностях.

*Значимость и возможные сферы практического применения.* Выявленные в результате исследований закономерности открывают возможности для целенаправленного повышения

энергетической эффективности и безопасности промышленных взрывов, управления перераспределением энергии вредного воздействия взрыва в полезные формы с целью повышения эффективности дробления горных пород и минимизации негативного влияния на окружающую среду и конструкции охраняемых объектов. Впервые полученные зависимости коэффициентов эластичности вектора скорости от основных технологических факторов позволяют сформировать методику прогнозирования действия взрыва при изменении параметров буровзрывных работ и применяемых средств разрушения горных пород, условий разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом. Применение методики прогнозирования опасного действия взрыва позволяет повысить экономическую эффективность и безопасность горных работ.




**Рисунок 4 – Зависимость векторной скорости смещения грунта от скорости детонирования**

Сведения о публикациях:

1. Ефремовцев Н.Н. Исследование дробящего, вредных действий взрыва и комбинированных физико-химических воздействий на горные породы. // Материалы конференции Разрушение горных пород и материалов. Екатеринбург, 01-02 апреля 2025 г. С. 13-14.

2. Ефремовцев Н.Н. Методические аспекты и результаты исследований дробящего и сейсмического действия взрыва при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. // Горная промышленность. 2025. – №5. – С. 38-42. ISSN 1609-9192 [Print]. ISSN 2587-9138 (online).

3. Efremovtsev, N.N., Shipovskii, I.E. (2025). Methodological Aspects of the Combined Application of Physical Experiments and the SPH Method for Assessing the Crushing and Seismic Effects of an Explosion. In: Orlov, M.Y., Visakh P. M., Penyazkov, O.G. (eds) Behavior of Materials Under Impact, Explosion, High Pressures and Dynamic Strain Rates. Advanced Structured Materials, vol 234. Springer, Cham. pp. 51-94. Опубликована Web of Science https://doi.org/10.1007/978-3-031-92878-9_3.

4. Ефремовцев Н.Н., Шиповский И.Е. Результаты исследования влияния технологических факторов на сейсмическое воздействие взрывов при открытой разработке месторождений полезных ископаемых // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2025. – Т. 17. - № 4. – С. 65–71. [Efremovtsev N.N., Shipovskii I.E. Researching the Influence of Technological Factors on the Seismic Impact of Blasts in Surface Mining of Mineral Deposits. Bulletin of the South Ural State University. Series of «Mathematics. Mechanics. Physics», 2025, Vol. 17, no. 4, pp. 65–71. DOI: 10.14529/mmph250408].

**Тема FMMS-2024-0008 Разработка фундаментальных основ возникновения, развития и прогнозирования катастрофических многофазных процессов в техногенно изменяемом массиве горных пород**

**Научный руководитель темы:** академик РАН Захаров В.Н.

*1. Краткая характеристика научного результата:*

*Сущность результата:* в ходе лабораторных исследований на конфокальном микроскопе выявлено, что форма частиц угольной пыли в основном призматическая. На основе численного моделирования движения частиц угольной пыли в ламинарном потоке, учитывающего выявленную призматическую форму и сопротивление воздушной среды (линейную

и квадратическую составляющую) определено время седиментации в горных выработках высотой 3 м для частиц с форм-фактором 2 (длина частицы в 2-ва раза больше её толщины) с размером 100 мкм 11,3 секунд и размером 10 мкм 17 минут и 27 секунд, а для частиц тех же размеров, с форм фактором 4 (длина частицы в 4-ре раза больше её толщины), соответственно 21,6 секунды и 34 минут и 18 секунд (рисунок 5).

*Новизна результата:* впервые получены теоретические зависимости скорости седиментации частиц угольной пыли, комплексно учитывающие сопротивление воздушной среды, которое при малых скоростях пропорционально скорости движения, а при больших квадрату скорости движения и их форму на основе решения с использованием функции гиперболического тангенса (th) дифференциального уравнения движения тела в вязкой среде: $v = v_{sp} th\left(v_{sp} g t / v_p^2\right) - v_p^2 / v_s$, где $v_{sp} = v_p \sqrt{k_A + \left(v_p / v_s\right)^2}$ предельная скорость частицы, $v_s = mg / 3\pi\eta r$, $v_p = \sqrt{2mg / \rho_A C_D S}$, $g$ – ускорение свободного падения, $k_A = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_c}$ - коэффициент, учитывающий выталкивающую силу среды, $m$ – масса частицы, $C_D$ – коэффициент сопротивления формы, $r$ и $S$ – характерные поперечный полуразмер и площадь частицы, $\eta$, $\rho_A$ и $\rho_c$ - динамическая вязкость рудничной атмосферы её плотность и плотность угля, $t$ - время.

*Значимость результата.* Теоретические зависимости седиментации частиц угольной пыли объясняют, что в горных выработках фракции угольной пыли размером 100 мкм распространяются на 50–150 м, а мелкодисперсные фракции размером менее 10 мкм практически не осаждаются и выносятся в атмосферу вентиляционной струей.

*Возможные сферы практического применения результата:* Полученные результаты следует использовать в расчетах при планировании мероприятий по обеспылеванию горных выработок угольных шахт и для корректировки нормативного документа «Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт».

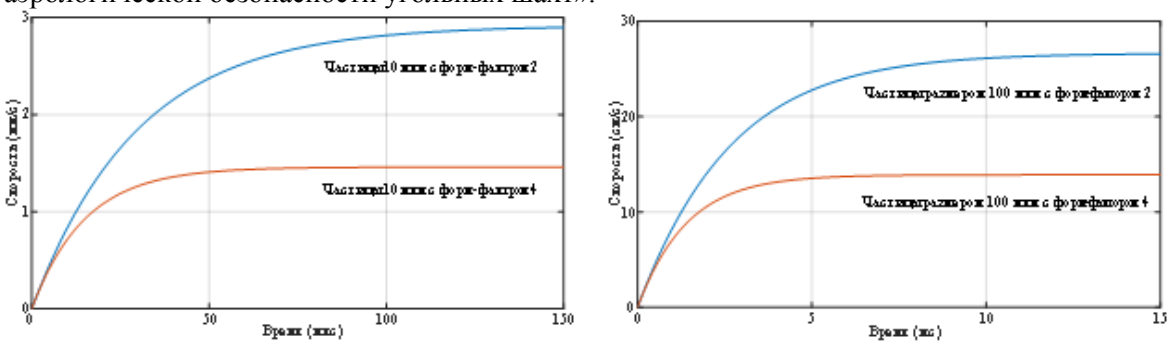



**Рисунок 5 - Изменение скорости седиментации частиц угольной пыли в начале падения при ламинарном движении**

Сведения об опубликовании:

1. Харченко А.В., Дубинский М.Л. Зависимость объема пылеотложения от свойств угля и его петрографического состава // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых Материалы 17 Международной научной школы молодых ученых и специалистов, Москва, 27–31 октября 2025 года. – Москва: ИПКОН РАН, 2025. – С. 229-231.

2. Харченко А.В., Соловьева Е.А. Анализ источников пылеобразования в угольной шахте /Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья: Материалы международной конференции, Екатеринбург, 29 сентября – 04 2025 года. – Екатеринбург: Форт-Диалог Исеть, 2025. – 504-506 с. – ISBN 978-5-6047797-5-0. – DOI 10.21440/978-5-6047797-5-0-2025-3-510

3. Кубрин С.С., Харченко А.В., Захаров В.Н. Определение скорости седиментации угольной пыли в зависимости от ее размеров и форм-фактора (публикация готовится к печати).

*2. Краткая характеристика научного результата:*

*Сущность результата.* Угольные пробы для определения газоносности призабойной зоны отбирались на одном пласте в промежутке от 2-х до 6 месяцев. Для всех проб, в соответствии с методикой, разработанной в ИПКОН РАН, определялись объёмы метана

$Q_1$ – выделяющегося в течение 20-30 минут из угля, помещенного в герметичный контейнер сразу после отделения его от массива, $Q_2$ –в течение 4-8 часов, а $Q_3$ – при измельчении в герметичной мельнице до прекращения газовыделения.

Получено, что разброс значений $Q_1$ и $Q_3$ относительно небольшой для всех проб, тогда как в значениях $Q_2$, характеризующих скорость диффузии в угле, наблюдается разброс значений в несколько раз. Для проб из пласта Болдыревский, ш. им. С.М. Кирова $Q_2$=0,05 $м^3/т_{сбм}$ для пробы 268, и 0,20 и 0,34 $м^3/т_{сбм}$ для проб 256 и 261 соответственно.

Исследование неоднородности их микроструктуры показало, что у угля пробы 268 нет наиболее упорядоченной области с энтропией меньше 0,65 отн.ед. (рисунок 6), тогда как для пробы 256 значения энтропии доходят до 0,57, а для пробы 261 до 0,54 отн.ед.

Аналогичные результаты получены при исследовании газовыделения из угля, отобранного в призабойной зоне шахты им. В.Д. Ялевского.

*Новизна результата.* Показано, что угли одного и того же пласта могут существенно отличаться по способности к газоотдаче, определяемой в течение нескольких часов после отделения проб угля от массива. Причём скорость газовыделения зависит от упорядоченности микроструктуры. Меньшая скорость газоотдачи соответствует углям с менее однородной структурой, что объясняется большим количеством оборванных связей, связанных с повышенной хаотичностью в алифатической составляющей микроструктуры углей, являющихся сорбционными центрами и препятствующих более быстрой диффузии.

*Значимость результата.* Результаты показывают причины различий в скорости газовыделения из отбитого угля, позволяют рассчитать возможное газовыделение в выработки и определить уголь, быстро отдающий метан, который нужно срочно удалять из выработки, в отличие от медленно отдающего метан угля, который может находиться в выработке (на конвейере) в течение нескольких часов.

*Возможные сферы практического применения результата.* Полученные результаты могут использоваться при прогнозе газовыделения в выработки из отбитого угля, при прогнозе текущей дегазации и в других расчётах, использующих скорость газовыделения.

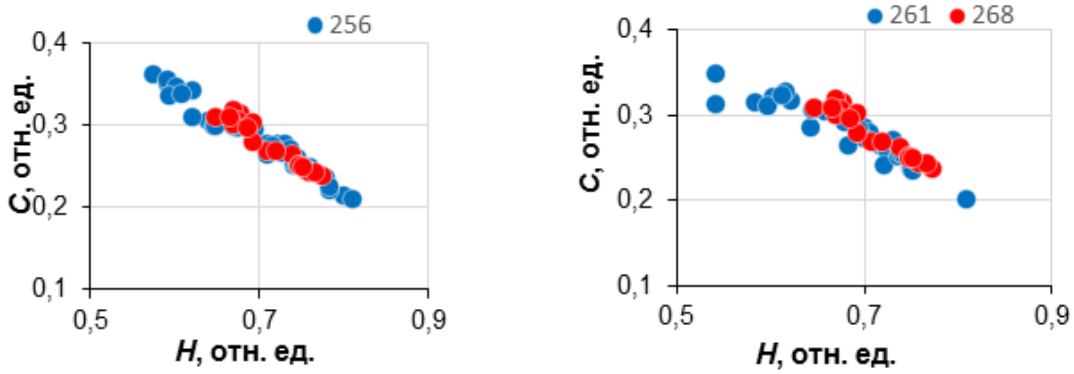



**Рисунок 6 – Значения информационных энтропии (*H*) и сложности (*C*) углей пласта Болдыревский, ш. им. С.М. Кирова**

Сведения об опубликовании:

Ульянова Е.В., Малинникова О.Н., Федоров Е.В., Горшенков И.Н., Пашичев Б.Н. Кинетика газовыделения метана из угля различной микроструктурной неоднородности. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. – № 6. – С. 36-43. – DOI: 10.15372/FTPRPI20250604.

**Тема FMMS-2024-0010 Разработка теоретических основ построения горнотехнических систем при переходе к роботизированным и дистанционно управляемым технологическим процессам**

**Руководители:**

г.н.с., академик РАН К.Н. Трубецкой,

г.н.с., чл.-корр. РАН. Д.Р. Каплунов

*Сущность результата*. Сформирован информационный базис роботизированных геотехнологий при организации информационного обмена между техническими устройствами для принятия решений без участия человека на открытых горных работах – в ходе эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов, на подземных – в ходе очистной выемки.

*Новизна результата*. Заключается в разработке современных методов восприятия окружающей природной и технологической сред, выбора и планирования действий, контроля их выполнения и самообучения роботизированного оборудования с применением сенсорных данных, разработанных алгоритмических моделей интерпретации и реагирования, а также биоинспирированного подхода к проектированию горных машин для добычи твердых полезных ископаемых.

*Значимость результата*. Полученный результат позволяет перейти к проектированию и реализации роботизированных горнотехнических систем, исключающих присутствие человека в опасных зонах.

*Возможные сферы практического применения результата*. Полученный результат позволяет расширить минерально-сырьевую базу России за счет создания условий для освоения участков месторождений стратегического рудоминерального сырья в сложных и экстремальных условиях благодаря значительному повышению эффективности и безопасности ведения горных работ.

*а* *б*

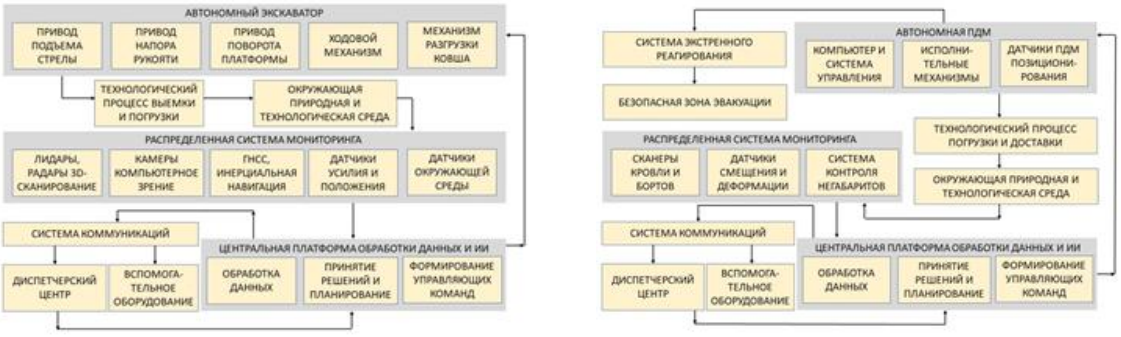



**Рисунок 7 - Архитектура систем управления автономным экскаватором при открытых горных работах (а) и автономной погрузочно-доставочной машиной при подземных (б)**

Сведения об опубликовании:

1. Дзансолов И.В., Муштекенов Т.С., Пацкевич П.Г., Айнбиндер И.И. Построение горнотехнических систем при переходе к роботизированным и дистанционно управляемым технологическим процессам на сверхглубоких горизонтах рудников Талнаха. // Горный журнал. – 2025. – № 6. - DOI: https://doi.org/10.17580/gzh.2025.06.01.

2. Радченко Д.Н., Федотенко, Н.А., Комаров Д.П. Биоинспирированный подход к проектированию горных машин для подземной добычи твердых полезных ископаемых. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – №4 (в печати).

3. Радченко Д.Н., Федотенко В.С., Аверин А.П. Особенности проектирования горнотехнических систем с автономным и дистанционно управляемым оборудованием в связи с добычей твердых полезных ископаемых подземным способом в условиях экстремальных сред. // Экстремальная робототехника. – 2024. – №1. - С. 479-483.

4. Захаров В.Н., Каплунов Д.Р., Федотенко В.С. Принципы и направления цифровизации горнотехнических систем комплексного освоения недр // Горный журнал – 2023. – №2. - DOI: https://doi.org/10.17580/gzh.2023.02.01.

## 2.2. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР ИМЕНИ АКАДЕМИКА М.А. САДОВСКОГО РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

В 2025 году научно-исследовательские работы горной направленности велись в ИДГ РАН по следующим темам государственного задания:

1. № 125012700798-8. Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий.

2. № 125012200570-5. Развитие методов контроля локальных участков земной коры и диагностики протекающих в ней геодинамических процессов разного масштаба, в том числе инициированных техногенной деятельностью.

При поддержке РНФ проводились работы по теме:

№ 22-17-00204-п. Геомеханика разломов земной коры – от региональных масштабов до микротрещин.

Кроме того, в рамках хозяйственных договоров с АО «Лебединский ГОК», АО «Михайловский ГОК» и АО «Комбинат КМАруда» проводились работы по мониторингу сейсмического и акустического действия массовых взрывов на охраняемые производственные объекты горнорудных предприятий, жилую застройку и инфраструктуру регионов этих предприятий.

**1. В рамках работ по Госзаданию № 125012200570-5 были выполнены исследования по теме «Оценка влияния сейсмического воздействия массовых взрывов на устойчивость отвалов вскрышных пород».**

Оценка сейсмического действия массовых взрывов проводились с помощью мобильных сейсмических станций, размещенных на бортах карьера. Сейсмовзрывные волны регистрировались акселерометрами А1638. Полоса частот регистрации акселерометра 0,2–400 Гц, коэффициент преобразования 1 В/м/с$^2$. Сигналы оцифровывались с частотой 5 кГц. Для сейсмической волны от взрыва каждого блока определялись максимальные значения вектора скорости PGV и ускорения PGA в зависимости от приведенного эпицентрального расстояния (рисунок 1).

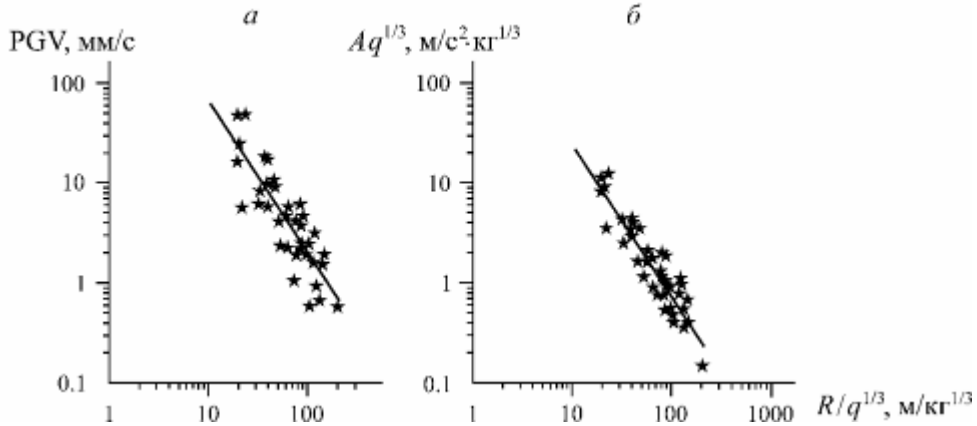



**Рисунок 1 - Зависимость максимального вектора скорости колебаний (*а*) и максимального вектора ускорения (*б*) от приведенного расстояния**

Прямым линиям на рисунке 1 соответствуют зависимости, полученные методом наименьших квадратов:

$$\mathrm{PGA} \cdot q^{1/3} = 750\left(\frac{q^{1/3}}{R}\right)^{1.5}, \quad (1)$$

$$\mathrm{PGV} = 2200\left(\frac{q^{1/3}}{R}\right)^{1.5}, \quad (2)$$

где PGA – максимальный вектор ускорения, м/с$^2$;

PGV – максимальный вектор скорости, мм/с;

$q$ – максимальная масса заряда в одной ступени замедления, кг;

$R$ – эпицентральное расстояние от взрываемого блока до точки регистрации, м. Поскольку массы ВВ в ступенях замедления одного блока могут различаться, то под $q$ понимается ее максимальное значение для данного блока.

На рисунке 2 представлены результаты сейсмических наблюдений в карьере Михайловского ГОКа. Так как масса ВВ в ступенях замедления при массовых взрывах

на Михайловском ГОКе примерно одинакова и составляла около 10 т, видна хорошая корреляция между максимальными PGA и максимальной скоростью PGV (коэффициент детерминации $R$=0,81).

Для оценки динамической устойчивости склона использовалась феноменологическая модель инициирования обрушения склона сейсмическим воздействием. В ее основе лежит метод Ньюмарка: сход оползня возможен лишь при достижении определенного порогового смещения $D_N$ неустойчивой части массива относительно подстилающей поверхности [Newmark N.M. Effects of earthquakes on dambs and embankments// Geotechnique. 1965, vol. 15, No 2, P. 139-160]. Согласно работам [Wilson R.C. Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding // Earthquake Hazards in the Los Angeles Region. U.S. Geological Survey Professional Paper 1360, 1985, p. 317-345], при оценке динамического воздействия для разных грунтов, исходя из сравнения характеристик сейсмических колебаний и зафиксированных случаев схода лавин после землетрясений, критическое значение $D_N$ для грунтов составляет ~5–10 см, для лавин из горных пород критическое значение $D_N$ составляет ~2–3 см.

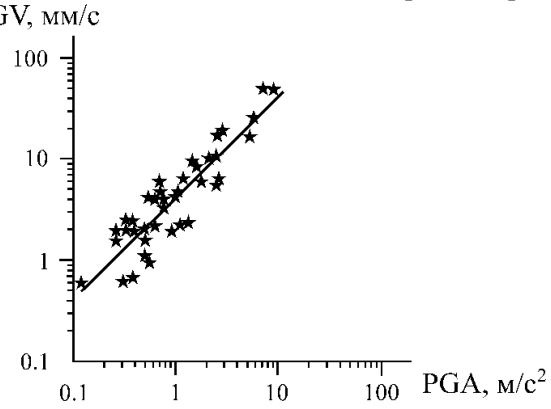



**Рисунок 2 – Взаимозависимость параметров сейсмовзрывных волн**

В классической постановке задача о движении оползневого массива рассматривается как скольжение жесткого блока по наклонной плоскости, либо как вращение абсолютно твердого тела по поверхности смещения. С математической точки зрения данный подход предполагает двукратное интегрирование функции ускорения *a(t)*, полученной из сейсмического воздействия. Соблюдается ключевое условие: смещение оползня возникает только в те временные интервалы, когда ускорение превышает пороговое значение $a_c$. В методе Ньюмарка перемещение $D_N$ служит мерой накопления деформаций в склоне.

Обрушение склона возникает в том случае, когда ускорение соскальзывающей части оползневого тела, вызванное сейсмическими колебаниями, превышает критическое ускорение [Wilson R.C.]:

$$a_c = \frac{\dfrac{C}{\gamma z \cos^2\alpha} + \left(1 - m\dfrac{\gamma_w}{\gamma}\right)\mathrm{tg}\varphi - \mathrm{tg}\alpha}{1 + \mathrm{tg}\varphi\,\mathrm{tg}\alpha}\, g\,, \qquad (3)$$

где $\alpha$ – угол поверхности скольжения с горизонтом;

$m$ – коэффициент обводнения (отношение глубины водного горизонта к глубине поверхности скольжения);

$\gamma_w$ – удельный вес воды;

$\varphi$ – эффективный угол внутреннего трения;

$C$ – эффективное сцепление;

$\gamma$ – удельный вес породы;

$z$ – толщина скользящего слоя (блока).

Критическое значение ускорения $a_c$, согласно (3), формально не зависит от периода колебаний. Однако спектральный состав сейсмических волн вносит коррективы как в процесс разрушения отвала, так и в расчетную величину смещения Ньюмарка. Чтобы исследовать влияние спектра сейсмического сигнала на $D_N$, были рассчитаны смещения Ньюмарка для землетрясения и взрыва. Использовались сейсмограммы от землетрясения в Турции

(06.02.2023 г.) с магнитудой $M$=7,7, зарегистрированного на эпицентральном расстоянии 144 км, и массового взрыва в карьере Михайловского ГОКа, проводившегося на эпицентральном расстоянии 0,5 км с суммарным весом зарядов ~3 тыс. тонн ВВ (рисунок 3). На этом рисунке серым цветом обозначена акселерограмма и ее спектр для массового взрыва на Михайловском ГОКе, черным – для землетрясения в Турции. Максимальное ускорение в этих примерах примерно одинаково (PGA=0,33$g$), а основные частоты колебаний $f$ отличались на два порядка. При расчетах $a_c$ изменялась от $10^{-3}g$ до 0,33$g$.

Результаты расчета смещения Ньюмарка для сейсмограмм землетрясения и взрыва представлены на рисунке 4. Видно, что для землетрясения критическое смещение Ньюмарка 10 см достигается при $(PGA/a_c)_{крит}$ порядка 2,5, а для массового взрыва – при 20-30. Это означает, что высокочастотная сейсмовзрывная волна менее эффективна по сравнению с волной от землетрясения с той же амплитудой PGA. Это связано с тем, что для длиннопериодной волны землетрясения (при одних и тех же ускорениях) величина PGV будет существенно выше, чем для взрыва.

Накопление деформаций при многократных воздействиях сейсмовзрывных волн приводит к дополнительному снижению опасного ускорения PGA в 2 раза (до ~10-15 $a_c$).

*(а)*

*(б)*

*(в)*

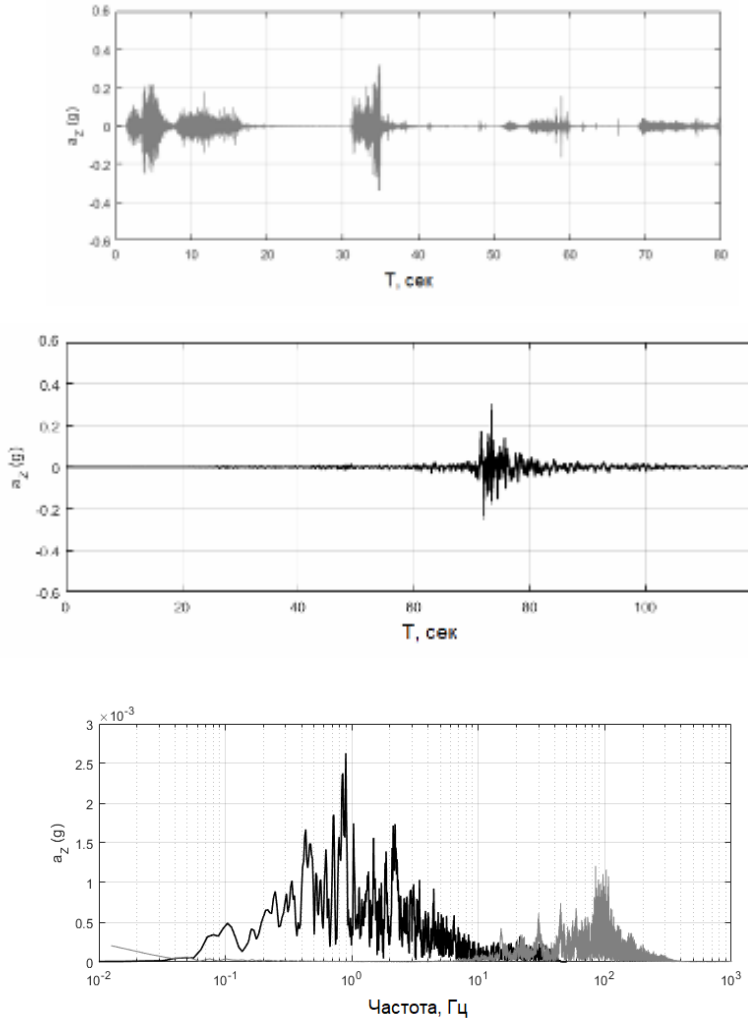



**Рисунок 3 - Акселерограммы, зарегистрированные при проведении массового взрыва в карьере Михайловского ГОКа (а) и при землетрясении в Турции (б) и их спектры (в). Серым цветом показаны записи для взрыва, а черным – для землетрясения**

Для оценки возможной потери устойчивости откосов на отвалах карьера при многократном сейсмическом воздействии массовых взрывов достаточно определить минимальные значения PGA и PGV, при которых могут возникнуть обрушения наименее устойчивых откосов (как правило, это отвалы вскрышных пород). Фрикционные характеристики пород (коэффициент трения и сцепление), слагающих отвалы на Михайловском ГОКе, приведены

в работе [Панфилов А.Ю. Прогноз устойчивости карьерных откосов глинистых пород с учетом пространственно-временной изменчивости инженерно-геологических характеристик. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006, №8, с. 85-90] и составляют φ=24°, С=19,6 кПа для суглинка, φ=20°, С=9,8 кПа для глины бурой и φ=12°, С=68,6 кПа для глины пестроцветной.

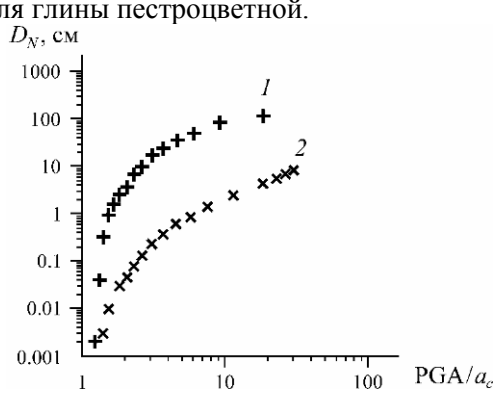



**Рисунок 4 - Рассчитанное смещение Ньюмарка $D_N$ в зависимости от отношения PGA/$a_c$: *1* – землетрясение в Турции; *2* – массовый взрыв в карьере Михайловского ГОКа**

Минимальной амплитуде ускорений в сейсмовзрывной волне PGA=1$g$ соответствует амплитуда скорости смещения грунта PGV=40 мм/с (см. рисунок 2). Такие амплитуды сейсмовзрывной волны в карьере Михайловского ГОКа наблюдаются на приведенном расстоянии 12 м/кг$^{1/3}$ (см. рисунок 1). Откосы обводненных отвалов, расположенные на этом и меньших приведенных расстояниях от блоков, могут разрушиться при многократном сейсмическом действии массовых взрывов. Если учесть, что максимальная масса ВВ в ступени замедления массовых взрывов на Михайловском карьере ~10 т, то расстояние от взрываемых блоков до потенциально разрушаемого отвала составит 240 м и менее. В настоящее время отвалы вскрышных пород Михайловского ГОКа удалены от карьера на 2 км, поэтому угроза их разрушения при сейсмическом действии массовых взрывов отсутствует.

Заметим, что для оценок можно не делать различие между вектором ускорения горизонтальных колебаний и полным вектором ускорений. Для монохроматических синфазных компонент колебаний (вертикальных и двух горизонтальных Ю–С и З–В) с одинаковой амплитудой они отличаются на 73%. На практике, как показывают расчеты вектора ускорений, это отличие из-за несинфазности акселерограмм составляет не более 20%. В настоящей работе напрямую сравнивались $a_c$ и PGA.

**2. В рамках работ 2025 года по Госзаданию № 125012700798-8** проводилась разработка физико-математической и численной моделей развития взрыва зарядов ВВ в группе скважин, формирующих блоки зарядов ВВ типичного промышленного взрыва на Лебединском карьере, и формирования пылегазового облака на начальной стадии взрыва с учетом влияния распределения частиц разрушенной горной породы по размерам на параметры пылевого облака. Оценка влияния вихревых процессов, развивающихся при обтекании ветром профиля открытого карьера, на дисперсию микрочастиц горной породы.

Методами компьютерного моделирования исследовано образование и подъем газопылевого облака, при проведении взрывов в скважинах. Распределение выбрасываемых частиц грунта по размерам описывается формулой Розина–Раммлера, В эту формулу входят два неизвестных параметра, которые определяются экспериментально и характеризуют особенности массива, в котором производятся взрывы. Проведено исследование влияния этих параметров на высоту подъема газопылевого облака и массу содержащейся в нем пыли.

Также исследовалась динамика взаимодействия ветра с поверхностью карьера и распространение пылегазового облака массового взрыва с учетом этого взаимодействия. В модельной постановке (двухмерная геометрия, постоянный во времени набегающий стратифицированный ветер, модельный профиль глубокого (500 м) карьера) продемонстрировано расслоение по вертикали течения в области пространства, ограниченного бортами карьера, на нижнюю и верхнюю зоны различной вихревой структуры. Внутри карьера в окрестности границы между зонами формируется область температурной инверсии. Моделирование распространения облака пыли, сформированного массовым взрывом на уступе наветренного борта карьера, показало, что часть этого облака, расположенная изначально в нижней зоне, переносится вихревыми потоками в сторону противоположного борта и не выходит

за пределы этой зоны, оставаясь внутри карьера (рисунок 5). Единственный путь очистки карьера – медленное истечение воздуха вдоль верхней части наветренного борта. Поступающая этим путем пыль распространяется по ветру вдоль поверхности, влияя на загрязнение отдаленных от карьера территорий.

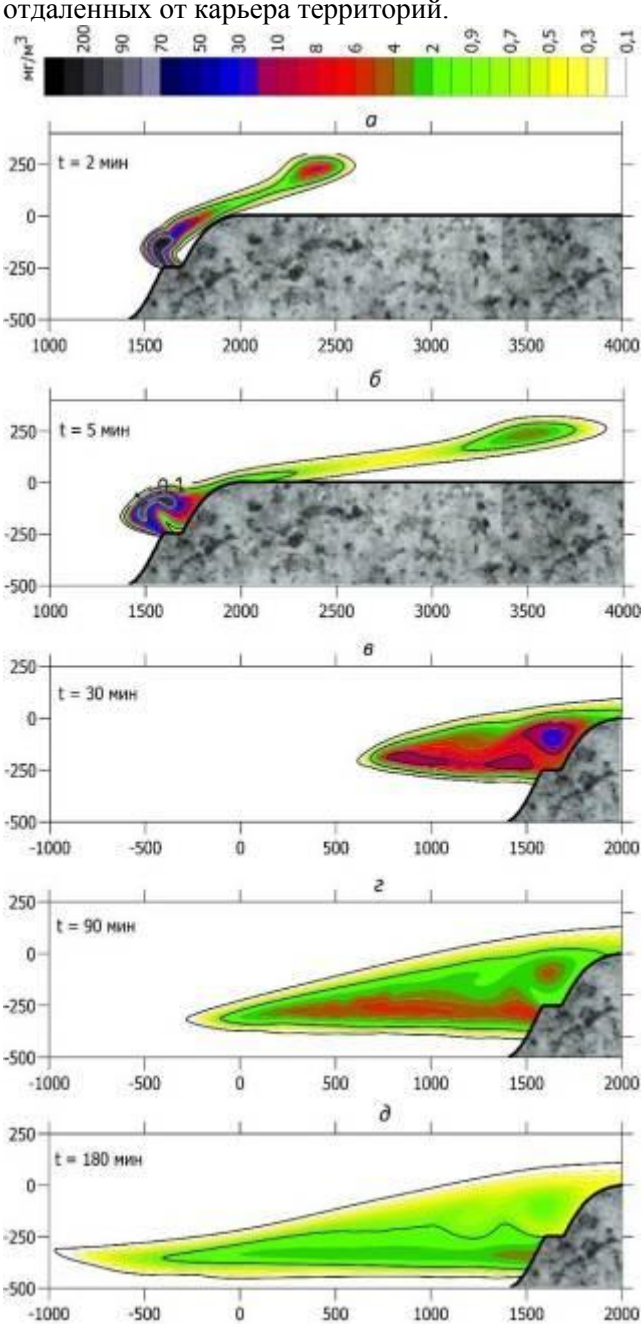



**Рисунок 5 - Взрыв массой 105 т на уступе карьера. Концентрация пыли в облаке в различные моменты времени. Панели *в, г* и *д* отражают характеристики облака только внутри карьера. Расстояния по осям – в метрах**

**3. В рамках выполнения Госзадания 125012200570-5** велись работы по теме «Развитие методов контроля локальных участков земной коры и диагностики протекающих в ней геодинамических процессов разного масштаба».

В 2025 г. на шахте КМАруда был продолжен мониторинг в двух пунктах наблюдения, расположенных в первой зоне горного отвода недр Коробковского железорудного месторождения КМА, включающий сейсмические, гидрогеологические и барометрические измерения.

В 2025 г. один пункт мониторинга на дневной поверхности был переоборудован для передачи экспериментальных данных в ИДГ РАН в непрерывном режиме. Также был организован пункт мониторинга в горной выработке на горизонте -71 м, в котором выполняются измерения водопритоков трещинно-жильных вод из двух горизонтальных шпуров и регистрация микросейсмического фона.

**Список публикаций сотрудников ИДГ РАН в 2025 году в рамках научно-исследовательских работ горной направленности:**

*1. Шарафиев, З.З., Куликов В.И.* Оценка влияния сейсмического воздействия массовых взрывов на устойчивость отвалов вскрышных пород. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. - № 3. - С. 44–52. - DOI: 10.15372/FTPRPI20250305.

*2. Шувалов В.В., Хазинс В.М., Соловьев С.П.* Влияние гранулометрического состава пылевых частиц на формирование и подъем газопылевого облака тротилового взрыва в скважине. // Динамические процессы в геосферах. - 2025. - № 4 - Т. 17. - С. 22–29.

*3. Хазинс В.М., Шувалов В.В., Соловьев С.П.* Численное моделирование вихревых процессов в глубоких карьерах и их влияние на перенос пыли. // Динамические процессы в геосферах. - 2025. - № 3. - Т. 17.- С. 1-14.

*4. Рыбнов Ю.С., Крашенинников, А.В., Соловьев С.П. Рыбнов С.Ю.* Мониторинг концентрации микрочастиц в атмосфере при выносе с поверхности и отвалов Лебединского и Стойленского карьеров. // Рациональное освоение недр. - 2025. - №2(82). - С. 66–72.

*5. Горбунова Э.М., Иванченко Г.Н., Петухова С.М.* Исследование природно-техногенных морфоструктур в условиях низкогорья. // Геофизические процессы и биосфера. - 2025. - № 4. - Т. 24. - С. 130-134.

*6. Горбунова Э.М., Поклад Ю.В., Беседина А.Н., Ряховский И.А., Гаврилов Б.Г., Козакова, Е.В., Петухова С.М., Сапунова А.И.* Реакция геофизической среды на землетрясения 06.02.2023 г. на юго-востоке Турции (по данным геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН). // Геофизические процессы и биосфера. - 2025. - № 4. - Т. 24. - С. 81-93.

*7. Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М., Петухова С.М.* Ранжирование равнинного ландшафта по степени техногенных изменений. // Геофизические процессы и биосфера. - 2025. - № 2. - Т. 24. - С. 100-118.

*8. Иванов А.Г., Караваев А.В., Федоров А.Ю.* Реакция систем «пласт–скважина» и «пласт–выработка» на промышленный взрыв. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 4. – С. 135–151.

*9. Горбунова Э.М., Петухова С.М., Кабыченко Н.В., Караваев А.В., Федоров А.Ю*. Постсейсмические вариации уровня подземных вод при разработке железорудных месторождений КМА. // В книге: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIX Международной сейсмологической школы. Обнинск, 2025. С. 30.

*10. Gorbunova E.M., Besedina A.N., Petukhova S.M., Huang F., Chen Y.* Response of «reservoir-well» systems to quasi-stationary and episodic impact in seismoactive and platform regions // В сборнике: Современные техника и технологии в научных исследованиях. Сборник материалов XVII Международной конференции молодых ученых и студентов. Бишкек, 2025. С. 4-10.

*11. Кишкина, С.Б., Сутулов Е.А.* Сейсмические характеристики площадок для станций МСМ на территории России. Ретроспектива. // Динамические процессы в геосферах. — 2025. — № 2. - Т. 17. - С. 1–16. - DOI: 10.26006/29490995-2025-17-2-1.

## 2.3. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ХАБАРОВСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

## ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

В 2025 году научно-исследовательские работы в Институте горного дела ДВО РАН велись по следующим направлениям программы фундаментальных научных исследований:

– **1.5.7.2.** Комплексная, технологически эффективная и экологически безопасная добыча, обогащение и глубокая переработка минерального сырья

– **1.5.7.3.** Развитие методов мониторинга развития опасных техногенных процессов; обеспечение безопасного ведения горных работ

– **1.5.7.4.** Изучение и моделирование горнотехнических систем и процессов техногенного преобразования недр

## ГОРНОЕ НЕДРОВЕДЕНИЕ

**Геомеханика.** Разработан метод раннего предупреждения опасных геодинамических явлений при подземном освоении недр, основанный на интеграции разномасштабных данных сейсмоакустического мониторинга (рисунок 1) и их интеллектуального анализа с применением адаптированных моделей случайного леса и градиентного бустинга, обученных на временных рядах с компенсацией дисбаланса классов через модифицированные функции потерь. Апробация метода в условиях опасного по горным ударам месторождения Южное показала его высокую эффективность, его применение обеспечивает достоверное прогнозирование опасных геодинамических явлений с точностью 84% при пороговом значении вероятности 0,2.

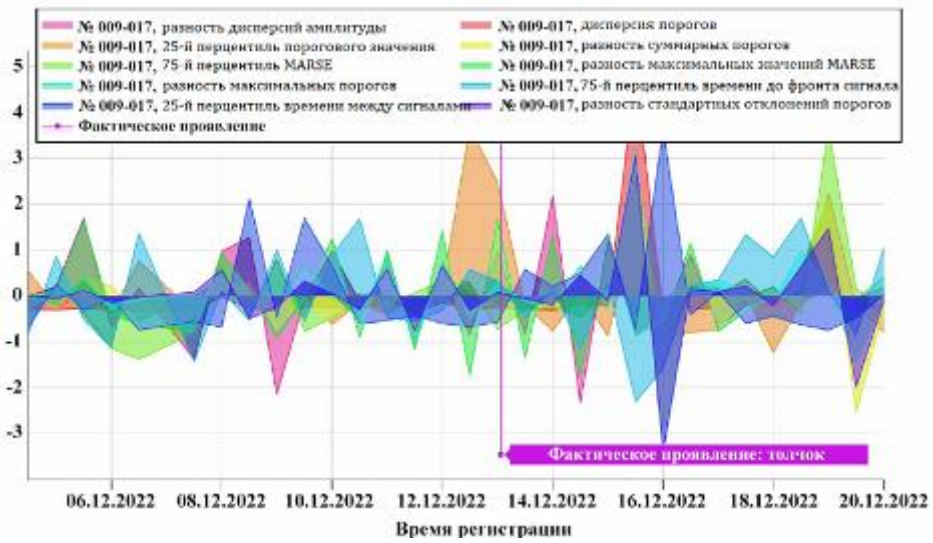



**Рисунок 1 - Временной ряд параметров сейсмоакустических сигналов до и после подземного толчка № 2093 (13 декабря 2022 г., месторождение Южное): по оси X – время регистрации; по оси Y – z-нормализованные значения параметров**

На базе установки объемного сжатия разработан лабораторный измерительно-вычислительный комплекс для углубленного изучения механизмов разрушения горных пород обеспечивающий регистрацию и обработку генерируемых сигналов АЭ с использованием быстрого преобразования Фурье, информационного критерия Акаике и специализированных алгоритмов для локации источников микроразрушения. Реализация указанных методов позволяет проводить исследования деформационных и акустических процессов на структурном уровне и в перспективе повысить надежность прогноза опасных геодинамических явлений.

**Геотехнология.** Для подготовки к выемке пород многолетней мерзлоты буровзрывным способом разработан и внедрен метод камуфлетно-скважинного взрывания с применением рассредоточенного скважинного заряда (рисунок 2), предназначенный для рыхления многолетнемерзлых гравийно-галечниковых пород на угольных разрезах в криолитозоне. Ключевой особенностью данного метода является разделение скважинного заряда на верхнюю и нижнюю части, при этом верхняя часть заряда инициируется отдельно от нижней камуфлетной части с выдержкой времени около суток, позволяет создать искусственный квазипарниковый эффект за счет тепловой энергии от запирания продуктов детонации нижней части горного массива. Внедрение данного метода на разрезе «Буреинский» (Хабаровский край) позволило достичь снижения удельного расхода взрывчатых веществ более, чем в 1,5 раза, уменьшить величину перебура скажины, а также повысить уровень безопасности за счет увеличения единичного объема массового взрыва в 2 раза и более.

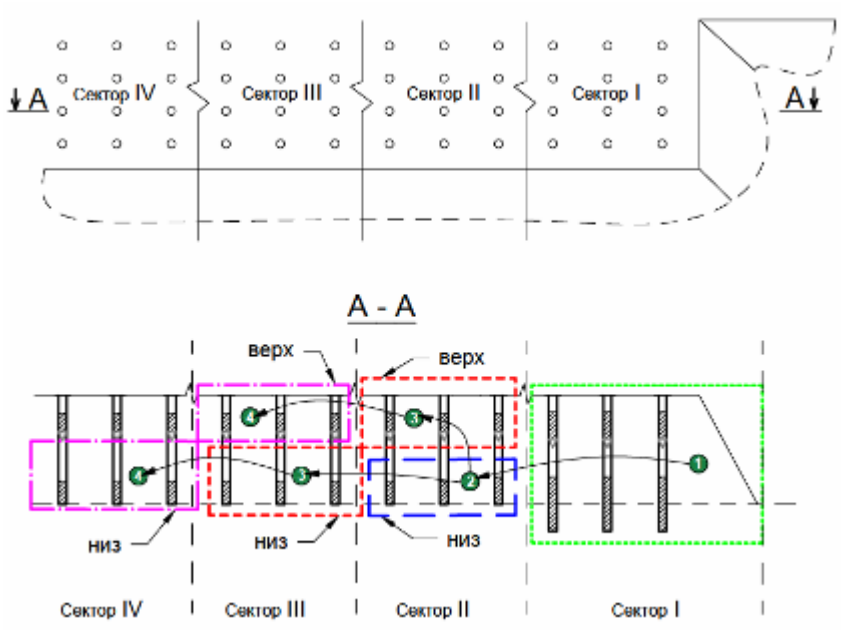



**Рисунок 2 - Схема последовательности взрывания массива уступа из МГГГ: 1-4 (в кружках) – порядок взрывания верхней и нижней частей секторов I-IV**

Разработана технология освоения удаленных маломасштабных месторождений с гибким управлением качеством рудной массы, заключающаяся в селективной выемке руд, их транспортировке к перерабатывающему комплексу, грохочении с выделением несортируемого и сортируемых классов и последующей рентгенорадиометрической и тяжелосредной сепарации минерального сырья. Выделенные в процессе сепарации концентраты с высоким содержанием полезного компонента транспортируются на значительное расстояние к золотоизвлекательной фабрике, а промпродукты с относительно низким содержанием металла перерабатываются на месте с применением технологий кучного и кюветного выщелачивания. Реализация предлагаемой технологии позволит увеличить сквозное извлечение металла и снизить себестоимость его получения.

По результатам лабораторных исследований обоснован способ получения коллективного концентрата тяжелых минералов из песков россыпных месторождений золота, дальнейшее обогащение и извлечение комплекса полезных компонентов из которого предполагается осуществлять гравитационными и физико-химическими методами. Разработан и изготовлен шлюз с непрерывной разгрузкой концентрата; в ходе его испытаний и отладки режимов работы из проб россыпных месторождений Хабаровского края получены коллективные концентраты, содержащие до 34,7% тяжелых минералов (Fe, Ti, Cr, Mn, Ni, Zn, W, Cu, V, Pt, Ag и др.), причем в мелких классах крупности (-0,2+0,0 мм) – до 80%. Установлено, что класс крупности -0,2+0,0 мм является наиболее продуктивным по содержанию попутных ценных компонентов.

Разработан способ отработки техногенных россыпных месторождений благородных металлов с формированием обогащенных зон. Сущность способа заключается в создании в теле россыпи устойчивого фильтрационного потока, обеспечивающего миграцию (перемещение) частиц высокой плотности, за счет чего формируется обогащенный слой песков. Для создания эффективного режима миграции ценных компонентов производится последовательное рыхление подготавливаемого блока песков продольно-поперечными ходами, и периодическое послойное удаление песков с низким содержанием ценного компонента после проведения геологического опробования. Промывка сформированного обогащенного слоя песков с повышенным содержанием ценного компонента осуществляется на промывочном приборе с развитой схемой обогащения. Применяется для отработки техногенных россыпных месторождений благородных металлов.

В пробах рудных интервалов золоторудного месторождения Чульбаткан (скважины 008 и 039, интервалы глубин от 103-104 м до 278-279 м) определены минералы теллуридов

золота, серебра, свинца, висмута: петцит (Ag3AuTe2), алтаит (PbTe) (рисунок 3), гессит (Ag2Te), теллуровисмутит (Bi2Te3), тетрадимит (Bi2Te2S), а также выявлены зёрна самородного золота (электрума с примесью серебра до 19 % масс) и самородного серебра.

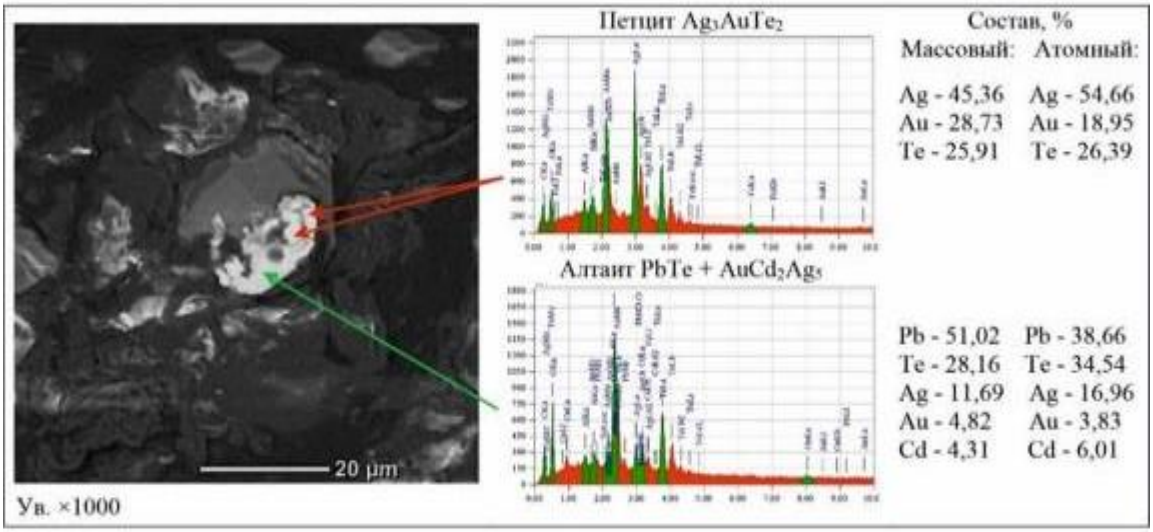



**Рисунок 3 - Петцит Ag3AuTe2 (3 мкм) и алтаит PbTe + AuCd2Ag5 (до 10 мкм), нарастающие на кристалл пирита**

Установлено, что выделения теллуридов и благородных металлов (от долей мкм до 10-40 мкм) в виде тонкой вкрапленности в сростках пирита и халькопирита сопровождаются прожилково-вкрапленными выделениями галенита, сфалерита, блёклых руд (теннантита-тетраэдрита с Zn). Повышенные содержания теллура и золота приурочены к интенсивно каолинизированным, серицитизированным, хлоритизированным, окварцованным гранитоидам (плагиогранитам). Тонковкрапленные и прожилковые выделения рудных минералов сопровождаются выделениями доломита с рассеянной вкрапленностью высокоуглеродистых образований. Полученные результаты могут послужить основой для разработки технологий попутного извлечения теллура.

**Геоэкология.** В целях экологического мониторинга районов россыпной золотодобычи разработана методика оценки мутности речной воды с использованием методов дистанционного зондирования Земли и выявлены закономерности пространственного распределения взвешенных веществ на участке слияния рек Б. Уссурка и Колумбе, Первая, Вторая, Третья Щедринка. Для точек, доступ к которым затруднен, разработан алгоритм автоматического расчета показателя, который позволяет выявить оптимальную формулу индекса мутности путем сравнения результатов с данными натурных измерений.

## ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

**Физические и химические процессы разделения, концентрации и переработки минералов.** Разработана технология сорбционного выщелачивания золота из техногенного россыпного минерального сырья для доизвлечения «тонкого» (менее 0,1 мм) и «чешуйчатого» золота, теряемого при стандартной промывке содержащих его продуктивных песков. Технология обеспечивает интенсивное растворение-выщелачивание таких форм золота из отходов горного производства, совмещенном с его локальной электросорбцией (поглощением) сорбентом, предварительно обработанным специальным активированным раствором, содержащим бесцианидный реагент. При этом сорбент находится во внутренней камере с перфорированной поверхностью, в которую проникает только мелкая фракция минеральной массы с «тонким» и «чешуйчатым» золотом. Для реализации технологии разработана компактная установка (рисунок 4).

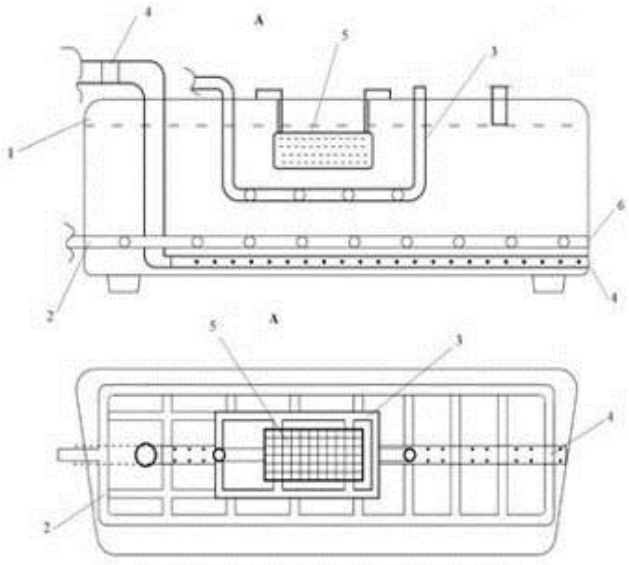
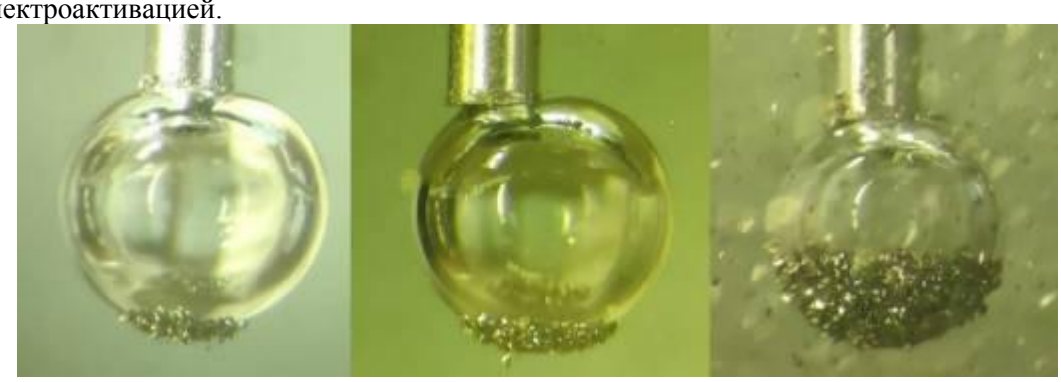


**Рисунок 4 - Минипачук с электросорбером для выщелачивания сложноизвлекаемых форм золота из хвостов промывки песков россыпей: 1 - емкость для выщелачивания, 2 - основной барботажный контур, 3 - локальный барботажный контур, 4 - пульпопровод, 5 – электросорбер, 6 - воздухоотвод с перфорированными трубами**

Методом молекулярной динамики получены новые результаты «поведения» молекул воды на поверхности пирита, показывающие уменьшение энергии их связи с ионами железа при участии активного иона гидроксония. Установлено, что присутствие активного иона гидроксония на расстоянии до 5,5 Å от поверхности минерала влияет на связи между молекулами пленочной воды, снижая количество водородных связей между молекулами. Теоретические расчеты подтверждаются результатами экспериментальных исследований кинетики закрепления частиц пирита при введении в пульпу при флотации активированного раствора католита. Наблюдается увеличение относительной площади закрепления минеральных частиц на пузырьке воздуха (рисунок 5). Полученные результаты позволяют оценить влияние активированных растворов на процесс закрепления пузырька воздуха на минеральной частице и показывают дополнительные возможности интенсификации процесса флотации и перспективность внедрения комбинированных методов обогащения связанных с электроактивацией.



***а*** ***б*** ***в***

**Рисунок 5 - Кинетика закрепления минеральных частиц на пузырьке воздуха: а – деионизированная вода; б – содовый раствор (0,05М); в – католит**

С целью повышения комплексности использования перерабатываемого минерального сырья разработана комбинированная схема обогащения бедной золото-меднопорфировой руды, включающая коллективно-селективную флотацию и магнитную сепарацию хвостов коллективной флотации. Детальными электронно-микроскопическими исследованиями в составе полученных золото-медных концентратов в халькопирите выявлены Bi, Te, Se, Cd, In в форме микровключений собственных минералов и примесей. В магнетитовых концентратах установлено самородное железо в виде свободных микрозерен и микровключений

в магнетите с примесью Cr, Ti, V; выявлено присутствие лантаноидов Ce, La, Nd; идентифицирован Co, Ti-содержащий ферберит. В сростках магнетита с кварцем определены микровключения аргентита и самородного серебра с примесью Cd. Выявлены интерметаллиды состава Fe Cr Ni Ti Mn и Pb Sb Zn Sn Fe; как компонент интерметаллидов определен In.

Разработан способ активационного кучного выщелачивания комплексных руд, который включает рудоподготовку, многостадиальное дробление руды и ее послойную укладку в штабели, выщелачивание на первом этапе ценных компонентов, образующих сульфатные комплексы (медь, цинк, частично молибден) водо-газовыми эмульсиями, подготовленными электроактивацией сернокислотного раствора и его барботажа озоном, с орошением руды оборотными растворами до падения концентрации этих ценных компонентов в продуктивном растворе, после чего орошение прекращают и производят обуривание штабеля скважинами, через которые производят орошение минеральной массы первоначально водой с вымыванием ее мелкофракционной шламообразующей составляющей к основанию штабеля и накоплением ее в аккумуляционной кювете. Затем через скважины подают раствор реагентов, подготовленный электроактивацией сернокислотного раствора с введенным в него хлоридом натрия и его барботажа озоном, обеспечивающий выщелачивание ценных компонентов, образующих хлоридные комплексы (золота, серебра). Данная технология может быть применена для рентабельного и экологичного извлечения цветных и благородных металлов из бедных, упорных или техногенных руд методом кучного выщелачивания.

**Научно-организационные мероприятия.** В период с 24 по 27 сентября 2025 года в г. Харбин состоялась X Международная научная конференция «Проблемы комплексного освоения георесурсов», организованная Институтом горного дела ДВО РАН совместно с Хэйлунцзянским научно-техническим университетом. Ключевым событием конференции стала церемония открытия Китайско-российского альянса в области освоения минеральных ресурсов. Консолидация ведущих ученых, экспертов и представителей предприятий, занимающихся разработкой минеральных ресурсов – качественно новый этап в развитии отношений между Россией и Китаем в вопросах освоения минеральных ресурсов.

В рамках конференции состоялась официальная церемония открытия на базе Хэйлунцзянского научно-технического университета российско-китайской лаборатории интеллектуальных шахт.

**Публикации Института.** Сотрудниками Института в 2025 году опубликовано: 4 монографии, 1 учебник, 104 статьи, в том числе 91 в отечественных и 13 в зарубежных изданиях, из них индексируемых в Web of Science – 19, в Scopus – 32, входящих в ядро РИНЦ – 56, в Белый список – 75.

## 2.4. ИНСТИТУТ УГЛЯ ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА УГЛЯ И УГЛЕХИМИИ СО РАН

### *Обоснование оперативного метода определения коэффициента затухания спектральных составляющих звука, генерируемого работающим горным оборудованием в углепородный массив*

Обоснован оперативный метод определения коэффициента затухания спектральных составляющих звука, генерируемого работающим горным оборудованием в углепородный массив.

Для его измерения предложено использовать многоканальную результирующую аппаратуру, например, Мекон-ГЕО. Расчет коэффициента затухания осуществлялся по формуле $\alpha_{i1} = -\frac{\ln\left(A_i / A_1\right)}{r_{i1}}$, $i\epsilon[2; 5]$, где $\alpha_{i1}$ – эффективный коэффициент затухания на участке между 1-м и $i$-м СМП, м$^{-1}$; $A_1$ и $A_i$ – соответственно амплитуды гармоник на 1-м и $i$-м СМП, у.е.; $r_{i1}$ – расстояние между $i$-м и 1-м СМП, м.

Для исключения немонотонного убывания амплитуды гармоник спектра с расстоянием предложено усреднять их во времени 20-30 минут, а длину частотных окон линейчатого спектра сигнала брать равной 200-300 Гц.

Для линейно возрастающей части спектра в диапазоне 0-600 Гц приведена зависимость $\alpha_{ср}(f)$ (сплошная линия) и ее линеаризованная экстраполяция (пунктир) в диапазоне 0-600 Гц.

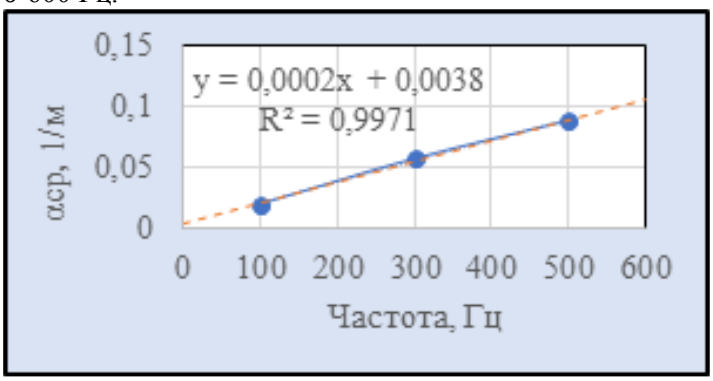



**Рисунок 1**

По результатам эксперимента получено следующее выражение для определения коэффициента затухания *i*-ой спектральной составляющей «шума» комбайна:

$\alpha_i = 0,0038 + 0,00012 f_i \frac{\sigma_{np}}{\sigma_m}$, м$^{-1}$; где $\sigma_{np}$ и $\sigma_m$ – средние соответственно предельное и текущее значения напряжений в массиве, Па.

Сведения об опубликовании:

Шадрин А.В., Шнайдер И.В. Влияние удаления сейсмоприемника от забоя выработки на спектр акустического излучения комбайна при прогнозе динамических явлений. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2025. - Вып. 1. – С. 722-737.

Шадрин А.В., Шнайдер И.В. Об адаптации комплекса «Микон-ГЕО» для прогноза динамических явлений в угольных шахтах. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2025. - Вып. 1.- С. 703-721.

### *Изменение напряжённого состояния массива в процессе применения метода направленного гидроразрыва*

Разработанный подход обеспечивает достоверность расчётов напряжённого состояния горных пород, расположенных в кровле пластовой выработки, при наличии в них трещины гидроразрыва, достигшей конечной длины и рациональное применение метода направленного гидроразрыва.

На рисунке 2 построен график зависимости горизонтальных растягивающих напряжений ($\sigma_{y.k}$) в середине потолочины подготовительной выработки от толщины породного слоя между кровлей выработки и горизонтальной гидротрещиной ($L_s$). Расчёты проведены при следующих данных. Глубина разработки 650 м; объёмный вес пород 25 кН/м$^3$; предел прочности угольного пласта 10 МПа; его угол внутреннего трения 20°; ширина и высота выработки 5 м и 3 м; модуль упругости пласта 5000 МПа, его коэффициент Пуассона 0,25. Длина трещины гидроразрыва 18 м, давление жидкости 20 МПа. Из графика следует, что при $L_s$=6 м в потолочине возникает растягивающее напряжение, равное 15,95 МПа, которое соответствует коэффициенту крепости $f$=15,95 единицы. Т.е. при меньших значениях $f$ в потолочине возникнут трещины разрыва, приводящие, к потере устойчивости выработки.

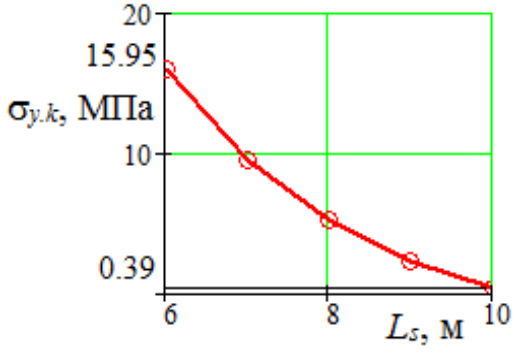



**Рисунок 2 - График зависимости горизонтальных растягивающих напряжений $\sigma_{y.k}$ в точке *D* от толщины $L_s$ породного слоя. *p*=20 МПа**

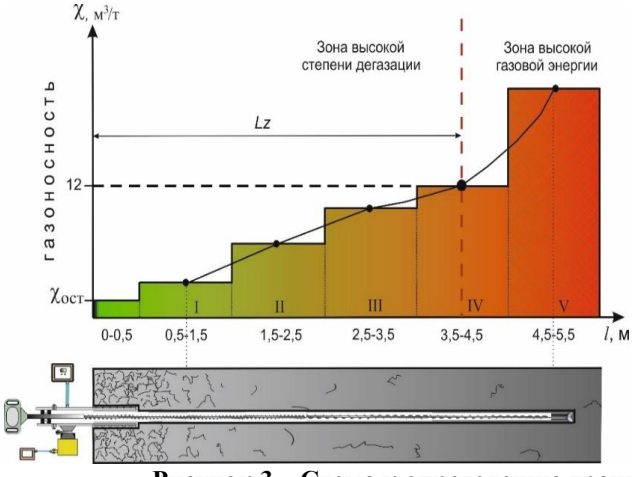
Сведения об опубликовании:

Черданцев, Н.В. Влияние трещины направленного гидроразрыва на состояние пород кровли пластовой выработки / Н.В. Черданцев // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 8. – С. 14-19.

Черданцев, Н.В. К расчёту параметров трещины гидроразрыва при первой посадке прочных пород основной кровли пласта в очистной выработке / Н.В. Черданцев // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2025. – № 3. – С. 12-20.

### *Разработка метода оперативного определения газоносности угольного пласта для расчета безопасных по газовому фактору технологических параметров при ведении горных работ*

Разработан инновационный метод определения газоносности угольного пласта без «упущенного» газа для расчета безопасных по газовому фактору технологических параметров при проведении забоев шахт, отрабатывающих пласты с полным обрушением кровли. На этапе шахтных экспериментов применяется специальное техническое устройство (патент РФ на изобретение № 2768245) для отбора проб в изолируемом от атмосферы выработки режиме с измерением газокинетических параметров разрушаемого угля. Этап лабораторных исследований основывается на ступенчатых выпусках газа из проб с получением до 25 показателей угля, отражающих склонность пласта к возникновению опасности по газовому и газодинамическому факторам. Метод позволяет определять границы зоны газовой опасности в зависимости от глубины заходки комбайна $l_з$. Разработан показатель Lz, определяющий расположение зоны высокой газовой энергии относительно забоя подготовительной выработки и отражающий положение равенства препятствующих и активных сил инициализации внезапного выброса.




$Lz > 2{,}8 \cdot l_з$ – безопасные условия проходки выработки;

$Lz < 2{,}8 \cdot l_з$ – вероятно появление инцидента в виде динамического газопритока в выработку, приводящего к ее загазированию, (выбросоопасная ситуация);

$Lz < 1{,}4 \cdot l_з$ – создается наиболее опасная ситуация для проявления выброса угля и газа в выработке

**Рисунок 3 – Схема к определению границ опасной по газовому фактору зоны относительно подвигания забоя выработки**

Сведения об опубликовании:

Инструментальные исследования газокинетических характеристик угольного пласта в его призабойной части / Е.Н. Козырева, А.А. Рябцев, М.С. Плаксин и др. // Уголь. 2025;(12):39-45. - DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-39-45.

### *Разработка способа «безлюдной» выемки мощных крутонаклонных пластов с выпуском угля с применением гидрофицированной крепи шагающего типа, комплексов гидравлического разрыва для подготовки угольного пласта к выпуску и бурошнекового глубокого бурения*

На основе многолетнего опыта разработан перспективный способ отработки труднодоизвлекаемых запасов угля из мощных крутонаклонных пластов склонных к самовозгоранию и труднообрушаемыми породами кровли. Таким образом обоснована возможность значительного снижения потерь угля при добыче подземным способом из приконтурных зон горных выработок. Разработанная технология исключает возможность возникновения

эндогенных пожаров за счёт нагнетания в выработанное пространство аэрозоли, состоящей из микроскопических капель антипирогена.

Одним из важных элементов разработанной технологии подэтажной выемки является разработанная специалистами Института угля роботизированная крепь шагающего типа. Экономический эффект разработанной технологии заложен в возможности отрабатывать трудноизвлекаемые запасы полезных ископаемых с минимальными капиталовложениями и эксплуатационными затратами используя, при этом, имеющуюся на горнодобывающем предприятии инфраструктуру, машины и оборудование.

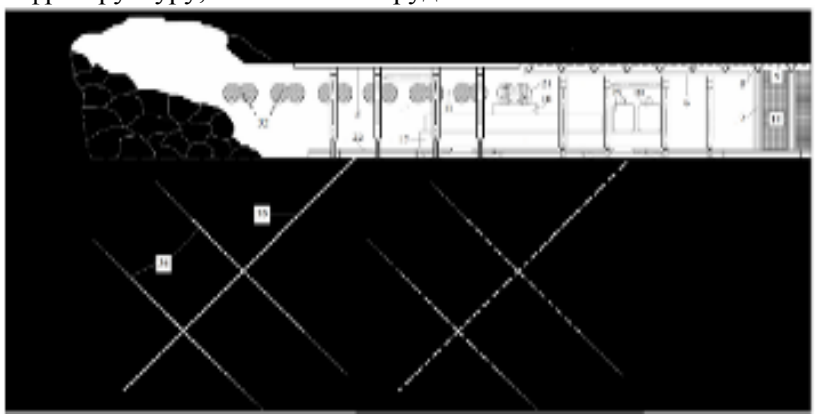


**Рисунок 4**

***Разработка методики промышленных испытаний роботизированного комплекса для оценки его технического состояния и планирования технического обслуживания***

Предлагаемое решение задачи оценки остаточного ресурса сложных систем учитывает вектор технических параметров состояния объекта, внешние условия эксплуатации в текущий момент времени и их изменение за рассматриваемый период, изменение вектора режима эксплуатации за рассматриваемый период и результаты диагностики. Для формирования единого диагностического критерия по множеству имеющихся диагностических признаков предлагается следующий алгоритм.

Рассмотренные способы выделения тренда детерминированной компоненты для построения прогноза позволяют получить меры достоверности для статистических оценок.

Впервые, в зависимости от формы технического обслуживания, рекомендованы методики долгосрочного (по методу наименьших квадратов) и краткосрочного (адаптивная экспоненциальная модель) прогнозирования и разработаны соответствующие алгоритмы получения оценок.

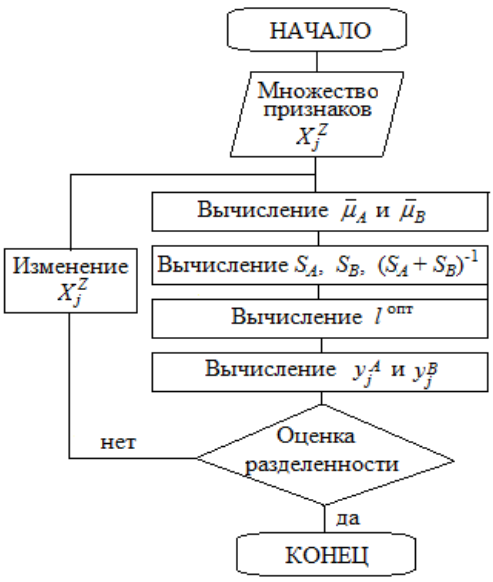



**Рисунок 5 - Алгоритм формирования единого диагностического критерия**

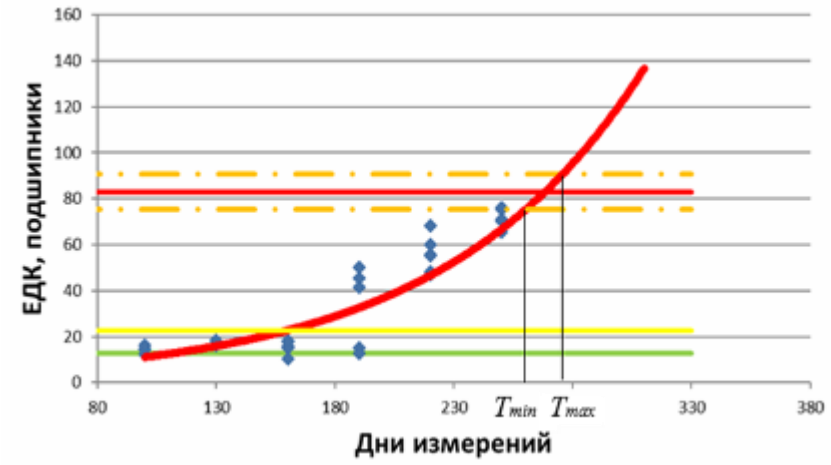



**Рисунок 6 - Схема изменения технического состояния объекта диагностики в координатах «диагностический параметр – время»**

Сведения об опубликовании:

Герике, П.Б. Применение единых критериев для диагностики и прогнозирования технического состояния подшипников / П.Б. Герике, Б.Л. Герике // Горное оборудование и электромеханика. – 2025. – № 4(180). – С. 76-82.

Герике Б.Л., Швыдкин С.А. К вопросу создания системы мониторинга технического состояния несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов. // Уголь. - 2025;(12). – С. 68-71. - DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-68-71.

### *Разработка методических рекомендаций по оценке достоверности геологической информации угольных месторождений*

Руководствуясь общемировым признанием того, что категория разведанности, выступает в качестве меры достоверности запасов, группой специалистов Института угля СО РАН, КузГТУ ведутся исследования по количественной оценке достоверности запасов угольных месторождений, по результатам которой доработана версия Методических рекомендаций по ее выполнению, общая структура которой представлена на рисунке.

Доработанная с учетом многолетнего российского опыта и опыта стран членов БРИКС версия Методических рекомендаций по количественной оценки достоверности запасов не имеет аналогов, которая включает рекомендации по плотности разведочной сети в зависимости от сложности условий залегания и выдержанности угольных пластов, учитывает особенности геометризации гипсометрии пластов сложнодислоцированных месторождений, содержит подход к формированию многовариантных моделей показателей угольных месторождений с учетом неопределённости геологических данных и граничные значения допустимых погрешностей основных показателей угольных месторождений, что позволяет объективно относить запасы к той или иной категории по степени достоверности.

Использование Методических рекомендаций позволит выполнить нормативные требования, снизить геологический риск при освоении недр, повысить доказательность и надежность оценок достоверности запасов минерально-сырьевой базы. По кругу ре-шаемых задач Методические рекомендации отвечают цели, определенной пунктом 36 Плана мероприятий по реализации Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года, утвержденного распоряжением Правительства РФ от 04.03.2025 №500-р.

Сведения об опубликовании:

Шаклеин, С.В. Методическое обеспечение количественной оценки достоверности разведанных запасов угля / С.В. Шаклеин, Т.Б. Рогова, М.В. Писаренко // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2025. – № 4(195). – С. 35-43.

Шаклеин С.В., Рогова Т.Б., Писаренко М.В. Руководство по количественной оценке достоверности запасов угля // Уголь. – 2025. – № 12S. – С. 34-38.




**Рисунок 7 - Основные разделы Методических рекомендаций по количественной оценке достоверности запасов угольных месторождений**

### *Разработка лабораторных методик исследования химического состава реакционной поверхности нативного угля и ее смачиваемости водой, технологическими растворами и суспензиями*

Разработаны методы оценки физико-химических свойств поверхности нативных углей после их обработки технологическими растворами для дезактивации процесса окисления и самовозгорания. С использованием методов электронной микроскопии и ИК-спектроскопии для низкометаморфизованного угля Д установлена возможность химического взаимодействия $Ca(OH)_2$ с функциональными группами угля за счет ионного обмена катионов кальция и атомов водорода ОН- и СООН-групп. Для среднеметаморфизованного угля СС закрепление $Ca(OH)_2$ преимущественно основано на физической адсорбции молекул щелочи на участках неоднородности электронной плотности угольной поверхности (сколах, трещинах, шероховатостях). Установлена большая плотность и частота покрытия реагирующей поверхности солями кальция для низкометаморфизованного угля марки Д (рисунки 8, 9).

*а* *б*

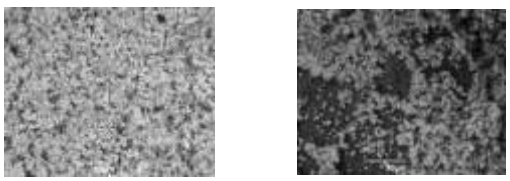


**Рисунок 8 - Микрофотографии поверхности углей Д (а) и СС (б), обработанных раствором $Ca(OH)_2$**

*а* *б*

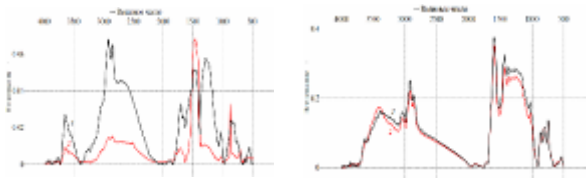


**Рисунок 9 - ИК-спектры углей Д (а) и СС (б) – нативных (*1*) и после обработки раствором $Ca(OH)_2$ (*2*)**

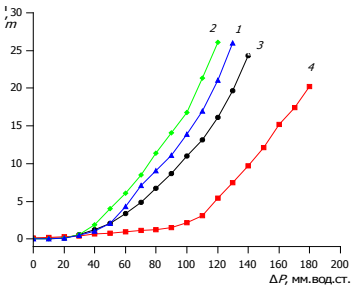



**Рисунок 10 - Результаты фильтрации $Ca(OH)_2$ с pH среды 7,0 (1), 8,8 (2), 10,9 (3), 12,5 (4) через слой угля Д**

*а* *б*

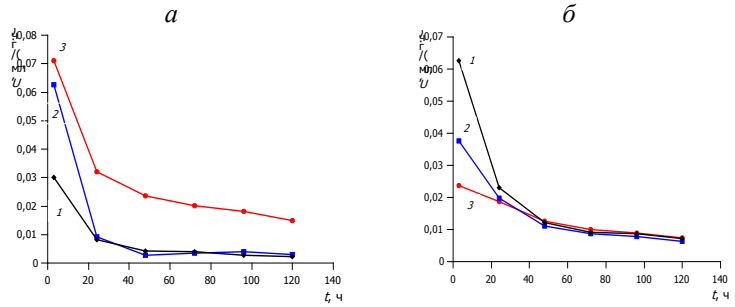



**Рисунок 11 - Динамика скорости сорбции кислорода при 25°С для образцов углей Д (а) и СС (б): нативных (1) и после обработки фильтратом (2) и суспензией (3) $Ca(OH)_2$**

Исследовано влияние pH раствора $Ca(OH)_2$ на смачиваемость поверхности и фильтрационные свойства угля. Установлено, что растворы $Ca(OH)_2$ с pH<8,8 имеют лучшую фильтрационную способность по отношению к воде (pH=7) за счет повышения полярности среды. Снижение фильтруемости растворов с pH>10,9 связано с ***формированием зародышей кристаллизации на фронте движения жидкости и сухого угля, что способствует гидрофобизации поверхности угля*** (рисунок 10).

Обработка растворами $Ca(OH)_2$ с целью ингибирования процесса окисления и самовозгорания имеет эффективность для углей средней стадии метаморфизма в условиях низкотемпературного окисления (25°C) на начальном этапе их взаимодействия с кислородом воздуха (рисунок 11). Пропитка растворами $Ca(OH)_2$ низкометаморфизованных углей, напротив, способствует развитию окислительных реакций при 25°C, возможно, вследствие катализа процесса окисления в щелочной среде.

Сведения об опубликовании:

Влияние обработки фюзенизированного угля газовыми средами на начальные стадии окисления в воздушной среде / С.А. Семенова, Ю.Ф. Патраков, А.В. Яркова [и др.] // Химия твердого топлива. – 2025. – № 5. – С. 33-42

Зависимость смачиваемости поверхности и фильтрационной способности углей от степени метаморфизма / Ю.Ф. Патраков, С.А. Семенова, Т.А. Папина, А.В. Яркова // Химия твердого топлива. – 2025. – № 4. – С. 57-63. – DOI 10.31857/S0023117725040066. – EDN LVZNPV.

### *Разработать концепцию определения множества возможных вариантов роботизации технологий подземных и открытых горных работ с человеко-машинным управлением*

1. Разработана универсальная системно-функциональная модель технологий подземных и открытых горных работ на основе методологии семейства IDEF0, позволяющая учитывать все возможные варианты роботизации технологических процессов.

2. Получена зависимость числа возможных вариантов роботизации технологий подземных и открытых горных работ от множества моделей горных машин, применяемых в конкретных горнотехнических условиях, способов их комплектации и уровней роботизации технологических процессов.

3. Разработана концепция определения множества возможных вариантов роботизации подземных и открытых горных работ с человеко-машинным управлением, позволяющая расширить область поиска решений за счет не рассматриваемых ранее вариантов неполной роботизации технологических процессов и повысить эффективность выбора рациональных параметров технологий без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ (рисунок 12).

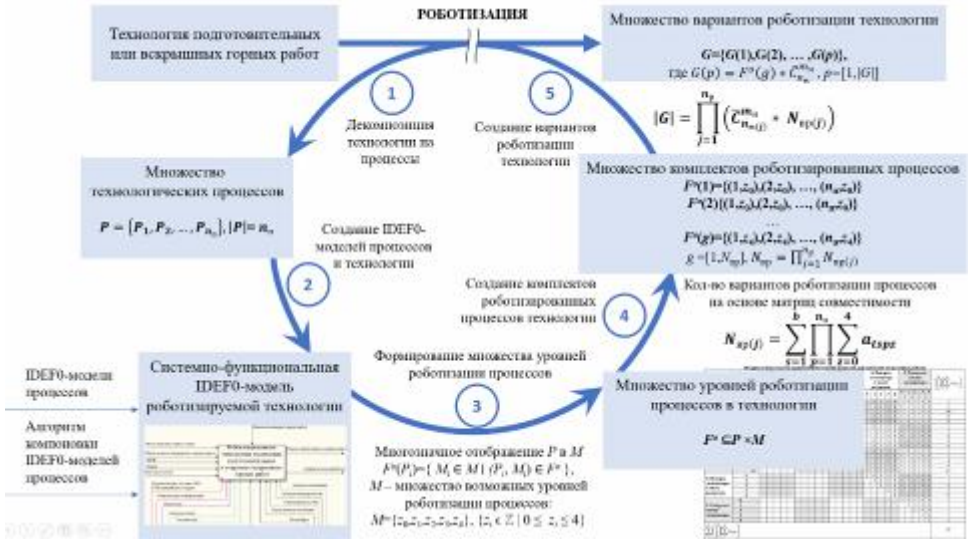



**Рисунок 12**

4. Концепция апробирована при определении множества вариантов роботизации технологий подземных и открытых горных работ для конкретных условий угледобывающих предприятий. Мощность множества показала, что учет уровней роботизации увеличивает количество вариантов применения средств робототехники в технологиях в $10^4$ и более раз.

Сведения об опубликовании:

Концепция синтеза вариантов роботизации вскрышных горных работ // Вестник Кузбасского государственного технического университета / Зиновьев В.В., Кузнецов И.С.

***Обоснование технологии и оборудования выемки мощных пологих пластов***

Наиболее ценные и поставляемые на экспорт марки каменного угля залегают в мощных пластах и добываются преимущественно подземным способом. Известны способы выемки угольных пластов, активно применяемые за рубежом. Возможность импортозамещения может быть реализована при внедрении технологии применения специализированных очистных механизированных комплексов с выпуском угля на забойный конвейер, разрабатываемой в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН. Высокая производительность и полнота выемки мощных угольных пластов с выпуском угля подкровельной толщи с использованием специальной механизированной крепи обеспечивается за счёт формирования разворота потока угля, образуемого рядом передвижек комплекса (рисунок 13а). При этом более стабильное, равномерное и полное заполнение конвейера при одновременном выпуске угля из нескольких секций специальной механизированной крепи по сравнению с другими режимами обеспечивает волновой режим выпуска угля. Разработан комплекс методов компьютерного моделирования для предиктивного анализа геотехнологий, исследования и программируемого управления движением горной массы. Создана методика определения для конкретных горно-геологических условий при использовании волнового режима выпуска количества, последовательности запуска и значений массового расхода на каждой управляемой секции крепи, позволяющие в динамике поддерживать заполнение конвейера на уровне, близком к максимальному. Обоснованы сочетания параметров технологии с выпуском угля подкровельной толщи, позволяющие обеспечить наибольшую эффективность выпуска с точки зрения интегрированного сочетания показателей: выпущенной горной массы, процента разубоживания, потерь угля за крепью и частоты образования зависаний (рисунок 13б).

Созданы предпосылки решения сложившейся проблемы эффективного программируемого управления движением горной массы при выпуске угля на забойный конвейер специальной механизированной крепью в составе специализированного очистного механизированного комплекса разработки мощных угольных пластов для повышения полноты выемки, снижения разубоживания и потерь угля в недрах.

*а* *б*

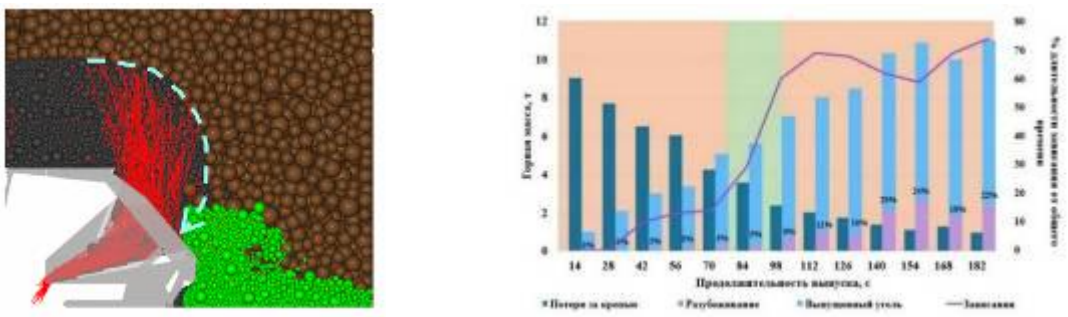



**Рисунок 13 - Обеспечение наилучших показателей технологии за счёт а) подготовки массива угля перед выпуском путём его разворота и б) выявления рационального интервала продолжительности единичного выпуска**

Сведения об опубликовании:

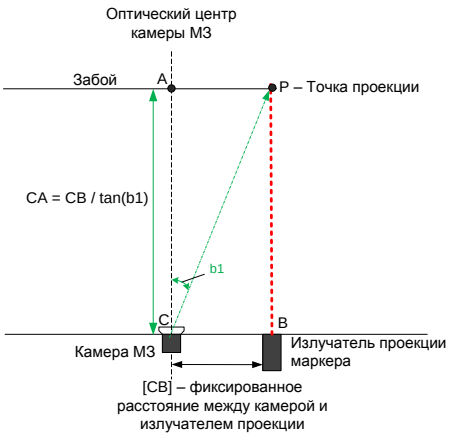
Обоснование параметров технологии с выпуском угля подкровельной толщи, обеспечивающие наибольшую её эффективность / А.Н. Стародубов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. – № 6. – С. 122-130

Стародубов А.Н. Связь параметров фигуры выпуска с показателями эффективности технологии отработки мощных угольных пластов // Уголь. – 2025. – № 6 S12. – С. 77-82.

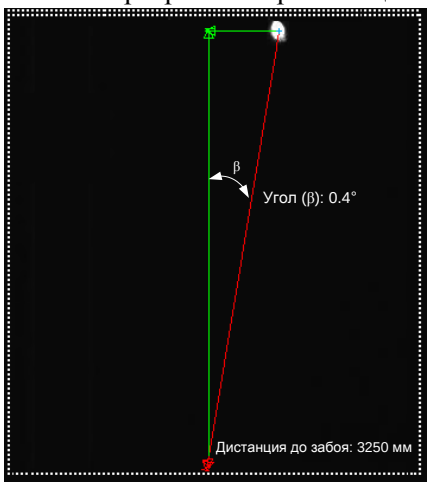
***Разработка методики и способа определения положения механизированной шагающей крепи относительно забоя и элементов проходческого или очистного комплекса с использованием средств машинного зрения***

Методика основана на анализе алгоритмами машинного зрения изменения геометрических параметров проекций световых маркеров, наличие которых упрощает процесс анализа изображений и видеоданных. Состав контролируемых и измеряемых величин позволяет автоматической системой управления МШК осуществлять движение и маневрирование с учётом текущей обстановки её положения.

Способ определения положения механизированной шагающей крепи относительно забоя заключается в измерение алгоритмом машинного зрения угла проекции светового маркера на грудь забоя относительно передовой секции механизированной шагающей крепи. На рисунок 14 представлено графическое описание способа и его программная реализация.




*а) графическое описание способа*




*б) программная реализация определения расстояния до забоя*

**Рисунок 14 – Способа определения положения механизированной шагающей крепи относительно забоя, где: а – графическое описание способа; б – программная реализация**

Эффективность и основное отличие способа достигается за счет расположения излучателя светового маркера на известном расстоянии от оптического центра цифровой видеокамеры. Таким образом для определения расстояния до точки проекции светового маркера достаточно измерить её угол, который вычисляется между двумя линиями с общей вершиной и двум точкам.

Определение положения механизированной шагающей крепи относительно элементов проходческого или очистного комплекса реализовано при помощи способа детектирования пересечения линий проекции лазерных световых маркеров бортами проходческого или очистного комплекса. Методика способа заключается в построении технической карты положения крепи относительно комплекса которая формируется за счет полученных изображений с цифровых видеокамер опор крепи и проекции лазерных линий вдоль правого и левого борта комплекса как показано на рисунок 15.

Эффективность способа достигается за счет оптимизации технических средств и алгоритмов машинного зрения не требовательных к вычислительным ресурсам вычислительной системы бортовых ЭВМ проходческих или очистных комплексов.

Сведения об опубликовании:

Никитенко, М.С. Альтернативные подходы к определению положения техники на горно-добывающих предприятиях / М.С. Никитенко, Д.Ю. Худоногов, С.А. Кизилов // Записки Горного института. – 2025. – Т. 275. – С. 167-178.

Кизилов С.А., Никитенко М.С., Худоногов Д.Ю. Методы автоматического контроля пространственного положения горных машин в условиях угольных шахт // Уголь. - 2025;(12). – С.72-76.

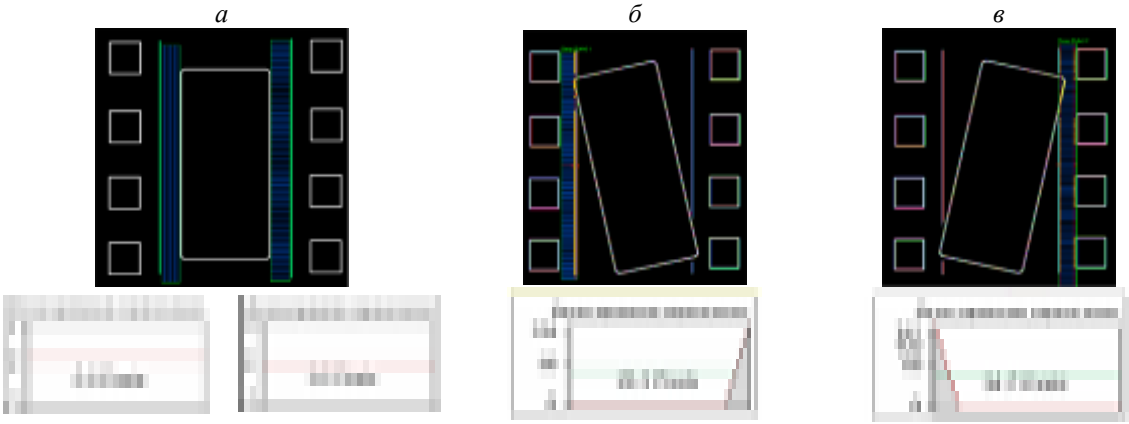



**Рисунок 15 – Способ определения положения механизированной шагающей крепи относительно элементов проходческого или очистного комплекса, где а – детектирование положения комплекса в рабочей зоне; б – детектирование пересечения безлопастной зоны справа МШК; в – детектирование пересечения безлопастной зоны слева МШК**

## 2.5. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ЯКУТСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

## ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СЕВЕРА ИМ. Н.В. ЧЕРСКОГО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИГДС СО РАН)

### Основные результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ за 2025 год

***Геомеханика***

• Проведены экспериментальные исследования статических упругих свойств (модуль упругости, коэффициент Пуассона) образца доломита, представляющего вмещающие карбонатные породы на месторождении алмазов трубки «Ботуобинская», при различных режимах водонасыщения. Получены новые экспериментальные данные (рисунок 1), подтверждающие высказанное ранее предположение о том, что на упругие свойства материала оказывает влияние не только количество содержащейся в нём влаги, но и характер её распределения в поровом пространстве материала. С одной стороны, вода взаимодействует с минеральным скелетом горной породы, что приводит к уменьшению его жёсткости, причём по мере заполнения поры водой эффективность воздействия влаги на минеральный скелет снижается, поскольку в этом процессе не участвует часть воды, находящаяся во внутренних областях поры. С другой стороны, заполненная водой пора представляет собой деформируемое жёсткое включение в упругом скелете горной породы и препятствует деформации материала, что приводит к увеличению его жёсткости.

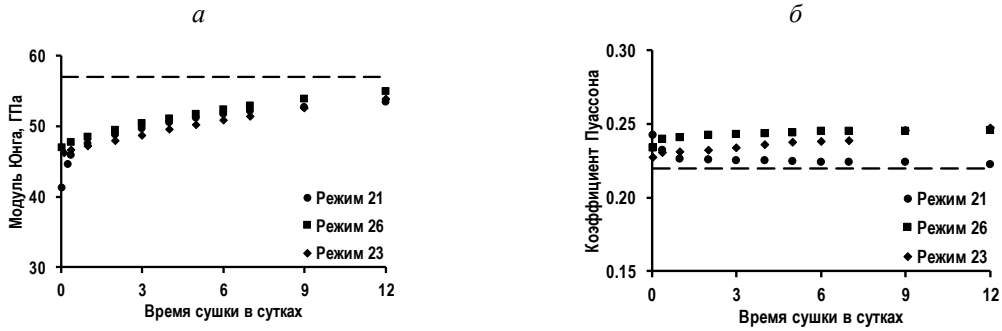



**Рисунок 1 - Изменение модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона (б) образца доломита в процессе сушки после насыщения в различных режимах**
***режим 21 – насыщение в течение 3 часов, режим 23 – насыщение в течение 7 суток, режим 26 – насыщение в течение 3 часов + выдержка в течение 6 суток и 21 часа***

• На основе установленных закономерностей изменения ореолов протаивания и циклов замораживания-оттаивания испытываемых массивом горных пород криолитозоны, в зависимости от применяемого метода снижения морозного выветривания, разработаны рекомендации по снижению интенсивности дезинтеграции горных пород при знакопеременном температурном воздействии, обеспечивающие повышение устойчивости горных выработок в криолитозоне, а следовательно, безопасные условия их эксплуатации в течении длительного времени. Рекомендуется совместное использование программ ЭВМ и методов снижения интенсивности дезинтеграции пород, с применением современных композиционных строительных материалов, в частности, легкого теплозащитного фибро-бетона марки D1000, армированного искусственной фиброй, введение которой значительно повышает его морозостойкость, а также сопротивление статическим и динамическим нагрузкам.

***Горная теплофизика, Рудничная аэрогазодинамика***

• Разработана трёхмерная математическая модель расчёта температурного режима рудного штабеля (РШ) при кучном выщелачивании золота в холодном климате, учитывающая изменение температуры наружного воздуха, солнечной инсоляции, ветра, снегового покрова, наличие или отсутствие теплоизоляции поверхности штабеля из различных материалов, подогрев раствора, внутренних или внешних источников тепла, а также геометрию штабеля и режима орошения (продвижения фронта работ). Математическим моделированием установлены закономерности теплопереноса в РШ, в частности, взаимосвязь между геометрией РШ, типами теплоизоляционных материалов и их эффективностью и режимами подогрева растворов.

Трёхмерная модель позволяет рассчитывать температурный режим РШ с учётом: климата, теплоизоляции, подогрева растворов, неоднородности строения и изменений геометрии/орошения в процессе эксплуатации. Результаты подтверждены натурными исследованиями на опытно-промышленном полигоне месторождения «Северный» АО «Эльконский ГМК» Горнорудного дивизиона Госкорпорации «Росатом» (рисунок 2). Определены закономерности формирования теплового режима РШ в зависимости от технологии его создания и режима орошения.

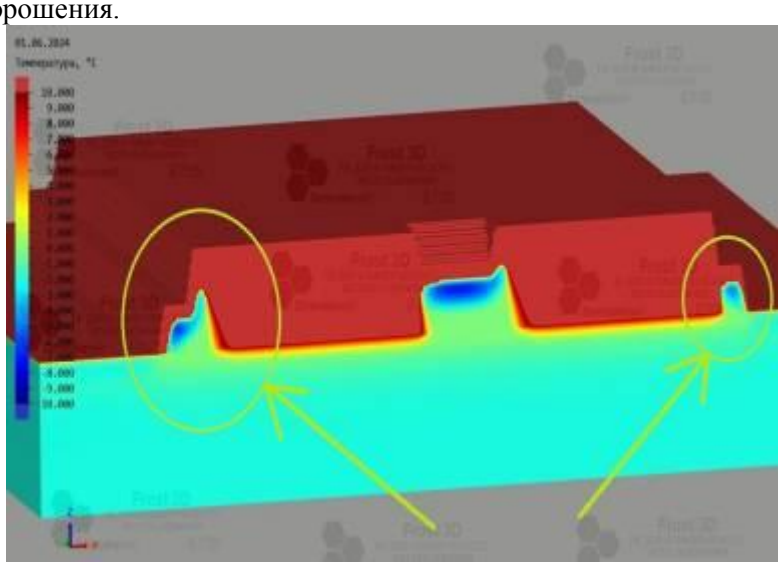


**Рисунок 2 - Температурная диаграмма продольного среза штабеля в районе технологического съезда на 01.06.2024 г при скорости фильтрации v = 2.0 м/сут при круглогодичном зимнем орошении**

Разработана программа выбора оптимальных параметров регулирования воздухораспределения и теплового режима в вентиляционных сетях шахт и рудников криолитозоны, основанная на применении теории нейронной сети для аппроксимации оптимальной стратегии управления вентиляционным и тепловым режимами шахт (рудников) криолитозоны, с учетом их взаимовлияния, что позволяет преодолеть вычислительную сложность традиционных методов и реализовать управление шахтной вентиляцией в реальном времени.

В исследовании проведена систематизация факторов, влияющих на распределение воздушных потоков и тепловой режим шахт (рудников), и сформулирована комплексная постановка задачи многопараметрической нелинейной оптимизации для системы управления шахтной вентиляцией. Разработан алгоритм формирования обучающей выборки для нейронной сети на основе апробированного программного комплекса расчета теплового и вентиляционного режимов шахт и рудников криолитозоны, учитывающего нестационарный теплообмен с массивом горных пород и фазовых переходов влаги в нем.

### *Горнопромышленная геофизика*

• На основе разработанных георадиолокационных моделей верхней части геологического разреза россыпных месторождений Якутии (рисунок 3) и полученных натурных геофизических данных сформулированы рекомендации по практическому применению методики геофизического изучения изменения криогенного состояния массивов горных пород при ведении горных работ. По результатам физического моделирования определены временные интервалы разносезонного георадиолокационного мониторинга динамики криогенного состояния дисперсных горных пород. Выполнена корректировка применения геофизического комплекса для выявления подземных льдов россыпных месторождений Субарктической зоны.

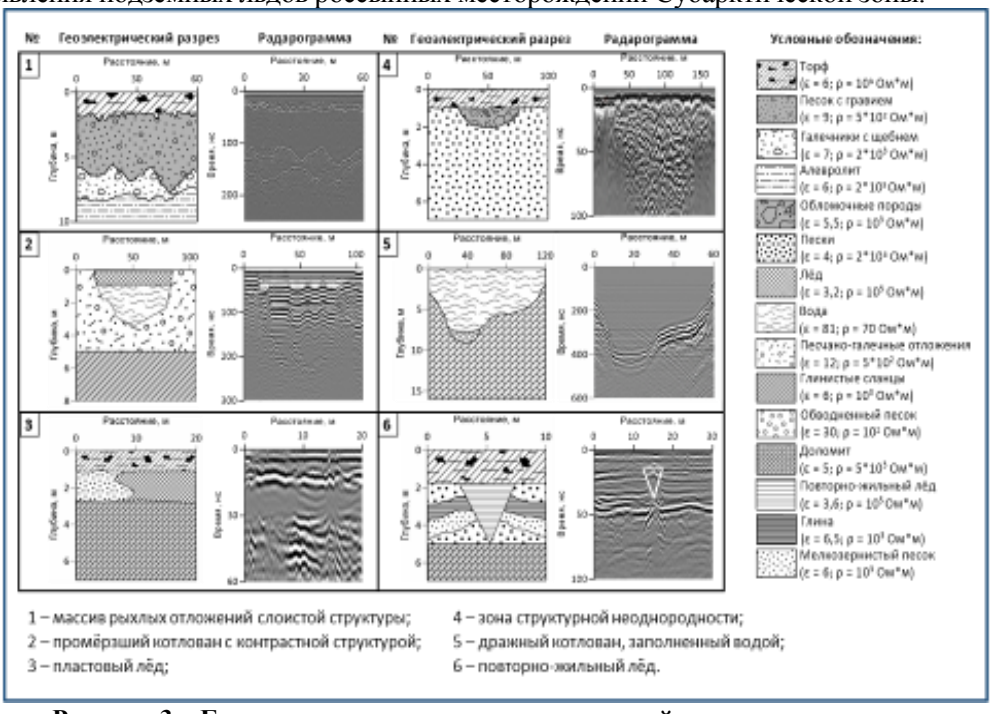



**Рисунок 3 – Георадиолокационные модели верхней части геологического разреза россыпных месторождений Якутии**

• Разработана методика картирования подземных льдов в массиве мерзлых горных пород, отличающаяся комплексным анализом спектральных и динамических характеристик георадиолокационных сигналов. На основе результатов компьютерного и физического моделирования распространения георадиолокационных сигналов в массиве многолетнемерзлых горных пород обоснованы критерии выявления повторно-жильного льда (ПЖЛ). Разработанный алгоритм обработки георадиолокационных данных позволил построить карты подземных льдов, глубины залегания кровли коренных пород и изомощности песков на участках алмазоносного месторождения «Далдын», разрабатываемого АО «Алмазы Анабара».

### *Экономика освоения георесурсов*

• Разработана методика выбора участка месторождения для обеспечения углем арктических районов Северо-Востока России. Решение о создании и порядке функционирования горного предприятия принимается на основе (рисунок 4): детальной оценки региональной сырьевой базы, потребителей местной и привозной угольной продукции по комплексу факторов; обоснования рациональных геотехнологических параметров разреза и объема

необходимых инвестиций; расчета социально-экономического эффекта. На начальном этапе цена местного угля может быть выше привозного, но она компенсируется ростом энергетической безопасности труднодоступных районов. При рассмотрении в качестве примера строительства разреза на расположенном в арктической зоне Якутии Краснореченском месторождении был рассчитан потенциально достигаемый эффект: снижение по разным районам тарифов ГУП ЖКХ РС (Я) на 24–50%, что может привести к ежегодной экономии до 2,1 млрд. рублей, а также уменьшение бюджетной нагрузки на 1,2 млрд. рублей.

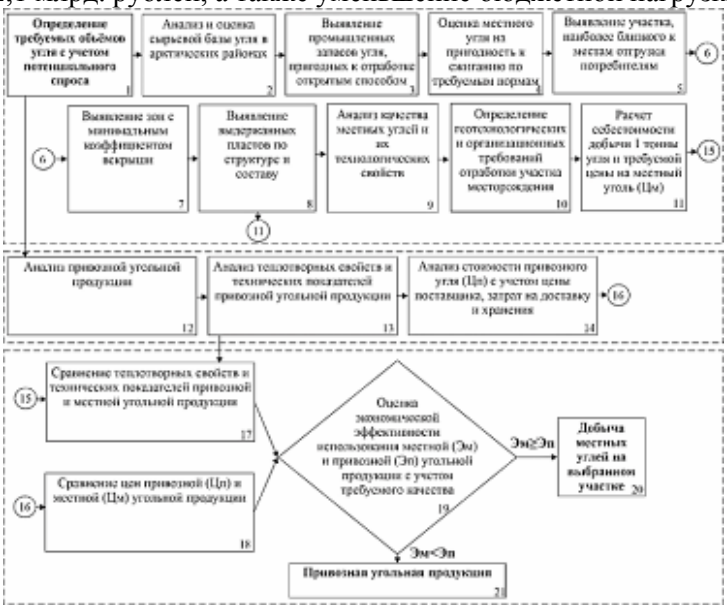



**Рисунок 4 – Порядок выбора участка месторождения для добычи местного угля и обеспечения им потребителей в арктических районах Северо-Востока РФ**

• Введено новое понятие «месторождение, имеющее социальное значение», определены основные подходы к его отработке в целях повышения безопасности населения, проживающего в удаленных, труднодоступных, транспортно- и энергоизолированных арктических районах Якутии. Создана интерактивная карта оцененных и разведанных месторождений твердых полезных ископаемых (уголь для местных нужд в труднодоступных удаленных районах, сверхмалые и мельчайшие россыпные месторождения золота, олова и др.), арктической зоны Северо-Востока РФ, имеющих социальное значение (рисунок 5).

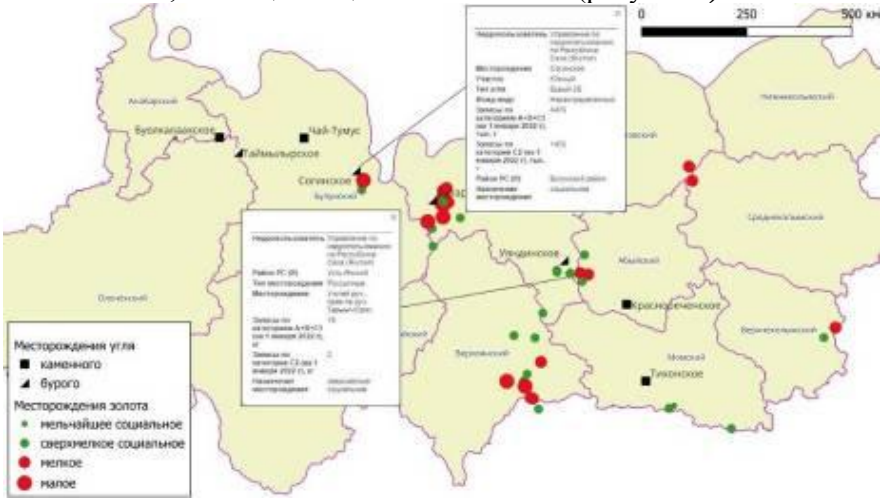



**Рисунок 5 – Фрагмент интерактивной карты разведанных и оцененных месторождений твердых полезных ископаемых арктической зоны Республики Саха (Якутия), имеющих социальное значение**

Разработаны стратегические и тактические подходы, сценарии вовлечения твердых полезных ископаемых в хозяйственный оборот на основе классификации месторождений по их социальной значимости для населения, приемлемые по эффективности разведки и добычи, уровням глубины переработки и комплексности использования минерального сырья. Составлен прогноз перспективного развития минерально-сырьевой базы твердых полезных

ископаемых арктической зоны Северо-Востока России по результатам оценки социальной значимости и инвестиционной привлекательности минерально-сырьевых ресурсов, изменяющегося во времени внешнего и внутреннего спроса на них.

### *Теория проектирования освоения недр*

• На основе полученных данных о порядке и условиях трансформации качества угля при открытой разработке, хранении, поставке и использовании в котельных со слоевым способом сжигания разработаны научно обоснованные технологические и организационные мероприятия по снижению потерь и повышению качества угольной продукции в цепочках поставок труднодоступным арктическим потребителям РС (Я). Мероприятия включают (рисунок 6): селективную выемку разрезами региона угля из забоев с учётом определенных по результатам горно-геологического моделирования зон с различными показателями качества; формирование угольных потоков на основе дифференциации запасов угля в пластах по показателям качества; использование заглубленных складов и защитных покрытий из различных материалов; отгрузку угольной продукции в сортовом виде и в мягких контейнерах (МК) и навалом.

*а*

*б*

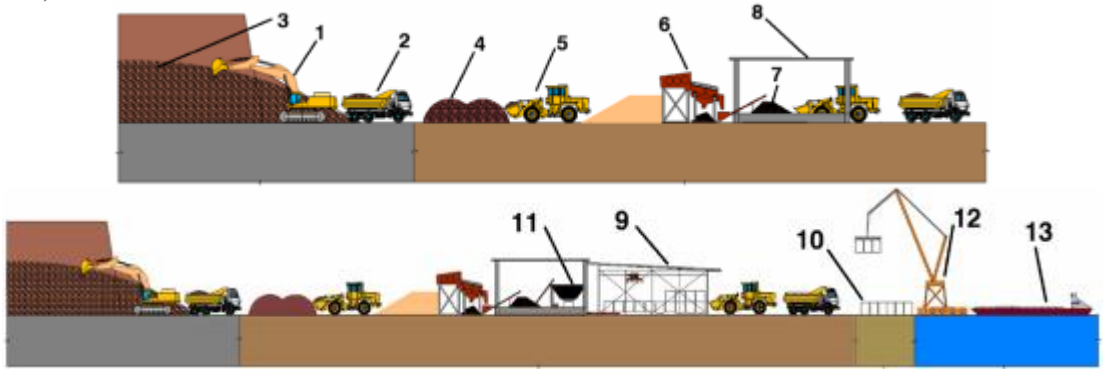



**Рисунок 6 – Схемы добычи угля, подготовки и выпуска сортовой угольной продукции навалом (а) и в МК (б)**

***1 – экскаватор; 2 – самосвал; 3 – уголь после подготовительных работ; 4 – навал угля; 5 – фронтальный погрузчик; 6 – дробильно-сортировочная установка; 7 – склад сортовой угольной продукции; 8 – навес; 9 – ангар для хранения МК; 10 – МК; 11 – упаковочная установка в МК; 12 – кран; 13 – грузовое судно***

### *Физико-техническая геотехнология*

• На основе результатов многолетних исследований влияния конструктивных и технологических параметров систем разработки на показатели полноты и качества извлечения блоковых запасов руды вследствие ее смерзания в условиях отрицательных температур очистного пространства разработаны рекомендации по эффективной технологии торцевого и донного выпуска руды, склонной к повторному смерзанию (режим, интенсивность выпуска, ширина, высота очистного пространства, способ оформления днища блока и т.д. в зависимости от влажности, температуры горных пород и очистного пространства), обеспечивающие минимальные показатели потерь и разубоживания при подземной разработке рудных месторождений в зоне многолетнемерзлых горных пород (таблица 1).

Таблица 1

**Рекомендации по обеспечению безопасного и эффективного выпуска руды в условиях подземной отработки месторождений криолитозоны**

| |
|---|
| Рекомендации общего характера, применение которых предпочтительно при любых вариантах систем разработки, применяющих технологию выпуска руды под обрушенными налегающими породами в условиях подземной разработки рудных месторождений криолитозоны |
| Обязательное соблюдение теплового режима шахты, предписанного в проектной документации. |
| Предусмотреть в проектной документации возможности оперативного изменения организационных и технологических параметров применяемой системы разработки при изменении термовлажностных условий, особенно при приближении подземных горных работ к нижним границам толщи многолетнемерзлых горных пород. |

*продолжение таблицы 1*

| | |
|---|---|
| Постоянный мониторинг температуры и влажности массива руды и породы, рудной массы и рудничного воздуха. При изменении термо-влажностных условий, в особенности при приближении подземных горных работ к нижним границам толщи многолетнемерзлых горных пород, следует применить рекомендуемые ниже мероприятия, в зависимости от варианта применяемой системы разработки. | |
| Максимально возможное сокращение времени нахождения отбитой руды в очистном блоке путем оптимизации схемы проветривания, сокращения продолжительности подготовительных операций, исключения простоев погрузочно-доставочных машин. | |
| С целью снижения потерь отбитой руды вследствие ее смерзания при выпуске рекомендуется сокращение расстояния между буро-доставочными выработками до минимально допустимых значений по требованиям Правил безопасности с одновременным усилением несущей способности рудных целиков или возведение искусственных целиков между буро-доставочными выработками. | |
| Двукратное увеличение дозы (интенсивности) выпуска в блоках, опасных по возникновению смерзания отбитой руды в очистном пространстве (Применение более мощных погрузочно-доставочных машин или увеличение их количества). | |
| **Торцевой выпуск** | **Донный выпуск** |
| Для снижения потерь рудной массы от смерзания в очистном пространстве рекомендуется увеличить высоту отбиваемого слоя. Оптимальное соотношение толщины отбиваемого слоя к его высоте составляет 1÷7. | Для снижения потерь рудной массы от смерзания в очистном пространстве предпочтительным является применение послойного режима выпуска отбитой руды из блока. |
| Угол наклона отбиваемого слоя рекомендуется формировать равным 90°. | Оптимальной конструкцией днища очистного блока, обеспечивающей минимизацию потерь выпускаемой рудной массы от ее смерзания, является траншея в сочетании с ортами-заездами. |
| В блоках, опасных по возникновению смерзания отбитой руды в очистном пространстве, рекомендуется выполнить мероприятия по обработке реагентами, повышающими минерализацию поровой влаги (Патент RU 2815126 C1). | Для изменения конструктивных параметров и расположения очистных камер, а также ориентировочной оценки потерь от смерзания отбитой руды при выпуске, использовать полученные в результате исследований зависимости изменения критической высоты и размеров эллипсоида выпуска в зависимости от ее влажности в условиях отрицательного температурного режима очистного пространства. |

• Экспериментальными исследованиями по определению зон интенсивного повторного смерзания пород в развале взорванного вскрышного уступа при их экскавации в условиях отрицательных температур выработанного пространства карьера Кангаласского угольного месторождения установлено, что зоной наиболее интенсивного повторного смерзания взорванной горной массы в развале является прибортовая часть уступа развала, так как в весенне-летний период (с мая по июль), характеризующийся повышением температуры и интенсивным таянием многолетнемерзлых горных пород, влажность в прибортовой части развала на 3-5% выше, чем в центральной части забоя за счет поступления влаги с оттаивания мерзлых пород откосов уступа. Именно в этой зоне наиболее часто затруднена экскавация взорванных вскрышных пород, что приводит к существенному снижению производительности драглайна, срыву плановых объемов и дополнительным затратам горного предприятия.

• На основе комплексного дескриптивного анализа характеристик песков и металла и с учетом принципа (методологии) минимизации объемов переработки золотосодержащих песков разработаны методические рекомендации по рациональному выбору типа промывочного прибора и оптимизации его рабочих параметров для снижения потерь полезного компонента по критерию фактического присутствия золотосодержащего класса и предельной крупности некондиционного сырья и установленной зависимости, определяющей область эффективного грохочения, с учётом ключевых параметров: граничной крупности разделения и предельной крупности перерабатываемых золотосодержащих песков по критерию фактического присутствия золотосодержащего класса.

### *Обогащение полезных ископаемых*

• Экспериментальными исследованиями процесса центробежной флотации пленочного типа золото-сурьмяной пробы месторождения «Сентачан» на флотомашине с периферийной разгрузкой концентрата при перечистке концентрата основной флотации установлено, что при центробежной флотации на поверхности вращающегося потока пульпы происходит избирательное откребление минералов из монослоя по степени их гидрофобности, что позволяет повысить качество конечных концентратов и показатели селективности разделения. Получен конечный концентрат со сниженным значением содержания мышьяка (арсенопирита) - менее 0,1%, который в 2 раза ниже, чем в исходном концентрате, при этом содержание сурьмы (антимонита) в концентрате флотации центробежной флотомашины составило 1,21%, в концентрате лабораторной флотомашины – 0,19%.

• На основе экспериментальных исследований процессов сегрегации минералов в «постели» центробежного концентратора конструкции ИГДС СО РАН установлено, что применение вибрационного направленного действия на формирующуюся постель в новой конструкции центробежно-вибрационного концентратора существенно повышает эффективность улавливания частиц тяжёлой фракции за счёт снижения избыточного переуплотнения постели под воздействием центробежных сил. Показано, что наиболее рациональными условиями концентрации и удержания тяжёлых частиц – магнетита в постели концентратора из минеральной смеси речного песка крупностью – 0,315 мм являются вертикально направленные вибрационные колебания амплитудой 1,5 мм, частотой 1930 мин$^{-1}$, при числе оборотов вращения рабочего органа 400 об/мин.

В ходе работ была разработана модернизированная конструкция центробежного концентратора и изготовлена лабораторная модель (рисунок 7), оснащённая механическим возбудителем вертикальных колебаний с расширенными диапазонами регулирования. Рабочий орган выполнен с увеличенным диаметром и уменьшенной массой по сравнению с базовой конструкцией концентратора, разработанного в ИГДС СО РАН, что позволило снизить инерционные нагрузки и повысить чувствительность системы к вибрационным воздействиям.

*а* *б*



**Рисунок 7 – Модернизированный концентратор: а – рабочий орган, б – общий вид концентратора со специальным генератором вертикальных колебаний**

### *Физико-химическая геотехнология*

• В результате экспериментальных исследований установлено, что при термохимическом воздействии на каменные угли Южно-Якутского бассейна происходит существенное изменение их пористой структуры и сорбционных свойств, выявлены закономерности изменения свойств получаемых сорбентов в зависимости от параметров термохимической обработки (температура, время воздействия, концентрация химического реагента). Так, при нагреве проб угля до температуры 800°С и выдержке в течении 1 часа в присутствии едкого калия (КОН) в соотношении 1:3 сорбционная емкость углей увеличивается в 25-40 раз, что показывает пригодность сырья для получения высококачественных сорбентов, схожих по характеристикам с промышленно выпускаемыми марками активных углей.

### Информация о научно-организационных мероприятиях

В период с 16 по 20 июня 2025 года в Якутске состоялась VII Всероссийская научно-практическая конференция «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России», посвященная 120-летию академика Н.В. Черского, 200-летию «Горного журнала» и 45-летию образования ИГДС СО РАН.

Сотрудники Института приняли участие в X Международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов» в г. Харбин (провинция Хэйлунцзян, КНР) (с 24 по 27 сентября). В рамках пленарного заседания конференции состоялась торжественная церемония создания Китайско-Российского Альянса по освоению минеральных ресурсов. Стороны договорились осуществлять взаимодействие в целях решения различных задач в сферах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке новых методов и технологий, подготовки кадров и развития промышленной инфраструктуры.

**Публикации Института:** Всего публикаций – 83, в том числе: 32 статьи в Белом списке (21 – первого уровня), 8 статей в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ, 9 – в РИНЦ, 20 статей и докладов в материалах конференций, патент РФ, свидетельство на базу данных и 12 программ для ЭВМ.

## 2.6. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА УРО РАН

**Направление: Комплексная, технологически эффективная и экологически безопасная добыча, обогащение и глубокая переработка минерального сырья, безопасность горного производства**

1. Показано, что адаптация параметров основных технологических процессов с учетом их взаимосвязи к изменяющимся условиям их функционирования при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых достигается:

- систематизацией геомеханических рисков нарушения устойчивости уступов и бортов карьеров;
- созданием технологических основ доработки месторождений малоценных руд открыто-подземным способом;
- формированием структуры модели транспорта горного предприятия с учетом надежности горных машин;
- адаптацией параметров БВР при дезинтеграции массивов горных пород с учетом изменения их физико-механических свойств;
- оптимизацией процессов ОГР в режиме управления качеством минерального сырья;
- систематизацией выявленного механизма возникновения и развития опасной производственной ситуации – основы разработки мер по предупреждению ее негативных последствий.

***Теоретическое обоснование метода адаптации параметров буровзрывных работ к условиям сложноструктурных месторождений / В.Л. Яковлев, С.Н. Жариков, А.С. Реготунов, В. А. Кутуев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. – № 3. – С. 64-75.***




**Рисунок 1 – Блок-схема адаптации параметров основных технологических процессов**

2. Установлено, что основой геотехнологической стратегии доработки крупных месторождений малоценных руд комбинированным способом, как долгосрочного плана действий по достижению основной цели – продление срока службы градообразующего предприятия с сохранением рентабельности производства, является концепция поддержания производственной мощности горно-обогатительного комбината по основному полезному ископаемому путем вовлечения запасов вне контура карьера в подземную разработку и диверсификации производства за счет извлечения попутных полезных ископаемых. Разработаны варианты геотехнологической стратегии, базирующиеся на применении низкозатратных и высокопроизводительных подземных геотехнологий и учитывающие совокупность управляемых факторов, таких как схема комбинированной разработки, объем промышленных запасов для подземной разработки, среднее содержание полезного компонента в промышленных запасах, способ и схема вскрытия, система разработки, годовая производственная мощность шахты, цена товарной продукции.

***Соколов И.В. Результаты геотехнологических и геомеханических исследований, направленных на повышение безопасности и эффективности горного производства / И.В. Соколов // Горная промышленность. – 2025. – № S4. – С. 127-133.***




**Рисунок 2 – Блок-схема взаимосвязи факторов и их влияния на технико-экономические показатели геотехнологической стратегии доработки крупных месторождений малоценных руд комбинированным способом**

3. Разработана структура модели многоэлементной системы горнопромышленного транспорта горнодобывающего предприятия, ориентированная на имитационное моделирование и сквозную оптимизацию «забой – продукт переработки» с целью рационального использования природных и материально-энергетических ресурсов, отличающаяся объединением в ней трех подсистем (внутрикарьерного, поверхностного транспорта и перерабатывающего производства), возможностью решения как прямой задачи «забой – система – продукт», так и обратной – «требования к продукту – организация системы», реализации разных технологических схем горнодобывающих предприятий, а также учета надежности транспортных и технологических машин (рисунок 1). Структура будет использована для построения соответствующей имитационной модели и разработки методики сквозной оптимизации рудопотоков с учетом вида и конкретных характеристик транспорта, целевых показателей качества и показателей содержания в руде, а также рационального резервирования по надежности.

***Журавлев А.Г. О методическом подходе к оптимизации параметров многоэлементной системы горнопромышленного транспорта / А.Г. Журавлев, В.А. Черепанов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – № 3. – С. 155-162.***

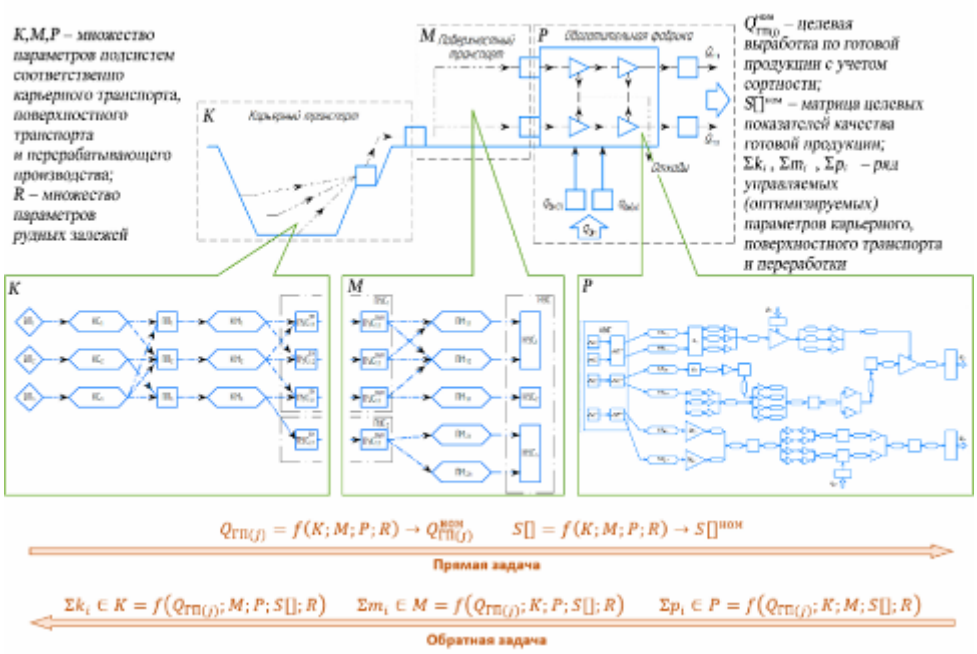



**Рисунок 3 – Структура модели многоэлементной системы горнопромышленного транспорта горнодобывающего предприятия для сквозной оптимизации «забой – продукт»**

4. На основе аналитических исследований и систематизации условий освоения сложноструктурных рудных месторождений разработана и апробирована методика оценки горнотехнических условий разработки карьеров для оптимизации резервов повышения интенсивности горных работ. Методика основана на автоматизированном анализе фронтов горных работ в карьере и аудите запасов полезного ископаемого на рабочих горизонтах карьера, которые производятся во взаимосвязи с методикой компьютерного планирования за счет совместного оперирования исходными данными блочных и цифровых топографических моделей карьера при различных положениях горных работ. Методика позволяет в автоматизированном режиме выявить участки карьерного пространства перспективные для повышения интенсивности добычи с учетом качества полезного ископаемого.

***Кантемиров В.Д. Методика оценки горнотехнических условий отработки карьеров для изыскания резервов повышения интенсивности горных работ / В.Д. Кантемиров, А.М. Яковлев, Р.С. Титов // Маркшейдерия и недропользование. – 2025. – Т. 25. - № 4. – С. 23-30.***

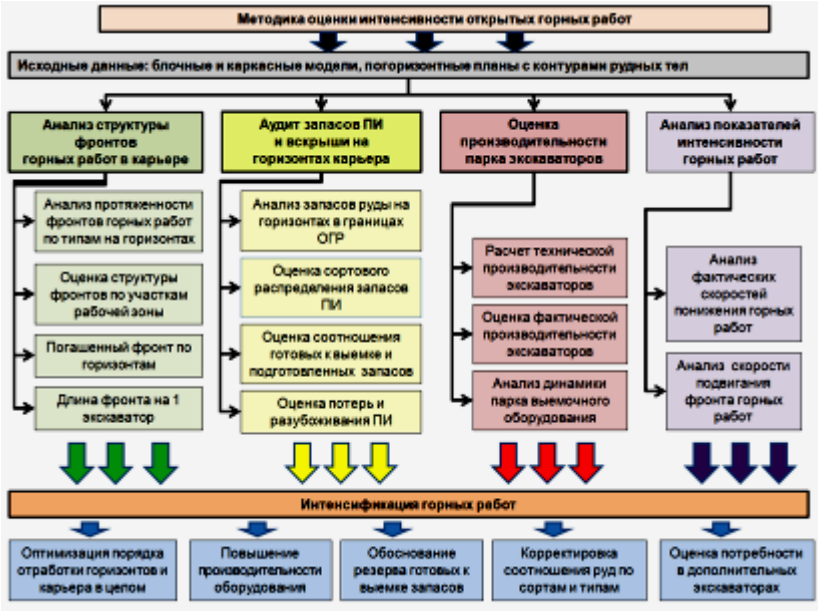



**Рисунок 4 – Алгоритм методики оптимизации резервов повышения интенсивности открытых горных работ**

5. В результате анализа взаимосвязей показателей буровзрывных работ (БВР) и физико-механических свойств горных пород определены критерии оценки эффективности и безопасности процессов. На этой основе разработан подход к поэтапному выбору рациональных инновационных решений по разрушению локальных массивов горных пород, представляющий собой системную адаптацию параметров БВР, включающую мониторинг за процессами, оценку результатов взрыва и итерации с корректировочными вычислениями. Разработанный подход нацелен на максимально эффективную эксплуатацию месторождений твердых полезных ископаемых, совершенствование и модернизацию технических средств, что в перспективе может внести свой вклад в укрепление суверенитета России.

***Аспекты практической реализации метода адаптации параметров буровзрывных работ в условиях сложноструктурных месторождений / В.Л. Яковлев, С.Н. Жариков, А.С. Реготунов, В.А. Кутуев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. – № 4. – С. 46-56.***

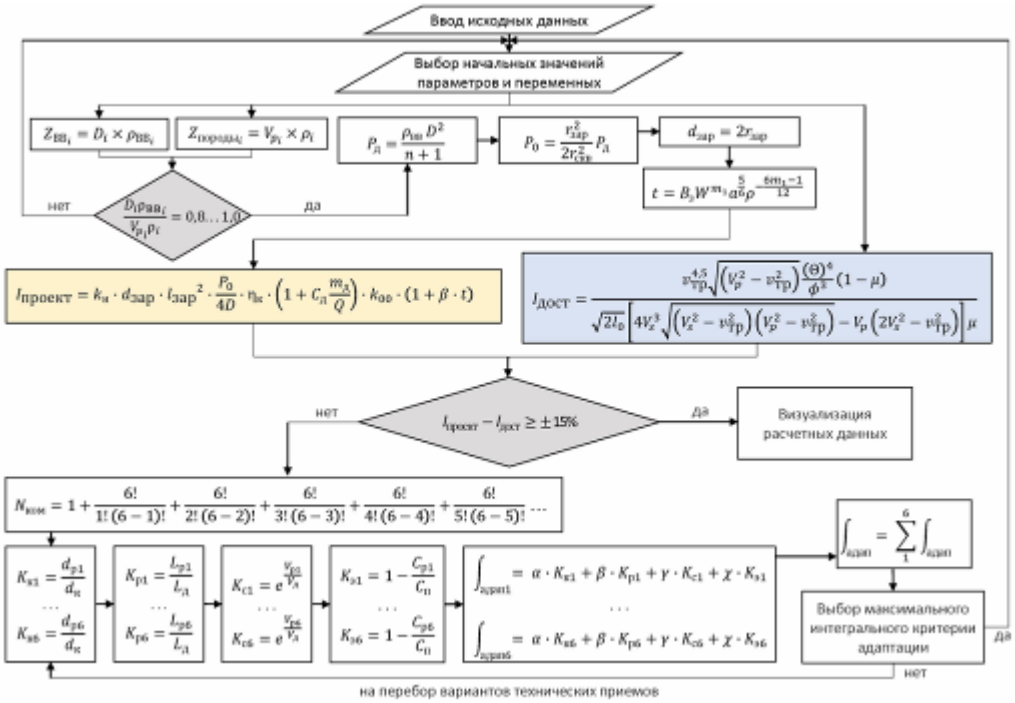



**Рисунок 5 – Схема функциональных взаимосвязей при системной адаптации параметров БВ**

**<u>Направление:</u> Геомеханика, современная геодинамика, мониторинг опасных техногенных процессов**

1. Показано, что выявление закономерностей развития геодинамических процессов в условиях техногенного преобразования недр и разработка мер по повышению безопасности горного производства достигается на основе:

- определения параметров современных геодинамических движений в горнопромышленных регионах;
- исследования пространственно-временных закономерностей деформаций земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений;
- изучения негативного влияния геодинамических процессов на горнотехнические системы и определения геомеханического состояния геологической среды;
- обеспечения устойчивости горных выработок с учетом развития геодинамических процессов в скальных массивах;
- исследования закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород в процессе отработки месторождений полезных ископаемых.

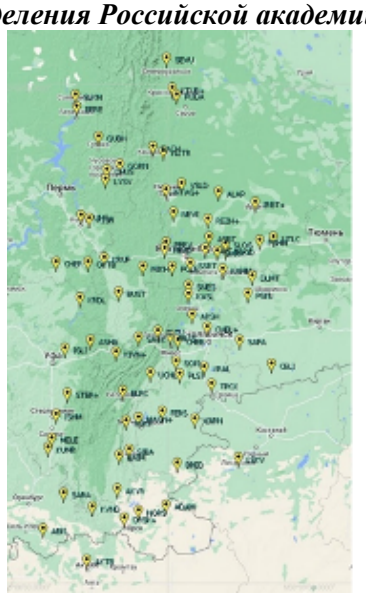
***Антонов В.А. Методология определения прочности пород горного массива в условиях гравитационного и тектонического напряжения / В.А. Антонов // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2025. – № 2(91). – С. 101-114.***




**Рисунок 6 – Блок-схема выявления закономерностей развития геодинамических процессов**

2. По результатам экспериментальных исследований распределения скоростей и направлений пространственных смещений наблюдательных пунктов высокоточных геодезических сетей Уральского региона определены параметры их современных геодинамических движений. На основе полученных результатов создана и направлена на государственную регистрацию база данных «Современные геодинамические движения территории Урала», предназначенная для получения информации о неравномерностях распределения скоростей горизонтальных сдвижений и деформационных полей, определения зон концентрации главных и сдвиговых деформаций – для выявления закономерностей развития геодинамических процессов в условиях техногенного преобразования недр.

***Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2025626200 Российская Федерация. Современные геодинамические движения территории Урала: заявл. 05.12.2025: опубл. 16.12.2025 / А.А. Панжин, Н.А. Панжина; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.***



Современные геодинамические движения территории Урала
в Международной земной системе координат ITRF2014 по состоянию на октябрь 2025 года

| Станция мониторинга | Маркер сета | Координаты станции, WGS-84 | | Период мониторинга | Геодинамические движения, мм/год | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | B (широта) | L (долгота) | | ΔB | ΔL | ΔH | 2D | 3D |
| ARTU | IGS | 56.4298 | 58.5605 | 4260 сут., 44 серий | 5.66 | 25.22 | 0.65 | 25.84 | 25.85 |
| URAL | IGS | 56.8988 | 60.6049 | 2424 сут., 16 серий | 4.89 | 25.42 | 1.01 | 25.88 | 25.90 |
| EKTG | FAGS | 56.8775 | 60.6812 | 2522 сут., 19 серий | 5.06 | 24.67 | 0.01 | 25.18 | 25.18 |
| NIRO | FAGS | 60.7349 | 56.7116 | 2081 сут., 15 серий | 6.11 | 24.24 | 3.25 | 25.00 | 25.21 |
| OREN | FAGS | 51.7597 | 55.0997 | 3894 сут., 22 серии | 6.95 | 25.37 | 1.53 | 26.31 | 26.35 |
| UFAI | FAGS | 54.7114 | 55.8345 | 1055 сут., 5 серий | 5.89 | 25.39 | -5.54 | 25.96 | 26.50 |
| EKBG | RKOS | 56.8147 | 60.5402 | 1403 сут., 10 серий | 4.43 | 25.75 | -1.42 | 26.13 | 26.17 |
| ORBG | RKOS | 51.7595 | 55.0998 | 1404 сут., 9 серий | 5.67 | 25.97 | 9.91 | 26.58 | 28.37 |
| MIAS | RGM | 54.9971 | 60.0823 | 1405 сут., 6 серий | 3.68 | 24.87 | -1.69 | 25.18 | 25.18 |
| NTAG | RGM | 57.8858 | 60.1216 | 1473 сут., 7 серий | 4.99 | 25.12 | -6.24 | 25.61 | 26.36 |
| ORSK | RGM | 51.0767 | 58.5939 | 1494 сут., 6 серий | 7.02 | 27.47 | 3.77 | 28.35 | 28.60 |
| PERM | RGM | 57.9588 | 56.1942 | 1405 сут., 7 серий | 4.64 | 27.22 | -1.11 | 27.61 | 27.68 |
| SERO | RGM | 59.6002 | 60.5298 | 1501 сут., 7 серий | 5.34 | 23.79 | 0.28 | 24.38 | 24.38 |
| SHAD | RGM | 56.0665 | 63.6379 | 1497 сут., 7 серий | 4.37 | 26.24 | 0.11 | 26.60 | 26.60 |
| VERU | RGM | 53.8080 | 59.1984 | 1401 сут., 7 серий | 5.72 | 25.69 | 0.88 | 26.32 | 26.32 |
| BLKA | SMT | 51.3590 | 56.3996 | 2150 сут., 11 серий | 5.29 | 25.47 | 1.31 | 26.02 | 26.05 |
| CHEL | SMT | 55.1938 | 61.3909 | 2187 сут., 10 серий | 5.07 | 26.31 | 3.97 | 26.79 | 27.09 |
| EKAT | SMT | 56.8450 | 60.6518 | 2186 сут., 10 серий | 4.16 | 24.72 | -5.05 | 25.07 | 25.77 |
| GORA | SMT | 55.1913 | 56.6680 | 981 сут., 9 серий | 4.25 | 25.03 | -4.17 | 25.38 | 25.72 |
| KAUR | SMT | 56.3868 | 61.9665 | 2186 сут., 10 серий | 4.52 | 25.05 | 0.20 | 25.46 | 25.46 |
| KTIV | SMT | 54.7635 | 58.1708 | 2186 сут., 10 серий | 5.76 | 24.98 | 0.82 | 25.64 | 25.65 |
| KUNK | SMT | 55.6994 | 61.5408 | 1679 сут., 7 серий | 4.25 | 25.28 | 0.23 | 25.64 | 25.64 |
| LBDK | SMT | 54.4549 | 62.8480 | 2113 сут., 10 серий | 3.60 | 25.58 | -0.69 | 25.83 | 25.84 |
| MAGN | SMT | 53.3946 | 58.9847 | 2186 сут., 10 серий | 1.41 | 21.63 | 2.80 | 21.68 | 23.06 |
| MIAS | SMT | 54.9695 | 60.0685 | 2187 сут., 10 серий | 4.79 | 25.34 | -0.18 | 25.79 | 25.79 |
| OREN | SMT | 51.8265 | 55.1540 | 1790 сут., 9 серий | 6.58 | 25.22 | -1.60 | 26.06 | 26.11 |
| PERM | SMT | 58.0082 | 56.2383 | 2179 сут., 7 серий | 6.59 | 24.35 | -0.51 | 25.23 | 25.23 |
| STTM | SMT | 53.6113 | 55.9512 | 2016 сут., 9 серий | 5.89 | 25.23 | -0.24 | 25.91 | 25.91 |
| TAGL | SMT | 57.9055 | 59.9812 | 2184 сут., 10 серий | 5.06 | 24.27 | 0.59 | 24.79 | 24.80 |
| UYSK | SMT | 54.3881 | 60.0014 | 2187 сут., 10 серий | 5.01 | 25.44 | -0.50 | 25.93 | 25.93 |
| VUPL | SMT | 56.0685 | 60.2102 | 2186 сут., 10 серий | 3.56 | 23.72 | 1.63 | 23.99 | 24.04 |

**Рисунок 7 – База данных «Современные геодинамические движения территории Урала»**

3. На основе анализа результатов 28-летнего мониторинга сдвижения земной поверхности Северо-Песчанского месторождения создана карта эмпирической пространственно-временной закономерности распределения интенсивности оседаний в зонах тектонических нарушений. Разброс среднеквадратических отклонений на площади месторождения 3 км$^2$ составляет 0-45 мм/год. Выявлено три участка, где градиент среднеквадратических отклонений скоростей оседаний земной поверхности резко увеличивается от 12 до 45 мм/год. В этих местах ранее возникали аварийные состояния промышленных зданий шахты.

Данные многолетнего мониторинга систематизированы в зарегистрированной базе данных (RU 2025620941).

***Систематизация данных многолетнего мониторинга развития сдвижения на песчанском скарново-магнетитовом месторождении / С.В. Усанов, Ю.П. Коновалова, С.А. Ногин, Д.С. Зотов // Проблемы недропользования. – 2025. – № 1(44). – С. 25-35.***

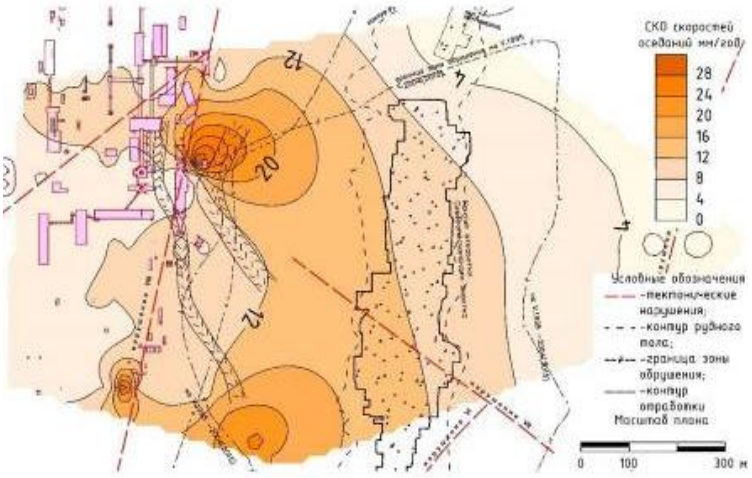



**Рисунок 8 – Распределение среднеквадратических отклонений скоростей оседаний на поверхности Северо-Песчанского месторождения**

4. На основе комплексной систематизации и структуризации массива данных, включающих результаты лабораторных испытаний образцов массивов III-V категорий устойчивости, а также геомеханического мониторинга конвергенции в подготовительных выработках, были установлены закономерности деформационного поведения системы «крепь-массив» в запредельном напряженно-деформированном состоянии. Выполненный анализ позволил выделить и количественно охарактеризовать различные режимы деформирования в зависимости от локации относительно зоны влияния очистных работ и интенсивности их ведения. Экспериментально подтвержден диапазон скоростей пластических смещений контура выработок, варьирующийся от фоновых 1,37 мм/мес на стабилизированных участках до критических 50,1 мм/мес в зонах активного техногенного воздействия.

***Харисов Т.Ф. Методика расчета нагрузки на крепь подготовительно-нарезных выработок в условиях неустойчивого массива / Т.Ф. Харисов, А.Е. Балек, Д.А. Коптяков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – № 1. – С. 682-692.***

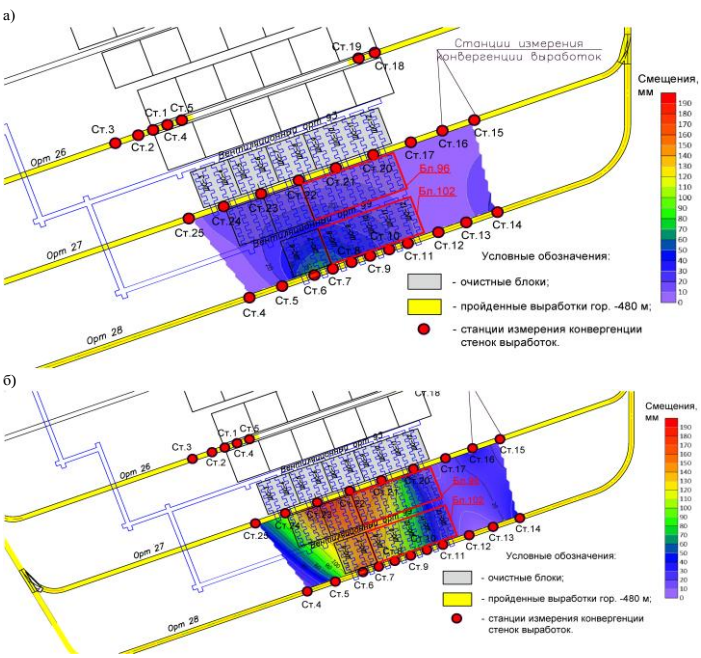



**Рисунок 9 – Диаграмма распределений максимальных значений конвергенции ортов №26, 27: а – по замерам 03.10.2025 г; б – по замерам 07.11.2025 г.**

5. Исследования, проведенные непосредственно в подземных условиях в массиве горных пород на характерном уральском месторождении, позволили количественно оценить первоначальное напряжённое состояние горных пород, роль трещиноватости и высокопрочных включений в формировании прочностных и упругих свойств массива горных пород. Применение полученных данных для моделирования распределения напряжений при отработке месторождения позволяет достоверно выявлять опасные зоны и разрабатывать эффективные меры по устранению этих зон. Классические модели строятся на усредненных лабораторных данных, с использованием данных, полученных при исследовании массива пород, учитывается реальная, иерархически блочная структура конкретного месторождения: трещины, разломы и твердые включения. Данный подход обеспечивает максимальное соответствие модели реальным горно-геологическим условиям конкретного объекта.

***Аленичев В.М. Методология определения достоверности напряжений на контуре горной выработки методом щелевой разгрузки / В.М. Аленичев, Р.В. Криницын // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2025. – № 4(93). – С. 148-157.***

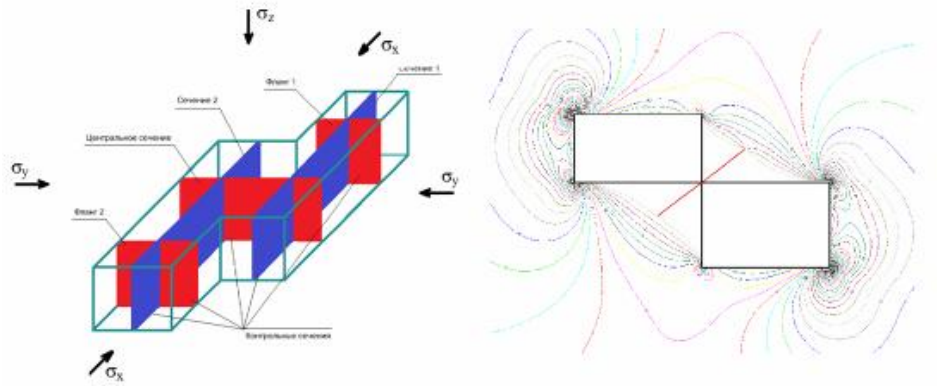



**Рисунок 10 – Моделирование распределения напряжений при отработке месторождения**

**<u>Направление:</u> Изучение и моделирование горнотехнических систем и процессов техногенного преобразования недр, численное моделирование и геоинформатика**

1. Данными мониторинга, а также экспериментальными исследованиями показано, что комплексный прогноз безопасного взаимодействия природной и техногенной среды, в том числе при предотвращении аварийных прорывов вод и разработке технологий экологической реабилитации последствий ведения горных работ, основывается на изучении и моделировании состояния водопроводящих толщ, взаимодействующих с подработанным массивом, что позволяет осуществлять прогноз безопасного ведения горных работ в сложных гидрогеологических условиях, а также создании природоподобных искусственных гео- и биогеохимических барьеров, включающих обоснованное дозирование в них мелиорантов и металлургических шлаков при проектировании эффективных мероприятий по восстановлению техногенно нарушенных территорий.

***Корнилков, С.В. Об основных направлениях взаимодополнения методов цифровизации и геоинформационного обеспечения горного производства / С.В. Корнилков, П.А. Рыбников, Л.С. Рыбникова // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2025. – Т. 67. - № 1. - С. 76-85.***

3. Для обеспечения индикативной оценки природосбережения обоснованы основные направления разработки методов экологической реабилитации путем формирования гео- и биогеохимических барьеров, с учетом систематизации природоподобных материалов способных нейтрализовать токсичное действие потенциальных загрязнителей. На основании экспериментальных исследований установлен оптимальный диапазон дозировок производственных отходов, оказывающих стимулирующее воздействие на рост растений: ферромагниевый мелиорант 25-100 г/м$^2$; металлургические шлаки 135-337,5 г/м$^2$, что является основой для регламентации применения отходов в качестве мелиорантов.

***Обоснование параметров применения природоподобных материалов на основе отходов горнодобывающей промышленности в качестве мелиорантов / Н.Ю. Антонинова, А.В. Собенин, А.И. Усманов, А.А. Горбунов // Известия Уральского государственного горного университета. – 2025. – № 3(79). – С. 99-108.***

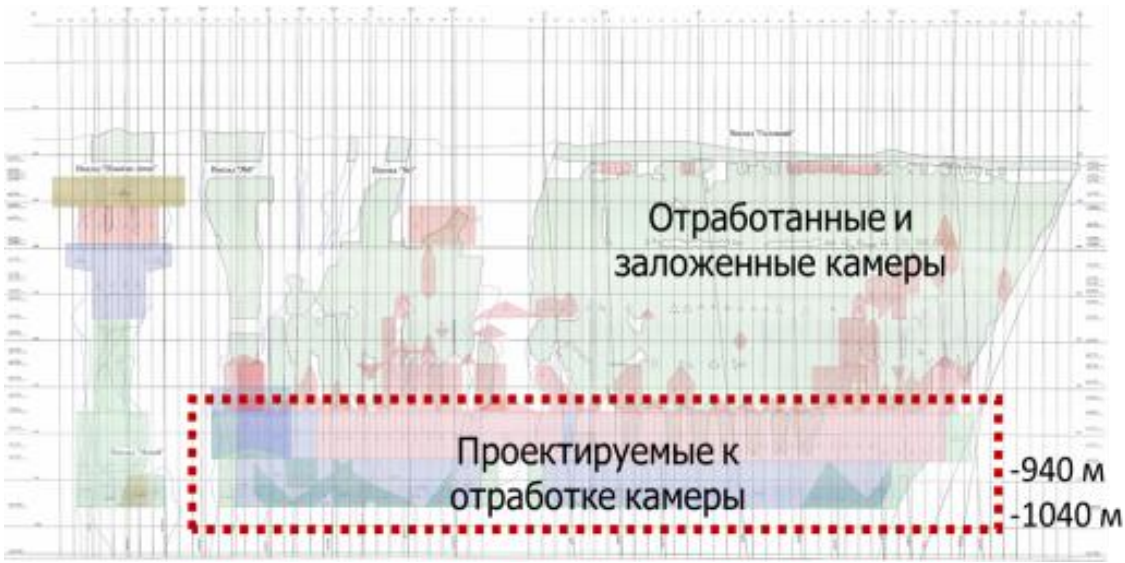



**Рисунок 11 – Формирование гео-барьера при предотвращении аварийных прорывов вод**

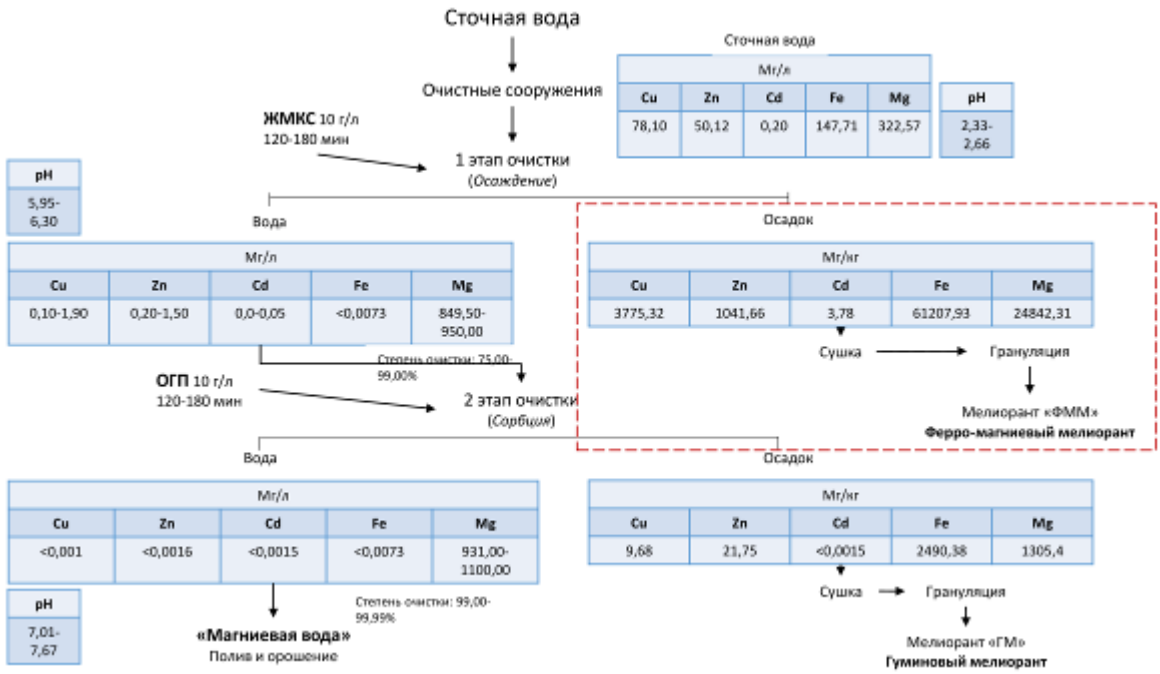



**Рисунок 12 – Схема получения и ферро-магниевого мелиоранта**

4. Обоснована методика формирования баз данных и цифровых моделей гипсометрии водоносных горизонтов в районе ведения горных работ, основанная на разработанных принципах структурирования данных и их проверки на нормальность, а также предложенном алгоритме создания геофильтрационных моделей, использующем разнородные источники данных о гипсометрии, литологии, фильтрационных параметрах, с учетом принятой технологии отработки месторождения. Важным этапом опытно-фильтрационных работ и построения геоинформационных моделей объекта является расчленение литологического разреза и выделение основных модельных слоев, в результате чего на основании геофильтрационной схематизации определяется характер взаимосвязи водоносных горизонтов.

***Методика проектирования специализированных гидрогеологических ГИС-ориентированных баз данных / С.В. Корнилков, П.А. Рыбников, Л.С. Рыбникова, А.Ю. Смирнов // Проблемы недропользования. – 2025. – № 3(46). – С. 107-118.***

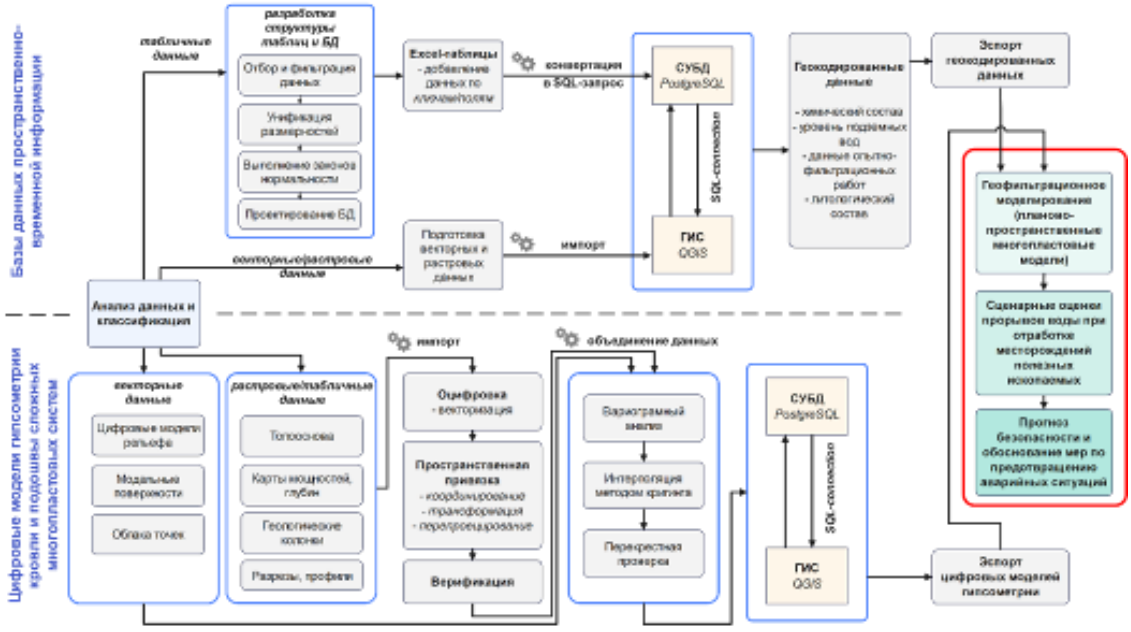



**Рисунок 13 – Блок-схема формирования баз данных и цифровых моделей гипсометрии водоносных горизонтов в районе ведения горных работ**

## 2.7.ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ УРО РАН (ГИ УРО РАН)

### *Прогнозирование выбросов окиси углерода дизельных двигателей горной техники с использованием нейросетевого подхода*

На основе методов машинного обучения и символьной регрессии выявлены количественные закономерности формирования массового расхода выхлопных газов и концентрации окиси углерода при изменении режимов работы дизельной техники, эксплуатируемой в подземных горных выработках. Полученные зависимости позволяют корректно учитывать влияние турбонаддува, крутящего момента и рециркуляции отработавших газов. Выявлен важный для практики рудничной аэрологии результат о том, что давления турбонаддува и катализатора принципиально изменяют классическую связь между расходом выхлопа, частотой вращения и рабочим объемом двигателя (рисунок 1).

***Panteleev I., Semin M., Grishin E., Kormshchikov D., Iziumova A., Verezhak M., Levin L., Plekhov O. Deep Learning Prediction of Exhaust Mass Flow and CO Emissions for Underground Mining Application // Algorithms. – 2025. – T. 18. – № 10. – Статья № 630. (УБС2, Scopus Q2, Web of Science ESCI)***

*Руководитель – чл.-корр. РАН, д.т.н. Л.Ю. Левин (aerolog_lev@mail.ru)*

*Работа выполнена совместно с ИМСС УрО РАН*

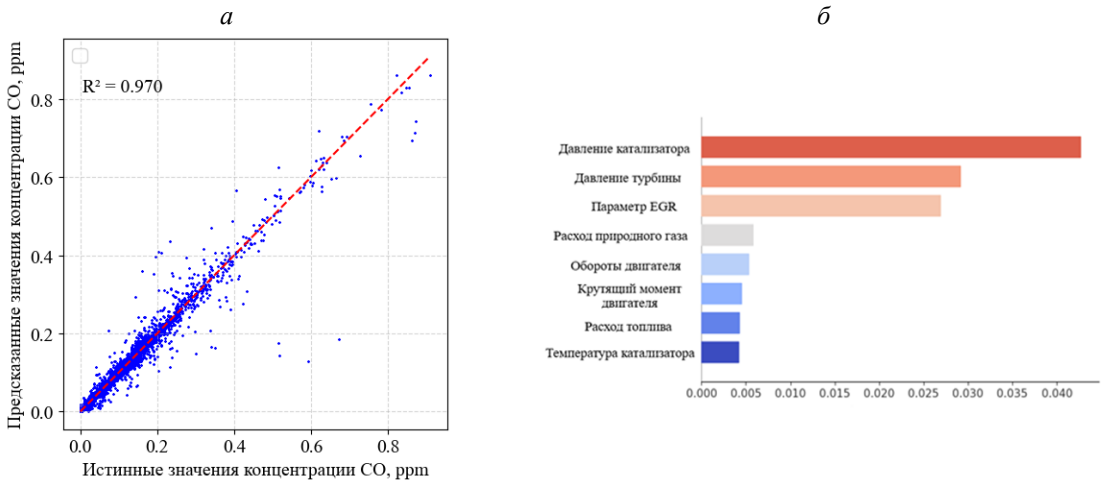



**Рисунок 1 - Кривая верификации концентрации окиси углерода (а); анализ важности признаков нейронной сети для прогноза окиси углерода (б)**

### *Упруго-вязкопластическая модель деформирования и разрушения соляных междукамерных целиков*

Разработан подход к моделированию процессов деформирования соляных междукамерных целиков и вмещающих пород во времени с учётом их предельного состояния, основанный на упруго-вязкопластической модели среды и модификации метода проекции напряжений. Метод реализован для объёмного критерия пластичности и критерия Кулона-Мора в связке с вязкопластической моделью подобной закону Перича и позволяет адекватно отразить нарастание во времени деформаций междукамерных целиков, развитие зон разрушения вмещающих пород и может быть включён в методическую схему оценки долговременной безопасности горных работ на калийных рудниках (рисунок 2).

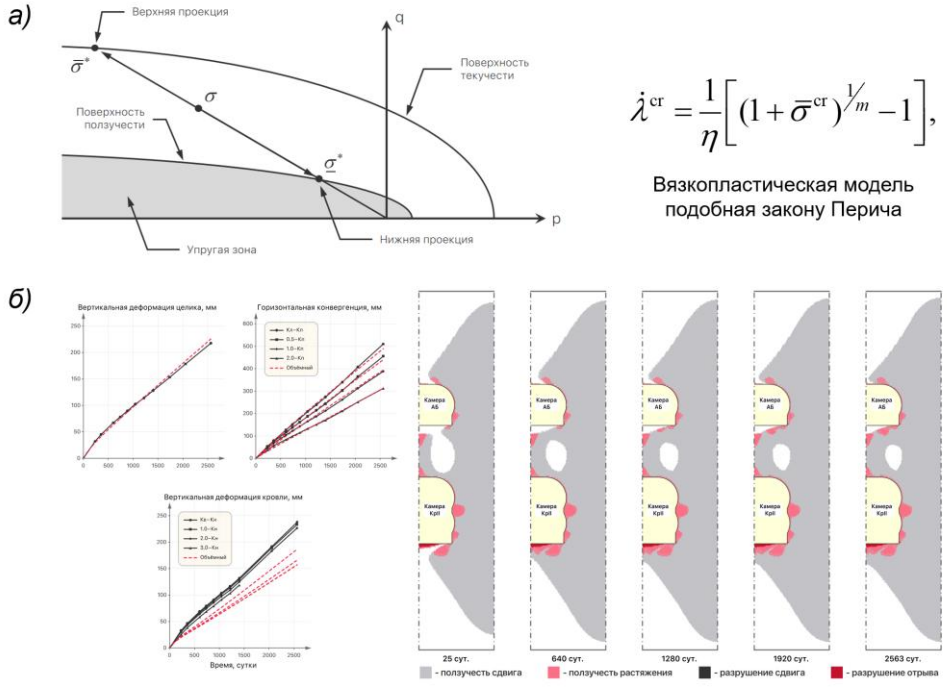



**Рисунок 2 - Модифицированный метод проекции напряжений (а), результаты моделирования процесса ползучести в камерном блоке с использованием модифицированного метода проекции напряжений (б)**

***1. Baryakh A. Elastic-viscoplastic deformation models of salt rocks / A. Baryakh, A. Tsayukov // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2024. – Vol. 18, No. 70. – P. 191-209. – DOI: 10.3221/igf-esis.70.11.***

***2. Baryakh A. Justification of fracture criteria for salt rocks / A. Baryakh, A. Tsayukov // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2022. – Vol. 16, No. 62. – P. 585-601. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.62.40.***

***3. Барях А.А. Математическое моделирование процесса деформирования и разрушения образцов соляных пород / А.А. Барях, А.А. Цаюков, А.В. Евсеев, И.С. Ломакин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 3. – С. 13-23. – DOI: 10.15372/FTPRPI20210302.***

*Руководитель – академик РАН, д.т.н. А.А. Барях, bar@mi-perm.ru*

### *Метод локального прогнозирования зон, опасных по газодинамическим явлениям, для условий Гремячинского месторождения калийных солей*

На основании установленных статистическим анализом закономерностей распределения геологических показателей в зонах калийного пласта, опасных и неопасных по газодинамическим явлениям, разработана математическая модель метода локального прогнозирования, основанная на многомерном дискриминантном анализе геологических данных и получены решающие правила для отнесения участков калийного пласта к зонам, опасным по газодинамическим явлениям. С помощью решающих правил построены прогнозные карты зон, опасных по газодинамическим явлениям, для условий шахтного поля Гремячинского ГОКа (рисунок 3). Метод внедрен в нормативную документацию, регламентирующую безопасное ведение горных работ.

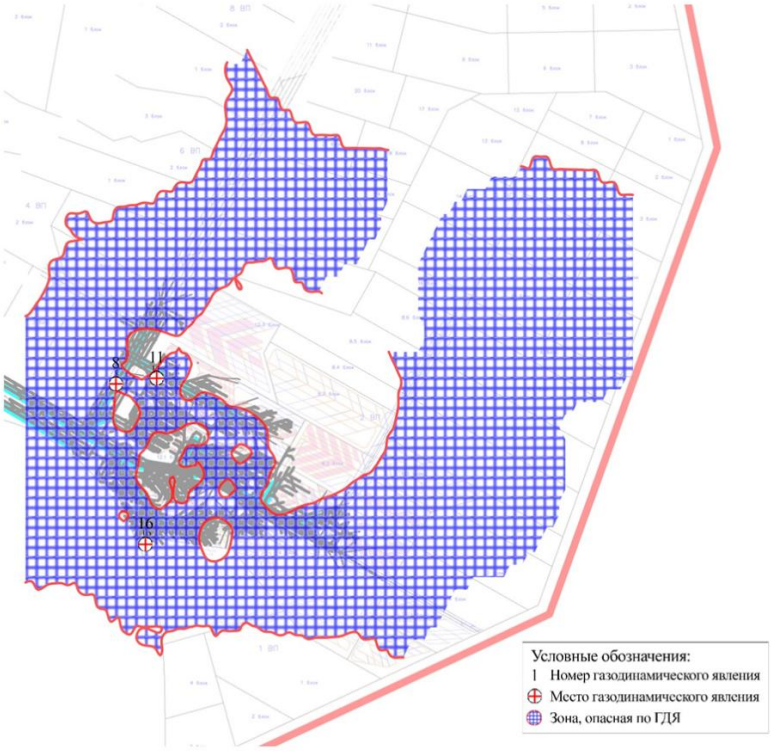



**Рисунок 3 - Прогнозная карта зон, опасных по газодинамическим явлениям, в пределах восточной части шахтного поля рудника Гремячинского ГОКа**

***Андрейко С.С., Лядов В.О., Нестеров Е.А. Роль зональности горно-геологических параметров шахтного поля в задаче локального прогнозирования зон, опасных по газодинамическим явлениям. – Недропользование. - 2025. - Т. 3. - № 3. – С.217–225. DOI: 10.15593/27128008/2025.3.11.***

*Руководитель – д.т.н., проф. Андрейко С.С.*

### *Модель нестационарного водораспределения в системе противопожарных трубопроводов глубокого рудника*

Предложена и верифицирована по данным натурных измерений численная модель нестационарного водораспределения в системе подземных пожарных трубопроводов глубокого

рудника, особенностью которого является подача воды через несколько стволов. Введенный метод расчёта степени заполненности трубопроводов водой и алгоритм работы редукционного клапана позволили воспроизвести реальную цикличность опустошения и заполнения водой системы, а также выявить критические участки и периоды её работы (рисунок 4). Модель обеспечивает достоверное описание динамических процессов, возникающих при работе запорной и регулирующей арматуры рудничных пожарных трубопроводов, и тем самым формирует основу для повышения управляемости и энергоэффективности шахтных систем водоснабжения.

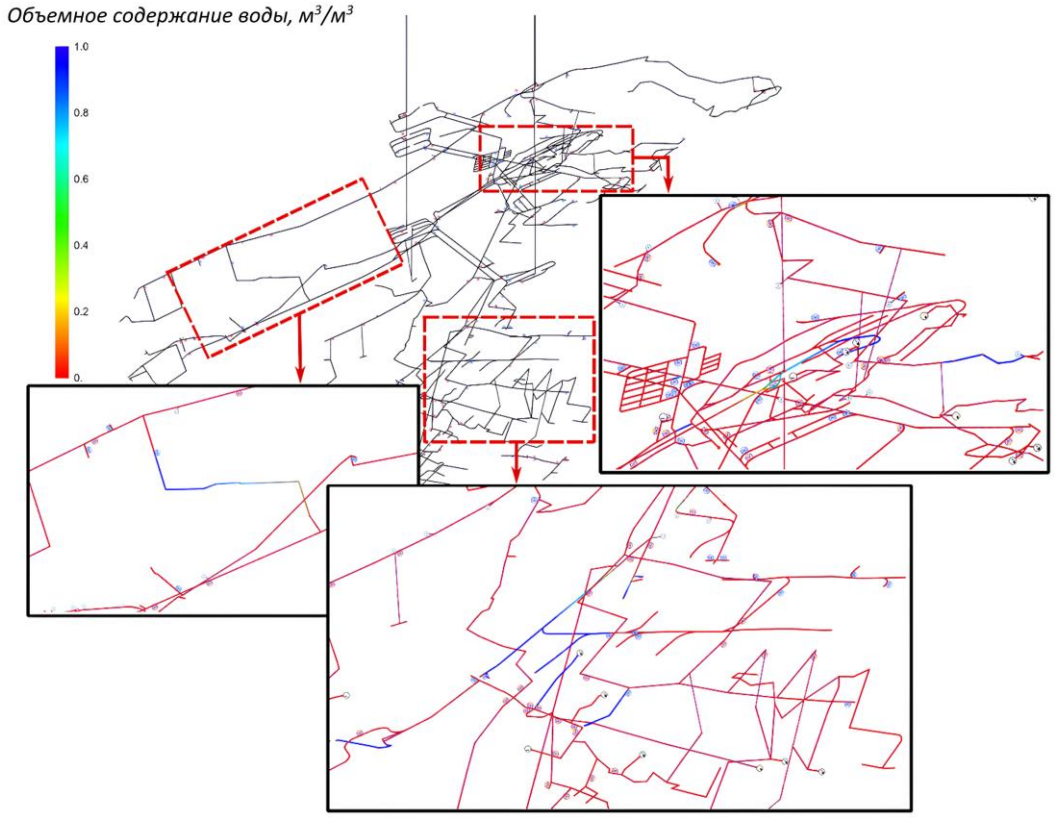



**Рисунок 4 - Рассчитанное распределение степени заполненности водой пожарных трубопроводов подземного рудника**

***Bublik S., Olkhovsky D., Semin M., Parshakov O., Zaitsev A. Mathematical modeling of the cyclical emptying and filling of water distribution system in a deep mine // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2025. – Т. 158. – Статья №. 106375. (УБС1, Scopus Q1, Web of Science Q1)***

*Руководитель – чл.-корр. РАН, д.т.н. Л.Ю. Левин (aerolog_lev@mail.ru)*

### *Модель нестационарного проветривания тупиковой выработки калийного рудника с работающим комбайновым комплексом*

Разработана и валидирована по экспериментальным данным численная модель нестационарного проветривания тупиковой выработки калийного рудника с работающим комбайновым комплексом. Адаптация и применение метода динамических сеток позволило воспроизвести фактическую динамику концентраций газа и микроклиматических параметров в исследуемой горной выработке с учетом влияния дискретных технологических процессов — циклов включения/выключения вентиляторов охлаждения проходческого комбайна и траектории движения самоходного вагона.

***Levin L., Semin M., Maltsev S., Luzin R., Sukhanov A. Numerical Analysis of the Impact of Variable Borer Miner Operating Modes on the Microclimate in Potash Mine Working Areas // Computation. – 2025. – Т. 13. – № 4. – Статья № 85. (УБС2, Scopus Q2, Web of Science ESCI)***

*Руководитель – чл.-корр. РАН, д.т.н. Л.Ю. Левин (aerolog_lev@mail.ru)*

### *Методика контроля напряженного состояния элементов камерной системы разработки с использованием скважинных датчиков нагрузки*

Разработана конструкция скважинного датчика измерения напряжений, оснащенная модулем on-line регистрации данных, и предложена методика его использования для оценки изменения напряжений в квазипластичных породах при ведении горных работ. Методика позволяет реализовать мониторинг напряженного состояния элементов камерной системы разработки в режиме реального времени. Получаемая информация является определяющей при оценке устойчивых размеров междукамерных целиков, сроков их службы и последующей оптимизации извлечения полезного ископаемого из недр.

***Барях А.А., Бельтюков Н.Л., Кузнецов А.И. Особенности поведения датчика напряжений типа жесткого включения в соляных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11. – С. 5–18. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_5. (Scopus Q2)***

*Руководитель – академик РАН, д.т.н. А.А. Барях (bar@mi-perm.ru)*

### *Способ сейсмоакустического прогноза неоднородностей породного массива из забоя горной выработки*

Для выявления акустически контрастных физико-геологических неоднородностей породного массива вокруг забоя горных выработок разработан способ сейсмоакустической локации отражающих объектов в горизонтальной плоскости, реализуемый в идеологии суммирования по общей глубинной точке с использованием малоапертурной приемной расстановки. На результатах полноволнового моделирования и целого ряда практических экспериментов показана возможность использования для этих целей поперечных волн вертикальной поляризации. Разработан алгоритм подавления отраженных волн, пришедших из нецелевых областей пространства. Проведены полевые испытания на контрольных объектах в реальных условиях соляных шахт.

***Ярославцев, А.Г., Тарантин М.В. Методика сейсмоакустического контроля структуры околозабойного массива в соляных рудниках // Инженерная и рудная геофизика 2025: материалы научно-практической конференции и выставки, Екатеринбург, 21–25 апреля 2025 года. – Москва: ООО «Геомодель Развитие», 2025. – С. 290-295.***

*Руководитель – д.т.н., проф. И.А. Санфиров (sanf@mi-perm.ru)*

### *Модель накопления годового слоя соляной толщи Верхнекамского месторождения на различных стадиях галогенеза*

Установлено, что соленакопление на всем протяжении происходило в стабильном мономиктическом гидродинамическом режиме, характеризующемся садкой солей в весенне-летний период на дне бассейна (друзовидный и друзовидно-шестоватый перистый галитит, друзовидный и древовидный карналлитит), а в осенне-зимний период - во всей толще воды (кумулятивные галит, сильвин, карналлит, зернистые корочки карналлита).

***Уткина Т.А., Чайковский И.И. Фациальные и гидроклиматические реконструкции условий формирования солей Верхнекамского месторождения // Литология и полезные ископаемые, 2026, № 1 (в печати)***

*Руководитель – д.г.-м.н. И.И. Чайковский (ilya@mi-perm.ru)*

### *Закономерности формирования в приповерхностном газовом фоне аномалий, отражающих поступление миграционных компонентов из нижележащей части разреза*

Установлено, что в условиях калийных месторождений деформация породного массива сопровождается высвобождением связанных газов и их последующим перераспределением в надсоляной части разреза. В пределах геодинамически активных зон преобладающими механизмами миграции газов является пульсационный адвекционный массоперенос пузырьков газов в сухих трещинах и их всплывание в водоносных толщах и в трещинах заполненных водой. Интенсивность поступление углеводородных газов в приповерхностную часть разреза позволяет контролировать характер происходящих в породном массиве

деформационных процессов, определяющих степень флюидопроницаемости зон природно-техногенной трещиноватости.

***Бачурин Б.А. Исследование процесса миграции метана в приповерхностную часть разреза в пределах затопленного калийного рудника // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – (в печати)***

*Руководитель – к.г.-м.н. Б.А. Бачурин (bba@mi-perm.ru)*

### *Гравиметрический контроль состояния аварийных участков Верхнекамского месторождения солей*

Выявление природных и техногенных зон изменения плотности в подработанном массиве по данным гравиметрического мониторинга позволяет конкретизировать форму и место проявления техногенных деформаций в пространстве подработанной толщи и прогнозировать участки опасных геологических процессов и контролировать процесс ликвидации аварий, что повышает безопасность эксплуатации Верхнекамского месторождения.

***Бычков С.Г., Щербинина Г.П., Простолупов Г.В. Гравитирующие объекты Соликамской впадины Предуральского краевого прогиба // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. - 2025. - № 2. - Вып. 66. - С. 110-121. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2025-2-66-110-121.***

***Бычков С.Г., Хохлова В.В. Гравиметрический мониторинг развития техногенно-геологических процессов в горном массиве // Геофизика. - 2025. - №5. - С. 28-33. - DOI: 10.34926/geo.2025.26.38.006.***

*Руководитель – д.г.-м.н. С.Г. Бычков (bsg@mi-perm.ru)*

### *Методика калибровки сейсмометрического оборудования с использованием эталонного прибора в условиях высокого уровня фоновых сейсмических помех*

Активное использование сейсмоприемников в различных отраслях требует высокой точности и надежности их показаний. Достоверность данных, получаемых с помощью этих приборов, становится критически важной для своевременного выявления и предотвращения возможных повреждений и аварий. С целью уточнения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) приборов была разработана и практически опробована методика относительной калибровки с помощью эталонного прибора. Установлено, что фактическая АЧХ сейсмометров, находящихся в длительной эксплуатации, может значительно отличаться от паспортных значений. Также показана необходимость учета собственного уровня шумов сейсмометров, даже при проведении измерений в условиях высокого уровня фоновых микросейсм (например, в центре мегаполиса).

***Воскресенский, М.Н. Калибровка каналов сейсмического регистратора с помощью эталонного прибора / М.Н. Воскресенский, Д.Ю. Шулаков, Ф.Г. Верхоланцев, А.А. Курданова, Е.А. Косоротова // Геофизика. – 2025. – № 5. – С. 103-109. – DOI: 10.34926/geo.2025.27.36.001.***

*Руководитель – д.т.н., проф. И.А. Санфиров (sanf@mi-perm.ru)*

### *Хлоридные технологии в переработке руд месторождения Сухой Лог*

В рудах месторождения Сухой Лог (углеродистые сланцы), наряду с золото-сульфидной минерализацией, установлено наличие органического вещества (ОВ) близкого по составу и генезису ОВ соляных пород ВКМС, а также связь с ним золота в виде органических соединений, формирующего отдельную ассоциацию. После шихтования руды с NaCl и высокотемпературного обжига, в огарке установлено наличие техногенного (самородного) Au. Преобразованию подвергались, как исходные минеральные обособления золота, так и органические соединения. Обжиг в восстановительных условиях преобразует соединения золота в самородное (техногенное) Au в виде обособлений, содержащих до 99% Au и примеси (Ag, Fe, S, O).

При обжиге в окислительно-восстановительных условиях формируются обособления, содержащие 100% золота. Присутствие в отдельных анализах кремния и кислорода связано с дефектами полировки, поэтому попадание зонда на углубление в поверхности шлифа показывает их наличие (шлифпорошок-карбид кремния).

Применение хлоридных технологий в переработке руд месторождения Сухой Лог, представленных углеродистыми сланцами, имеет несколько ключевых достоинств: упрощение

технологии переработки руды и отсутствие экологически вредных отходов; получение практически аффинированного золота в конце передела; возможность пересмотра ресурсов золота, связанного с углеродистыми сланцами месторождения Сухой Лог.

***Сметанников А.Ф. Связь благородных металлов с органическим веществом соляных пород и углеродистых сланцев // Материалы международной конференции «Плаксинские чтения - 2024», г. Апатиты, 23-27 сентября 2024 г., стр. 434-439.***

*Руководитель – д.г.-м.н. А.Ф. Сметанников (smetannikov@bk.ru)*

## 2.8. ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ - ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

В 2025 году Горный институт КНЦ РАН продолжил научные исследования в следующих направлениях:✓

✓ Развитие методологии рационального и экологически сбалансированного недропользования при освоении минерально-сырьевых ресурсов Северо-Запада Арктической зоны Российской Федерации;

✓ Развитие научных основ обеспечения геомеханической безопасности природно-технических систем горнодобывающей отрасли;

✓ Создание ресурсосберегающих технологий переработки природного и техногенного минерального сырья;

✓ Разработка цифровых технологий и информационных систем для решения задач горно-обогатительного производства.

Исследования выполнялись по 4 темам НИР в соответствии с государственным заданием.

Наиболее значимые важнейшие научные достижения распределены по отраслям знаний:

### Геотехнология

1. На основе предложенной методологии цифрового планирования открытых и подземных горных работ разработан комплекс алгоритмов, процедур и методик автоматизированного формирования среднесрочных планов. Методология построена на сценарном анализе достижения целевых показателей (объём и качество добываемого сырья), а оптимизация направлена на минимизацию отклонений при рациональном использовании ресурсов предприятия. Интеграция методов теории графов, программирования в ограничениях и имитационного дискретно-событийного моделирования обеспечивает высокую детализацию и многовариантность анализа сценариев ведения горных работ с минимизацией простоев и перегонов оборудования.

2. Разработана концепция единой Геолого-технологической блочной модели (ГТБМ), представляющей собой мелкоблочную цифровую модель месторождения, содержащую геологические, геомеханические и технологические данные о свойствах массива горных пород. В основе концепции лежит идея исключения фрагментации данных за счёт создания интегрированной, пространственно-темпоральной модели недр в едином координатном пространстве с сохранением в БД всех привязанных к дате и времени изменений. ГТБМ в предложенной концепции обеспечивает оперативность получения данных, облегчает аналитику и прогнозирование, а также является единым источником актуальной информации о месторождении, формируя ядро цифрового двойника горнодобывающего предприятия.

3. Разработан научно-методический подход к автоматизированному созданию цифровой модели транспортной сети на основе 3D-моделей горных выработок. Метод построен на автоматическом определении топологии выработок, их функциональной классификации и учёте ограничений, определяющих возможность перемещения техники и транспортирования горной массы. Использование метода позволяет существенно ускорить процесс анализа транспортной доступности, проектирования и планирования подземных горных работ.

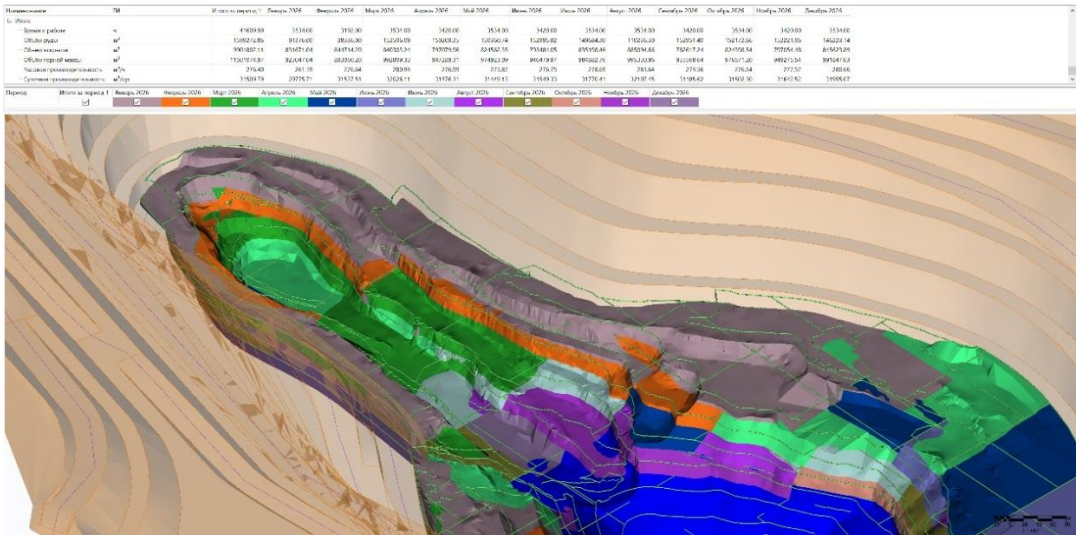


**Рисунок 1 – Результат расчёта плана развития горных работ на примере карьера Юбилейный (ПАО «АК Алроса»)**

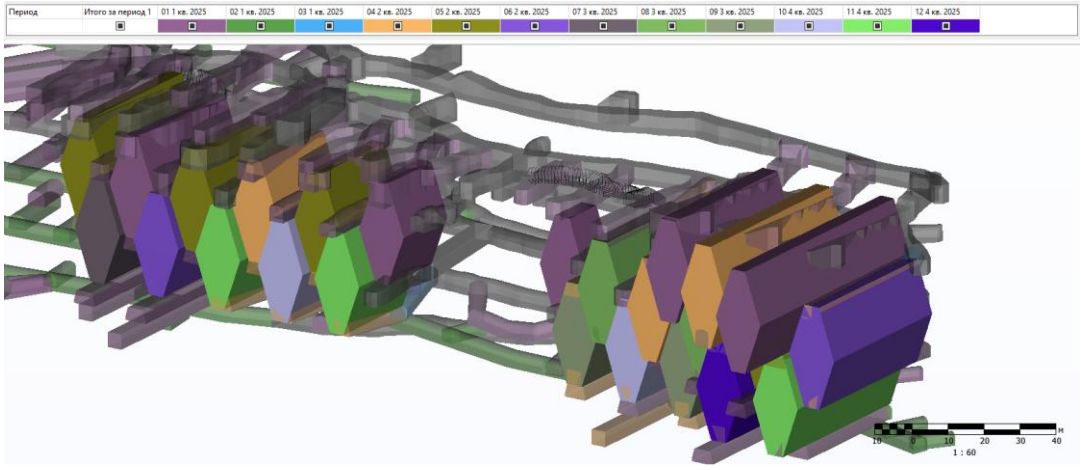



**Рисунок 2 – Результат расчёта плана развития горных работ на примере фрагмента рудника Айхал (ПАО «АК Алроса»)**

## Геомеханика

1. На основе результатов натурных и численных исследований установлен равнокомпонентный характер поля напряжений и размеры нарушенной зоны вокруг горных выработок сверхглубокого заложения, обоснован тип и параметры их крепления для горно-геологических условий Норильских рудников, что позволяет повысить устойчивость выработок на больших глубинах.

2. Установлены закономерности распределения сейсмичности в массиве пород Ковдорского месторождения магнетит-апатитовых руд, отрабатываемого крупнейшим карьером северо-запада России. На основе пространственно-временной кластеризации и динамики площадного распределения сейсмической энергии выявлена миграция сейсмоактивных зон, связанная с развитием горных работ и сезонной обводнённостью массива. Определены зоны с экстремально высоким уровнем сейсмичности, приуроченные ко дну карьера в районах разломных структур. Выделены геодинамически активные структуры, вблизи которых при проведении горных работ имеет место высокий уровень сейсмического отклика массива, что может приводить к развитию деформационных процессов на вышележащих участках борта карьера.

3. Разработана методика моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом структурных неоднородностей, реализующая оценку влияния разломных структур с различным масштабом и типом заполнителя на возможность сдвига по контакту и распределение главных нормальных компонент напряжений.

4. На основе анализа результатов численного моделирования, учитывающего действие в массиве тектонических сил, определены параметры техногенного поля напряжений участка Гакман Юкспорского месторождения. Выявлены области растягивающих напряжений в консоли налегающих пород, способствующие планомерному обрушению по мере развития очистной выемки. Установлены характеристики потенциально удароопасных зон в границах участка Гакман. Разработанная численная геомеханическая 3D-модель внедрена на производстве и является основой прогноза удароопасности и планирования горных работ.

5. На примере скальных пород месторождений Кольского региона установлено, что при отношении жесткости пресса к жесткости образца менее 1 ($C_1/C_2<1$), скорости нагружения более 10 МПа/с и при соотношении компонент напряжений $\sigma_1>\sigma_2=\sigma_3$ (где $\sigma_3=0$) породы будут разрушаться преимущественно в динамической форме. При отношении жесткости пресса к жесткости образца больше 1 ($C_1/C_2>1$), скорости нагружения менее 10 МПа/с и боковом давлении ($\sigma_3$) более 30 МПа склонность пород к динамическому разрушению будет уменьшаться вплоть до изменения на несклонное к такому виду разрушения.

6. Разработан комплекс методов мультимасштабного мониторинга гидротехнических сооружений горнодобывающих предприятий и сопряженных природных систем в климатических и географических условиях Баренцева евро-арктического региона России (БЕАРР). Мониторинг базируется на комплексировании методов наблюдений, обеспечивающих их геометрическую мультимасштабность, начиная с размеров частиц грунтов и заканчивая объемом сооружения в целом. Комплексирование методов позволяет получать более полную, детализированную и иерархически структурированную информацию о состоянии контролируемых объектов. Методы мультимасштабного мониторинга внедрены на предприятиях НорНикель, ЕвроХим, СЗФК, Фосагро, расположенных в БЕАРР, и рекомендуются к применению в других горнопромышленных регионах.

7. Создана гидрогеологическая 3D-модель хвостохранилища АНОФ-3 КФ АО «Апатит», учитывающая технологический сброс пульпы и промышленных вод, осадки, притоки поверхностных и грунтовых вод, с одной стороны, и испарение и инфильтрацию вод из хвостохранилища в окружающую среду, с другой. Модель имитирует полный гидрогеомеханический режим и позволяет прогнозировать техногенные фильтрационно-деформационные процессы в природно-технической системе «хвостохранилище - окружающая среда».

8. На основе цифровых технологий разработан методический подход к дистанционному мониторингу и оценке рисков снижения устойчивости гидротехнических сооружений (ГТС). Подход включает создание компьютерных 3D-моделей и формирование информационных карт объектов, ранжированных по степени их воздействия на окружающую среду. Методический подход апробирован на предприятиях АО «Апатит», АО «СЗФК», АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», АО «Олкон», ПАО «ТГК-1» и может быть использован как инструмент оценки промышленной и экологической безопасности ГТС.

9. Разработан дистанционный метод площадной оценки состояния поверхности техногенных массивов, основанный на изучении степени водонасыщенности среды по данным мультиспектральных инфракрасных оптико-электронных спутниковых систем. Оценка производится на основе критерия, связывающего водонасыщенность среды со склонностью грунтов к развитию опасных экзогенных геологических процессов. Особенностью метода является возможность автоматизированного дешифрования и геопространственного анализа космоснимков с помощью машинного зрения.

**Разрушение горных пород**

На основе экспериментальных наблюдений на карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» выявлены закономерности формирования и распространения сейсмических и акустических волн в зависимости от условий взрывания. Оценено их влияние на охраняемые объекты и разработана технологическая инструкция (регламент) по обеспечению сейсмической безопасности зданий и сооружений промплощадки и города Ковдор при ведении буровзрывных работ в карьере. Инструкция предназначена для прогноза сейсмической опасности при производстве массовых взрывов в карьере и выбора их параметров при проектировании горных работ в зависимости от горно-геологических условий.

## Обогащение полезных ископаемых

1. Определены оптимальные гранулометрические пороги раскрытия ферромагнитной фазы титаномагнетитовых руд, на базе чего обоснованы селективные режимы их рудоподготовки и обогащения. Разработаны комбинированные технологические схемы обогащения титаномагнетитовых руд ряда месторождений России, основанные на оптимизации операций дезинтеграции, магнитной и магнитно-гравитационной сепарации. Апробация данного методического подхода обеспечила для комплексных руд Сибири получение концентрата, содержащего до 59% железа, для руд Кольского полуострова получение концентрата с содержанием до 63% железа, а для руд Урала – до 65%. Полученные результаты подтверждают эффективность технологических схем для решения задачи освоения титаномагнетитовых месторождений России.

2. На основе изучения изотерм поверхностного натяжения бинарных растворов ксантогената и моноамидов дикарбоновых кислот установлен эффект синергизма при образовании смешанных мицелл и адсорбционного слоя, рассчитаны термодинамические параметры взаимодействия. Установленные соотношения реагентов коррелируют с оптимальным составом собирательной смеси при флотации сульфидных медно-никелевых руд, обеспечивающим повышение извлечения никеля в черновой концентрат на 2,5%.

3. На основе изучения обогатимости забалансовых апатит-нефелиновых руд установлена линейная зависимость качественно-количественных показателей. Для руды с содержанием 2-3% P2O5 при снижении качества концентрата на 1% извлечение апатита в концентрат увеличивается на 1,8%, что обосновывает целесообразность вовлечения в переработку бедных руд. Установленная зависимость подтверждена результатами опытно-промышленных испытаний.

4. Научно обоснована и апробирована в опытно-промышленных условиях комплексная технология получения качественного титаномагнетитового концентрата из апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений с ультранизкой (0,4%) концентрацией титаномагнетита, обеспечивающая получение концентрата с содержанием железа общего на уровне 60% и диоксида титана 13% при извлечении титаномагнетита более 90%. Отработана реагентная схема сгущения апатитового концентрата с использованием сульфата железа, произведенного из данного сырья, продемонстрировавшая высокую эффективность осаждения взвешенных частиц. Разработанная технология создает основу для полного импортозамещающего технологического цикла переработки стратегического титаномагнетитового сырья России.

5. На базе технологии машинного обучения создан программно-аппаратный комплекс управления процессом магнитно-гравитационной сепарации тонкоизмельченных сильномагнитных руд. В его основе лежит нейронная сеть, использующая в реальном времени данные о технологическом процессе из информационной системы обогатительного производства. Комплекс апробирован и интегрирован в действующую АСУ ТП обогатительной фабрики АО «Карельский окатыш».

## Горная экология

Разработан методический подход к интегральной интерпретации данных дистанционного зондирования Земли применительно к задачам восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов. В основе подхода лежит использование вероятностной графовой модели, обученной на данных о распределении абиотических факторов. Установлена зависимость чистой первичной продукции растительного покрова, как показателя восстановления наземных природных систем, что расширяет инфологическую базу экологического мониторинга. Выявлены факторы восстановления природных систем, а также их причинно-следственные связи, влияющие на этот процесс. Показано, что загрязнение атмосферы оксидами азота является лимитирующим фактором и определяет размер предельного контура восстановления природных систем. Результаты исследований готовы к использованию в качестве методической базы автоматизированного контроля восстановления природных систем в региональном масштабе.

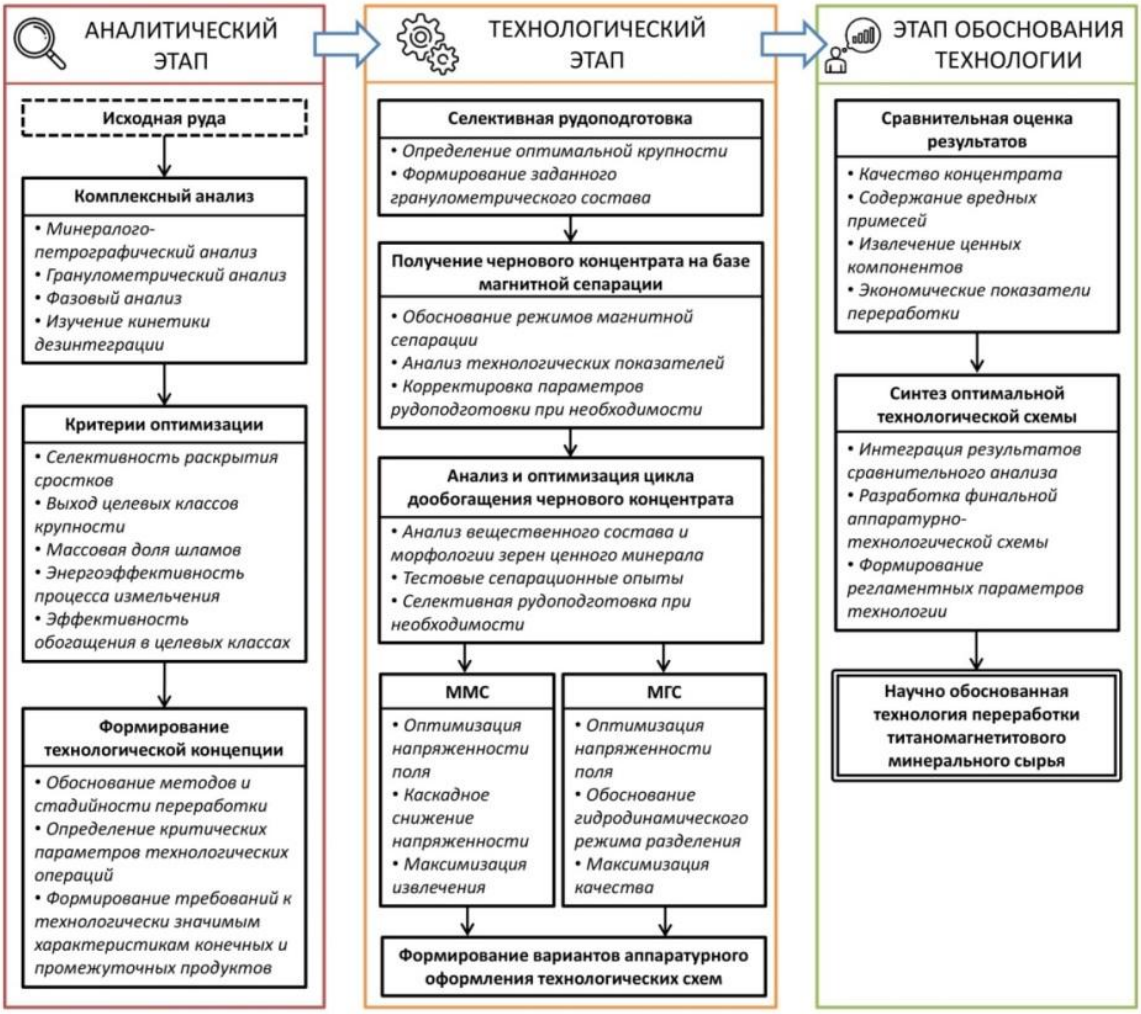



**Рисунок 3 – Концептуальная схема научно-технологического подхода создания эффективных технологий переработки титаномагнетитовых руд**

## 2.9. ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ СЕВЕРА – ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

**2. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

**2.3. Науки о Земле**

**2.3.7. Горные науки**

**2.3.7.2. Комплексная, технологически эффективная и экологически безопасная добыча, обогащение и глубокая переработка минерального сырья**

**Сущность результата:**

Обоснован подход по включению механизмов радиационного и фазового притоков тепла в аэротермодинамическую мезомасштабную модель атмосферы (программа COMSOL), предназначенную для исследования процессов естественного проветривания карьеров при проведении взрывных работ и переноса мелкодисперсной пыли на хвостохранилищах. Учет радиационного притока тепла при безоблачной и облачной атмосфере основан на аппроксимации расчетных данных радиационного блока по вертикали и широте в глобальных климатических моделях и программах прогноза погоды. Для фазового притока тепла обоснован консервативный диапазон значений разности сухо- и влажно-адиабатических градиентов температуры**.**

**Новизна:**

На основе расчетных данных глобальной климатической модели (Марчук Г.И. и др., 1984) построены аппроксимирующие функции радиационного притока тепла при безоблачной и облачной атмосфере для диапазона широт $\varphi$ от 15° с.ш. до 70° с.ш. (рисунок 1 конкретно для широты 70° с.ш.) до высоты 1000 м.

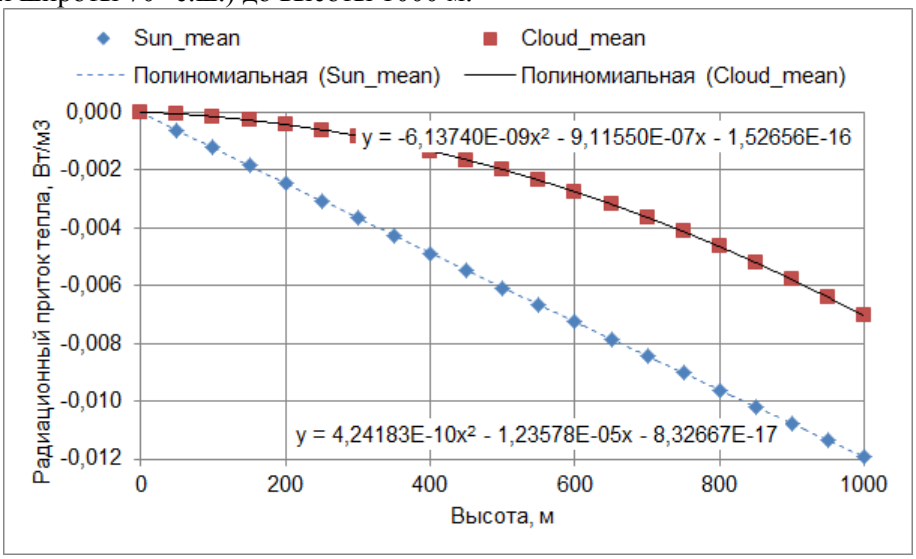



**Рисунок 1 – Расчетные средние значения для двух версий радиационных блоков R2 и R4 глобальной климатической модели (*Марчук Г.И. и др., 1984*) и квадратичные функции аппроксимации радиационного притока тепла при безоблачной (Sun_mean) и облачной (Cloud_mean) атмосфере для 70°с.ш. для высоты до 1000 м**

Обобщенные функции радиационного притока тепла в зависимости от высоты $z$ (до 1000 м) над поверхностью и диапазона $\varphi$ от 15° с.ш. до 70° с.ш. $\varphi$ имеют вид (рисунок 2):

*безоблачная атмосфера*

$$\varepsilon_{radSun}(\varphi,h) = (4{,}79879\cdot 10^{-15}\cdot\varphi^2 - 2{,}64213\cdot 10^{-10}\varphi + 1{,}88958\cdot 10^{-8})\cdot h^2 + (-2{,}39518\cdot 10^{-9}\cdot\varphi^2 + 7{,}49417\cdot 10^{-7}\varphi - 5{,}30871\cdot 10^{-5})\cdot h + (-3{,}61663\cdot 10^{-20}\cdot\varphi^2 + 1{,}93868\cdot 10^{-18}\varphi - 4{,}17595\cdot 10^{-17})$$

*облачная атмосфера*

$$\varepsilon_{radCloud}(\varphi,h) = (-2{,}59278\cdot 10^{-12}\cdot\varphi^2 - 2{,}64998\cdot 10^{-11}\varphi + 8{,}41900\cdot 10^{-9})\cdot h^2 + (3{,}86203\cdot 10^{-9}\cdot\varphi^2 + 8{,}61616\cdot 10^{-8}\varphi - 2{,}58673\cdot 10^{-5})\cdot h + (-8{,}40921\cdot 10^{-22}\cdot\varphi^2 - 1{,}56862\cdot 10^{-18}\varphi + 2{,}90178\cdot 10^{-18})$$

Максимальное значение фазового притока тепла -$\varepsilon_{fmax}$ с учетом консервативного диапазона значений разности сухо- и влажно-адиабатических градиентов температуры является функцией только вертикальной скорости w-$\varepsilon_{fmax}$=7,5322·w. Алгоритм вычислений фазового притока тепла может быть организован через перебор значений из диапазона от 0 (отсутствует приток) до 7,5322. Учет фазового притока тепла ***правомерен*** в исследованиях процессов естественного проветривания карьеров при проведении взрывных работ при условии, когда удельная влажность воздуха не меньше удельной влажности насыщения, но для условий процессов пыления на объектах хранения хвостов обогащения учет фазового притока тепла ***не требуется***.

**Значимость:**

Подход совершенствует математическую модель аэротермогазодинамики атмосферы, разработанную в неспециализированном компьютерном коде COMSOL для решения научно-практических задач по оценке загрязнения атмосферы на объектах горнопромышленного комплекса (хвостохранилища, карьеры) без привлечения продолжительных и дорогостоящих расчетов на глобальных климатических моделях и программах прогноза погоды.

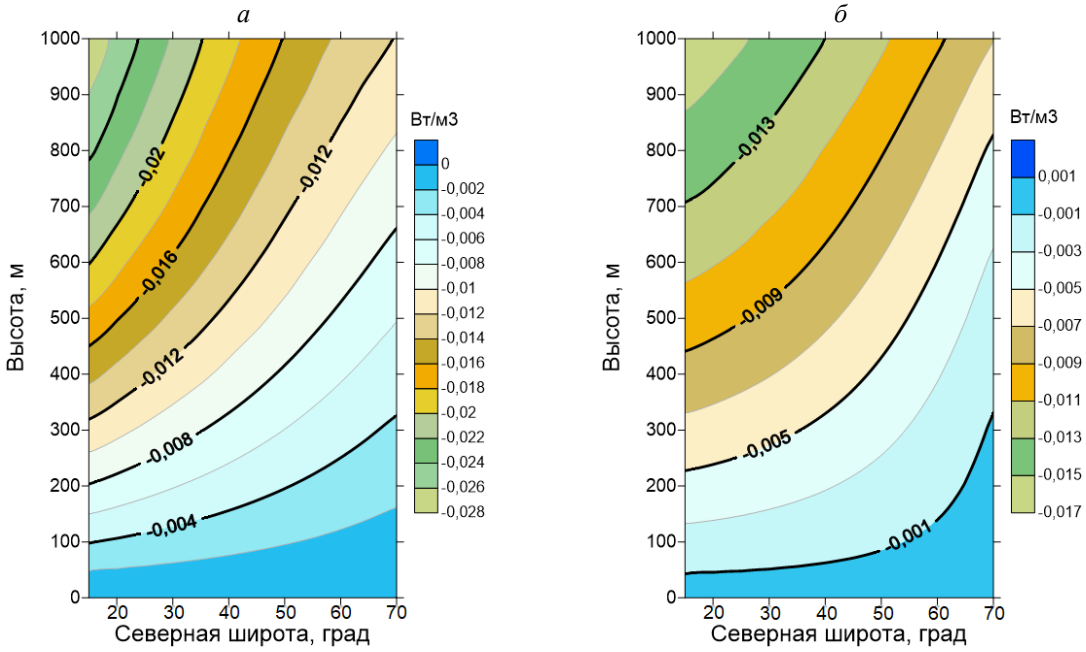



**Рисунок 2 – Изолинии функций аппроксимации радиационного притока тепла при безоблачной (а) и облачной (б) атмосфере для диапазона $\varphi$ от 15° с.ш. до для 70° с.ш. и высоты до 1000 м**

**Возможные сферы применения практического результата:**

Методический подход найдет свое применение в задачах моделирования процессов пыления и переноса мелкодисперсной примеси на объектах хранения хвостов обогащения, а также в оценках времени естественного проветривания карьеров при проведении взрывных работ, в т.ч. с включением предложенного алгоритма в другие программные продукты.

**Сведения об опубликовании:**

1. Амосов П.В. Подходы к включению механизмов неадиабатических притоков тепла в аэротермодинамическую модель атмосферы в неспециализированной программе // Известия СПбГТИ(ТУ). - 2025. - № 74(100). - С. 107-111. (**РИНЦ, ВАК**)

2. Амосов П.В. Подход к учету радиационного притока тепла в неспециализированном программном коде // Математические методы в технологиях и технике. - 2025. - № 4. - С. 59-62. (**РИНЦ**)

## 2.10. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ВСЕРОССИЙСКИЙ ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ РАН

### Состояние и перспективы развития углеродной (нефтяной) энергетики в России

В связи с наступлением на Земле глобального потепления человечество все больше к склоняется к возобновляемым источникам энергии «зеленая энергетика»: солнечные панели, ветровые электростанции, гидроэлектростанции, приливная и термальная энергетика. Следует отметить, что, несмотря на то, что большинство ученых считает основной причиной изменения температуры Земли - выброс в атмосферу парниковых газов, связанных с промышленной деятельностью на основе углеродной энергетики, существуют и другие точки зрения, две из которых – это выбросы газов при извержении вулканов и периоды в истории Земли, связанные как с потеплением, так и с малыми ледниковыми периодами. На настоящий момент доказано, что альтернативная «зеленая» энергетика в ближайшие годы не в состоянии заменить углеродную. К тому же, наряду с экологическими проблемами, существуют и политические моменты, связанные с подрывом экономики стран, широко использующих углеродную энергетику. Поскольку 40% экспортных доходов России связано с нефтью и газом, западный мир и США ввели против этого экспорта санкции, ограничивающие цену барреля в 60 долларов. В 2025 году в рамках 19-го пакета ЕС введены санкции

против Российский нефтяных компаний «Роснефть» и «Лукойл» и ограничения в использовании так называемого «теневого» танкерного флота. Как же на самом деле стоит вопрос с нефтью в России.

Запасы легкоизвлекаемых нефтей на обустроенных площадях заканчиваются. В поисках новых крупных месторождений нефти необходимо проводить работы на Арктическом шельфе и в Северном ледовитом океане. Наложение санкций на нашу добывающую нефтяную промышленность создает определенные трудности. Несмотря на это, компанией «Роснефть» сильно продвинуло программное обеспечение для бурения разведочных скважин в районе арктического шельфа на основе отечественных разработок. Недавно на Таймыре открыто новое месторождение нефти «Восток Ойл» с достаточно большими запасами качественной нефти. Но дополнительным резервом добычи нефти в России становится добыча нетрадиционной нефти на месторождениях типа Баженовского и доизвлечение трудноизвлекаемой нефти (ТРИЗ) на близких к истощению старых месторождений, на которых имеется развитая инфраструктура, логистика и кадры.

Сегодня мировая энергетика находится на весьма сложном этапе своего исторического развития. Эксперты спорят о ее будущем, о той развилке, с которой столкнулся этот гигантский рынок. Традиционное ископаемое сырье или «зеленые» возобновляемые источники энергии (ВИЭ) – выбор, на первый взгляд, не очевиден. Но, по объективным причинам, человечеству рано еще отказываться от нефти, газа, угля и уповать исключительно на милость солнца или ветра. С этой мыслью, озвученной главой «Роснефти» Игорем Сечиным, согласились участники XVII Веронского Евразийского экономического форума, прошедшего в городе Рас-эль-Х.

Ситуация с глобальным энергобалансом такова, что в обозримой перспективе роль нефти и газа в нем будет только увеличиваться. По прогнозам Bank of America, годовой прирост потребления энергии составит до 9 млн баррелей нефтяного эквивалента в сутки, что связано с бурной динамикой ВВП в таких странах как Индия. Что касается производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии (ВИЭ), его объемы в 2025 году могут вырасти максимум на 2 млн. баррелей нефтяного эквивалента в сутки. Между тем среди многих аспектов, заставляющих усомниться в реализуемости «зеленого» энергоперехода, на первый план выходит финансово-экономический. По словам Сечина, для достижения к 2050 году целей Парижского соглашения понадобится свыше $70 трлн инвестиций. Необходимо в 10 раз увеличить мощности низкоуглеродной энергогенерации – до 35 ТВт, что в 4 с лишним раза превышает всю установленную мощность мировой энергосистемы. Именно по этой причине, а также из-за высокой стоимости ВИЭ, сегодняшний лидер по возобновляемой генерации Китай одновременно бьет рекорды по вводу угольных мощностей. За последние 10 лет эта страна, являясь лидером в ветряной и солнечной энергетики, увеличила мощности угольной генерации более чем на 350 ГВт, или на 45%, сообщил глава «Роснефти». Он также остановился на вопросе изменения климата на Земле, напомнил, что так называемый Малый ледниковый период закончился менее 200 лет назад, и текущий период глобального потепления возможно является частью, продолжением естественного природного цикла. Этот аргумент стал основой декларации «Климатической чрезвычайной ситуации не существует», подписанной двумя тысячами ученых, включая двух лауреатов Нобелевской премии.

Энтузиазм западных фондовых рынков в отношении ВИЭ тоже стремительно сходит на нет: акции компаний по производству «чистого» топлива упали в несколько раз. Иными словами, в реальной жизни бизнес голосует деньгами, а «зеленый» доллар бежит от «зеленой» повестки, как от огня. – констатировал Сечин. По его мнению, нефть и газ продолжают играть ключевую роль в обеспечении глобальной энергобезопасности, сегодня на нефть приходится 30% глобальной выработки энергии, на уголь – 25%, на газ – 22%. По прогнозу инвестиционного банка JPMorgan к 2035 году мировой спрос на черное золото увеличится почти на 6 млн баррелей в сутки – благодаря росту потребления в Индии и других развивающихся стран. Руководитель «Роснефти» отметил также особую роль Арктики в развитии Российского ресурсного потенциала. Учитывая ее стратегическое значение для энергобезопасности всей Евразии, а также то, что в Российских широтах сосредоточены

80% мировых запасов арктических нефти и газа, регион должен быть полностью свободен от конфликтов и иностранного вмешательства.

Подтверждением этому является флагманский проект «Роснефти» «Восток Ойл» на Таймыре, с колоссальной ресурсной базой, способной с лихвой обеспечить углеводородами и Россию и многие страны на долгие годы. Ресурсная база «Восток Ойл» - это свыше 6 млрд тонн премиальной нефти, которая отличается сверхмалым содержанием серы в 0,01-0,04%. Весомым преимуществом проекта является близость к Северному морскому пути, что открывает широкие возможности поставок на рынки Азиатско-Тихоокеанского региона.

**Инновационные технологии и методы добычи**, использование новых методов, таких как горизонтальное бурение, гидроразрыв пласта и системы удаленного мониторинга, позволяет значительно повысить эффективность извлечения углеводородов. Внедрение технологий, таких как искусственный интеллект и анализ больших данных, помогает оптимизировать процессы и прогнозировать различные сценарии разработки месторождений. Современное оборудование и автоматизация, высокотехнологичное оборудование, такое как роботы и дроны для выполнения определенных задач, механизированные буровые установки и системы управления, способствующие автоматизации процессов, не только повышают безопасность, но и снижают затраты на добычу, сокращая время на выполнение операций.

По состоянию на 01.01.2020 г. на государственном балансе запасов полезных ископаемых Российской Федерации на глубинах более 4,5 км числятся 119 залежей нефти, 31 залежь свободного газа и конденсата 77 месторождений. Наибольшее число месторождений с залежами на больших глубинах выявлено в пределах Чеченской Республики и Республики Дагестан - по 16, в границах Оренбургской области - 14, Ненецкого автономного округа - 8, Волгоградской области - 5, Кабардино-Балкарской Республики - 4, Республики Ингушетия и Краснодарского края - по 3, Саратовской области - 2, Астраханской области, в Пермском и Ставропольском краях, Республиках Адыгея, Калмыкия и Коми - по одному

**Нетрадиционные ресурсы углеводородов становятся все более актуальной темой в** энергетическом секторе. К ним относятся такие источники, как сланцевый газ, битуминозные пески и метан, содержащийся в угольных пластах. Эти ресурсы открывают новые возможности для обеспечения мирового спроса на энергию, но также сопряжены с рядом вызовов и рисков, как экологического, так и экономического характера.

Одним из ключевых аспектов, связанных с использованием нетрадиционных углеводородов, является необходимость в разработке эффективных технологий добычи. Применение таких методов, как гидроразрыв пласта, требует не только высокой квалификации работников, но и соблюдения строгих норм безопасности. Это важно для минимизации негативного воздействия на окружающую среду и здоровья людей. Инвестиции в научные исследования и инновационные технологии могут существенно повысить эффективность добычи и снизить риски, связанные с использованием этих ресурсов.

К трудноизвлекаемым и нетрадиционным запасам нефти и газа отнесены месторождения Баженовской свиты и месторождения на больших глубинах Западной Сибири. Баженовская свита - это аномально битуминозные глины. Она является нефтематеринской толщей для большинства выявленных в нижнем мелу месторождения нефти в ЗападноСибирском бассейне. Нефти баженовской свиты преимущественно легкие, малосернистые, метановые, плотность нефтей 0,81-0,83 с содержанием твердых парафинов (1-2%). Отличительной особенностью является высокое содержание сапропелевого органического вещества.

Повышение спроса на энергоресурсы и снижение «традиционных» запасов нефти привело к началу разработки «нетрадиционных» источников углеводородов, к числу которых относится Баженовская свита. Разработка Баженовской свиты является одной из стратегических задач многих российских компаний. Баженовская свита распространена на территории около 1 млн км$^2$ и содержит в себе колоссальные ресурсы. Однако в связи со сложными геолого-физическими условиями залегания, промышленная разработка данного объекта была начата относительно недавно, в отличие от группы сланцевых месторождений в США. При освоении запасов Баженовской свиты, специалисты сталкиваются со следующими проблемами: низкие значения фильтрационно-емкостных свойств, высокие пластовые температуры и давления, отличие формирования коллектора от «традиционного», содержание

как легкой нефти, так и керогена различной степени зрелости, преобразование которого в синтетическую нефть требует высоких температур.

Ключевые перспективные комплексы отложений нетрадиционных источников углеводородов в Российской Федерации - хадум (СевероКавказская НГП), доманик (Волго-Уральская и Тимано-Печорская НГП), бажен (ЗападноСибирская НГП), а также пермские отложения центральной части Волго-Уральской НГП

**Импортозамещение в сфере оборудования и программного обеспечения для поиска и разработки месторождений в Арктике** представляет собой стратегически важную задачу для России.

Освоение шельфовых месторождений требует больших затрат и применение высоконадежного оборудования на всех этапах строительства скважин. Ограниченное число разведочных скважин, как следствие высокие геологические неопределенности, требует от бурения скважин использование передовых методов ГИС без права на ошибку. Последние годы указанный сервис представлен зарубежными компаниями: Schlumberger, Halliburton, Weatherford. На сегодняшний день, российские геофизические компании к работам на шельфовых проектах технически не готовы из-за отсутствия соответствующих сертификатов, компетенций и отсутствием требуемого текущими проектами оборудования геоинформационных систем (ГИС). Направление развития при работах на шельфе – полное импортозамещение. Представлен текущий обязательный комплекс ГИС на примере строительства поисково-оценочной скважины в Карском море с применяемыми современными технологиями.

Опыт освоения недр Арктики кардинально меняет представление о нефтяной промышленности как о «нефтяной игле», тормозящей инновационное развитие страны. Для Российской Федерации (РФ) освоение Арктики может стать катализатором модернизации нефтегазовой отрасли. В 2014 году рядом развитых стран в отношении РФ были введены санкции, прежде всего, направленные на ограничение передачи технологий для разработки нефтегазовых месторождений Арктики. Некоторые компании, такие, как ПАО «Роснефть», стали заблаговременно осваивать качественно новые для страны технологии, создавая промышленные и научные кластеры, однако большая часть компаний пришла к необходимости импортозамещения лишь после политических шагов со стороны западных стран.

Таблица 1

Рейтинг стран по запасам нефти

| № | Страна | Запасы (млрд баррелей) |
|---|---|---|
| 1 | Венесуэла | 303,22 |
| 2 | Саудовская Аравия | 267,19 |
| 3 | Иран | 208,60 |
| 4 | Канада | 163,63 |
| 5 | Ирак | 145,02 |
| 6 | ОАЭ | 113,00 |
| 7 | Кувейт | 101,50 |
| 8 | Россия | 80,00 |
| 9 | США | 55,25 |
| 10 | Ливия | 48,36 |

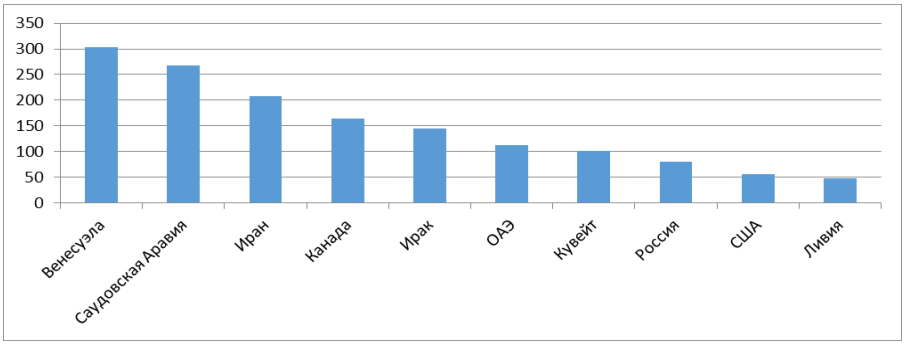



**Рисунок 1 - Запасы (млрд. баррелей) - СТРАНА**

Таблица 2

Страны с наибольшими объемами добычи нефти на 2024 год

| № | Страна | Добыча (мон барр./день) |
|---|---|---|
| 1 | США | 11,6 |
| 2 | Россия | 10,5 |
| 3 | Саудовская Аравия | 10,2 |
| 4 | Канада | 4,7 |
| 5 | Ирак | 4,3 |
| 6 | Китай | 4,0 |
| 7 | ОАЭ | 3,0 |
| 8 | Бразилия | 2,9 |
| 9 | Кувейт | 2,6 |
| 10 | Иран | 2,5 |

Таблица 3

Топ-15 крупнейших месторождений нефти

| № | Месторождение | Год открытия | Геологические запасы (млрд тонн) | Оператор разработки | Нефтегазоносный бассейн |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Аль-Гавар | 1948 | 12 | Saudi Aramco | Персидский залив |
| 2 | Большой Бурган | 1946 | 11 | Kuwait Petroleum Corp. | Персидский залив |
| 3 | Боливар Костал | 1917 | 8,3 | Petroleos de Venezuela | Озеро Маракайбо |
| 4 | Верхний Закум | 1969 | 7,0 | ADNOC, ExxonMobil, Inpex | Персидский залив |
| 5 | Северное / Южный Парс | 1991 | 7,0 | Qatar Gaz, Petropars | Персидский залив |
| 6 | Кашаган | 2000 | 6,4 | Eni, КазМунай-Газ, Total, etc | Прикаспийская впадина |
| 7 | Самотлорское | 1965 | 6,2 | Роснефть | Западная Сибирь |
| 8 | Дацин | 1959 | 5,7 | PetroChina | Сунляо |
| 9 | Сафания-Хафджи | 1951 | 5,5 | Kuwait Petroleum Corp., Saudi Aramco | Персидский залив |
| 10 | Гечсаран | 1928 | 5,2 | NIOC | Персидский залив |
| 11 | Эр-Румайла | 1953 | 5,2 | | Персидский залив |
| 12 | Группа Кантарел | 1971 | 5,0 | Pemex | Мексиканский залив |
| 13 | Ромашкинское | 1948 | 5,0 | Татнефть | Поволжье |
| 14 | Приобское | 1982 | 5,0 | Роснефть, Газпром нефть, Русснефть | Западная Сибирь |
| 15 | Комплекс Марлин | 1985 | 4,3 | Petrobras | Бразилия |

**Литература**

1. Агафонов А.И. Теоретическое и практическое обоснование возобновляемости запасов нефти и природного газа. Анализ современного состояния проблем происхождения нефти и газа. // Бурение и нефть. – 2019. - № 1. - С. 22-29.

2. Осипов А. В.Характеристика запасов углеводородного сырья глубокозалегающих залежей нефтегазоносных провинций Российской Федерации. // Нефтяное хозяйство. – 2021. - № 5. - С. 8-10.

3. Немченко-Ровенская А.С., Немченко Т.Н. Баженовская свита и месторождения на больших глубинах - основной источник пополнения углеводородной базы Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. // Недропользование XXI век. - 2017 - № 4. - С. 136-140.

4. Анализ технологий по разработке залежей сланцевых углеводородов баженовской свиты. // Булатовские чтения: Материалы 7 Международной научно-практической конференции, Краснодар, 31 марта, 2023: Сборник статей. Т. 1. Прогноз, поиск и разведка месторождений нефти и газа. Нефтегазопромысловая геология. Разведочная и промысловая геофизика. Разработка нефтяных и газовых месторождений. Бурение нефтяных и газовых скважин. - Краснодар. – 2023. - С. 183-198.

5. Хисамов Р. С. Стратегия разработки месторождений на поздней стадии, перспективы добычи углеводородных ресурсов из нетрадиционных источников углеводородов в Республике Татарстан. // Бурение и нефть. – 2015. - № 1. - С. 40-44.

6. Высоцкий В.И., Меркулов О.И., Сизинцев С.В.Сланцевые углеводороды и тяжелая нефть - основные перспективные направления развития мировой нефтегазодобычи в среднесрочной и долгосрочной перспективе. //Минеральные ресурсы России: экономика. и управление. – 2023. - № 2. - С. 19-28.

7. He Dengfa, Ma Yongsheng, Liu Bo, Cai Xunyu, Zhang Yijie, Zhang Jian Основные достижения и ключевые вопросы разведки на больших глубинах в нефтегазоносных бассейнах Китая. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China.// Dixue qianyuan=Earth Sci. Front. 2019. – 26. - № 1. - С. 1-12.

8. Определение основных направлений развития и импортозамещения услуг по геофизическим исследованиям скважин на шельфе Арктики» // Журнал «Neftegaz.RU» - 2020 - №12.

9. Коровин Г.Б., Аверина Л.М. (Институт экономики Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия), Захарова Л.А. (Министерство промышленности и науки Свердловской области, г. Екатеринбург, Россия). Опережающее импортозамещение для реализации арктических проектов.

10. Володина И.Н., Анисимова С.Е. –доценты РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. Реализация политики импортозамещения и локализации при освоении нефтегазовых месторождений Арктики.

11. Якуцени В.П., Грибков В.В. Изучить и оценить нетрадиционные ресурсы углеводородного сырья, создать методы и технические средства их поисков, разведки, освоения: В 8 книгах. - М.: 1990, 1123 с.

12. Ушакова А.С. Научно-методические основы и условия применения закачки воздуха в пласт для освоения трудноизвлекаемых запасов. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. - Институт проблем нефти и газа РАН, М.: 2024, 50 с.

13. Ибатуллин Р.Р. Новые технологии гидроразрыва горизонтальных скважин, используемые в Северной Америке. Научные исследования: итоги и перспективы. 2021.

## 2.11. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ДВО РАН

1. Рассмотрены условия образования и металлоносность нижне-среднемиоценовых угленосных отложений на юго-западной окраине Зейско-Буреинского бассейна, показано, что их формирование происходило в пределах Приамурской депрессии, ограниченной на западе Большим Хинганом, а на востоке - системой Костюковско-Благовещенского поднятий. Впервые детально исследованы минералогический состав и геохимия углей и продуктов их сгорания. Показана неравномерность накопления REY (РЗЭ + Y), редких элементов, цветных и благородных металлов, что связно с разнообразием состава питающих провинций, ограничивающих депрессию. Выделены два типа обогащения углей Сергеевского месторождения редкоземельными элементами: терригенный - с привносом REY поверхностными водами, и туфогенный, связанный с выщелачиванием щелочных эффузивов. По оценке авторов наиболее перспективный из них - терригенный тип, который может рассматриваться в качестве основного вида сырья при попутном извлечении REY при сжигании угля (рисунок 1).

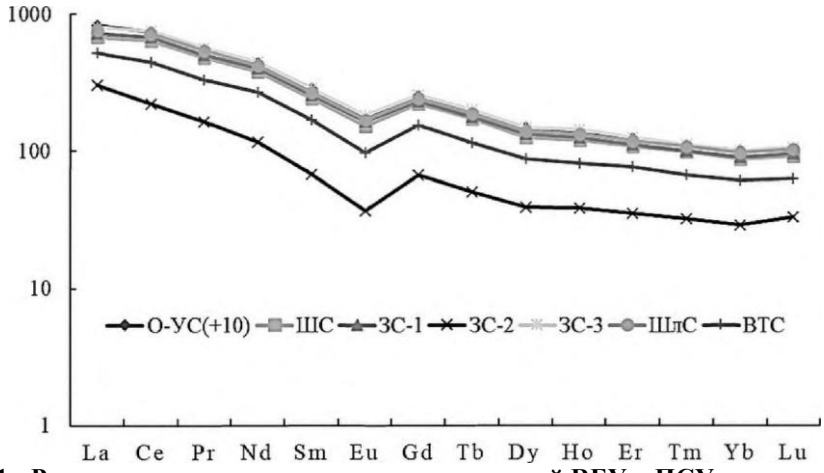



**Рисунок 1 - Распределение нормированных содержаний REY в ПСУ и в озоленом угле: 0-УС(+Ю) - озоленный уголь; ШС - шлак; ЗС-1, ЗС-2, ЗС-3 - зола-уноса; ШлС - шлам; ВТС - осадок**

**Публикация:**

**Сорокин А.П., Дугин С.В.** Редкие элементы в нижне-среднемиценовых бурых углях юго- западной окраины Зейско-Буреинского бассейна (Приамурье, Дальний Восток) // Химия твердого топлива. - 2025. - № 2. - С. 3-20. DOI: 10.31857/S0023117725020019 EDN: KPYMNR

2. Комплексом аналитических методов: ИК-, ICP-MS и дифракционной (XRD) спектрометрии, электронно-микроскопического (СЭМ) и синхронного термического анализа исследованы минералогия и поведение стратегически ценных элементов при их выщелачивании из золы угля Сергеевского месторождения в разных условиях лабораторного эксперимента. Выявлено, что применение последовательной трехступенчатой схемы выщелачивания водой, щелочью и кислотой способствует значительному (до 97%) извлечению большинства элементов из зольного остатка. Показано, что основная часть редкоземельных элементов в золе присутствует в виде оксидов, хорошо растворимых в кислоте; не выщелачиваемые редкоземельные элементы присутствуют в виде фосфатных минералов, близких по составу к монациту и ксенотиму. Установлено, что при одноступенчатой обработке золы концентрированной соляной кислотой (4.8 М) в течение часа при 75°С достигается максимальное (70-100%) извлечение из нее большинства стратегически ценных элементов (рисунок 2).

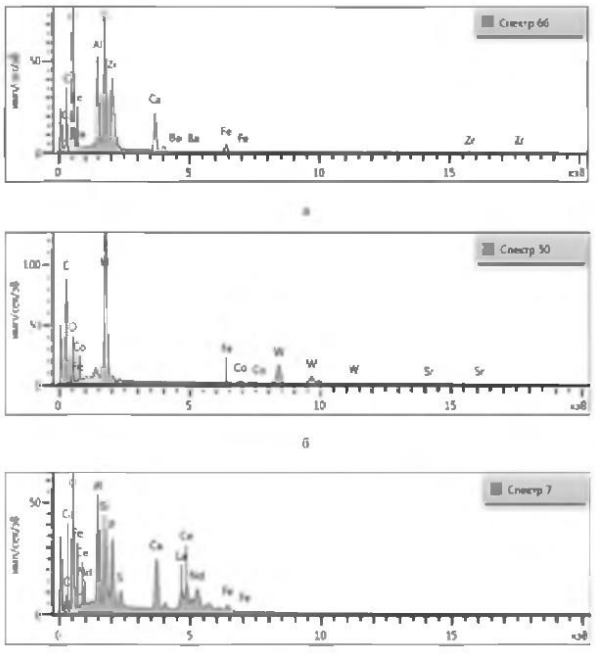



**Рисунок 2 - ЭДС-спектры минеральных зерен в золе угля Сергеевского месторождения (проба У-1): а - силикаты (циркон); б - оксид вольфрама; в - фосфаты РЗЭ**

**Публикация:**

**Радомская В.И., Шумилова Л.П., Сорокин А.П., Соктоев Б.Р., Иванов В.В., Павлова Л.М.** Выщелачиваемость стратегически важных элементов из золы среднемиоценовых углей Сергеевского буроугольного месторождения (Приамурье) // Химия твердого топлива. - 2025. -№ 2. - С.75-90. DOI: 10.31857/S0023117725020085 EDN: KOKSRC

3. Изучена термодинамика и кинетика твердофазных химических реакций фторидно-аммониевой переработки золы углей предприятий теплоэнергетики Амурского региона. Произведен расчет термодинамически вероятных направлений протекания химических реакций в зависимости от температуры по изменению энергии Гиббса, а кинетики - построением парной регрессии с шестью параметрическими функциями (линейной, степенной и экспоненциальной, а также уравнениями Ерофеева-Авраами, трехмерной диффузии и сжимающейся сферы). Были выбраны параметрические функции, имеющие минимальные погрешности аппроксимаций. Для выбранной модели регрессии рассчитывались ранее использовавшиеся статистики и проверялся ряд ранее использовавшихся статистических гипотез Фишера, Снедекора-Фишера и Стьюдента, а также индекс детерминации, индекс корреляции Фишера и проверялась гипотеза Фишера о значимости индекса корреляции. Ввиду большого количества проверяемых статистических параметров, использовалась суммарная статистика в процентах от 0 до 100%. Максимальное значение статистика принимала в случае, если выполняются все проверяемые гипотезы. Созданная авторами ранее расчетная программа на языке Visual Basic дополнена для расчетов с новой параметрической функцией, для новых статистических величин, в том числе, суммарной статистики.

**Публикация:**

**Пушкин А.А., Римкевич В.С., Гиренко И.В.** Физико-химия фторидно-аммониевой переработки золы углей предприятий теплоэнергетики // Современные наукоемкие технологии. - 2025. - № 9. - С. 116-122. DOI 10.17513/snt.40495.

4. Установлено, что в составе миоценового угля Сергеевского месторождения редкоземельные элементы (РЗЭ) распределены между фульво- и гуминовыми кислотами. Преобладающая часть РЗЭ (67-93%) связана с фульвокислотами, а основным концентратором Sm, Lu и Gd являются гуминовые кислоты. Исключение составляет скандий, 29% которого связано с фульвокислотами и по 35% находится в составе гуминовых кислот и силикатных минералов.

**Публикация:**

**Радомская В.И., Носкова Л.П.** Распределение редкоземельных элементов по компонентам бурых углей Сергеевского месторождения (Амурская область) // Техносфера»: материалы II Всероссийской научной конференции с международным участием «Техносфера» (16-17 сентября 2025 г.) / ФГБОУ ВО «КубГТУ». - Краснодар: Издательский Дом - Юг. - 2025. - С. 173- 174.

5. Разработана инновационная технология комплексной переработки золошлаковых отходов. Показана возможность использования оксидов, полученных из топочных шлаков по фторидно-аммониевой технологии, в качестве сырья для производства конкурентной продукции многоцелевого назначения, в том числе для производства порошковых красок и лакокрасочных материалов для создания защитных покрытий строительных конструкций, металлических и керамических изделий.

**Публикация:**

**Агеев О.А., Гиренко И.В., Показаньев А.А.** Перспективы использования продуктов сгорания углей для изготовления промышленных покрытий для керамических изделий // Керамика и композиты: направленный синтез, функциональные свойства, практическое применение. - 2025. - С. 225-231.

6. Ультразвуковая активация синтеза при получении цеолита из метакаолина каолинового концентрата за 15-30 мин. позволяет сократить общее время получения готового продукта на 50 процентов. При этом исключается автоклавный этап синтеза, на который приходится от 8 часов до 2-х суток при традиционной технологии получения цеолита из каолинов.

**Публикация:**

**Еранская Т.Ю.** Ультразвуковой синтез цеолита из каолинового концентрата // Вестник АмГУ, серия: Естественные и экономические науки. 2025. - № 111. - С. 43-45.

## 2.12. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ ИМ. О.Ю. ШМИДТА РАН

### НИР «Создание тектонофизической и геомеханической моделей коры и литосферы Крыма и Северного Причерноморья»

*д.ф.-м.н. Ребецкий Ю.Л., к.г.-м.н. Маринин А.В.*

В рамках развития катакластического метода Ю.Л.Ребецкого по реконструкции тектонических напряжений из сейсмологических данных показано, что состояние кусковато-блочной геологической среды (КБГС) в сейсмическом диапазоне наблюдений можно характеризовать функцией в виде разности удельных мощностей энергии упругой разгрузки и работы сил трения на активных разрывах разного масштаба:

$$F = \dot{u} + \dot{a} \qquad (1)$$

Эта функция в первом приближении соответствует мощности удельной энергии сейсмического излучения ($\dot{e}$) и ее максимум характеризует стационарную стадию деформирования хрупко-упругого тела под действием внешних и внутренних сил (*теорема стационарности катакластического течения*) и прямо приводит к критерию прочности Кулон-Мора для хрупких сред. Согласно (1) стационарность деформирования КБГС характеризуется не стремлением к минимуму мощности приращения энтропии, как это имеет место для неравновесных процессов в идеализированных диссипативных средах (теорема Пригожина) или энергии состояния для консервативных систем, например деформации идеального упругого тела (принцип Гамильтона наименьшего действия), а стремлением к максимуму мощности излучения сейсмической энергии – сейсмической диссипации ($\dot{e} \rightarrow max$). Выявленное свойство стационарности КГС, вытекающее из (1), найдет свое приложение при прогнозе землетрясений, в фундаментальных и прикладных исследованиях в области тектонофизики, геомеханики, сейсмологии, региональной и поисковой (нефтяной и рудной) геофизики.

**Публикация:**

Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Тектонофизическое районирование активных разломов Алтая и Западных Саян, выделение участков подготовки сильных землетрясений. // ГЕОТЕКТОНИКА. – 2025. - № 6. - С. 85—118. DOI: 10.7868/S3034497225060048

**Автор для переписки:** д.ф.-м.н. Ребецкий Ю.Л. reb@ifz.ru

### НИР «Модели строения и эволюции земной коры, литосферного слоя и мантии в различных геодинамических обстановках, включающих взаимодействие эндогенных и экзогенных факторов»

*чл.-корр. РАН Морозов Ю.А.*

На примере карельских шунгитов и выявленных в них сейсмогенных зеркалах скольжения (ЗСК) приведены первые свидетельства природного преобразования исходно аморфного углерода в нанокластеры графита и алмаза, происходившие на уровне средней коры под воздействием высокоскоростной динамической подвижки и связанного с ней фрикционного разогрева углеродсодержащего субстрата. Даны приблизительные оценки PT-параметров этих структурно-вещественных и фазовых преобразований и определено их положение на фазовой диаграмме углерода. Результат иллюстрирует идею об использовании природоподобных технологий для создания важных для индустрии наноалмазных материалов.

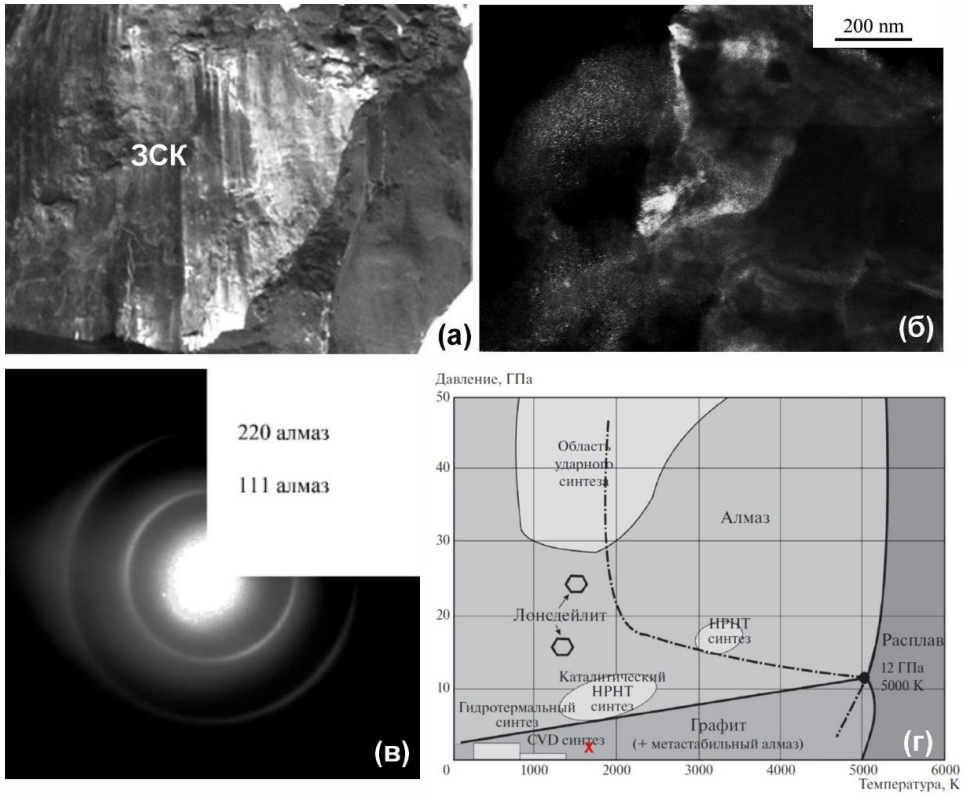



**Рисунок 1 - ЗСК в шунгите (а), его фрагменты в рефлексах алмаза (б), картины микродифракции с параметрами алмаза (в) и фазовая диаграмма углерода в PT-координатах с положением на ней (красный индекс) нанокластеров алмаза из пленки ЗСК (г)**

**Публикация:**

Морозов Ю.А., Аронин А.С., Баркалов О.И. и др. Первые свидетельства формирования наноалмазных кластеров в шунгите в связи с сейсмогенной динамической подвижкой // Доклады академии наук. Науки о Земле. - 2025. - Т. 523. - №1. - С. 5-16. DOI: 10.31857/S2686739725070011

**Автор для переписки:** Морозов Ю.А. frost@ifz.ru

**НИР «Исследование современных геодинамических процессов в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах»**

***Учет весомости среды при оценке геодинамической опасности территорий и объектов***

*д.ф.-м.н., проф. Кузьмин Ю.О.*

Существуют два подхода к оценке геодинамической опасности территорий и объектов. Первый, экспериментальный, основан на идентификации опасности на основе результатов геодезических наблюдений, полученных при геодинамическом мониторинге объектов, расположенных либо в сейсмоактивных регионах, либо в районах интенсивного недропользования. Второй, теоретический, использует геомеханические модели, разработанные для оценки изменений напряженно-деформированного состояния недр в зонах активных разломов и месторождений полезных ископаемых. В обоих подходах для формулировки критериев идентификации опасности используются представления об опасных деформациях, которые регламентируются нормативными документами, определяющими безопасное функционирование объектов.

При модельном подходе оценки уровня геодинамической опасности важно в максимальной мере учитывать особенности строения геологической среды при построении геомеханических моделей. Так, разработанные геомеханические модели пороупругих неоднородностей, использующие механизм параметрического индуцирования процессов,

показали, что учет весомости среды приводит к увеличению амплитуды аномальных оседаний на 10-20% от значений смещений поверхности для невесомой среды. А это меняет оценки уровня геодинамической опасности объектов в сторону ее увеличения.

Результат получен впервые. Он позволяет повысить эффективность оценки уровня геодинамической опасности особо ответственных объектов.

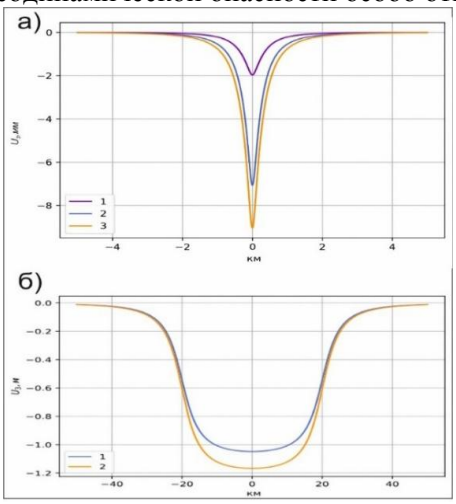



**Рисунок 2 - Распределение вертикальных смещений земной поверхности для разлома (а) и пласта (б). На рисунке (а): 1 – весомая вертикальная призматическая неоднородность, 2 – раздвиговый разлом в невесомой среде, 3 - раздвиговый разлом в весомой среде. На рисунке (б): 1 – разрабатываемый пласт в невесомой среде, 3-разрабатываемый пласт в весомой среде**

**Публикации:**

1. Кузьмин Ю.О. Параметрические эффекты в современной геодинамике. // Физика Земли. - 2025. - № 4. - С. 216–236.

2. Кузьмин Ю.О. Парадоксы аномальных оседаний на длительно разрабатываемых месторождениях нефти и газа. // Геофизические процессы и биосфера. - 2025. - № 2. - Т. 24. - С. 30-41.

3. Кузьмин Ю.О. Геодинамическая опасность и риски недропользования. // Геофизические процессы и биосфера. - 2025. - № 3. - Т. 24. - С. 46-60.

**Автор для переписки:** Кузьмин Ю. О. kuzmin@ifz.ru

## 2.13. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ АКАДЕМИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ГОРНОЙ ГЕОЛОГИИ, ГЕОМЕХАНИКИ, ГЕОФИЗИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА» (ФГБНУ «РАНИМИ») МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Фундаментальные и прикладные исследования проводятся в рамках следующих основных направлений научных исследований ФГБНУ «РАНИМИ»: «Геомеханические исследования напряженно-деформированного и газодинамического состояния массива горных пород для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации месторождений полезных ископаемых»; «Исследования деформаций породного массива и земной поверхности, влияния горных работ на подземные и наземные сооружения и разработка мероприятий их защиты»; «Изучение строения и геодинамики литосферы геолого-геофизическими методами с целью поисков месторождений полезных ископаемых и прогноза горно-геологических условий их эксплуатации и экологических изменений окружающей среды».

В 2025 году Институт проводил исследования по 5-ти фундаментальным темам государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и 10-ти хоздоговорным работам.

**Наиболее значимые результаты по направлению *«Геомеханические исследования напряженно-деформированного и газодинамического состояния массива горных пород для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации месторождений полезных ископаемых»:***

**«Исследование устойчивости и трансформации напряженно-деформированного состояния обводненных массивов горных пород»**

В результате выполнения заключительного этапа:

1. Сформулированы требования к разработке геомеханической модели формирования и трансформации НДС: модель должна учитывать все пространственные параметры очистных выработок; использовать все основные физико-механические характеристики вмещающего массива с учетом их изменения при обводнении; учитывать реологические параметры массива и их активизацию при обводнении; учитывать слоистость массива; учитывать изменение физико-механических параметров пород в различных зонах, в частности разрушение пород в зонах полных сдвижений; в математической постановке на свободной поверхности нормальные и касательные напряжения равны 0; модель должна прогнозировать основные параметры сдвижения земной поверхности при использовании в расчетах реальных физико-механических параметров с минимальным использованием так называемых «калибровочных коэффициентов», величины которых не должны превышать десятков процентов; модель должна учитывать гидростатическое давление при затоплении горных выработок; модель должна быть верифицирована по данным экспериментальных наблюдений, а именно, без каких-либо дополнительных предположений естественным образом прогнозировать наблюдаемые эффекты поведения подработанного массива и наблюдаемый «феномен» поднятия земной поверхности при затоплении горных выработок.

2. Разработана аналитическая модель активизации процесса сдвижения и деформаций многократно подработанного и длительно затопленного массива горных пород и земной поверхности при отработке свиты пластов (рисунок 1), которая позволяет вести расчеты для различных глубин, деформационных характеристик массива, мощностей пласта и размеров целиков в обводненных и затопленных массивах, не прибегая к мощным программным средствам.

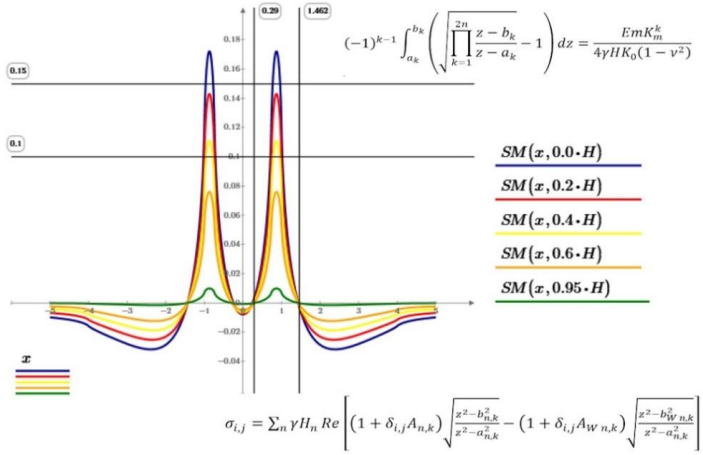



**Рисунок 1 – Смещения земной поверхности при различных уровнях затопления**

Полученное решение задачи о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород увязывает все основные физико-механические и геометрические характеристики массива горных пород и очистных выработок, особенностей деформирования различных зон массива и, как показывают расчеты, приводит существенному пересмотру механизма формирования полей напряжений и деформаций, что является исключительно важным при решении целого класса вопросов и проблем обеспечения экологической безопасности горно-промышленных регионов. В рамках построенной модели находят ясное и четкое объяснение многочисленные «феномены» поведения подработанных массивов:

– поднятия земной поверхности при затоплении угольных шахт (экспериментально зафиксированный факт на 8 наблюдательных станциях имеющий системный характер);

– случаи «дальнодействия» очистных работ (анализ результатов обследования более 200 глубоких стволов показал, что в 75% случаев причиной их нарушений явилось ведение очистных работ, оконтуривающих околоствольные предохранительные целики).

Во всех вариантах затопления массива расчеты показывают устойчивые результаты поднятия земной поверхности в интервалах от 70 до 200 мм при различных геометрических и горнотехнических параметрах очистной выработки без каких-либо дополнительных предположений об изменении физико-механических свойств массива горных пород, что на взгляд автора, является ключевым в оценке достоверности предлагаемых построений;

Применение «классической» теории сдвижения показывает явно некорректные результаты при активизации процесса сдвижения от обводнения и затопления массива горных пород, поскольку основано в основном на геометрических зависимостях и не учитывает изменение физико-механических свойств массива и возникновение гидростатического давления. Построенная аналитическая модель, практически впервые, увязывает напряженное и деформированное состояние слоистого массива горных пород без каких-либо дополнительных предположений о существенном снижении деформационных характеристик вмещающего массива, что на наш взгляд является основным критерием правдоподобности проведенных рассуждений.

Теоретически и экспериментально установлено, что напряженно-деформированное состояние массива определяется суперпозицией шести компонент. А именно: непосредственно горно-геологическими условиями и тектоническими напряжениями на данной глубине, региональными напряжениями, возникающими от ведения очистных работ, локальными концентрациями напряжений, которые обусловлены слоистостью массива, возникающими на контактах слоев с различными механическими и реологическими характеристиками и локальной нарушенностью вмещающего массива, гидростатическим давлением обводненного затопленного массива. Разработанная модель впервые позволяет дать не только общую оценку, но и прогнозировать точные места появления нарушений и характера проявления горного давления, что особенно важно при разработке конструктивных мер защиты и параметров крепления, как на стадии проектирования новых, так и на стадии перекрепления действующих горных выработок.

3. Для верификации, калибровки и подтверждения корректности работы предложенной модели были проведены экспериментальные и модельные исследований по изучению деформирования обводненных массивов горных пород и земной поверхности на наблюдательных станциях шахты «Красный Профинтерн» и в вертикальных стволах шахт «Суходольская-Восточная» и «Советская».

1) Шахта «Красный Профинтерн» отрабатывала 19 угольных пластов мощностью от 0,5 до 1,7 м, средний угол падения пластов составляет 65°.

Инструментальные измерения на наблюдательной станции проводились в периоды, соответствующие глубине затопления 402,7 м и 177,4 м. Для указанных глубин были построены графики суммарных вертикальных смещений по пяти влияющим пластам. Результирующий график соответствует разности между конечным и начальным уровнем затопления (рисунок 2).

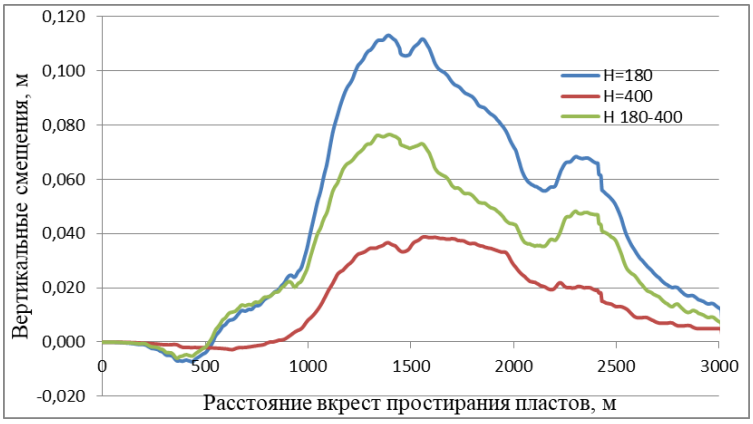



**Рисунок 2 – Графики суммарных вертикальных смещений**

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная модель деформирования долговременно обводненного и многократно подработанного массива горных пород показывает адекватные результаты. Абсолютные значения вертикальных смещений поверхности

находятся в приемлемых диапазонах, которые можно использовать для прогнозирования процесса сдвижения при строительстве и реконструкции объектов, расположенных в зонах активизации деформаций при затоплении выработанного пространства в условиях крутого падения пластов.

2) Шахта «Суходольская Восточная». Экспериментальные и модельные исследования заключались в обследовании состояния крепи главного и вспомогательного вертикальных стволов шахты и в построении моделей геомеханической устойчивости крепи стволов и околоствольного массива.

По результатам визуального обследования главного и вспомогательного стволов шахты «Суходольская-Восточная» обнаружены множественные трещины, заколы и вывалы крепи в интервале глубин 850-950 м, с наиболее нарушенным участком сопряжения с горизонтом 915 м, фактическая бальная оценка степени нарушенности крепи стволов составляет 2,5 балла, что по классификации РАНИМИ соответствует стадии опасных деформаций.

Моделирование геомеханической ситуации в стволовом комплексе проводилось на основе аналитической модели активизации процесса сдвижения и деформаций многократно подработанного и длительно затопленного массива горных пород и земной поверхности при отработке свиты пластов.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования в виде графиков распределение радиальных нагрузок на крепь главного и вспомогательного стволов на момент обследования.

Таким образом, можно сделать вывод, что проведенные расчеты по прогнозу состояния крепи стволов, реализованные на основе разработанных аналитических моделей: формирования и трансформации напряженного состояния обводненного массива горных пород при отработке свиты пластов и активизации процесса сдвижения и деформации земной поверхности с учетом напряженного состояния массива горных пород, имеют хорошую сходимость с фактическими данными состояния крепи стволов, по материалам обследования.

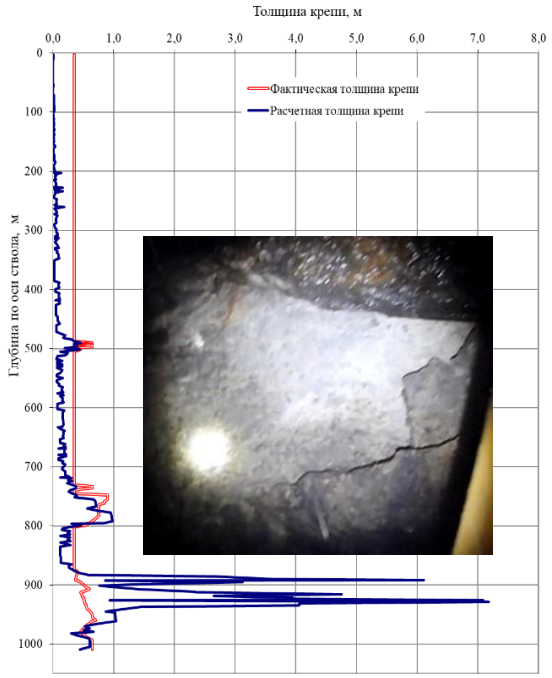



**Рисунок 3 – Графики расчетной и допустимой радиальных нагрузок на крепь главного ствола шахты «Суходольская-Восточная»**

4. Проведены экспериментальные исследования механических свойств углей в зависимости от глубины их залегания. Были исследованы механические свойства угольных образцов в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия, моделирующих глубины залегания пластов от 1600 м до 2400 м (рисунок 4).

Получены зависимости механических свойств углей от глубины их залегания:

1) с ростом глубины залегания угольных пластов повышаются жесткость и предельная прочность углей, уменьшается коэффициент концентрации напряжений в окрестности горной выработки, разрушение становится более вязким;

2) при возрастании глубины залегания угля до 2000 м происходит его разрушение до определенных микроблоков, характеризуемых более совершенной (гомогенной) структурой, для разрушения которых необходимы более высокие уровни напряжений (тензора), что объясняет экстремумы в зависимостях упругих свойств от глубины залегания углей.

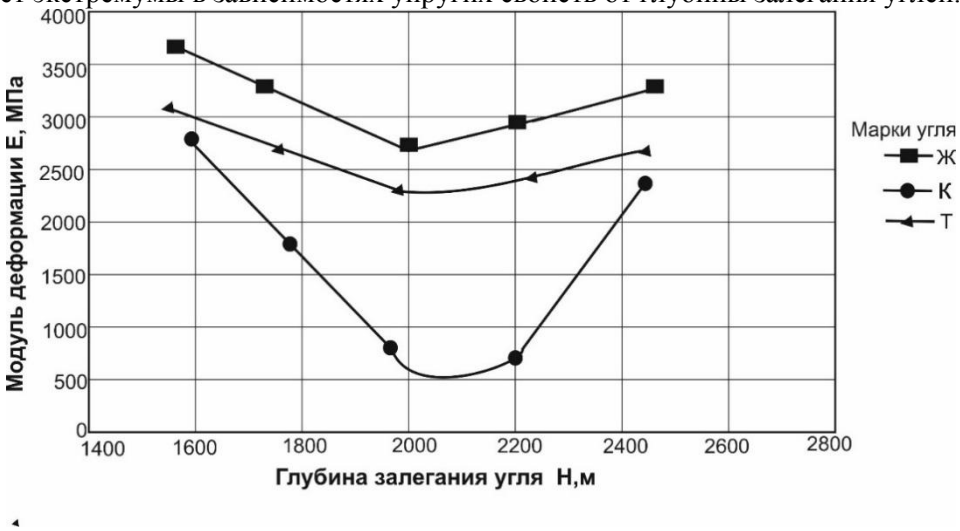



**Рисунок 4 – Зависимость модуля деформации E, МПа от глубины залегания угля *H*, м**

5. Разработаны, обобщены и классифицированы способы и средства повышения устойчивости породных массивов в условиях обводнения.

1) разработаны региональные способы и средства, связанные с расположением и поддержанием выработок в зонах влияния очистных работ (под- и надработка, участки опорного давления), которые являются законченными предложениями в нормативные и нормативно-методические документы (рисунок 5);

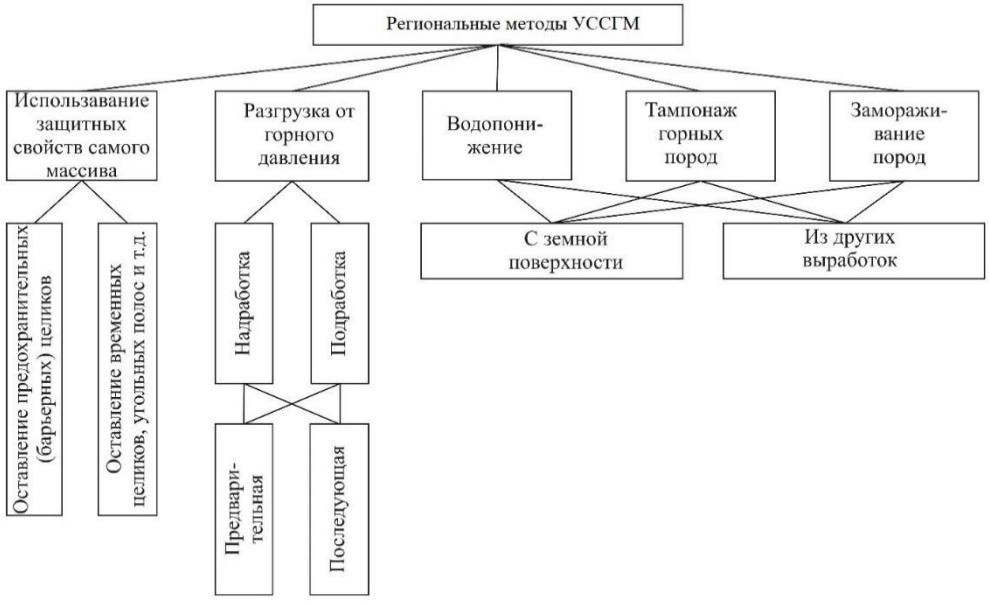



**Рисунок 5 – Классификация региональных методов управления состояния и свойствами горного массива (УССГМ)**

2) локальные способы и средства отличаются многочисленностью и разнообразием, что связано с высокой их востребовательностью в производственной практике. Дана классификация локальных методов, выполнен их анализ. Доказано, что многие локальные методы УССГМ, применяемые для предотвращения газодинамических явлений применимы (и многие часто применяются) при поддержании и охране горных выработок;

3) при локальном закреплении горного массива механизм предотвращения критических смещений разрушенных пород в полость выработки заключается в том, что на фоне прогрессирующей дезинтеграции породы закрепленные породные блоки, обладая

повышенной прочностью, дольше сохраняют свою целостность среди разрушенной массы, и в зависимости от своих размеров и увеличения горизонтальной компоненты напряжений в ранее разгруженной области содействуют уменьшению подвижности и самозаклиниванию разрушенных породных блоков.

6. Разработаны способы гидроизоляции и сохранения сопряжений капитальных горных выработок при обводнении:

- при подготовке сопряжений капитальных горных выработок к их длительному затоплению защитную оболочку вокруг бетонной крепи следует осуществлять путем нагнетания в закрепное пространство скрепляющего карбамидно-ангидридного состава;

- при контакте бетонных образцов с шахтной водой в течение 45 сут. химические процессы, обусловленные вещественным составом воды, не успевают вызвать коррозию бетона, и все изменения его деформационно-нагрузочных характеристик связаны с известным эффектом адсорбционного понижения прочности твердых тел;

- на основании исследований фазового состояния скрепляющих составов, разработан способ повышения устойчивости кровли горных выработок при обводнении.

**«Изучение геомеханических и геофильтрационных процессов в подработанных обводненных горных массивах»**

Выполнена оценка особенностей формирования критических областей подработанных обводненных горных массивов.

Разработана модель фильтрации с источниками наследственного типа, описывающая нелинейных характер массопереноса в гетерогенных средах (рисунки 6, 7) и позволяющая прогнозировать образование зон напорной дезинтеграции горных пород пласта. Установлено, что при определенном сочетании прочностных характеристик горных пород пласта, их исходного напряженного состояния и достижении амплитудой пьезометрической волны критических значений возникает опасность развития процессов напорной дезинтеграции горных пород пласта, что приводит к резкому снижению просветности крупных транспортных каналов пласта и к снижению его исходной проницаемости. Установлено, что вероятность возникновения этих процессов возрастает в зонах с повышенной проницаемости напорных пластов.

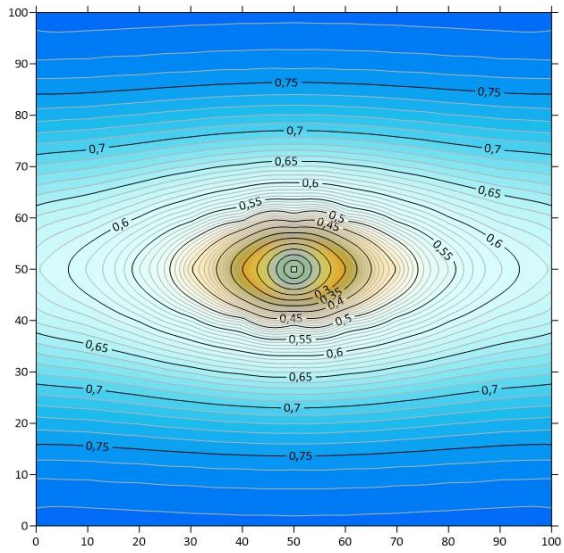



**Рисунок 6 - Распределение давления флюида в крупных трещинах в некоторый начальный момент времени t***

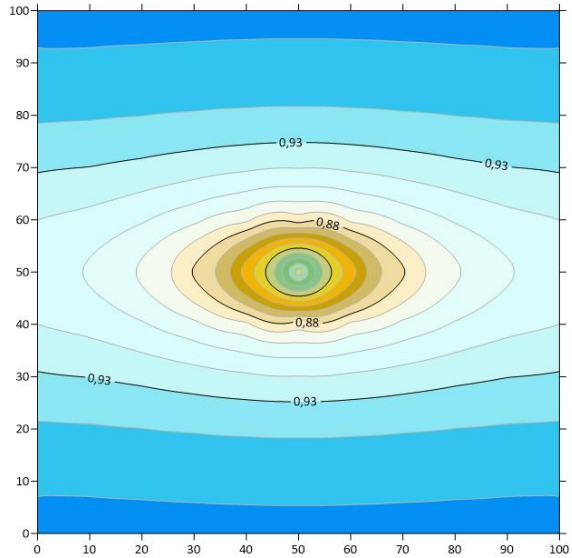



**Рисунок 7 - Распределение давления флюида в пористых блоках в некоторый начальный момент времени t***

Разработана геомеханическая модель влияния малоцикловой усталости вследствие поверхностного обводнения на рост трещин и развитие процесса провалообразования над горными выработками неглубокого заложения в зоне выветрелых пород. Впервые установлены временные параметры проявления критических деформаций (провалов) земной поверхности (рисунок 8).

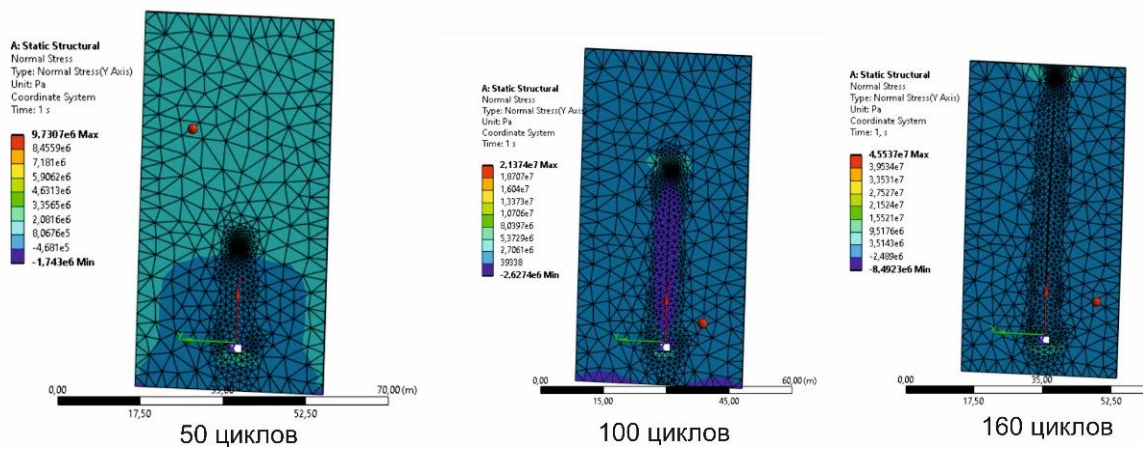



**Рисунок 8 - Поэтапное развитие трещины в кровле горной выработки при воздействии цикловых нагрузок**

Разработана структура нейронной сети для прогноза вероятности возникновения провалов земной поверхности с применением методов анализа выживаемости. Обоснован выбор метода PMF, который позволяет гибко моделировать кривые выживания различной формы и динамики и строить прогнозно-вероятностные модели развития процессов провалообразования с применением методов машинного обучения (рисунки 9, 10).

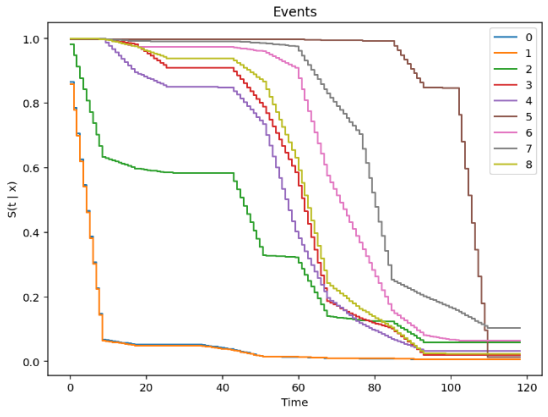



**Рисунок 9 – Графики выживаемости**

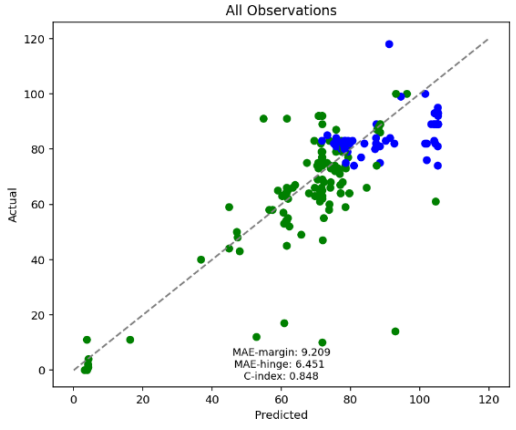



**Рисунок 10 – Диаграмма рассеяния**

**Наиболее значимые результаты по направлению *«Исследования деформаций породного массива и земной поверхности, влияния горных работ на подземные и наземные сооружения и разработка мероприятий их защиты»*:**

**«Разработка геомеханических основ защиты объектов поверхности в условиях сложной структуры рельефа подрабатываемых территорий и исследование формирования зон интенсивных деформаций горного массива»**

1. Разработана математическая модель деформирования земной поверхности на подрабатываемых склонах мезорельефа, а также при активизации процесса сдвижения земной поверхности при затоплении горных выработок закрывающихся угольных шахт. Результаты моделирования имеют высокую практическую ценность и могут быть положены в основу **стандартизации методик инженерного обследования** зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния подземных горных работ.

2. Установлены закономерности совместного влияния подработки и мезорельефа на различные типы застройки, характерные для Донбасса: мезорельеф земной поверхности является фактором, модифицирующим характер и интенсивность деформаций зданий при подработке; в условиях пологого залегания пластов мезорельеф приводит к структурному разделению зданий на блоки, смещению мульды сдвижения и точек максимальных оседаний в сторону склона, а также к увеличению зоны влияния горных работ на 10-20%; в условиях крутого залегания пластов влияние мезорельефа проявляется в сочетании с действием

сосредоточенных деформаций (уступов), что приводит к наклонам зданий в сторону склона и дополнительному раскрытию деформационных швов и трещин. Полученные закономерности могут использоваться как при расчете деформаций земной поверхности при добыче угля подземным способом, так и при ликвидации предприятий методом мокрой консервации.

3. Разработана модель расчёта остаточного деформационного ресурса зданий и сооружений, расположенных на подрабатываемых склонах мезорельефа, подразумевающая под собой учет конструктивно-технического, деформационного и горнотехнического критериев. Проведенное исследование сформировало методологическую базу для перехода от констатации факта деформаций к прогнозной количественной оценке остаточного ресурса устойчивости зданий и городской инфраструктуры.

4. Разработана методика выбора оптимальных мер защиты объектов, расположенных на подрабатываемых склонах мезорельефа, которая может эффективно использоваться для защиты зданий, сооружений и инженерных коммуникаций, расположенных в зонах влияния подземной горной добычи угля и других полезных ископаемых.

5. Разработана база данных типовых повреждений зданий на подрабатываемых территориях с мезорельефом и подрабатываемых территориях. Разработанная структура базы данных (рисунок 11) предназначена для комплексного решения прикладных и научных задач в области инженерной защиты территорий, подверженных влиянию подземных горных работ.

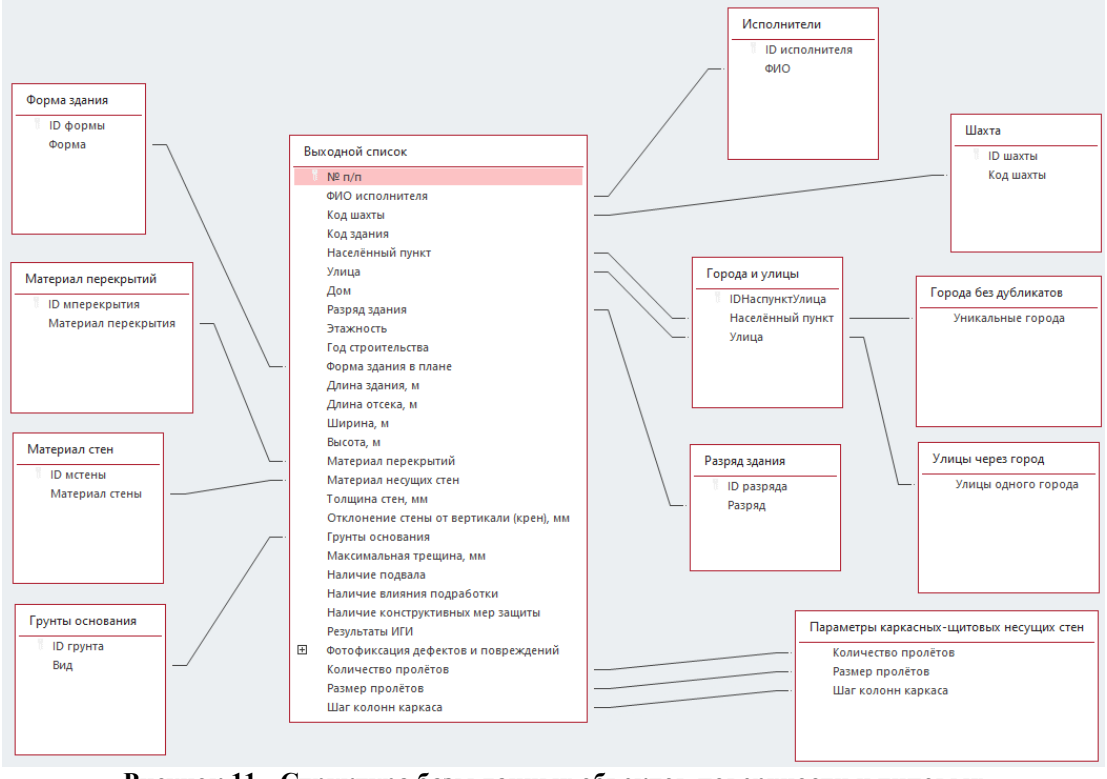



**Рисунок 11 - Структура базы данных объектов поверхности и типовых повреждений зданий на территориях с мезорельефом и подрабатываемых территориях**

6. Установлены основные закономерности формирования зон интенсивных деформаций горного массива в действующих шахтах: формирование над выработанным пространством структурно детерминированной трехзональной области сдвижения; влияние типа группировки слоев на характер деформаций горного массива, особенно при наличии в разрезе мощных и прочных пластов (песчаников) (рисунок 12); присутствие в кровле угольного пласта мощных и прочных пластов (ключевых слоев), способных работать как консольные или балочные конструкции, является доминирующим фактором, ограничивающим вертикальную протяженность зоны полных сдвижений. Установленные закономерности позволяют обеспечить безопасность ведения горных работ и сократить работы по поддержанию горных выработок.

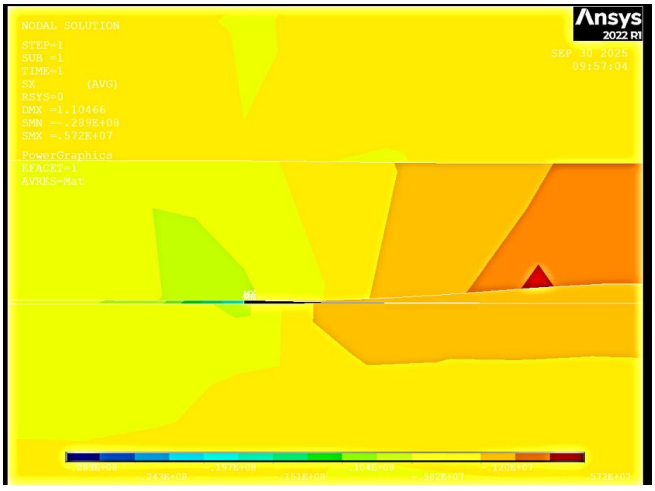



**Рисунок 12 – Распределение напряжений в окрестности лавы в горизонтальной плоскости (непосредственная кровля – глинистый сланец средней мощности, основная кровля – мощный песчаник)**

7. Представлены предложения по планированию последовательности отработки выемочных столбов лав и технологических процессов выемки угля с учетом сохранности объектов поверхности (горные меры защиты). Описанные предложения направлены на уменьшение, компенсацию или перераспределение деформаций в основании объектов, изменение знака деформаций, изменение направления деформаций по площади, ускорение или замедление развития деформаций.

**Наиболее значимые результаты по направлению *«Изучение строения и геодинамики литосферы геолого-геофизическими методами с целью поисков месторождений полезных ископаемых и прогноза горно-геологических условий их эксплуатации и экологических изменений окружающей среды»*:**

**«Разработка геолого-геофизической модели формирования аномальных скоплений метана на угольных шахтах в зонах динамического влияния разломов»**

Результаты работы:

1. При апробации и доработке программных модулей по результатам апробации:

- подтверждена работоспособность программных модулей обработки данных долгосрочных микросейсмических наблюдений и анализа изменений во времени параметров регистрируемых сигналов;

- установлено, что программные средства обеспечивают корректную загрузку, обработку, статистический анализ и визуализацию микросейсмических данных, а также определение закономерностей при анализе спектральных, амплитудных и временных характеристик сигналов, позволяя выявлять краткосрочные и долгосрочные изменения, в том числе с разделением происхождения (природного или техногенного) источника колебаний;

- по итогам апробации выполнена доработка модулей, направленная на повышение устойчивости, оптимизацию использования вычислительных ресурсов и расширение возможностей анализа данных микросейсмического мониторинга.

- установлено, что в условиях промышленных территорий метод оценки распределения плотности пород по глубине требует дополнительной методической адаптации.

2. При обосновании информативных характеристик зон геодинамического влияния разломов, влияющих на формирование аномальных скоплений метана, разработана концептуальная модель аномального скопления АСМ, на основе которой к информативным характеристикам отнесены глубинный разлом (источник метана), подводящий разлом (миграция газа), зоны открытой трещиноватости (скопление газа) и земная поверхность (дегазация метана в атмосферу).

3. При исследовании особенностей латерального изменения геофизических параметров на различных стратиграфических уровнях в зоне динамического влияния разлома установлены закономерности формирования геофизических полей, обусловленных аномальными скоплениями метана в зоне динамического влияния разлома и критерии их выявления по геолого-геофизическим данным.

По электрометрическим данным в разрезе выделены два этажа: верхний приповерхностный с горизонтальными аномалиями удельного электрического сопротивления и второй с субвертикальными аномалиями. В нижнем этаже выявлено закономерное изменение удельного электрического сопротивления, обусловленное образованием высокоомных газонасыщенных блоков с отрытой трещиноватостью и низкоомных водонасыщенных блоков. Определены размеры данных блоков, исчисляемые первыми сотнями метров, и удельное электрическое сопротивление высокоомных аномалий (200–300 Ом·м) в 10–30 раза большее низкоомных образования.

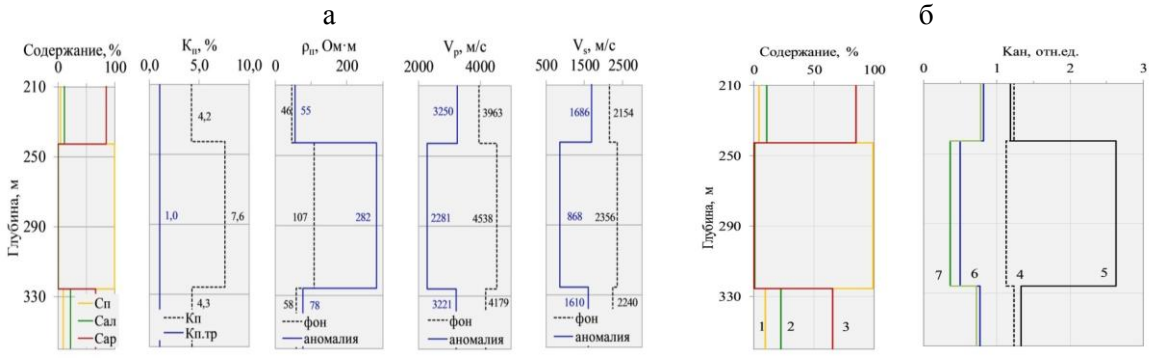
Критерии выделения АСМ установлены по увеличению удельного электрического сопротивления не менее 2,6 раза и уменьшению скорости распространения упругих продольных и поперечных волн соответственно не более 0,5 и 0,4 раза относительно значений этих же пачек в водонасыщенном и не трещиноватом состоянии

4. При разработке геолого-геофизической модели формирования аномальных скоплений метана в зоне динамического влияния разломов и обосновании критериев их выявления получены следующие результаты (рисунок 13):

- построена модель, которая отражает картину количественного изменения пористости, электрических и скоростных параметров по разрезу, состоящему из аномальных скоплений метана и водонасыщенных нетрещиноватых пачек песчаникового, алевролитового и аргиллитового типов на стадии метаморфизма газовых углей (3Г).

- критерии выделения аномальных скоплений метана установлены по увеличению удельного электрического сопротивления не менее 2,6 раза и уменьшению скорости распространения упругих продольных и поперечных волн соответственно не более 0,5 и 0,4 раза относительно значений этих же пачек в водонасыщенном и нетрещиноватом состоянии.

5. При построении прогнозной карты опасных скоплений метана в приразломной зоне на одном из шахтных полей Донбасса выделена область мозаичного распространения аномальных скоплений метана в восточной и юго-восточной частях участка геофизических исследований на поле шахты «Калиновская Восточная». Установлено, что данная область сохраняет свое положение на различных стратиграфических уровнях.




Сп – содержание в литолого-стратиграфической пачке; Сал – то же алевролитов; З – то же аргиллитов; $К_п$ – коэффициент общей пористости; $К_{п.тр}$ – коэффициент трещинной пористости; $\rho_п$ – удельное электрическое сопротивление; $V_p$ – скорость распространений упругих продольных волн; $V_s$ – то же поперечных волн; $К_{ан}$ – коэффициент аномальности геофизического параметра относительно его фоновой величины; шифр кривых: 1 – Сп; 2 – Сал; 3 – Сал; 4 – $К_{ан}$ параметра $К_п$; 5 $К_{ан}$ параметра $\rho_п$; 6 – $К_{ан}$ параметра $V_p$; 7 – $К_{ан}$ параметра $V_s$

**Рисунок 13 - Геолого-геофизическая модель аномального скопления метана (А) и критерии его выявления по коэффициентам аномальности геофизических параметров (Б)**

## «Исследование деформированного состояния и геофизических свойств подработанного углепородного массива»

Разработан и реализован инновационный подход к оценке оседаний земной поверхности и состояния горного массива, основанный на комплексировании конечно-элементного моделирования и комплекса геофизических методов. На территориях подвергшихся первичной подработке впервые определена пространственная зона максимальных изменений скоростей упругих волн (4–10%), которая концентрируется в интервале до 100 м над выработанным пространством, что имеет ключевое значение для оценки устойчивости горного массива при многократной подработке. Это позволит уточнить параметры мониторинга

при комплексной оценке характера сдвижения горного массива и земной поверхности при подземной разработке полезных ископаемых для обеспечения безопасности и минимизации экологического и социального ущерба.

Приведенные результаты являются основой для формирования математических моделей многократно подработанного массива, которые позволят уточнить параметры сдвижения ранее разуплотненной горными работами углепородной толщи (рисунок 14).

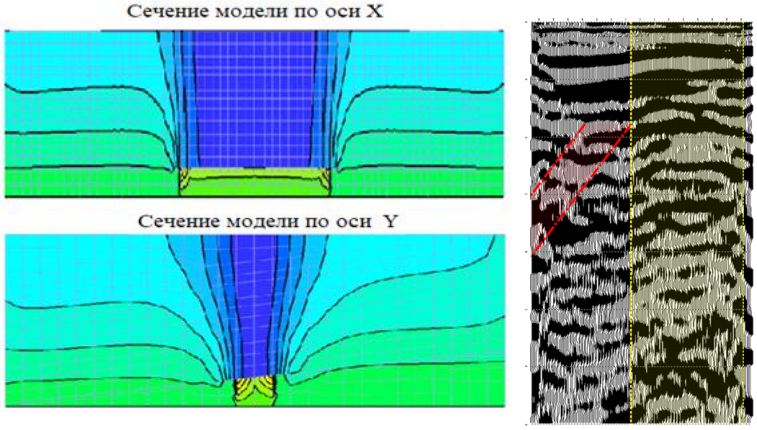



**Рисунок 14 - Модель оседаний горного массива и земной поверхности при добыче угля и сейсмический временной разрез в зоне влияния разрывного нарушения и горной выработки**

## 2.14. ЯКУТСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ «ЯКУТНИПРОАЛМАЗ»

### 1. Структура и научный потенциал

Численность научно-исследовательской части института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО) (далее – Институт) в 2025 г. составила 116 человек, включая 1 доктора технических наук и 19 кандидатов наук, в том числе: к.т.н. – 14, к.ф.-м.н. – 1, к.г.-м.н. – 3, к.э.н. – 1.

В состав научно-исследовательской части Института входят:

1. Комплексные отделы:

- обогащения (включает:
    - лабораторию рудоподготовки и основных методов обогащения;
    - лабораторию флотационных методов обогащения и осветления оборотных вод;
    - лабораторию радиометрической сепарации;
    - сектор исследования качества алмазной продукции и методов контроля);

горно-геологических проблем разработки месторождений (включает:

- лабораторию газодинамических явлений;
- сектора:
    - гидрогеологического и гидродинамического моделирования;
    - изучения и прогноза нефтегазопроявлений на горных предприятиях;
    - гидрогеологических исследований;
    - гидротехнический);

2. Технико-экономический блок (включает лаборатории:

- прогнозирования;
- экономико-управленческих исследований;
- технико-экономических обоснований кондиций и инвестиций);

3. Отдельные специализированные лаборатории:

- подземных горных работ (включает сектора:
    - технологий подземных горных работ;
    - технологий закладки);
- автоматизации технологических процессов;
- геомеханики;

- оптимизации открытых горных разработок;
- интеллектуальной собственности;
- анализа состояния окружающей среды (включает сектора:
    - гидрохимических исследований;
    - исследования воздушной среды;
    - сопровождения системы менеджмента качества);

4. Отдельные специализированные секторы:
- разрушения горных пород;
- механизации горных работ.

## 2. Направления исследований

Являясь центром инженерно-технических, научных компетенций в сфере разработки месторождений алмазов открытым и подземным способами, обогащения алмазоносных руд, Институт:

- принимает участие в решении ключевых проблем, возникающих перед АЛРОСА;
- разрабатывает и внедряет в деятельность структурных подразделений АЛРОСА уникальные технологии, позволяющие повысить эффективность производства;
- реализует стратегию развития научно-исследовательской части на ближайшую и среднесрочную перспективу, целью которой является научное и инженерное обеспечение стабильной деятельности и устойчивого развития АЛРОСА.

Глобальной проблемой, стоящей перед АЛРОСА, является неизбежное исчерпание разведанных месторождений природных алмазов.

Проблема падения алмазодобычи не имеет односложного и простого решения, связана с необходимостью решения комплекса разноплановых задач. В условиях отсутствия новых крупных алмазных месторождений единственным решением является поддержание алмазодобычи после 2030 г. с использованием запасов глубоких горизонтов уже отрабатываемых месторождений, а также за счёт вовлечения беднотоварных месторождений.

В связи с ухудшением горно-геологических условий месторождений с глубиной их отработки с целью обеспечения безопасности горных работ Институт выполняет:

- разработку и внедрение систем контроля и прогнозирования геотехнических состояний горного массива в горных выработках рудников на основе предиктивных моделей;
- обоснование возможности использования глубокозалегающих коллекторов водоносных комплексов для закачки дренажных вод, отводимых при отработке месторождений подземным способом;
- геофизический контроль за процессом опережающего водопонижения при отработке месторождений.

Одной из важнейших задач, стоящих перед Институтом, является поиск и внедрение технологий добычи, дезинтеграции и обогащения руды, обеспечивающих минимизацию техногенной повреждаемости алмазов.

В отчетном периоде выполнены (завершены):
- 9 научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;
- 30 технологических работ;
- оказана 121 инженерно-техническая услуга.

Выполненные работы имеют большое значение для обеспечения безопасности, устойчивости и эффективности горнодобывающего производства, в том числе наиболее важные разработки и научные исследования в следующих областях.

## 3. Результаты интеллектуальной деятельности

В 2025 г. на правообладателя АК «АЛРОСА» (ПАО) получено 25 охранных документов, в том числе:

- 1 патент РФ на изобретение;
- 1 патент на изобретение зарубежный (ОАЭ);
- 1 патент РФ на полезную модель;
- 15 свидетельств на программы ЭВМ;
- 7 свидетельств на базы данных.

В Роспатент направлено для последующей экспертизы и получения охранных документов и свидетельств 27 заявок на РИД:

- 5 заявок на патент на изобретение;
- 15 заявок на программы для ЭВМ;
- 7 заявок на базы данных.

Внедрено в производство 7 научно-технических мероприятий.

## 4. Наиболее значимые работы 2025 года

Наиболее значимыми работами в области горных наук, выполненными сотрудниками Института в 2025 году, являются следующие.

### *Обоснование теплового режима при отработке запасов месторождения Мир подземным способом, включая разработку обоснования безопасности опасного производственного объекта с прохождением экспертизы промышленной безопасности*

Исполнители: к.т.н. М.В. Тишков, Д.П. Семенов

***Цель работы*** – обоснование минимально допустимых параметров температурных режимов в подземных горных выработках при ограниченных тепловых мощностях, обеспечивающих безопасность производства работ.

В ходе работы проведены научные исследования, позволившие определить микроклиматические параметры рудничной атмосферы в нормальном и реверсивном режимах проветривания в летний и зимний периоды года, при этом установлено следующее.

Тепловая мощность систем воздухоподготовки в условиях абсолютно минимальной температуры -55°С снаружи при нормальном режиме должна составлять 27,5 МВт, при этом температура подаваемого воздуха составит +0,1°С. Для недопущения снижения температуры подаваемого воздуха ниже +2°С необходимо снизить объём подаваемого воздуха в рудник на 15м$^3$/с. При этом расход составит около 359 м$^3$/с. Следует учитывать, что абсолютно минимальной температуры в течение всего года может не быть, но в случае её наступления для снижения расхода воздуха можно будет остановить некоторую часть подготовительных или нарезных работ, при этом сохранить суточную и соответственно годовую производительность по руднику без остановки работ в очистных забоях. Таким образом можно констатировать, что проектируемой тепловой мощности ГКУ (26,6 МВт) достаточно.

Тепловая мощность систем воздухоподготовки в условиях холодной пятидневки с температурой -48°С снаружи при нормальном режиме должна составлять 24,2 МВт, при этом температура подаваемого воздуха составит +2°С. При этом никаких компенсирующих мероприятий не требуется.

При реверсивном режиме проветривания с учётом существующей ВКУ с тепловой мощностью 19,0 МВт в условиях абсолютно минимальной температуры -55°С снаружи объём подаваемого воздуха необходимо снижать до 60%.

При реверсивном режиме проветривания в условиях холодной пятидневки с температурой -48°С снаружи объём подаваемого воздуха необходимо снижать до 67%.

При реверсировании 100% объёма воздуха отрицательная температура воздуха снаружи не должна быть ниже -32,8°С.

Полученные результаты работы подтвердили достаточность проектируемой Главной калориферной установки с тепловой мощностью 26,6 МВт и имеющейся (законсервированной) Вспомогательной калориферной установки с тепловой мощностью 19 МВт. В случае наступления максимально низких температур (-55°С снаружи) объём подаваемого воздуха в рудник необходимо снизить на 15м$^3$/с, что не повлечёт за собой снижения производительности. Для дальнейшего проектирования принята температура подаваемого в рудник воздуха не ниже +2°С.

Разработано «Обоснование безопасности опасного производственного объекта «Рудник «Мир-Глубокий» АК «АЛРОСА» (ПАО)». Вновь устанавливаемые требования промышленной безопасности в части температуры подаваемого воздуха в горные выработки. 3811.1/5836-412-02 2025-01 ОБ», согласно которому допускается подача воздуха в рудник

с температурами воздуха ниже 2°С в течение ограниченного времени. Данное обоснование прошло экспертизу промышленной безопасности, получило положительное заключение и зарегистрировано в реестре заключений Ростехнадзора (регистрационный номер экспертизы промышленной безопасности: № 68-ОБ-35201-2025).

Разработанное обоснование безопасности позволило определить минимально допустимые параметры температурных режимов в подземных горных выработках и обеспечить безопасность производства работ.

Результаты работы использованы при разработке проектной документации «Рудник «Мир-Глубокий». Вскрытие и отработка запасов в отм. -575 м/-1300 м».

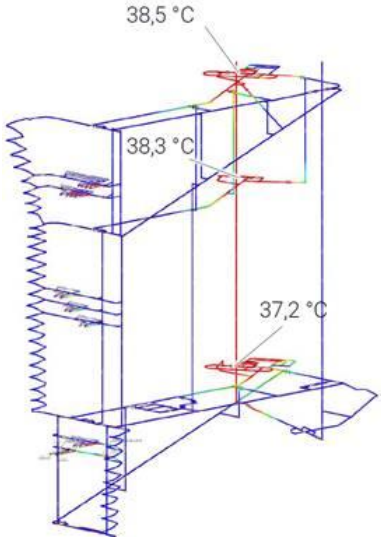



**Рисунок 1 – Теплораспределение в теплый период года, абс. макс. темп. (37,0°С)**

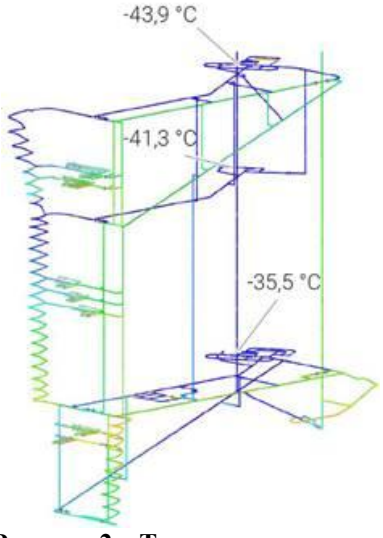



**Рисунок 2 – Теплораспределение в теплый период года, без подогрева воздуха при абс. мин. (-55,0°С)**

### *Проведение испытаний торкрет-бетонной смеси на машине для торкретирования на руднике «Айхал»*

Исполнители: Шарин Д.И., Семёнов И.П. Плотников В.В.

***Цель работы*** – оценка эффективности применения закладочной смеси в качестве изолирующей крепи для торкретирования горных выработок рудника «Айхал» и технологии нанесения смеси на свод и стенки выработки и удобства ведения работ.

В процессе выполнения работы решены следующие задачи:

1. Оценено качество нанесения смеси: толщина крепления; возможность нанесения слоя за один проход (стена / кровля); величина потерь (отскок) смеси.

2. Оценена технологичность оборудования, используемого для нанесения смеси.

3. Определена эффективность испытываемых смесей по фактору коррозийной стойкости по солевой деградации бетона.

4. Выполнен отбор образцов для определения физико-механических характеристик смеси.

Для проведения исследований разработана программа испытаний в установленном порядке, осуществлено сопровождение процесса приготовления торкрет-бетонной смеси из закладочной смеси и её нанесения на борта и кровлю подземных горных выработок.

Испытания по торкретированию выработок закладочной смесью проводились в условиях подземного рудника «Айхал» по утвержденной программе проведения испытаний торкрет-бетонных смесей с использованием оборудования фирмы Titan (миксер и машина для торкретирования) для «жидкого» способа торкретирования.

Для уменьшения отскока (потерь) смеси и повышения производительности торкретирования за счет увеличения первоначальной прочности при креплении подземных горных выработок использовался жидкий ускоритель схватывания «Реламикс Торкрет».

Поскольку торкрет-установка фирмы Titan не оснащена насосом для перекачки ускорителя схватывания в бак для присадок, заполнение бака производилось самотеком после

поднятия куба с химией ковшом погрузочно-доставочной машины на высоту, позволяющую произвести перекачку. Предварительно перед перекачкой химия активно перемешивалась.

Готовая смесь с поверхностного закладочного комплекса подавалась по бетонопроводу к месту приема смеси на горизонт -10 м, затем миксером в объеме 4,5 м3 доставлялась к торкрет-установке на место производства работ.




**Рисунок 3 – Подача готовой закладочной смеси по бетонопроводу**

Основные выводы по результатам испытаний:

- закладочная смесь марки М30 и марки М40 при использовании её в качестве набрызг-бетона имеет повышенный отскок и неудовлетворительный контакт с поверхностью в процессе торкретирования, что обусловлено повышенным водоцементным соотношением (порядка 2,3) в то время, как оптимальное водоцементное соотношение для торкрет-бетонной смеси должно быть в пределах 0,4-0,45;

- закладочные смеси с добавлением дополнительного заполнителя (ТСУ) и дополнительного вяжущего (цемент), дополнительного вяжущего (цемент) и малоклинкерного вяжущего вещества, представляли собой цельную однородную массу с разной текучестью на выходе из миксера, что свидетельствует о неравномерном перемешивании материала внутри миксера, без признаков водоотделения во время нанесения. Смеси укладывались равномерно, толщина наносимого слоя 3 см. Отмечены незначительные сползания, текучесть и срывы торкретбетона с бортов, кровли выработки (визуально отскок порядка 25%);



**Рисунок 4 – Нанесение набрызг-бетона с неудовлетворительным результатом**



**Рисунок 5 – Нанесение набрызг-бетона с удовлетворительным результатом**

- смеси, в которые добавлялись дополнительные компоненты в шахте, показали удовлетворительный контакт с поверхностью в течение времени торкретирования;

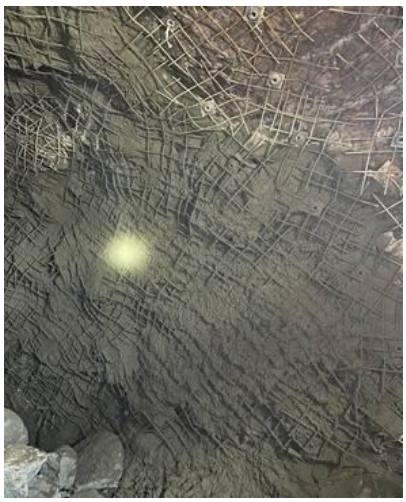



**Рисунок 6 – Нанесение набрызг-бетона после доработки состава смеси с удовлетворительным результатом**

- средняя прочность образцов торкрет-смеси, полученной из закладочной смеси марки М30, составила 3,8 Мпа;

- средняя прочность образцов торкрет-смеси 21.12.2024, полученной из закладочной смеси марки М30 с добавлением цемента в шахте, составила более 10,17 Мпа;

- средняя прочность образцов торкрет-смеси, полученной из закладочной смеси марки М40 с добавлением в шахте ТСУ и цемента, составила более 9,87 Мпа;

- максимально зафиксированная прочность образца торкрет-бетонной смеси 22.12.2024 была показана на смеси, полученной из закладочной смеси марки М30 с добавлением цемента в шахте, и составила 16,9 Мпа.

Зафиксированные прочностные характеристики и результаты по адгезии образцов смесей к бортам выработок свидетельствуют о том, что закладочная смесь может применяться в качестве изолирующей торкрет-бетонной крепи (при соответствующей доработке состава).

В результате исследования даны рекомендации, направленные на повышение производительности и снижения технологических потерь в процессе нанесения торкретбетона из закладочных смесей.

### *Моделирование геомеханической устойчивости горного массива предохранительного целика и расчет параметров крепления горно-подготовительных и очистных выработок при отработке подкарьерных запасов в отм. +85 м/+35,5 м рудника «Интернациональный» по результатам лабораторных исследований керна, выбуренного из вмещающего массива и рудного целика*

Исполнители: Решетова В.В., Пушистов В.В. Шерстюк Н.М., к.т.н. Золотин В.Г., к.г.-м.н. Янников А.М.

***Целью работы*** являлось моделирование геомеханической устойчивости горного массива предохранительного целика и расчет параметров крепления горно-подготовительных и очистных выработок при отработке подкарьерных запасов в отм. +85 м/+35,5 м рудника «Интернациональный» по результатам лабораторных исследований керна, выбуренного из вмещающего массива и рудного целика. Для решения задач проанализированы и учтены все имеющиеся и предоставленные заказчиком материалы, в том числе и результаты ранее проводившихся исследований.

В процессе выполнения работы решены следующие задачи.

1. Определены физико-механические свойства пород, руды и ж/б плиты, сформированной на дне карьера в плановых направлениях ведения горных работ в рамках предоставленных проб керна.

2. Выполнена оценка фактического состояния рудного целика в отм. +85,0 м/+35,0 м на основании бурения исследовательских скважин.

3. Выполнена оценка фактического состояния массива и контуров берм отработанного карьера «Интернациональный» с учетом их сработки.

4. Определены виды и параметры крепления горно-подготовительных и очистных выработок при отработке подкарьерных запасов в отм. +85 м/+35,5 м рудника «Интернациональный» в пределах опасной зоны от водного объекта с учетом вариативности начала ведения горных работ с очистных слоев №1-5 эксплуатационного блока №2.

5. Выданы оптимальные параметры крепления.

6. Выполнено моделирование геомеханической устойчивости горного массива предохранительного целика при ведении горнопроходческих и очистных работ с учетом вариативности начала ведения горных работ с очистных слоев № 1-5 и проведённых исследований.

Данные, полученные в результате лабораторных испытаний керна, позволяют сделать вывод о низких прочностных свойствах и высокой влажности как породного, так и кимберлитового массива.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что наиболее технологически безопасным вариантом является способ применения камерно-столбовой системы при отработке кимберлитового массива «от центра – к флангам». На основании полученных результатов работы принято решение начать отработку подкарьерных запасов ЭБ №2 с 4 слоя.

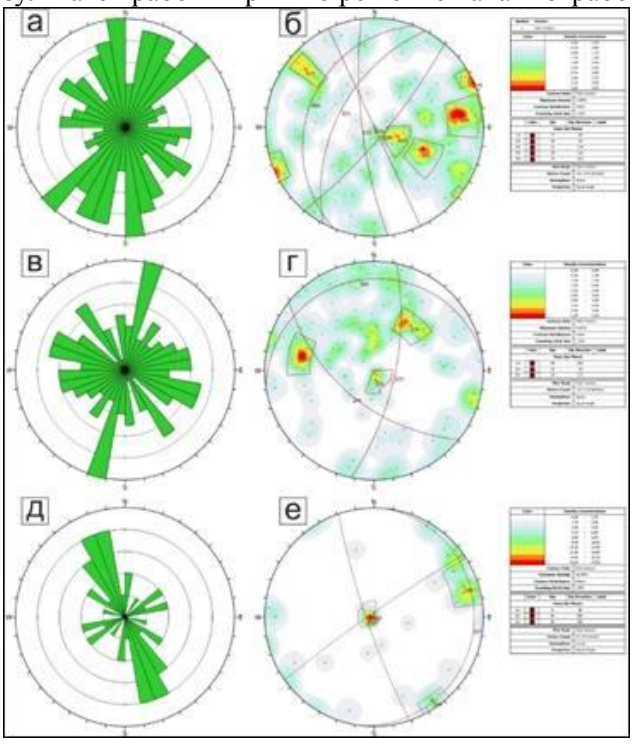



**Рисунок 7 – Розы-диаграммы и круговые диаграммы трещиноватости по кимберлиту (а, б), вмещающим отложениям (в, г, д, е)**

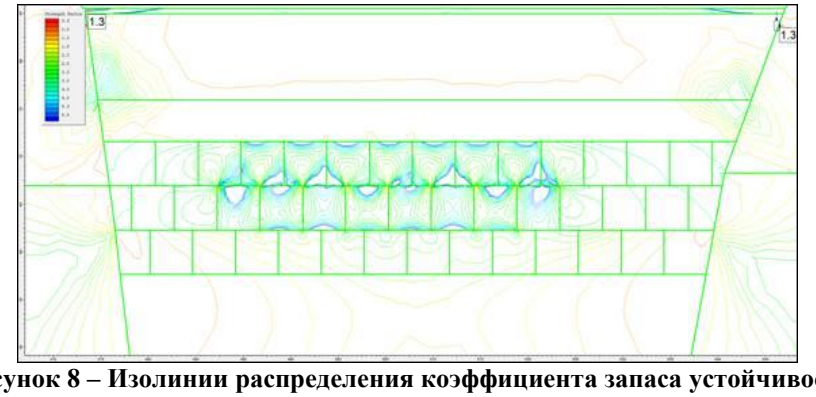



**Рисунок 8 – Изолинии распределения коэффициента запаса устойчивости при полной закладке слоя 5 ЭБ № 2**

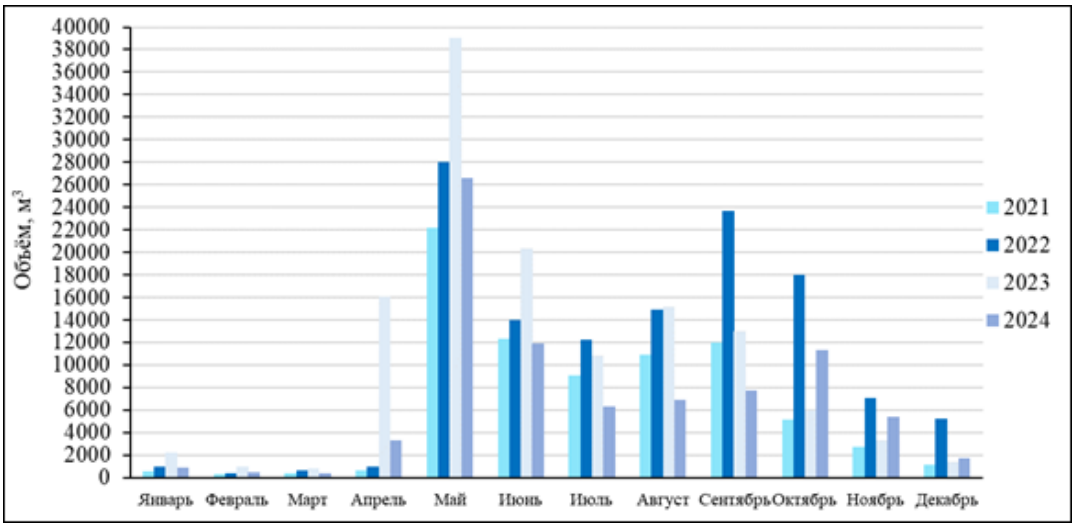



**Рисунок 9 – Динамика притока карьерных вод 2021-2024 гг.**

***Проведение адаптации методов текущего прогноза выбросоопасности пород по параметрам искусственного акустического сигнала и сорбционным показателям пород в условиях рудника «Интернациональный»***

Исполнители: Корепанов А.Ю., к.н. Золотин В.Г., к.т.н. Никифоров А.В., Карпенко А.И.

***Цель работы*** – адаптация методов текущего прогноза выбросоопасности пород по параметрам искусственного акустического сигнала и сорбционным показателям пород в части установления пороговых значений прогностических параметров для выявления выбросоопасных зон в условиях рудника «Интернациональный».

В процессе выполнения работы решены следующие задачи:

1. Составлена программа проведения опытно-промышленных испытаний по адаптации методов текущего прогноза выбросоопасности пород по параметрам искусственного акустического сигнала и сорбционным показателям пород в условиях рудника «Интернациональный».

2. Проведены горно-экспериментальные работы по адаптации методов текущего прогноза выбросоопасности пород по параметрам искусственного акустического сигнала и сорбционным показателям пород при проведении подготовительных выработок буровзрывным способом по выбросоопасным породам в условиях рудника «Интернациональный».

3. Установлены пороговые значения прогностических параметров (коэффициента выбросоопасности) для текущего прогноза выбросоопасности пород по параметрам искусственного акустического сигнала и сорбционным показателям пород с применением аппаратуры АПСС1, программного комплекса «Прогноз» и шахтного десорбометра ДШ1.

4. Определена скорость прохождения продольных и поперечных волн для корректировки программы обработки акустического сигнала.

Процесс проведения подготовительных выработок по газоносным доломитовым породам в условиях рудника «Интернациональный» осложняется проявлением внезапных выбросов породы и газа, последствия которых обуславливают необходимость применения дополнительных мер борьбы с этим явлением, основанных на своевременном прогнозировании и выполнении мер предотвращения выбросоопасности.

Существующий метод текущего прогноза предполагает производить в ручном режиме поинтервальные замеры начальной скорости газовыделения из контрольных шпуров, которые бурятся с определенной периодичностью из груди забоя выработки, для чего требуется остановка забоя, привлечение буровой техники, задействование рабочего персонала, что влияет на ухудшение показателей операционного цикла и темпов проходки, не устраняет существенную зависимость результатов прогноза от субъективного фактора.

В качестве альтернативы существующего метода предлагается переход на двухфакторный метод прогноза выбросоопасности, основанный на непрерывной регистрации параметров искусственного акустического сигнала с выдачей результатов прогноза в режиме «онлайн» и контрольном определении сорбционных показателей потенциально опасных пород непосредственно в шахте на рабочем месте.

Двухфакторный метод прогноза выбросоопасности решает задачу повышения оперативности и достоверности прогнозирования, обеспечивает больший уровень безопасности при проведении выработок по доломитовым породам, что имеет стратегическое значение для рудника «Интернациональный».

Способ прогноза базируется на следующих теоретических основах:

- увеличение прочностных и деформационных характеристик породы повышает вероятность к хрупкому разрушению пород под воздействием энергии взрывных работ и активации послойного лавинообразного разрушения призабойной части массива приводящего к реализации выброса породы и газа;

- увеличение напряженного состояния призабойной части массива приводит к уплотнению трещин, уменьшению порового пространства пород, т.е. к формированию более целостной микроструктуры пород.

Эти два условия приводят к увеличению энергетической доли высокочастотной составляющей спектра акустического сигнала, получаемого при бурении шпуров, и могут быть спрогнозированы с помощью определения коэффициента выбросоопасности.

Способ текущего прогноза выбросоопасности по параметрам искусственного акустического сигнала позволяет в непрерывном режиме контролировать напряженно-деформированное состояние призабойной части массива. Газовый фактор выбросоопасности наиболее информативно позволяет контролировать способ прогноза выбросоопасности по сорбционным показателям породы.

В ходе выполнения работы каждая выработка оборудована аппаратурой АПСС1, на расстоянии от забоя выработки 7-30 м установлены сейсмоприемники, которые подключены к линии связи, и акустический сигнал подавался на поверхность в службу ППГДЯ в персональный компьютер, где архивировался и обрабатывался в программе «Акустика».

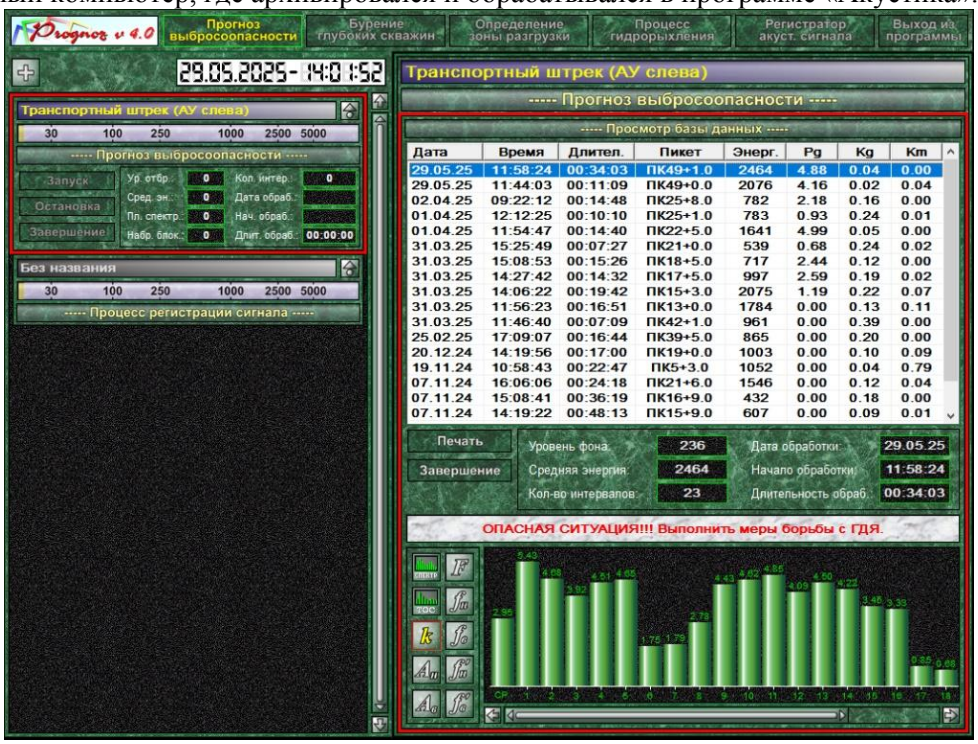
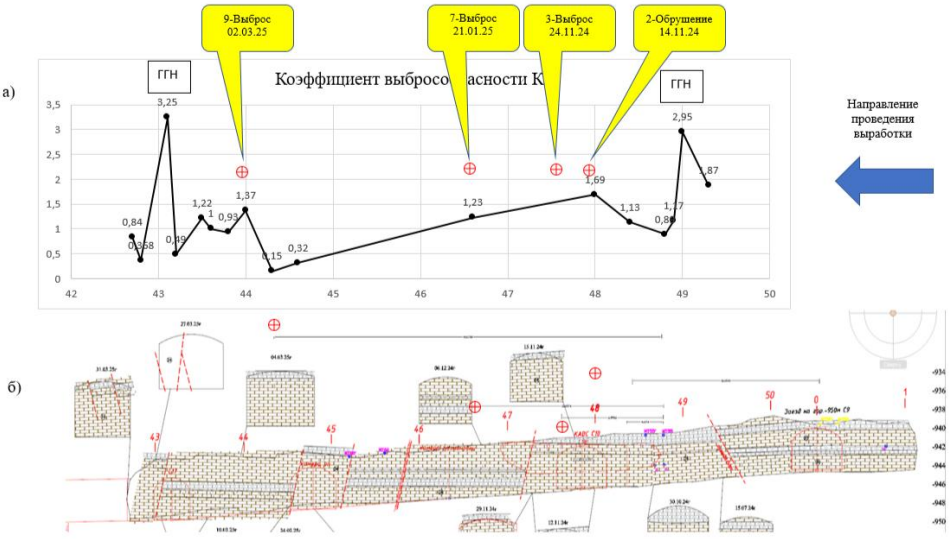



**Рисунок 10 – Зарегистрированные циклы обработки акустического сигнала, возникающего при бурении шпуров для взрывной отбойки при проведении подготовительных выработок в ЭБ №11**




**Рисунок 11 – Схема реализации способа прогноза выбросоопасности по параметрам искусственного акустического сигнала**




Распределение коэффициента выбросоопасности Кв (а) с фактическими горно-геологическими условиями проведения транспортного штрека (юг) (б) ЭБ№11, ⊕ - место выброса породы и газа

**Рисунок 12 – Результаты обработки акустического сигнала при проведении транспортного штрека (юг) ЭБ №11 гор. – 950 м**

Сорбционные показатели пород определялись в результате отбора штыба при бурении шпуров из призабойной части подготовительной выработки

Для реализации работ по адаптации способов прогноза выбросоопасности на руднике установлена аппаратура АПСС1, которая осуществляла запись акустического сигнала, возникающего при бурении шпуров для выполнения взрывных работ по проведению

подготовительных выработок по выбросоопасным породам. Обработка записей выполнялась в программном обеспечении «Прогноз».

На основании результатов проведения адаптации способов прогноза выбросоопасности были установлены критические значения прогностических параметров, на основании которых можно осуществлять прогнозирование выбросоопасных зон.

Для дальнейшего развития научных основ прогнозирования выбросоопасности пород и расширения функциональных возможностей испытанных способов прогноза предложено выполнение ряда НИОКР.

### *Прогнозный план работы системы обратной закачки на весь период эксплуатации месторождения трубки Мир с выдачей рекомендаций*

Исполнители: Корепанов А.Ю., к.г.-м.н. Янников А.М., Стручкова А.С., Янникова С.А.

***Цель работы*** – разработка прогнозного плана работы системы обратной закачки (СОЗ) на весь период эксплуатации месторождения трубки Мир с выдачей рекомендаций.

Проведение данной работы обусловлено необходимостью определения режима эксплуатации системы обратной закачки (СОЗ) дренажных вод рудников «Мир», «Интернациональный», а также дебалансных вод хвостохранилища ОФ №3, так как существующая конфигурация требует уточнения в части объёмов закачки с учётом дебалансных вод самого накопителя, а также планируемым возобновлением горных работ и сопряженного осушения на руднике «Мир-Глубокий».

В процессе выполнения работы решены следующие задачи:

1. Проведены сбор, обобщение и анализ режимных данных материалов эксплуатации СОЗ с 2019 по 2025 гг.

2. Выполнен анализ режимных наблюдений за гидродинамической ситуацией в метегеро-ичерском водоносном комплексе (МИВК).

3. Выполнен прогнозный водный баланс накопителя минерализованных вод.

4. Выполнено моделирование эксплуатации системы обратной закачки с учетом перекачки дебалансных вод хвостохранилища ОФ №3.

5. Учтена откачка воды из хвостохранилища ОФ№3 с учетом увеличения перекачиваемой воды после перехода в круглогодичный режим работы ОФ№3.

6. Определён объем рассолов МИВК, необходимый для поддержания минерализации в накопителе минерализованных вод (32 г/л).

При моделировании учитывались воды карьера трубки Мир, хвостохранилища 3 очереди ОФ №3, накопителя минерализованных вод на участке «Тымтайдаах», а также участки закачки СОЗ, УОЗ, УЗВ, «Юлегир» и «Тектонический».

Определение оптимального режима закачки выполнено при помощи построенной гидродинамической модели мирнинского кимберлитового поля, учитывающей взаимовлияние рудника «Интернациональный», карьера «Мир», существующих участков закачки в зонах динамического влияния Западного (УОЗ, УЗВ) и Восточного («Тымтайдаах», «Южный») региональных разломов, а также перспективных площадей в зонах динамического влияния Центрального («Юлегир») и Аппаинского («Тектонический») разломов. После анализа результатов динамики изменения пьезометрической поверхности МИВК в региональном плане выбран оптимальный вариант в качестве рекомендованного.

Таблица 1

Оптимальные расходы закачки по результатам моделирования

| Рекомендованные расходы закачки на участках закачек, $м^3/ч$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| УОЗ | УЗВ | «Тымтайдаах» | «Южный» | «Тектонический» | «Юлегир» |
| 30 | 1000 | 1280 | 200 | 270 | 0 |

Рекомендованное распределение закачки позволяет не только эксплуатировать участки без превышения напорного фронта над местными базисами эрозии, но и формирует минимальный возврат (40–50%) закачиваемых вод к дренажным системам рудников «Интернациональный» и «Мир-Глубокий». С учётом требуемого времени на ввод в опытную эксплуатацию участка «Тектонический» начало проектных и строительных работ предлагается за 4 года перед планируемой датой восстановления системы откачки/закачки карьера «Мир».

Рассмотрены три базовых варианта осушения карьера трубки Мир в период:

1) 2027–2034 гг. – позволит осушить карьер от накопленных рассолов к моменту начала добычных работ на руднике «Мир-Глубокий»;

2) 2036–2045 гг. – позволит осушить карьер от накопленных рассолов к моменту начала отработки запасов в абс. отм. -575/-775 м на руднике «Мир-Глубокий»;

3) 2039–2050 гг. – позволит осушить карьер от накопленных рассолов к моменту полной отработки запасов в отм. -575/-1300 м на руднике «Мир-Глубокий» и перейти к отработке запасов выше абс. отм. -575 м.

Главным условием осушения карьера «Мир» с учётом прогнозируемых объёмов перекачки дебалансных и оборотных вод в указанные временные периоды (2039–2047 гг. или 2039–2048 гг.) является использование участков УОЗ и УЗВ, что, в свою очередь, потребует соответствующего строительства трубопровода между карьером «Мир» и карьером «Новинка» (который будет использоваться в качестве локального накопителя) и насосных дополнительного подъёма (из-за геоморфологических особенностей территории). Осушение карьера «Мир» без использования данных мероприятий не позволит своевременно приступить к отработке запасов выше отм. -575 м.

Результаты работы будут использоваться для планирования и безопасной эксплуатации системы обратной закачки.

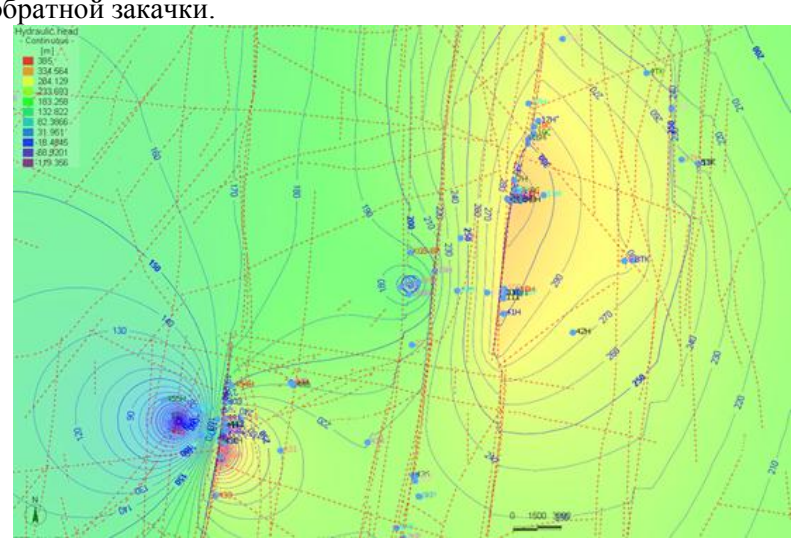


**Рисунок 13 - Пьезометрическая поверхность МИВК к концу первого года после возобновления закачки дренажных вод карьера «Мир», суммарный расход закачки 2780 м$^3$/час (используются участки УОЗ, УЗВ, «Тымтайдаах», «Южный» и «Тектонический»)**

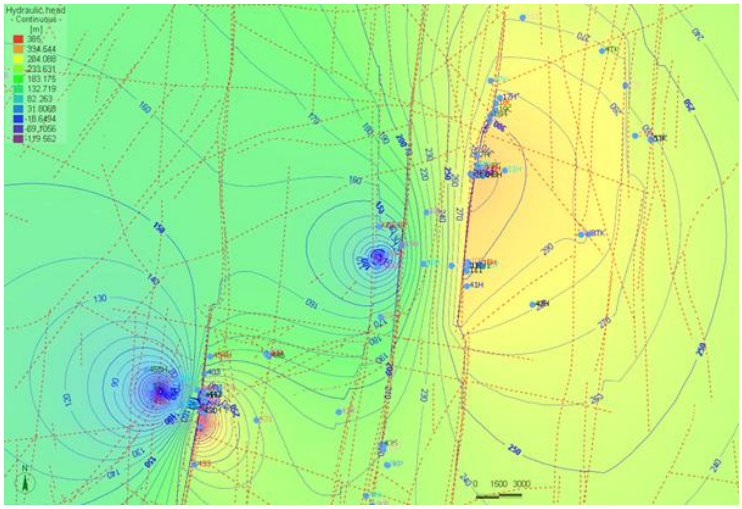


**Рисунок 14 - Пьезометрическая поверхность МИВК к концу тринадцатого года после возобновления закачки дренажных вод карьера «Мир», суммарный расход закачки 2780 м$^3$/час (используются участки УОЗ, УЗВ, «Тымтайдаах», «Южный» и «Тектонический»)**

***Оценка технологической эффективности работы классификатора гидравлического двухпродуктового КГД-2М***

Исполнители: Лаборатория флотационных методов обогащения и осветления оборотных вод: Бабушкина А.Л., Артамонов А.В., Чуть-Ды В.А., Селляхова Т.А., Гоголев С.Е.

***Цель работы*** – оценить технологическую эффективность классификатора гидравлического двухпродуктового КГД-2М (далее – КГД-2М).

Задачи – провести сравнительное опробование, оценить работу КГД-2М и выдать рекомендации, направленные на повышение эффективности работы данного оборудования.

Промышленными испытаниями установлено, что основной причиной ухудшения работы переделов обогащения алмазосодержащего сырья и в целом технологии извлечения являются факторы, связанные с высоким содержанием тонкодисперсных частиц породы. В настоящее время наблюдается повышенное содержание шламов, отрицательно влияющих на все технологические процессы ОФ №12.

Для эффективного вывода тонких шламов и пустой породы из схемы обогащения принято решение дополнительно использовать в системе обесшламливания КГД-2М.

Промышленные испытания КГД-2М проводились в 3 этапа при различных вариантах работы технологической схемы фабрики:

- по базовой технологической схеме подрешетный материал 1 стадии грохочения крупностью - 6 мм поступает на обесшламливание на воронки 2 стадии и далее по схеме;
- по новой технологической схеме подрешетный материал 1 стадии грохочения крупностью -6 мм поступает на обесшламливание в КГД-2М (минимальный перелив) и далее по схеме;
- по новой технологической схеме подрешетный материал 1 стадии грохочения крупностью -6 мм поступает на обесшламливание в КГД-2М (максимальный перелив) и далее по схеме.



**Рисунок 15 – КГД-2М в схеме обесшламливания ОФ №12**





**Рисунок 16 – Работа КГД-2М с минимальными переливами**



**Рисунок 17 – Работа КГД-2М с максимальными переливами**

Полученные результаты испытаний свидетельствуют об эффективности работы КГД-2М в схеме обесшламливания на максимальных переливах – выход класса -0,5 мм с максимальными переливами 169,6 т/ч против 136,5 т/ч. Эффективность классификации по зерну 0,5 мм при максимальных переливах выше и составляет 30,8 % против 22,9 % при работе на минимальных переливах.

КГД-2М является аппаратом предварительной подготовки и его правильная работа критически важна для всей последующей схемы обогащения. Его основная роль в контексте борьбы со шламами следующая.

1. Защита основного обогатительного оборудования: удаляя шламы, КГД-2М предотвращает их негативное воздействие на отсадочные машины, тяжелосредные сепараторы и на рентгенолюминесцентные сепараторы (РЛС), где шламы создают «слепой» слой и приводят к прямым потерям алмазов.

2. Снижение вязкости пульпы: удаление тонких фракций, особенно глинистых, значительно снижает вязкость пульпы, что улучшает эффективность гравитационных методов.

3. Снижение расхода реагентов: при обогащении методом флотации, предварительное удаление шламов резко сокращает непродуктивный расход реагентов.

4. Повышение качества концентрата: чистые от шламов продукты обогащения лучше разделяются, что приводит к получению более чистого концентрата.

Основными преимуществами КГД-2М являются:

- простота конструкции и надежность;
- отсутствие движущихся частей в контактной зоне (кроме клапана);
- эффективность для разделения крупных и тонких частиц;
- невысокие эксплуатационные затраты.

При этом необходимо отметить и недостатки, в том числе:

- чувствительность к колебаниям в подаче пульпы (расход, плотность);
- необходимость тщательного контроля и регулировки (скорость потока, плотность).

КГД-2М – это высокоэффективный, надежный и экономичный аппарат, который выполняет критически важную функцию подготовки сырья. Его правильная работа является фундаментом для всей последующей дорогостоящей и тонкой операции по извлечению алмазов.

Результаты опробований показали более высокую эффективность обесшламливания при работе КГД-2М с максимальными переливами.

Использование данного аппарата при работе с максимальными переливами позволяет снизить влияние шламов на процессы обогащения в целом, что приведет к стабилизации технологической схемы путём вывода непродуктивного класса из процесса. Корректная настройка КГД-2М с максимальными переливами приведёт к повышению эффективности

обесшламливания и окажет положительный эффект на извлечение алмазов по всем переделам обогащения.

Результаты испытаний позволяют сделать вывод об эффективности КГД-2М в качестве обесшламливающего оборудования.

Результаты работы будут использованы для повышения эффективности работы обогатительной фабрике №12.

**6. Публикационная активность сотрудников института**

В 2025 г. сотрудники Института приняли участие в 21 научно-практической конференции, опубликовали 34 статьи и доклада, 2 монографии.

## 2.15. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

В 2025 году по проблемам горных наук при непосредственном участии работников *Учебно-научного центра МГРИ и ИПКОН РАН «Моделирование месторождений твердых полезных ископаемых и горнотехнических систем»* и кафедры горного дела МГРИ получены следующие важнейшие результаты.

### Разработка цифрового учебно-методического комплекса подготовки и аттестации системных горных инженеров

***Авторы: Панов Ю.П., Стадник Д.А.***

Разработан комплекс компонентов цифрового учебно-методического обеспечения подготовки и аттестации системных горных инженеров в соответствии с современными тенденциями преподавания специальных дисциплин согласно требованиям Индустрии 4.0.

*Новизна:* проведен анализ современных тенденций и практического опыта подготовки специалистов с компетенциями мирового уровня, сформирована структура цифрового учебно-методического комплекса, применение которого позволяет вести подготовку и аттестацию горных инженеров на основе проектирования и эксплуатации учебного цифрового двойника горнодобывающего предприятия в междисциплинарном подходе.

*Значимость:* научно обоснованы и экспериментально апробированы прототипы учебных и аттестационных цифровых сервисов, сформирована система дополнительных компетенций современного горного инженера.

*Прогноз применения:* планируется использовать разработанный цифровой учебно-методический комплекс подготовки и аттестации системных горных инженеров как самостоятельно, так и при реализации основных и дополнительных образовательных программ.




**Рисунок 1 - Структура цифрового учебно-методического комплекса подготовки и аттестации системных горных инженеров**

**Список литературы:**

1. Панов Ю.П. Программа развития МГРИ на 2023—2027 гг. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2022;64(2):8—17. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-8-17.

2. Панов Ю.П., Грабский А.А., Рожков А.А. Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий в угольной промышленности России. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023;65(5):8—21. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-5-8-21.

3. Стадник Д.А., Стадник Н.М., Лопушняк Е.В. К вопросу разработки методических основ информационного моделирования горных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 3. – С. 187–200. WOS:000884619900016.

4. Стадник Д.А. Обоснование функциональных подсистем единой отраслевой системы автоматизированного проектирования угольных шахт // М.: Ежемесячный научно-технический и производственно-экономический журнал «Уголь», - 2017. - №10(1099), – С. 52-56. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-10-52-56.

## Способ приготовления и доставки закладочной смеси в выработанное пространство под землей

***Авторы: Панов Ю.П., Мустаев Р.Н., Брюховецкий О.С.***

Получены новые результаты по эффективности работы камерных загрузочных устройств для гидротранспортирования руды, породы и закладочных материалов при подземной разработке месторождений полезных ископаемых.

*Новизна:* повышение технологической и эксплуатационной эффективности процесса приготовления и доставки закладочного материала с помощью камерного загрузочного аппарата достигается за счет максимального использования кинетической энергии водяной струи, формируемой дросселирующими дисками.

*Значимость:* оригинальное конструктивное выполнение разгрузочного узла и режим разгрузки аппарата.

*Прогноз применения:* планируется использование при подземной разработке месторождений полезных ископаемых системами с применением гидравлической закладки выработанного пространства (в том числе твердеющими смесями).

## Комплексный подход к автоматизированной обработке данных геологоразведочных работ при оценке запасов месторождений твердых полезных ископаемых

***Авторы: Стадник Д.А., Кирков А.Е., Нагайцев Н.А, Гаврилов Р.И.***

Разработаны методические основы автоматизированной обработки геологоразведочной информации и доказана ее ключевая роль при проектировании и планировании деятельности горнодобывающих предприятий.

*Новизна:* предложен комплексный подход, включающий основные принципы, технологии и процессы автоматизированной обработки данных опробования геологоразведочных работ в горно-геологических информационных системах (ГГИС).

*Значимость:* обоснованы основные этапы автоматизированной обработки и представления геологоразведочной информации в ГГИС при моделировании месторождений твердых полезных ископаемых.

*Прогноз применения:* планируется использовать разработанный подход для повышения точности, эффективности и масштабируемости оценки запасов при автоматизированном проектировании горнотехнических систем.

**Список литературы:**

1. Стадник, Д.А., Стадник Н.М., Григорян К.Л., Кожиев З.В. Актуализация технологических показателей технических проектов разработки месторождений полезных ископаемых с помощью компьютерных технологий // Горный информационно-аналитический

бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 5–1. – С. 170–184. DOI: 10.25018/0236_1493_ 2023_51_0_170.

2. Клюев Р.В., Мартюшев Н.В., Кукарцев В.В., Кукарцев В.А., Бригида В.С. Анализ геологической информации для обеспечения устойчивого функционирования горнотехнических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 144–157. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_144.

3. Захаров В.Н., Каплунов Д.Р., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н. Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горнотехническими системами // Горный журнал. - 2022. - № 12. - С. 55-61. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.10.

4. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Макеев М.А., Кадочников М.В. Применение искусственного интеллекта и перспективы развития аналитических систем больших данных в горной промышленности. // Горная промышленность. 2022;(3):89–92. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-89-92.

*Учебно-научный центр МГРИ и ИПКОН РАН*
*«Моделирование месторождений твердых полезных ископаемых и горнотехнических систем»*

Кафедра геотехнологических способов и физических процессов горного производства

**Проект: «Аргументация повышения извлечения драгметаллов из бедных руд и отходов обогащения на основе эрлифтной принудительной рециркуляции»**

Научные исследования проводились в развитии технического направления, изложенного в патенте RU2132297C1 – устройство для эрлифтирования сыпучих материалов.

В данной работе предлагается интенсификация процесса массообмена при выщелачивании ценных компонентов из бедных руд и отходов обогащения при двухконтурном пневмоперемешивании с помощью эрлифтного устройства при его погружении в зернистую среду, а также для равномерной интенсивности смешивания загружаемого исходного материала и продуктивного раствора в процессе выщелачивания.

Как известно, выщелачивание представляет собой сложный гетерогенный процесс селективного растворения ценного компонента, входящего в состав рудного материала при его взаимодействии с раствором реагента. Скорость выщелачивания, то есть извлекаемого количество компонента, переходящее в раствор в единицу времени, или расходуемое в единицу времени количество реагента, зависит от многих факторов, в том числе от концентрации реагентов, температуры, скорости перемешивания, поверхности твердой фазы и других показателей. Как правило, она изменяется в ходе процесса. В общем виде, скорость выщелачивания можно представить, как:

$$\frac{dG}{d\tau} = q * S$$

где G – количество выщелачиваемого вещества в твердой фазе, кг;

q – поток выщелачивания, то есть количество выщелачиваемого вещества, $\frac{кг}{м^2 * с}$, переходящее в раствор в единицу времени, с, с единицы поверхности твердой фазы (удельная скорость выщелачивания);

S – поверхность, на которой происходит выщелачивание, $м^2$.

Реакция между жидкостью и твердым веществом развивается от поверхности частиц к их центру, причем до полного завершения выщелачивания в центре остается непрореагировавшее ядро, а на периферии – твердый продукт.

При подаче в процесс выщелачивания кислорода воздуха, он переходит в трехфазное состояние (две границы раздела: твердое – жидкое и жидкость – газ), основными стадиями которого являются:

– абсорбация газа раствором (растворение газа);
– транспорт растворенного газа к поверхности твердой фазы – внешняя диффузия;
– транспорт реагента через слой твердого вещества – внутренняя диффузия;
– химическое взаимодействие поверхности твердой фазы;
– отвод продуктов реакции в объем раствора.

Перенос частиц растворенного в жидкости вещества к поверхности обусловлен двумя одновременно протекающими процессами:

– молекулярной диффузией, вызываемой наличием разности (градиента) концентраций;

– переносом вещества с потоком жидкости (конвекцией) как в направлении движения (тангенциальный перенос), так и перпендикулярно к нему.

Эффективная толщина диффузионного слоя – это величина прилегающего к поверхности слоя раствора. Она тем больше, чем меньше скорость жидкости и больше коэффициент диффузии, вязкость раствора и расстояние, пройденное жидкостью вдоль твердой поверхности.

Таким образом, для выбора оптимальной конструкции гидрометаллургического аппарата, необходимо иметь данные о скоростях протекания химических реакций, особенности массопередачи, гидродинамической обстановке или структуре потоков в данном аппарате, с учетом его технологических параметров.

На эффективность их работы оказывает влияние не только режим осуществляемого в нем процесса, но и правильность выбора конструктивного типа самого аппарата, способствующего достижению заданных показателей.

К числу основных факторов, влияющих на работу аппаратов любого типа, относятся:

– термодинамические (константы химического и фазового равновесия), определяющие направление реакции, технологические параметры поведения реакции и оказывающие влияние на скорость и селективность всего процесса;

– кинетические (константы скорости и энергии активации основных и побочных реакций);

– массообменные (коэффициенты массопередачи исходных и промежуточных веществ, а также конечных продуктов реакции);

– гидродинамические (характеристики межфазной поверхности и перемешивания по сплошной и дисперсной фазам).

Таким образом, выбор оптимальной конструкции гидрометаллургического аппарата состоит в обеспечении контакта между раствором и твердым материалом в течении необходимого времени и оптимальных для выщелачивания условиях.

Распространенный тип применяемых аппаратов для выщелачивания – реактор с механической мешалкой. В свою очередь, мешалки в зависимости от устройства лопастей подразделяются на лопастные с плоскими лопастями, пропеллерные с винтовыми, турбинные, специальные.

Процесс перемешивания с точки зрения гидродинамики может быть сведен к внешнему обтеканию тел потоком жидкости. При медленной скорости в вязкой жидкости, он преодолевает только силы трения, причем вокруг образуется пограничный слой, через который передается давление потока. С ее возрастанием возникает и приобретает наибольшее значение силы инерции: пограничный слой отрывается от поверхности тела и позади последнего образуются вихри. Картина вихреобразования при движении плоской пластины соответствует работе лопасти мешалки в одних и тех же гидродинамических условиях.

Однако, при выщелачивании с использованием механической мешалки достичь перехода процесса в кинетическую область при увеличении числа ее оборотов удается далеко не всегда. В первую очередь, это относится к тонкодисперсному материалу: повышение скорости вращения мешалки в конечном итоге приводит к тому, что твердые частицы увлекаются раствором и вместо увеличения скорости движения жидкости относительно поверхности частиц происходит ее снижение. Кроме того, при выщелачивании более крупной фракции, максимально возможное число оборотов мешалки может оказаться недостаточным для перехода в кинетический режим при большой скорости химической реакции и когда необходимо отводить от твердой поверхности продукты реакции достаточно быстро.

При выщелачивании, кислород воздуха обычно пропускают в виде пузырьков через слой жидкости – барботируют, характеризующийся диффундированием (фильтрацией) воздуха в объеме жидкости. Этот процесс протекает в аппаратах большей емкости с пневмоциркуляционным перемешиванием – пачуках, который обычно представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд с коническим днищем, имеющим угол конусности 60°, диаметр около 7 м и общей высотой около 7 м. Он активно используется при сорбции

непосредственно из пульпы. В таком аппарате имеется три эрлифта: один зля загрузки, другой - для перемешивания, а третий – для транспортировки пульпы и смолы. Эволюция таких аппаратов происходила за счет увеличения длины эрлифтной трубы для барботирования, однако основная концепция процесса выщелачивания осталась та же: один эрлифт предназначен для барботажа всего объема пульпы, а второй – необходим для выгрузки пульпы и смолы из аппарата.

Недостаток аппаратов типа «пачук» - сложность создания равномерного распределения потоков по сечению аппаратов, а также работа с пульпой при крупности материала менее 0,15 мм и объемной концентрацией, составляющей 10–15% во всем объеме. Кроме того, в них невозможно проведение процессов выщелачивания, промывки и обезвреживания плотнозернистых гидросмесей.

Режим оптимальной работы эрлифта определен как эксплуатация его в области максимального КПД, который характеризуется достаточно высокой производительностью при небольших расходах воздуха в смесителе эрлифта. При его увеличении, производительность достигает максимального значения для заданной длины эрлифта, диаметре его подъемной трубы и коэффициенту погружения смеси. Причем дальнейшее увеличение расхода воздуха ведет к переходу раздельного четочного режима движения пузырей к сложному стержневому режиму с достаточными высокими скоростями на границе раздела фаз в трехфазной системе: твердое – жидкость – газ.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема устройства для выщелачивания металлов из руд, концентратов и отходов обогащения, а также показаны расположение перфорированных трубчатых каналов параллельно и коаксиально эрлифтной трубе непосредственно в толще насыпного материала, которые должны способствовать при их взаимном расположении ускорению движения жидкости из верхних слоев к всасывающему узлу. Аппарат для выщелачивания включает загрузочную емкость, внутри которой по всей ее глубине размещена эрлифтная подъемная труба с воздухоотделителем в верхней его части и узлом пульпоприготовления и всасывания в виде конфузора – в нижней. Параллельно и коаксиально эрлифтной трубе частично или по всей глубине емкости размещены трубчатые каналы.

В результате известных работ [1], было определено, что в плоскости всасывания образуется воронка с вихревым конусом посередине. При круговом столкновении всасывающих струй в осевой зоне происходит сложное силовое их взаимодействие. Равнодействующая сила при этом всегда направлена под углом к оси центральной области всасывания, что приводит к общему вращению всасываемого потока. Это вызывает снижение осевой скорости всасывания в центральной части за счет появления тангенцальной скорости, а также возникновения градиента давления по центру плоскости всасывания и, как следствие, вынос ожиженного потока песка в виде конуса в эрлифтную трубу.

Закрутка восходящего потока может быть усилена установкой к узлу приготовления и всасывающему над конфузором патрубка тангенциального подвода воздуха к эрлифтной трубе или к кольцевой камере конфузора, установленной в нижней части эрлифтной трубы и имеющей в донной части патрубок, образующий кольцевой зазор с эрлифтной трубой.

В кольцевой камере воздух закручивается до определенной для данного зернистого материала угловой скорости и уже коаксиально закрученный поток формируется в кольцевой насадке и генерируется компактный тороидальный воздушно – жидкостной раствор реагента вихря.

Возможны различные варианты выполнения и расположения трубчатых каналов: в виде внутреннего кожуха боковой поверхности, как обечайка эрлифтной подъемной трубы или отдельных трубок внутри загрузочной емкости. Трубчатые каналы перфорированы (частично или по всей длине) круглыми или щелевыми отверстиями. Их размеры не превышают характерных размеров компонентов загрузки камеры. Перфорация может быть выполнена с различной степенью равномерности в зависимости от распределения и гранулометрического состава фракции по высоте. Верхние торцы трубчатых клапанов содержат либо сетку, либо поплавковый клапан. Днище емкости имеет преимущественно конусную поверхность и содержит патрубок слива пульпы с задвижкой.

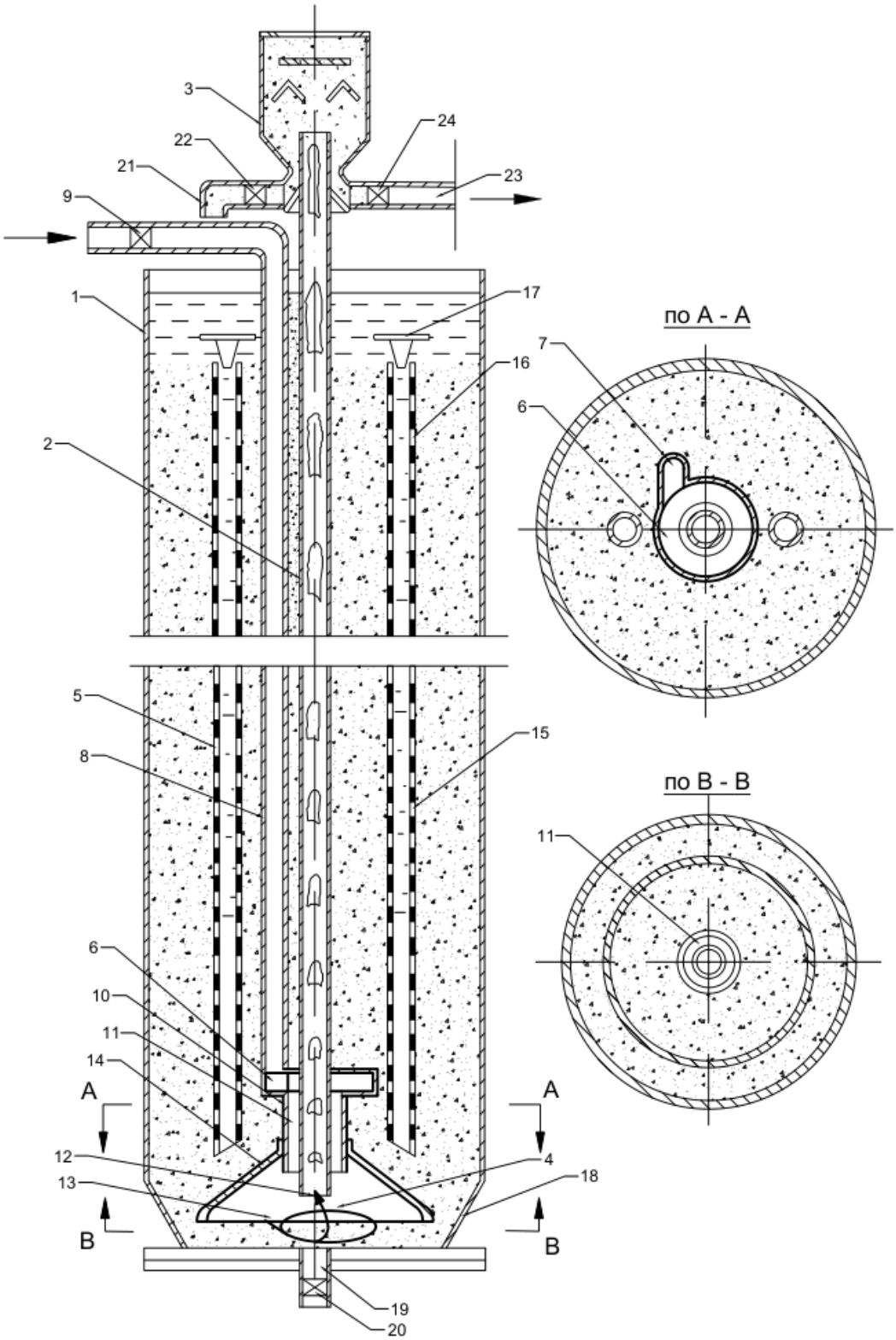



**Рисунок 2 – Конструктивная схема эрлифтного перемешивания с принудительной рециркуляцией для интенсификации процесса выщелачивания**

***1 – загрузочная емкость, 2 – эрлифтная подъемная труба, 3 – воздухоотделитель, 4 – узел пульпоприготовления и всасывания, 5 – трубчатые каналы, 6 – кольцевая камера, 7, 10 – патрубок, 8 – воздухопровод, 9, 20, 22, 24 – задвижка, 11 – кольцевая насадка, 12 – всасывающее отверстие, 13 – камера всасывания, 14 – конфузор, 15 – щелевые отверстия, 16 – сетка, 17 – поплавковый клапан, 18 – конусная поверхность, 19 – патрубок слива пульпы, 21 – полость патрубка, 23 – полость транспортного трубопровода***

При загрузке исходного материала в виде пульпы, открывают задвижку на сливном донном патрубке и дренируют поровую воду, чему способствуют трубчатые каналы, по которым поровая вода с наименьшим гидравлическим сопротивлением транспортируется к патрубку. Количество трубчатых каналов определяют по скорости фильтрации загруженного в емкость материала. Задвижку закрывают и емкость заполняют предварительно подготовленным выщелачивающим реагентом до верхнего среза трубчатых каналов. Затем подают под давлением воздух к узлу пульпоприготовления и всасывания эрлифтной подъемной трубы.

Раствор реагента из объема вытесненной поровой жидкости под слоем твердого нисходящим потоком с наименьшими гидравлическими сопротивлениями по гладкоствольным перфорированным трубчатым каналам попадает в зону всасывания, где твердое над конфузором насыщается жидкостью и в плывунном состоянии по боковой наклонной его поверхности поступает в область воздействия тороидального вихря и формируется им в виде концентрированного потока к всасывающему отверстию эрлифтной подъемной трубы. Трехфазная смесь в воздухоотделителе сепарируется от газа, сливается в емкость и цикл повторяется необходимое число раз, или обработанный продукт гидравлически транспортируют по трубопроводу. Расход вытесненной жидкости поровой жидкости – реагента над слоем твердого, поступающей в трубчатый канал, регулируют на торце его сеткой или поплавком – клапаном. Трубчатые каналы перфорированы круглыми или щелевыми отверстиями, размеры которых не превышают фракции насыпного материала в емкости, что препятствует проникновению твердой фазы в каналы.

Аппарат позволяет с минимальным объемом раствора реагента (около 40 % по объему как поровой жидкости) выщелачивать рудный материал предельно возможного объема (около 60% по объему как скелета загруженного твердого) при различных скоростях фильтрации, обеспечиваемых трубчатыми каналами независимо от фильтрационных свойств загруженного материала. Режимы циркуляции твердого в жидкости можно осуществлять в широком диапазоне скоростных и напорных характеристик потока:

– в пульсационно – статическом;

– при резко изменяющихся режимах турбулентности – число Рейнольдса, равном $10^6$, в эрлифтной подъемной трубе до значений Рейнольдса 1 – 2 (вялое псевдоожиженное состояние в объеме слоя твердого вне ее);

– в режиме движущегося пригруженного слоя твердого за счет обезвоженного верхнего слоя, который и уплотняет рабочий слой горной массы;

– обеспечивается практически равномерное движение раствора в емкости;

– при переработке глинистого материала без опасности кольматации порового пространства слоя твердого.

Решение этих задач значительно расширяет область применения пневмоподъемников при добыче и переработке руд различного гранулометрического состава.

Экспериментальная проверка эффективности применения рассмотрения аппаратов для выщелачивания золота проводилась на пробах золотоносной руды месторождения «Северо – Восток» Промежуточного рудного поля (Чукотка), а также на золотосодержащих рудах местогорждения «Многовершинное».

Пробы были представлены золото – серебряными рудами по составу алюмосиликатными, окисленными, с малым содержанием сульфидов. Рудовмещающие породы представлены смесью жильного кварца, темно – серых углеродистых сланцев и алевролитов. Золото концентрировалось в двух собственных минералах – в самородном низкопробном электруме и в высокопробном самородном золоте. Характерной особенностью для данной пробы является наличие гидроксидов железа, покрывающих минералы золота. Средний размер обособленных выделений золота составляет около 0,1 мм. Серебро представлено широкой гаммой разнообразных форм, основной из которых является электрум и сульфосоли серебра.

Выщелачивание золота из руд месторождений «Северо–Восток» и «Многовершинное» проводились в рассмотренных выше аппаратах емкостью 100 л по пульпе. В лабораторных условиях отношение Ж:Т составляло 1–1.2. Для сравнения также проводилось выщелачивание в реакторах с механическим перемешиванием со скоростью вращения мешалки 150 об/мин. Периодически осуществлялся отбор проб пульпы для анализа растворов

на содержание золота и серебра. Пробы пульпы предварительно центрифугировались при 5000 оборотах в течении 10 минут. Анализ растворов проводился на атомно – абсорбционной установке «Спектр – 5» с пределами чувствительности по золоту – 0,1 мг/л, по серебру – 0,05 мг/л. Остаточные содержания металлов в кеках после выщелачивания и в рудах определялись методом классической пробирной плавки. Результаты экспериментов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

**Кинетика агитационного цианирования золота и серебра из хвостов гравитации месторождения «Северо–Восток» при использовании различных способов агитации**

| Время, час | Механическое перемешивание | | | | Эрлифтная установка | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | золото | | серебро | | золото | | серебро | |
| | В р-ре, мг/л | Извлечение, % | В р-ре, мг/л | Извлечение, % | В р-ре, мг/л | Извлечение, % | В р-ре, мг/л | Извлечение, % |
| 0,5 | | | | | 10,0 | 58,5 | 87,2 | 33,6 |
| 1 | 8,7 | 47,5 | 70,2 | 28,4 | 11,9 | 69,6 | 88,2 | 34,0 |
| 2 | 10,9 | 59,5 | 76,2 | 34,8 | 13,4 | 80,3 | 100,0 | 38,6 |
| 3 | 14,0 | 76,5 | 78,2 | 33,0 | 14,9 | 87,1 | 104,4 | 40,3 |
| 4 | 15,6 | 87,3 | 81,2 | 34,2 | 15,6 | 93,4 | 106,0 | 48,8 |
| 4,5 | | | | | 15,6 | 93,4 | | |
| 6 | 16,8 | 91,7 | 87,2 | 35,7 | | | | |
| Остаточное содержание, г/т | 1,9 | | 90,6 | | 1,4 | | 190,0 | |
| Исходное, г/т | 22,7 | | 301,4 | | 21,2 | | 321,4 | |

Таблица 2

**Кинетика процесса цианирования руды месторождения «Многовершинное». (Ж:Т=1; концентрация NaCH=1 г/дм$^3$; pH=10,5–11; крупность – 2 мм).**

| Время, час | Реактор с мешалкой | | Эрлифтная установка | |
|---|---|---|---|---|
| | золото | | золото | |
| | В р-ре, мг/л | Извлечение, % | В р-ре, мг/л | Извлечение, % |
| 1 | 3,5 | 61,3 | 3,8 | 66,5 |
| 2 | 3,6 | 63,0 | 4,5 | 78,8 |
| 3 | 3,9 | 68,3 | 4,8 | 84,0 |
| 4 | 4,2 | 73,5 | 5,0 | 87,6 |
| 5 | 4,4 | 77,0 | 5,3 | 92,8 |
| 6 | 4,7 | 82,3 | 5,6 | 98,0 |
| Остаточное содержание, г/т | 1,0 | | 0,11 | |
| Исходное, г/т | 5,7 | | 5,71 | |

Конструкция эрлифтного аппарата обеспечивает эффективное взаимодействие реагентов в трехфазной системе твердое – жидкость – газ с высокой скоростью растворения кислорода по мере его расходования, за счет использования развитой свободной турбулентности, рассмотренной выше.

Использование двухконтурного эрлифтного перемешивания позволило вести процесс выщелачивания одновременно и последовательно в режимах: инфильтрационном, фильтрационном и напорно – вихревом при диапазоне чисел $Re=1–2\cdot10^5$;

Результаты экспериментальных исследований на золотосодержащихся пробах, представленных в табл. 1, 2, показали, что двухконтурное эрлифтное перемешивание обеспечивает эффективное взаимодействие раствора реагента в трехфазной системе твердое – жидкость – воздух с высокой скоростью растворения за счет развитой свободной турбулентности так, что в сравнении с применяемыми традиционными реакторами с мешалкой процесс выщелачивания за 4 часа на золотосодержащемся сырье месторождения «Северо–Восток» ускоряется в 1,5 раза, а извлечение золота на 7%, на рудах «Многовершинного» за 6 часов – на 19%.

Таким образом, предлагаемый способ выщелачивания, по нашему мнению, является новым перспективным направлением в гидрометаллургической технологии извлечения драгоценных металлов из минерального сырья и техногенных продуктов, требующим развития в промышленных масштабах.

**Важнейшие результаты научно-исследовательских работ Учебно-научного центра МГРИ и ИПКОН РАН «Моделирование месторождений твердых полезных ископаемых и горнотехнических систем» и факультета технологии разведки и разработки за 2025 год в рамках стратегического технологического проекта «Технологический блокчейн-контур управления качеством в недропользовании»**

**Руководители проекта:** Захаров В.Н., академик РАН, д.т.н., профессор; Атрушкевич В.А., д.т.н., профессор, и.о. декана.

Сроки выполнения этапа: 2025 год.

**Ключевые исполнители:** Учебно-научный центра МГРИ и ИПКОН РАН «Моделирование месторождений твердых полезных ископаемых и горнотехнических систем»; коллектив кафедры горно-технологических систем и энергетических комплексов имени Н.В. Тихонова и кафедра высшей математики и физики.

В отчетном 2025 году в рамках программы развития МГРИ до 2030 года осуществлен запуск и активная фаза реализации стратегического технологического проекта «Технологический блокчейн-контур управления качеством в недропользовании». Проект инициирован факультетом технологии разведки и разработки и направлен на решение системной проблемы угольной отрасли — отсутствия сквозной прозрачности и доверия между участниками цепочки поставок (добыча — обогащение — логистика — потребление).

Проект нацелен на создание доверенной цифровой среды для угледобывающих предприятий, обеспечивающей сквозную прослеживаемость качества сырья от забоя до приемки потребителем на основе интеграции технологий Интернета вещей (IoT), распределенного реестра (блокчейн) и искусственного интеллекта (AI/ML). Ключевым ожидаемым эффектом от внедрения системы является рост маржинальности угольного бизнеса не менее чем на 7% за счет исключения потерь, связанных с недоверием контрагентов, фальсификацией данных о качестве и неэффективной логистикой.

Все запланированные на 2025 год работы выполнены в полном объеме и в установленные сроки. Ключевым итогом года стал успешный переход от концептуальной идеи, изложенной в презентационных материалах, к фазе практической разработки и создания прототипа.

**Ключевые научные и научно-технические результаты**

В результате выполнения научно-исследовательских работ в 2025 году получены следующие значимые результаты, имеющие научную новизну и практическую значимость:

**Разработка архитектуры и технического задания на создание программного комплекса**

**Проведение предпроектного обследования:** Рабочей группой проекта проведено детальное предпроектное обследование индустриального партнера. Обследование включало:

- Анализ существующих регламентов документооборота при отгрузке и приемке угля.
- Инвентаризацию парка весоизмерительного оборудования и лабораторных приборов контроля качества (зольность, влажность, теплотворная способность).
- Изучение логистических маршрутов движения угольной продукции от склада готовой продукции до конечного потребителя (ТЭЦ, коксохимическое производство).
- Сбор информации о точках возникновения спорных ситуаций и типовых разногласиях между поставщиком и заказчиком.

**Формирование архитектурной схемы:** на основе собранных данных сформирована и утверждена архитектурная схема программного комплекса. Схема описывает трехуровневую структуру будущей системы:

**1. Уровень сбора и валидации данных (периферия):** Взаимодействие с IoT-датчиками, промышленными контроллерами и АСУ ТП предприятия. Разработка универсальных адаптеров для интеграции с оборудованием различных производителей и годов выпуска (включая устаревшие модели).

**2. Уровень доверия и неизменяемости (блокчейн-ядро):** Распределенный реестр, обеспечивающий запись цифровых профилей партий, подтверждение времени и места фиксации параметров, хранение хеш-сумм первичных документов.

**3. Уровень аналитики и представления (AI/ML и приложения):** Модули машинного обучения для прогнозирования изменения качества угля в процессе транспортировки, динамической оптимизации логистики и формирования рекомендаций для технологов, а также личные кабинеты для всех участников цепочки поставок.

**Разработка технического задания:** на базе утвержденной архитектуры разработано детализированное техническое задание (ТЗ) на создание ядра блокчейн-платформы и модулей интеграции. ТЗ включает:

- Спецификацию требований к функциональным характеристикам системы.
- Требования к информационной безопасности и защите данных.
- Описание форматов обмена данными и протоколов взаимодействия с внешними системами.
- План тестирования и приемочных испытаний прототипа.

**Создание прототипа блокчейн-платформы**

**Разработка ядра распределенного реестра:** В лабораторных условиях кафедры горно-технологических систем и энергетических комплексов разработано и успешно протестировано ядро распределенного реестра. При разработке использовались современные фреймворки с открытым кодом, адаптированные под задачи промышленного применения.

**Реализация базовых функций:** Созданный прототип позволяет выполнять следующие ключевые операции:

- Формирование уникального цифрового профиля (цифрового паспорта) для каждой партии угля с привязкой к конкретному месторождению, лаве и временному интервалу добычи.
- Запись в реестр критически важных параметров качества: масса нетто, зольность, влажность, выход летучих веществ, сера, теплотворная способность.
- Фиксация временных меток и геолокации на ключевых этапах движения партии (отгрузка со склада, прохождение контрольных точек на ж/д, прибытие на станцию назначения).
- Обеспечение целостности и неизменяемости данных: любая попытка постфактум изменить записанные в реестр параметры делает всю цепочку невалидной, что гарантирует доверие к данным.

**Подготовка к регистрации программного продукта:** на основе разработанного прототипа ведется подготовка пакета документов для регистрации программы для ЭВМ «Модуль валидации данных для горно-геологических информационных систем».

## Эффекты от реализации проекта

Реализация проекта в 2025 году уже оказала следующие положительные эффекты на различных уровнях:

**На университетском уровне:**

- МГРИ (факультет технологии разведки и разработки) закрепил за собой статус центра компетенций в области цифровизации горного дела и применения блокчейн-технологий в недропользовании.
- Установлены и развиваются партнерские отношения с высокотехнологичными компаниями и научными центрами, работающими в сфере цифровой экономики.

**На региональном уровне (г. Москва):**

- Проект способствует формированию положительного имиджа Москвы как центра притяжения талантливой молодежи и создания высокотехнологичных рабочих мест. Реализация подобных инициатив в столичном вузе создает условия для удержания интеллектуального капитала в регионе.

**На национальном уровне:**

- Заложены научно-технические и методологические основы для создания отечественного импортозамещающего программного комплекса для критически важной сырьевой отрасли экономики. Это полностью соответствует приоритетам научно-технологического развития РФ, направленным на достижение технологической независимости.

• Разрабатываемые подходы могут быть масштабированы на другие сырьевые сектора (нефть, газ, руды черных и цветных металлов), что придаст проекту мультипликативный эффект для всей минерально-сырьевой базы страны.

Таким образом, в 2025 году проект «Технологический блокчейн-контур» успешно прошел стадию инициации, сформировал необходимую научно-техническую, кадровую и инфраструктурную базу и перешел в фазу практической реализации. Все ключевые показатели результативности, запланированные на отчетный период (количество публикаций, привлеченных магистрантов, разработанная документация, созданный прототип), достигнуты в полном объеме.

## 2.16. САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМПЕРАТРИЦЫ ЕКАТЕРИНЫ II

### ГОРНАЯ СИСТЕМОЛОГИЯ. ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

#### *Получение строительных материалов на основе отходов обогащения полевошпатового сырья*

**Ключевые слова**

ОТХОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕВОШПАТОВОГО СЫРЬЯ, ПЕНОКЕРАМИКА, УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ, ВСПЕНИВАНИЕ, ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

**Суть полученного научного результата**

Разработана и экспериментально подтверждена технология утилизации отходов обогащения полевошпатового сырья путем их переработки в пенокерамические теплоизоляционные материалы.

По результатам исследований определены оптимальные технологические параметры переработки. Методом прямого вспенивания с использованием карбида кремния в качестве пенообразователя определены оптимальные диапазоны технологических параметров: температура вспенивания (1120–1140°С), время выдержки (от 30 до 60 минут) и концентрация вспенивателя (0,5–2,5% от массы отходов). Выявлены корреляционные зависимости между параметрами спекания и физико-механическими характеристиками конечного продукта: увеличение температуры и времени выдержки снижает теплопроводность и плотность пенокерамического материала, но может приводить к снижению прочностных показателей при превышении оптимальных значений.

Полученный материал по своим физико-механическим свойствам (коэффициент теплопроводности от 0,049 до 0,064 Вт/(м·К), предел прочности на сжатие от 0,47 до 12,45 МПа, пористость от 46,5 до 80,1%) соответствует, а по некоторым показателям превосходит требования, предъявляемые к теплоизоляционным изделиям по ГОСТ 33949-2016 и является конкурентоспособным аналогом существующих утеплителей.

**Новизна и отличие от известных решений**

Впервые установлены оптимальные технологические параметры получения пенокерамики с использованием в качестве основного компонента хвостов от обогащения нефелин-полевошпатовых руд.

Усовершенствован подход к обращению с отходами обогащения полевошпатового сырья путем замены их складирования в хвостохранилищах на подготовку и реализацию в качестве товарного сырья для производителей изоляционных материалов.

Дополнены научные представления о возможности переработки трудноутилизируемых отходов горнорудной промышленности экспериментальными данными о физико-механических характеристиках полученной пенокерамики, подтверждающими ее конкурентоспособность по сравнению с традиционными аналогами (пеностекло, керамические утеплители).

Большинство известных патентов и исследований, посвященных утилизации отходов обогащения полевошпатового сырья, направлены на дообогащение отходов для получения полевошпатового концентрата или использование хвостов в качестве второстепенного компонента (наполнителя) при производстве традиционных материалов (кирпич, глазурь, бетон). В отличие от них предлагается использовать хвосты в качестве основного компонента

(95–99,5% массы) для получения высокоэффективного теплоизоляционного материала — пенокерамики.

Получен патент на изобретение RU 2 855 463 Состав шихты для получения пенокерамического материала / Матвеева В.А., Пашкевич М.А., Сверчков И.П., Игнатченко П.П.; принято участие в международной конференции «Перспективы экологического развития России и стран СНГ. Материалы 6-й Международной научно-практической конференции, проводимой в рамках XXIII Уральской горнопромышленной декады» с докладом: «Перспективные направления переработки отходов обогащения полевошпатового сырья» (г. Екатеринбург, 2025 г).

**Область применения в горной науке и практике**

• Рациональное природопользование:

обоснована возможность отказа от строительства новых хвостохранилищ за счет перевода отходов в категорию техногенного сырья, что позволит снизить антропогенную нагрузку на земельные ресурсы и предотвратить загрязнение компонентов окружающей среды.

• Переработка техногенного минерального сырья:

полученные технологические параметры могут быть применены при разработке промышленных регламентов получения пенокерамических материалов из отходов обогащения не только полевошпатовых, но и других типов руд со схожим химическим составом.

• Проектирование природоохранных мероприятий на горнодобывающих предприятиях:

экономически обоснованная модель переработки хвостов обогащения может быть использована в бизнес-планировании и технико-экономических обоснованиях при модернизации схем обращения с отходами.

• Строительство:

применение технологии расширяет сырьевую базу производителей стройматериалов за счет доступного техногенного источника, полученный пенокерамический материал пригоден для производства теплоизоляционных плит, легких заполнителей бетонов, огнеупорных изделий.

**Ожидаемый эффект**

Экономический эффект:

• Снижение платы за негативное воздействие на окружающую среду в результате сокращения объемов накопленных отходов, а также получения прибыли в результате реализации рассматриваемого отхода в качестве сырья для производства теплоизоляционных материалов.

Технологический эффект:

• Доказана принципиальная возможность использования хвостов обогащения полевошпатового сырья в качестве полноценного сырьевого компонента для производства пенокерамики без предварительного дообогащения и добавления других минеральных компонентов.

• Установлены оптимальные режимы термообработки (1120–1140°С, выдержка 30–60 мин), позволяющие получать материал с конкурентоспособными физико-механическими характеристиками.

Экологический эффект:

• Исключение необходимости строительства новых хвостохранилищ предотвращает изъятие земель лесного фонда и их перевод в категорию промышленных.

• Снижение негативного воздействия на окружающую среду от существующих объектов размещения отходов (пыление, инфильтрация загрязняющих веществ в подземные воды, нарушение почвенного покрова).

• Обеспечение экономии первичных природных ресурсов за счет замещения их техногенным сырьем.




**Рисунок 1- Образцы пенокерамики полученные из отходов обогащения полевошпатового сырья после спекания**

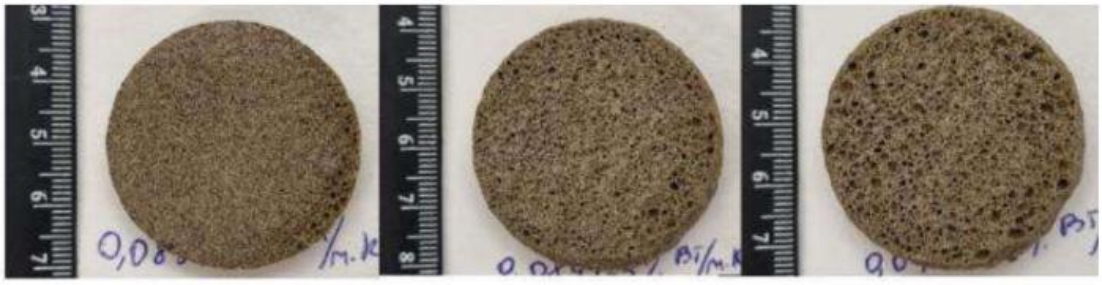


**Рисунок 2 - Пористость исследуемых образцов**

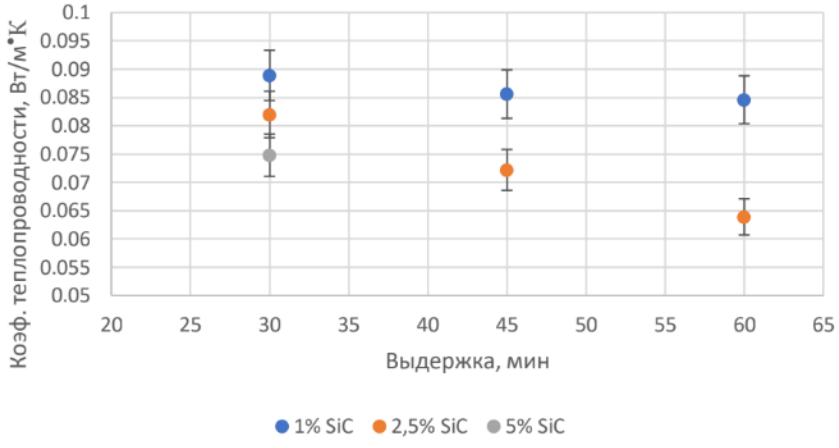



**Рисунок 3 - Диаграмма значений теплопроводности образцов в зависимости от времени выдержки и количества вспенивающей добавки**

## ГОРНОЕ НЕДРОВЕДЕНИЕ. МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД (ГЕОМЕХАНИКА)

### *МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ СКЛОНОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ СПУТНИКОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ*

**Ключевые слова**

ГЕОДЕЗИЯ, ОПОЛЗНЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ, СПУТНИКОВОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ, ГНСС, RTK, ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ, ОПОРНЫЕ СЕТИ, ЛИНЕЙНО-УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ПРОГНОЗ СМЕЩЕНИЙ.

**Суть полученного научного результата**

Разработаны: новый способ оценки стабильности в пространстве аппроксимацией координат пунктов плоскостью, регламент применения технологии RTK при наблюдениях за оползневыми смещениями, учитывающий условия измерений и получаемую точность, способ линейно-угловых измерений при наклонах вехи и схема наблюдений линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи, выявлены зависимости

точности от применяемого оборудования, удаления от объекта, количества съёмочных пикетов и их расположения.

Выполнен комплекс экспериментальных исследований с применением методов математического моделирования, а также наблюдения за оползневыми смещениями геодезическими методами с дальнейшей оценкой точности полученных результатов. Предложена схема представления опорной сети через систему «центроид – нормаль – точка на нормали», а также выявлены зависимости смещений опорных пунктов (их нестабильности) от смещения системы. Путём наблюдений тест-объекта выявлены зависимости точности определения смещений технологией спутникового позиционирования в режиме реального времени (RTK).

Применение аппроксимации координат плоскостью позволило вывести зависимости между смещениями и нестабильностью опорных пунктов, на основе которых были сформированы алгоритмы определения критерия стабильности опорной сети. На основе эксперимента составлен регламент применения технологии RTK.

**Новизна и отличие от известных решений**

Впервые установлены зависимости величин отклонений опорных пунктов пространственной сети от смещения системы «центроид – нормаль – точка на нормали», точности измерения смещений оползня технологией RTK от условий и параметров наблюдений и точности определения деформационных пунктов в теле оползня от способов установки вехи в наклоне на пункт.

Известны решения, при которых измерения выполняются в режиме RTK без учёта условий и параметров наблюдений, такие как длительность сеанса наблюдений, количество наблюдаемых эпох и др. Оценка стабильности выполняется раздельно в плане и по высоте, несмотря на пространственный вектор смещений пунктов, а линейно-угловые измерения выполняются только при отвесном положении вехи, а когда это невозможно – пункт исключается из наблюдений.

Существующие решения обладают недостатками, при которых не всегда удаётся достичь регламентируемой точности наблюдения оползневых смещений 20 мм в плане, 10 мм по высоте при использовании ГНСС, либо не удаётся осуществить наблюдения при отсутствии видимости на деформационный пункт.

Предложенные решения позволяют выполнять наблюдения за смещениями оползней пространственной технологией измерения – с применением ГНСС в режиме RTK. Главным преимуществом является определение пространственных смещений: одновременно в плане и по высоте, что позволяет получать более полную информацию о процессе оползневого смещения. Применение ГНСС ускоряет процесс полевых работ, сокращает время пребывания на опасном оползневом склоне.

Предложенные решения прошли апробацию на 10 научно-практических мероприятиях с докладами, результаты опубликованы в 12 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, в 4 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получен 1 патент и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Область применения в горной науке и практике**

• Отрасли применения: горная промышленность, строительство в сложных инженерно-геологических условиях, мониторинг опасных геологических процессов;

• Стадии применения: инженерные изыскания, проектирование, эксплуатационный мониторинг, оценка устойчивости склонов;

• Экономический, технологический и экологический эффект: повышение точности наблюдений деформаций, снижение риска схода оползня за счёт своевременного распознавания увеличения скорости смещений;

• Стадия готовности к внедрению: опытно-промышленная проверка, частичное внедрение в производстве;

• Рекомендации по внедрению: использование ГНСС в режиме RTK, соблюдение регламента, внедрение роботизированных тахеометров для наблюдений в рамках системы мониторинга.

**Ожидаемый эффект**

• Экономический эффект: снижение затрат на ликвидацию последствий оползней, уменьшение затрат на избыточные инженерные мероприятия, сокращение стоимости работ за счёт сокращения времени выполнения полевых работ.

• Технологический эффект: внедрение современных ГНСС-технологий, повышение точности ГНСС-измерений RTK до нормативных значений, расширение возможностей наблюдений в сложных условиях.

• Экологический эффект: снижение риска катастроф и разрушений, предотвращение негативного воздействия на окружающую среду.

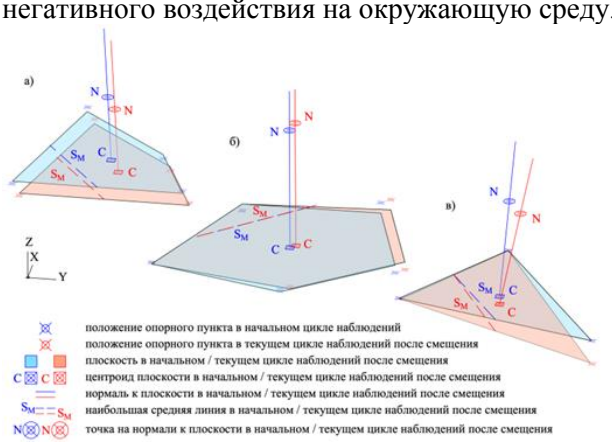



**Рисунок 4– Характерные элементы плоскости (центроид плоскости С, нормаль к плоскости, точка на нормали к плоскости N), полученной путём аппроксимации плановых координат и высот опорных пунктов при различных видах их смещений (а) смещение в пространстве всех опорных пунктов; б) горизонтальное смещение части опорных пунктов; в) вертикальное смещение части опорных пунктов)**



**Рисунок 5 – Закреплённые в твёрдом покрытии дюбели с целью моделирования смещений деформационного пункта в теле оползня**

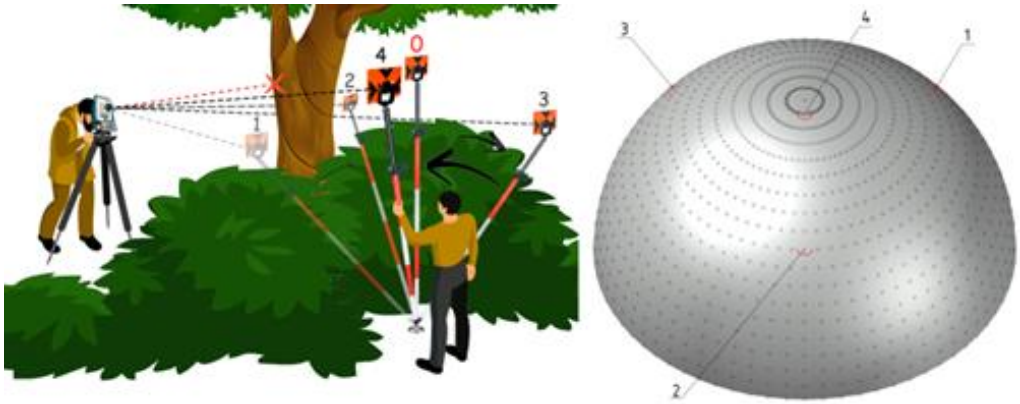


**Рисунок 6 – Схема расположения вехи при наблюдении методом по определению плановых координат и высоты деформационного пункта линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения**

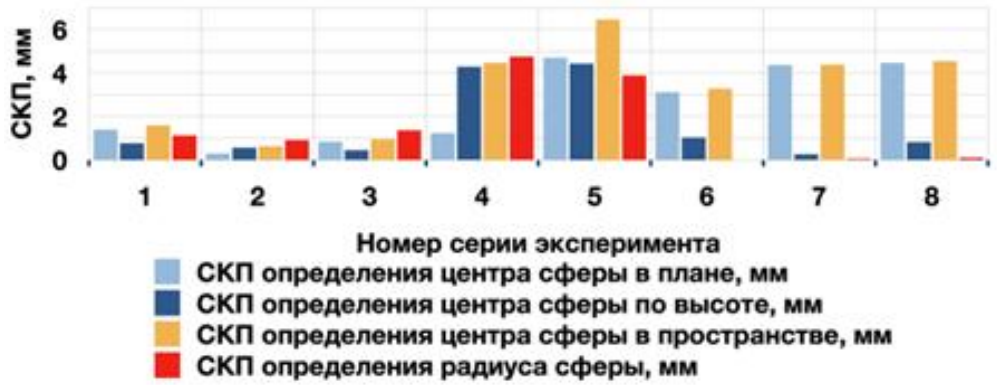



**Рисунок 7 – Гистограмма величин СКП определения плановых координат, высоты центра сферы и её радиуса линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения при различных условиях наблюдений**

Таблица 1

**Классификация условий и параметров наблюдений технологией RTK**

| **Условие/параметр наблюдения** | **Класс 1** | **Класс 2** | **Класс 3** | **Класс 4** | **Класс 5** |
|---|---|---|---|---|---|
| СКП определения смещений | $mS_{XY}$: 7<br>$mS_H$: 9 | $mS_{XY}$: 8<br>$mS_H$: 9 | $mS_{XY}$: 8<br>$mS_H$: 10 | $mS_{XY}$: 19<br>$mS_H$: 38 | $mS_{XY}$: 20<br>$mS_H$: 31 |
| Априорная точность ГНСС-оборудования | $m_{XY}$:<br>5 + 0,5<br>$m_H$:<br>10 + 0,8 | $m_{XY}$:<br>5 + 0,5<br>$m_H$:<br>10 + 0,8 | $m_{XY}$:<br>5 + 0,5<br>$m_H$:<br>10 + 0,8 | $m_{XY}$:<br>10 + 1,0<br>$m_H$:<br>15 + 1,0 | $m_{XY}$:<br>8 + 1,0<br>$m_H$:<br>15 + 1,0 |
| Маска возвышения, ˚ | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Частота измерений, Гц | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Минимальное количество используемых ГНСС-систем, ед | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| Минимальное количество общих наблюдаемых спутников ровера с базовой станцией, ед | 23 | 23 | 23 | 10 | 9 |
| Максимальное значение PDOP, ед | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 2,4 | 2,1 |
| Режим подключения к базовой станции | Одиночная БС/сетевой режим | Одиночная БС/сетевой режим | Одиночная БС/сетевой режим | Одиночная БС/сетевой режим | Одиночная БС/сетевой режим |
| Удаление наблюдаемого пункта от базовой станции, м | 1007 | 1007 | 1987 | 5011 | 10020 |
| Количество наблюдаемых эпох, ед | 180 | 120 | 120 | 10 | 10 |
| Деформационные пункты | *XY, H* | *XY, H* | *XY, H* | *XY* | *XY* |
| Рабочие пункты | *XY, H* | *XY, H* | *XY* | *XY* | – |

## *КОНЕЧНО-ДИСКРЕТНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ В СОЛЯНЫХ МАССИВАХ НА ОСНОВЕ ЯВНОГО УЧЕТА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КАМЕННОЙ СОЛИ*

**Ключевые слова**

ГЕОМЕХАНИКА; СОЛЯНОЙ МАССИВ; КАМЕННАЯ СОЛЬ; ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА; ТЕССЕЛЯЦИЯ ВОРОНОГО; КОНЕЧНО-ДИСКРЕТНЫЙ МЕТОД; ДИЛАТАНСИЯ; РАЗРУШЕНИЕ ПО ГРАНИЦАМ КРИСТАЛЛОВ; ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; УСТОЙЧИВОСТЬ ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ.

**Суть полученного научного результата**

Разработан и обоснован конечно-дискретный подход к прогнозу напряженно-деформированного состояния и запредельного деформирования соляных пород в окрестности породных обнажений. В отличие от традиционных континуальных схем, в предлагаемом подходе каменная соль рассматривается как поликристаллическая среда, сформированная набором взаимодействующих зерен, разделенных межкристаллическими границами. Теоретическую основу результата составляют положения механики деформируемого твердого тела, механики разрушения, конечно-дискретного метода, а также представление о зарождении и развитии трещин преимущественно по границам кристаллов. Для формирования расчетной структуры использован метод тесселяции Вороного. Параметры синтетической структуры калибровались по результатам лабораторного изучения макроструктуры образцов каменной соли и статистической обработки распределений размеров и формы кристаллов.

Методика получения результата включала: лабораторные исследования макроструктуры и механических свойств соли, обоснование способа определения характеристик отдельных кристаллов, генерацию синтетических поликристаллических структур, построение конечно-дискретных моделей с когезионными элементами и серию численных экспериментов для оценки влияния размера, формы и распределения зерен на прочность и деформируемость. Верификация подхода выполнялась на прикладных задачах геомеханики при моделировании деформирования ленточного целика и стенок скважины в соляном массиве. Установлено, что макроструктура определяет характер локализации деформаций, конфигурацию трещин и момент перехода к дилатансионному поведению. Показано, что при увеличении угловатости кристаллов прочность образцов снижается, а дилатансия и нарушение связности в конечно-дискретной постановке проявляются раньше, чем в моделях механики сплошной среды.

**Новизна и отличие от известных решений**

Впервые для условий соляных массивов сформировано целостное представление о деформировании каменной соли как поликристаллической структуры на макромасштабном уровне. Разработан способ генерации синтетических структур, идентичных реальным по распределению размеров и формы зерен, установлены закономерности влияния макроструктурных параметров на механический отклик, обосновано, что характер и интенсивность смещений контура выработок, а также дилатансионные процессы в зонах ожидаемого запредельного деформирования следует определять именно в рамках конечно-дискретного подхода.

Известные подходы к моделированию солей в основном базируются на механике сплошной среды и учитывают структурную неоднородность косвенно, через осредненные свойства материала. Ограничением таких решений является невозможность явного описания межкристаллических контактов, локальных концентраций напряжений, зарождения трещин по границам зерен и ранних стадий дилатансии. В представленном результате впервые для задач геомеханики соляных массивов реализовано явное представление породы в виде набора поликристаллических структур, сформированных методом тесселяции Вороного и включенных в конечно-дискретную постановку. Отличие результата состоит в переходе от осредненного континуального описания к структурно-обусловленному моделированию, где учитываются форма, размер и распределение кристаллов, характер межзеренного взаимодействия и разрушение связей на контактах.

**Область применения в горной науке и практике**

Результат применим в геомеханике соляных месторождений, при проектировании и эксплуатации подземных сооружений в соляных толщах, оценке устойчивости целиков, камер, скважин и иных породных обнажений. Подход может использоваться на стадиях научного обоснования, проектирования, прогноза и анализа безопасности горных работ. Практическая значимость связана с повышением достоверности прогноза зон дилатансии, локального разрушения и потери устойчивости, что особенно важно при освоении глубоких месторождений, строительстве подземных емкостей и оценке длительной работоспособности объектов в соляных массивах. Отдельные результаты приняты к использованию в проектной деятельности АО «Гипроцветмет» при определении параметров крепи вертикальных стволов.

**Ожидаемый эффект**

Экономический эффект:

• Снижение риска ошибок при проектировании параметров выработок и крепи, сокращение вероятности аварийных ситуаций и необходимости внеплановых усилений.

Технологический эффект:

• Повышение надежности прогноза напряженно-деформированного состояния соляного массива, возможности выявления потенциально опасных зон раньше, чем это обеспечивают классические континуальные модели, а также в расширении инструментов численного анализа для задач разрушения и дилатансии.

Экологический эффект:

• Уменьшение вероятности нарушения сплошности массива, неконтролируемого развития трещин и сопутствующих негативных последствий при освоении соляных месторождений и размещении подземных объектов.

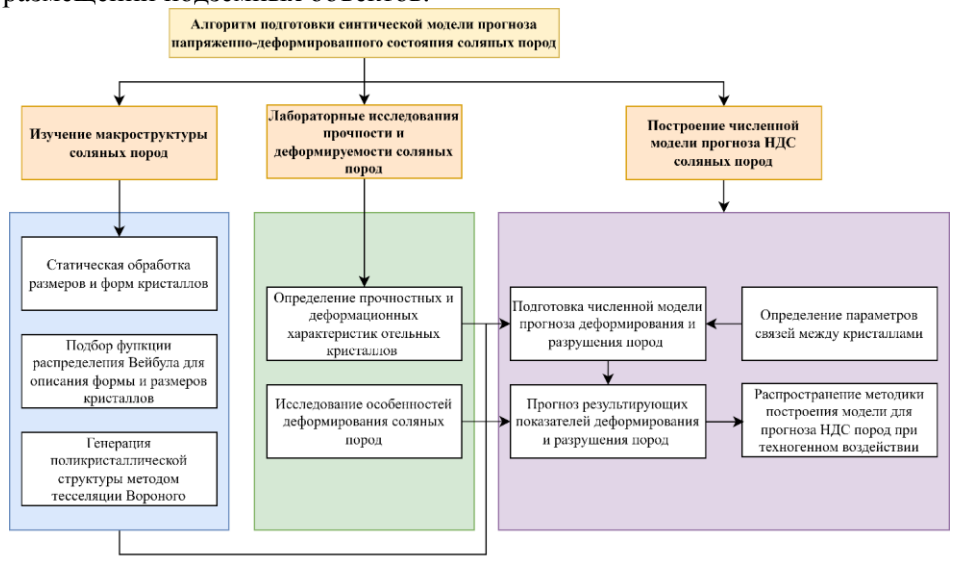



**Рисунок 8 – Алгоритм подготовки синтетической модели прогноза НДС соляных пород**

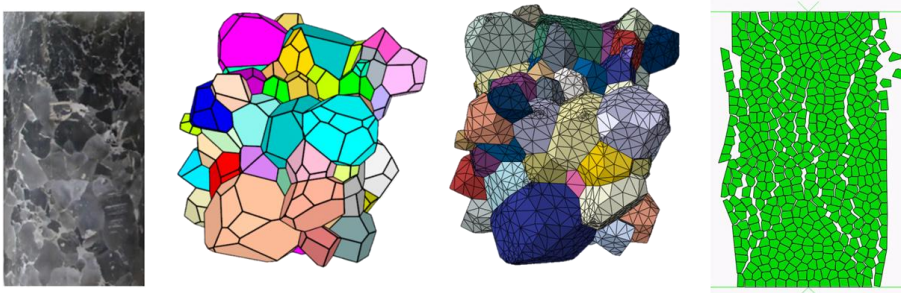


**Рисунок 9 – Концепция формирования синтетической модели**

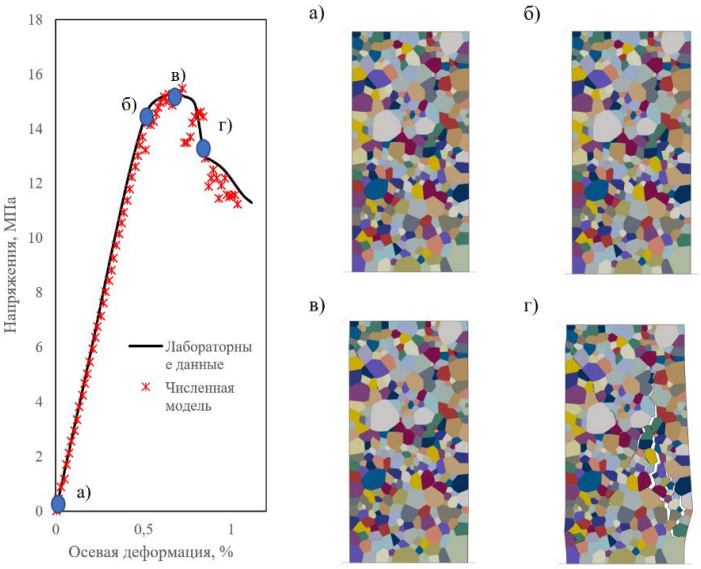



**Рисунок 10 – Характер разрушения образца каменной соли при виртуальном испытании на одноосное сжатие**

## 2.17. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

***Кафедра механики материалов и геотехнологий***

В 2025 году кафедра «Механика материалов и геотехнологии» продолжила активную работу как в области научных исследований, так и при реализации модели высшего образования и подготовки кадров высшей квалификации по приоритетному направлению научно-технологического развития – Адаптация к изменениям климата, сохранение и рациональное использование природных ресурсов, а также в рамках важнейшей наукоемкой технологии - Экологически чистые технологии эффективной добычи и глубокой переработки стратегических и дефицитных видов полезных ископаемых (направления и технологии были определены в Указе Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529).

На кафедре работает 18 преподавателей, из которых: 8 докторов наук, профессоров; 6 кандидатов наук, доцентов; 4 ассистента.

Ведется подготовка специалистов с присвоением квалификации «Горный инженер» по специальности 21.05.04 «Горное дело» (направленности: «Открытые горные работы», «Шахтное и подземное строительство», «Горные машины и оборудование») и бакалавров по направлению 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки»), которые входят в Перечень профессий, специальностей, направлений подготовки и научных специальностей, соответствующих задачам обеспечения технологической независимости и технологического лидерства Российской Федерации и направленных на обеспечение научно-технологического развития (утвержден Распоряжением Правительства Российской Федерации от 7 марта 2026 г. № 457-р).

Кроме того, продолжается подготовка магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» с направленностью (профилем) «Основания и фундаменты, подземные сооружения».

На декабрь 2025 года за кафедрой закреплено 12 аспирантов очной формы обучения и 2 докторанта. Руководство аспирантурой и докторантурой осуществляют доктора наук кафедры. Набор в аспирантуру и докторантуру ведется по трем научным специальностям: 1.6.21 «Геоэкология» (группа научных специальностей 1.6 «Науки о Земле и окружающей среде»); 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» и 2.8.8 «Геотехнология, горные машины» (группа научных специальностей 2.8 «Недропользование и горные науки»); работает диссертационный совет Д 24.2.417.04.

Основные научные направления работы кафедры:

- разработка теории и новых аналитических методов расчета конструкций подземных сооружений различного назначения;
- системные исследования геоэкологических функций литосферы;

- эколого-экономическое, геотехнологическое и геомеханическое обоснование разработки и проектирования комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов;

- теоретические основы геоинформационного мониторинга техногенного преобразуемых участков литосферы, подземных сооружений и горных выработок;

- автоматизированный расчет и проектирование горных машин;

- системные исследования гидродинамического воздействия на горные породы и искусственные материалы; теория и практика использования вторичных ресурсов;

- математическое моделирование аэрогазодинамических режимов и процессов тепломассопереноса при эксплуатации горных предприятий;

- промышленная и экологическая безопасность горного производства.

При выполнении ряда научно-исследовательских и диссертационных работ были проведены комплексные исследования, общие результаты которых сводятся к следующему.

В области ***открытой геотехнологии и геоэкологии*** обоснованы технологические решения для освоения и консервации ресурсов техногенных месторождений угледобывающего региона на основе оценки их воздействия на окружающую среду

Основные выводы и результаты:

1) усовершенствованы математические модели для определения зон влияния деформаций техногенных месторождений, переноса пыли и газовых загрязнителей с поверхности техногенных месторождений в приземном слое атмосферы, миграции токсичных компонентов в почву, инфильтрации стоков с поверхности техногенных месторождений на прилегающие территории;

2) разработаны методические положения и предложена структурно-функциональная схема комплексного мониторинга для оценки техногенного воздействия минеральных образований на окружающую среду и оценки способов снижения такого воздействия с использованием зон влияния источника загрязнения в зависимости от основных факторов влияния;

3) на основе результатов натурных наблюдений, лабораторных и вычислительных экспериментов определены количество и параметры зон влияния техногенных месторождений на окружающую среду в зависимости от основных факторов влияния;

4) определены наилучшие доступные технологии для снижения или исключения негативного воздействия насыпных техногенных минеральных образований;

5) определены основные параметры шнекобуровой отработки техногенных месторождений, для расчёта производительности бурошнековой выемки определен коэффициент, учитывающий размеры свода естественного обрушения над скважиной;

6) установлены закономерности изменения напряженного состояния межскважинных целиков от их размеров, отличающиеся учетом сцепления и угла внутреннего трения пород и позволяющие обосновать параметры бурошнековой выемки с заданным диаметром скважин на различной глубине при освоении техногенных месторождений;

7) предложена технология сохранения ресурсов потенциальных техногенных месторождений, основанная на гидроструйной цементации пород, позволяющая изолировать породы потенциальных техногенных месторождений от взаимодействия с агрессивными природными факторами;

8) обоснован способ выбора направления рекультивации для сформированных прошлой экономической деятельностью техногенных минеральных образований и техногенных месторождений в зависимости от преобладающей категории земельных участков, расположенных в зоне их влияния;

9) обосновано применение нечеткой кластеризации для ранжирования техногенных месторождений в масштабах угледобывающего региона, позволяющего определять очередность освоения и сохранения ресурсов данных объектов;

10) в процессе экспертной оценки сформирован перечень особенно значимых критериев для оценки технологий отработки техногенных месторождений, представленных породными отвалами угольных шахт, и выявлена наиболее эффективная, безопасная и экономически целесообразная технология для применения в масштабах угледобывающего региона.

11) на основе сформированного перечня критериев методом экспертных оценок выявлена наиболее эффективная, безопасная и экономически целесообразная технология консервации потенциальных техногенных месторождений, представленных породными отвалами угольных шахт.

В области ***геомеханики и строительной геотехнологии*** был разработан аналитический метод расчета обделок тоннелей, сооружаемых закрытым способом вблизи земной поверхности с применением защитных экранов из труб, позволяющий установить новые закономерности формирования напряженного состояния обделок тоннелей, что будет способствовать принятию обоснованных конструктивных или технологических решений, обеспечивающих прочность и надежность подземных сооружений различного назначения.

Основные выводы и результаты:

1) разработана математическая модель взаимодействия массива грунта, труб защитного экрана и обделок тоннелей кругового поперечного сечения, сооруженных закрытым способом вблизи наклонной земной поверхности, базирующаяся на теоретических положениях геомеханики и механики подземных сооружений;

2) выполнена постановка соответствующей задачи геомеханики и с применением математического аппарата теории функций комплексного переменного получено аналитическое решение соответствующей задачи теории. Достоверность полученного решения подтверждается высокой точностью удовлетворения граничных условий, погрешность расчетов не превышает 5%;

3) разработан аналитический метод расчета обделок тоннелей, сооруженных под защитой экрана из труб, при действии собственного веса грунта, базирующийся на полученном решении задачи теории упругости;

4) составлены алгоритм и компьютерная программа, позволяющие производить многовариантные расчеты конструкций подземных сооружений по определению их напряженного состояния в различных геомеханических ситуациях;

5) установлено удовлетворительное согласование результатов расчетов с данными, полученными другими аналитическими методами для частных случаев;

6) уточнены известные и установлены новые закономерности формирования напряженного состояния массива грунта и обделок тоннелей, сооружаемых с применением защитных экранов из труб, при различных сочетаниях основных влияющих факторов.

В 2025 году по кафедре получены следующие научно-технические результаты:

- подготовлены и защищены 1 докторская и 1 кандидатская диссертации;
- изданы 4 подписных издания «Известия ТулГУ. Науки о земле» (издание «Изве-стия ТулГУ. Науки о Земле», категория К1, включено в международную базу цитирования Web of Science);
- публикационная активность: количество статей в научных периодических издани-ях, включенных в международную базу цитирования Scopus – 4; количество статей в научных периодических изданиях, включенных в международную базу цитирования Web of Science – 9; количество статей в журналах, принадлежащих к первым двум квартилям международных баз цитирования Web of Science и Scopus – 3; количество статей в научных периодических изданиях, включенных в международную базу цитирования РИНЦ – 16; прочие статьи – 5.
- по результатам обучения в аспирантуре подготовлены 2 аспиранта, получившие квалификацию «Преподаватель. Преподаватель-исследователь».

Студентами кафедры сделаны 6 докладов на региональных конференциях, 1 на всероссиийской и 10 на международных конференциях. Опубликовано 8 работ.

Студенты принимали участие:

- в XIII Международном инженерном чемпионате «CASE-IN» по направлению «Горное дело» (28 человек, 7 команд, одна участвовала в полуфинале);
- в Осеннем кубке XIII Международного инженерного чемпионата «CASE-IN» по отраслевому направлению (12 человек, одна из команд прошла в полуфинал);
- во Всероссийской студенческой олимпиаде по сопротивлению материалов (7 человек, г. Тула, г. Нижний Новгород);
- в Открытой международной студенческой Интернет-олимпиаде по дисциплине «Сопротивление материалов» (10 человек, г. Йошкар-Ола).

## 2.18. ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

### Геомеханика

Продолжены исследования закономерностей формирования и развития мезотрещинной структуры в массиве горных пород с помощью разработанных методов: деформационным

и сейсмоакустическим. Методы позволяют эффективно обнаруживать предвестники разрушения массива горных пород вокруг глубоких подземных выработок. Деформационный метод обнаружения предвестников разрушения массива горных пород вокруг глубоких подземных выработок заключается в том, что на основании аналитической оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород определяются параметры многоинтервального метода деформационных исследований массива вокруг подземных глубоких выработок, а в качестве долгосрочного и среднесрочного предвестников принимаются условия отсутствия или фиксации зонального характера деформирования соответственно. Сейсмоакустический метод обнаружения предвестников разрушения массива горных пород вокруг глубоких подземных выработок, заключается в том, что на основании аналитической оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород определяются параметры сейсмоакустической сети геофонов, а в качестве долгосрочного и среднесрочного предвестников принимаются условия возникновения одиночных или очаговых сигналов соответственно.

Для установления критериев определения стадий формирования и развития мезотрещинных структур в горных породах вокруг глубоко залегающих горных выработок разработан многоканальный метод фиксации этапов формирования мезотрещинной структуры горных пород, заключающийся в том, что по данным акустических и деформационных экспериментов, а также экспериментов с образцами в лабораторных условиях определяются положение и стадия формирования мезотрещинных структур, при этом момент разрушения определяется закономерностями ее развития по многоканальной схеме с использованием долгосрочного и среднесрочного предвестников. Показано, что применение многоканальных методов обнаружения предвестников повышает эффективность прогноза не менее чем в 1,5 раза.

Разработан аналитический метод определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг глубоких подземных выработок, заключающийся в том, что для установленных горно-геологических условий на основании решения краевых задач о горной выработке в сильно напряженном массиве на основе неевклидовой модели определяются момент возникновения и характеристики зональной структуры разрушения, которые затем используются при задании параметров деформационных и сейсмо-акустических систем определения предвестников разрушения Установлено качественное соответствие между неевклидовой математической моделью и экспериментальными данными. Показано, что расхождение теоретических и экспериментальных данных в среднем составляет 47,7%.

В 2025 году в Международном научно-исследовательском центре геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов Политехнического института (Школы) ДВФУ получены следующие результаты:

1. Разработаны алгоритмы машинного обучения для прогнозирования критических состояний образца горной породы в ходе одноосного нагружения по данным деформационных и акустико-эмиссионных наблюдений.

2. Разработана программа для ЭВМ для прогнозирования состояния критических состояний образца горной породы в ходе одноосного нагружения на основе данных о деформировании боковой поверхности образца методом линейной регрессии.

3. Разработана программа для ЭВМ для прогнозирования состояния критических состояний образца горной породы в ходе одноосного нагружения на основе данных о количестве, положении и энергии акустико-эмиссионных сигналов в образце горных пород методом кластеризации K-Means++.

**Обогащение и глубокая переработка георесурсов**

В 2025 совместно с Дальневосточным геологическим институтом ДВО РАН продолжены работы по созданию инвестиционных паспортов минерально-сырьевой отрасли Дальневосточного федерального округа, основанных на возможности комплексно глубокой переработки минерального сырья с получением продукции высокого передела, востребованной на внешнем и внутреннем рынках. Разработана структура комплексного документа, включающего сведения об актуализированном перспективном ресурсном потенциале минерально-сырьевой отрасли территории, возможностях применения технологий комплексной глубокой переработки сырья на конкретных объектах недропользования, возможностях

и условиях локальных преференциальных режимов, значимых для принятия инвестиционных решений и привлечения отраслевых инвесторов для развития горной промышленности ДФО и диверсификации линейки выпускаемой продукции.

В 2025 г. были продолжены исследования в области оптимизации технологических параметров при получении линейки биопрепаратов на основе бурых углей и торфов Приморья и ряда морских биоресурсов. В качестве базового компонента рассматривалась гуминовая субстанция, которая в комбинации с другими биоактивными компонентами позволила разработать получения органических и органоминеральных удобрений и их применения в земледелии качестве удобрений, ремедиации почвы, препаратов для рекультивации земель после техногенного воздействия

Продолжены исследования по применению компонентов гуминовых и фульвовых кислот бурых углей и торфов в качестве базы удобрений для органического земледелия.

Экспериментально исследованы параметры и технологические режимы грануляции в присутствии цеолитсодержащих связывающих компонентов. Проведенные лабораторные исследованию цеолитов Приморского края в качестве матриц для удобрений и реагентов с контролируемым высвобождением (Controlled release fertilizers/CRFs). Совместно с Дальневосточным геологическим институтом ДВО РАН на база Аналитического центра института начаты исследования пористых структур цеолитов Чугуевского месторождения. Проведены исследования эффектов насыщения структур цеолитов органическими смесями, содержащими компоненты фульвовых и гуминовых кислот. Установлены параметры насыщения цеолитсодержащих матриц для разработки технологических схем получения CRF продуктов для сельского хозяйства и экологической очистки. Выполнены работы по повышению уровня готовности (TRL) прототипов органических и органоминеральных удобрений из угольного и торфяного сырья.

Таким образом, была исследована структура и экспериментально обоснована возможность подготовки и использования цеолитов Чугуевского месторождения Приморского края в качестве матриц удобрений с контролируемым высвобождением (CRF удобрения).

На основе исследований были созданы промышленные прототипы органических и органоминеральных удобрений на основе глубокой переработки торфов и бурых углей Дальнего Востока.

Проведенные исследования по оптимизации параметров гранулирования гуматосодержащего сырья позволили создать линейку товарной продукции гранулированных удобрений для механизированного внесения в почву. Прототипы удобрений были представлены во время проведения Российско-Китайского Экспо, г. Харбин, 17-21 мая 2024 года совместно с индустриальным партнером - ООО «АВИС». Прототипы являются наукоемкой продукцией для устойчивого земледелия, полученные на основе комплексной глубокой переработки торфов и углей месторождений Дальнего Востока (органические удобрения, гуматы, фульвовые кислоты).

Итогом выставки были запросы и предложения ряда китайских научных и производственных организаций подробнее познакомиться с областями применения продукции, условий стандартизации, а также проведение совместных научных исследований и производства в этой области.

## 2.19. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

***Факультет строительства и архитектуры***
***Кафедра экспертизы и управления недвижимостью, горного дела***

За период 2024-2025 учебного года исследования проводились в следующих направлениях:

1. Подготовка специалистов в области горного дела (доц. к.п.н. Семенова Л.А.; аспиранты направления 21.06.01 «Геология, разведка и разработка полезных ископаемых» Семенов Д., Сабельников А.);

2. Исследования гидрогеологических особенностей карьера Михайловского месторождения (проф. Хаустов В.В., доц. Семенова Л.А.).

**Подготовка специалистов в области горного дела**

За период 2024-2025 учебного года ППС кафедры продолжили исследования в области проблем профессиональной подготовки специалистов по горному делу. Основное внимание в публикациях было уделено использованию методов и приемов анализа художественного текста в преподавании специальных дисциплин при подготовке инженеров. По мнению авторов, работа с художественным текстом направлена на интеграцию инженерных и гуманитарно-художественных знаний и формирование творческих способностей, востребованных современным работодателем. Семеновой Л.А. в исследованиях приводятся примеры включения предлагаемых заданий в дисциплины профессионального цикла («Введение в профессиональную подготовку горного инженера», «Геология» и т.п.) произведений И. Ефремова. Коновалова Л.И., Семенова Л.А. приходят к выводу, что проецировать опыт работы с художественным текстом в преподавание специальных дисциплин не просто возможно, но необходимо в условиях изменившихся требований к профессиональной подготовке горных инженеров.

Семеновой Л.А., Коноваловой Л.И. подготовлено учебное пособие «Интегративный подход в преподавании гуманитарных дисциплин в среднем профессиональном образовании», в котором предлагается примерный вариант планирования уроков по литературе и внеурочной деятельности, а также методы, приемы и инновационные технологии при изучении литературы и внеурочной деятельности по литературе, задания и разработки занятий для подготовки обучающихся по инженерным специальностям. Учебно-методическое пособие носит практико-ориентированный характер предназначено для учителей литературы и преподавателей гуманитарных дисциплин в средних профессиональных организациях (СПО), преподавателей специальных дисциплин, классных руководителей, кураторов. Оно будет полезно при организации внеурочной деятельности, проведения уроков «Разговоры о важном», классных часов по литературе, в изучении специальных дисциплин обучающихся, педагогам-библиотекарям.

**Исследования гидрогеологических особенностей карьера Михайловского месторождения**

Проф. Хаустовым и доц. Семеновой Л.А. проведены исследования гидрогеологических изменений карьера Михайловского месторождения. Осушение карьера Михайловского железорудного месторождения осуществляется комбинированно-поверхностным и подземным способами. При планируемом развитии карьера в северо-западном направлении увеличивается соответственно размер его дренажного контура, что способствует росту водопритоков. Установлено, что в последние годы среднегодовой водоприток к шахтному водоотливу изменяется в пределах 2150...2830 $м^3$/ч. Выявлено при этом, что абсолютно большая часть притоков воды в карьер приходится на батский водоносный горизонт - 1500 $м^3$/ч (77%). В этой связи выполнен прогноз водопритоков из батского водоносного горизонта с учетом расширения и углубления чаши карьера. Для оценки и прогноза обводнения карьера из батских песков разработана численная модель геофильтрации района Михайловского железорудного месторождения. Прогнозное моделирование проводилось с учетом сооружения дополнительного дренажного штрека к границам горного отвода для размещения восстающих дренажных скважин на батские пески, поскольку существующие дренажные сооружения (штреки с восстающими скважинами) будут подработаны карьером и частично выведены из эксплуатации.

Данная работа была продолжена и получила развитие в публикациях журнала «Маркшейдерия и недропользование», где представлена оценка и прогноз обводнения карьера из батских песков и разработана численная модель геофильтрации района Михайловского железорудного месторождения. Прогнозное моделирование проводилось с учетом сооружения дополнительного дренажного штрека к границам горного отвода для размещения восстающих дренажных скважин на батские пески, поскольку существующие дренажные сооружения (штреки с восстающими скважинами) будут подработаны карьером и частично выведены из эксплуатации. Установлено при этом, что удельный приток на северо-западном борту карьера в результате сооружения дренажного штрека у границ горного отвода уменьшится в 1,5 раза (с 1,2 до 0,8 $м^3$/сут на 1 п. м. откоса). Опираясь на результаты прогнозных расчетов общего притока подземных и поверхностных вод в карьер, обоснова-

но необходимое количество и разработана схема расположения дренажных узлов восстающих скважин для обеспечения эффективного осушения карьера Михайловского железорудного месторождения вплоть до 2032 года.

**Список литературы:**

1. Железные руды КМА. Москва, 2001: 616. [Iron ores of the KMA / edited by V.P. Orlov, I.A. Shevyrev, N.A. Sokolov. Moscow, 2001:616 (In Russ.)]

2. Железорудная база России. Москва, 1998: 842. [Iron ore base of Russia. Moscow, 1998: 842 (In Russ.)]

3. Дунаев В.А., Рягузов Н.Т., Серый С.С. Структурное районирование Михайловского железорудного месторождения в связи с устойчивостью откосов действующего карьера *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1996;6:14-20. [Dunaev VA, Ryaguzov NT, Sery SS. Structural zoning of the Mikhailovsky iron ore deposit in connection with the stability of the slopes of the operating quarry. *Mining information and analytical bulletin*. 1996;6:14-20 (In Russ.)]

4. Геология, гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии (КМА): В 3 томах. Т. II: Гидрогеология и инженерная геология. Москва, 1972: 479. [Geology, hydrogeology and iron ores of the Kursk Magnetic Anomaly (KMA) basin: In 3 volumes. Vol. II: Hydrogeology and engineering geology. Moscow, 1972: 479 (In Russ.)]

5. Гидрогеология СССР. Т. IV: Воронежская и смежные области. Москва, 1971: 499. [Hydrogeology of the USSR. Vol. IV: Voronezh and adjacent regions. Moscow, 1971: 499 (In Russ.)]

6. Смольянинов В.М. Подземные воды Центрально-Черноземного региона: условия их формирования, использование. Воронеж, 2003: 240 [Smolyaninov V.M. Groundwater of the Central Black Earth Region: conditions of their formation, use. Voronezh, 2003: 240 (In Russ.)].

7. Пономаренко Ю.В. Способ осушения бортов глубоких карьеров с помощью систем комбинированных дренажных устройств. *Горный журнал*. 2014;7:52-4. [Ponomarenko YuV. Method of draining the sides of deep quarries using systems of combined drainage devices. *Mining Journal*. 2014;7:52-4 (In Russ.)]

8. Трубецкой К.Н., Волков Ю.И., Изотов А.А. и др. Осушение глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых системами восстающих дренажных скважин – технология будущего. *Неделя горняка – 2006*: *сб. материалов*. Белгород, 2006: 175-84. [Trubetskoy KN, Volkov YuI, Izotov AA, et al. Drainage of deep-lying mineral deposits by systems of rising drainage wells – the technology of the future. *Miner's Week – 2006*: *collection of materials*. Belgorod, 2006:175-84 (In Russ.)]

9. Козуб А.В, Исмагилов Р.И., Бадтиев Б.П. и др. Опыт освоения и осушения месторождения в сложных гидрогеологических условиях. *Горная промышленность*. 2019;5(147):12-4. [Kozub AV, Ismagilov RI, Badtiev BP, et al. Experience in the development and drainage of a deposit in complex hydrogeological conditions. *Mining Industry*. 2019;5(147):12-4 (In Russ.)]

10. Трубецкой КН, Краснянский ГЛ, Хронин ВВ и др. Проектирование карьеров. 3-е изд., перераб. Москва, 2009: 696. [Trubetskoy KN, Krasnyansky GL, Khronin VV et al. Quarry design. 3rd ed., revised. Moscow, 2009:696 (In Russ.)]

## 2.20. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»

## ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА И ТРАНСПОРТА

### Обогащение полезных ископаемых

Термодинамическое обоснование селективного извлечения алюминия и хрома из отработанных катализаторов методом щелочного выщелачивания

В результате выполненных исследований впервые проведен комплексный термодинамический анализ многокомпонентной системы $Al_2O_3$-$Cr_2O_3$-$SiO_2$-NaOH-$H_2O$ в широком температурном диапазоне 0–300°С, моделирующей процессы щелочной переработки

отработанных алюмохромовых катализаторов (типа ИМ-2201). С использованием фундаментальных термодинамических баз данных (NIST WebBook, Robie & Hemingway 1995) рассчитаны стандартные энергии Гиббса, энтальпии и энтропии для 33 потенциально возможных реакций. Установлено, что целевые реакции выщелачивания оксида алюминия с образованием гидроксоалюмината натрия ($\Delta G°(210°C) = –61,7$ кДж/моль) и окисления оксида хрома(III) до хромата натрия ($\Delta G°(210°C) = –588,4$ кДж/моль) являются термодинамически высокоспонтанными во всем исследованном интервале температур, тогда как побочные процессы (растворение $SiO_2$, образование алюмосиликатов, гидратация примесных фаз) характеризуются положительными значениями энергии Гиббса и подавлены в рабочих условиях. Выявлена критическая роль парциального давления кислорода: показано, что при температурах выше 220°C снижение парциального давления $O_2$ вследствие роста давления насыщенных паров воды требует повышения общего давления в системе для обеспечения полноты окисления Cr(III) до Cr(VI). На основе термодинамических расчетов впервые количественно обоснована возможность достижения селективного извлечения целевых компонентов с прогнозируемыми выходами: алюминий – 95–100%, хром – 85–95% при полном переходе кремния в нерастворимый остаток. Полученные результаты создают фундаментальную основу для разработки экологически безопасной и экономически эффективной технологии переработки токсичных хромсодержащих отходов нефтехимической промышленности, позволяющей возвращать ценные компоненты (алюминий и хром) в хозяйственный оборот в виде товарных соединений – алюминатных и хроматных растворов.

Проведенны исследования на высокотитанистых титаномагнетитовых рудах месторождений: Копанского, Медведевского, Кусинского и Малый Куйбас. В ходе работы детально изучено влияние ультразвуковой обработки на структурно-механические свойства руды перед стадией измельчения. Экспериментально и теоретически установлено, что предварительная ультразвуковая обработка способствует селективному разрушению сростков и ослаблению межфазных связей на границах зерен рудных (титаномагнетит, ильменит и магнетита) и нерудных минералов. Количественная оценка показателей раскрываемости минералов подтвердила данное положение: коэффициент раскрываемости рудных и нерудных минералов после воздействия ультразвуком увеличился в среднем в два раза (на 35-55%) по сравнению без обработки. Анализ показателей обогащения полученных концентратов подтвердил эффективность предложенного подхода. Сравнение результатов мокрой магнитной сепарации проб, прошедших ультразвуковую обработку и обработанных по стандартной схеме, показало, что ультразвук позволяет:

1. Снизить массовую долю диоксида титана в железо-ванадиевом концентрате с 14-12% до 6-4%.
2. Повысить извлечение железа и диоксида титана в концентрат на 12-15%.
3. Снизить потери ценных минералов с хвостами обогащения за счет более полного вскрытия тонковкрапленных зерен.

Работа выполнена: Шавакулевой О.П., доцентом кафедры ГМДиОПИ ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», к.т.н. и Сединкиной Н.А., доцента кафедры ГМДиОПИ ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», к.т.н.

**Журналы**

1. Недропользование и транспортные системы. 2025. Том 15 № 4
2. Недропользование и транспортные системы. 2025. Том 15 № 3
3. Недропользование и транспортные системы. 2025. Том 15 № 2
4. Недропользование и транспортные системы. 2025. Том 15 № 1

## 2.21. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Направление: Новые технологии поиска и добычи минерального сырья**

**1.** Выполнение работ по оценке геологической, геохимической изученности и подготовке геологического обоснования ГДП-200 листа O-40-XXXV (Артинская площадь). Составление авторского варианта комплекта государственной геологической карты масштаба 1:200 000 листа O-40-XXXV (Артинская площадь) в составе: геологических дочетвертичных образований, четвертичных образований, полезных ископаемых и закономерностей

их размещения; схем (карт) зарамочного оформления масштаба 1:10 000 000 – 1:500 000, элементов зарамочного оформления - легенды; геологических разрезов; стратиграфической колонки (колонки или схема сопоставления колонок при наличии нескольких структурно-формационных зон); таблиц полезных ископаемых; минерагенограммы; схемы соотношений четвертичных отложений и корреляции четвертичных отложений.

**2.** Моделирование сезонной динамики миграции горючих газов в эксплуатационном блоке №1 и №2 восточного рудного тела подземного рудника «Удачный» имени Ф.Б. Андреева» установило, что миграция горючих газов формируется подземными водами. Подземные воды активно наполняют горные породы рудника «Удачный». Миграция горючих газов зарождается на больших глубинах в промышленных масштабах. Депрессионная воронка рудника «Удачный» создает направление движения природных газов совместно с движением шахтных вод, тупиковые выработки (забои) насыщаются газами снизу. Массивы у забоев насыщаются газами и при взрывных работах, газ высвобождается в призабойное пространство. Ингибитором объемных взрывов становится водород при соединении с кислородом воздуха в шахтной атмосфере у забоя. По результатам исследований установлено, что количество природного газа пропорционально приходящей из глубин воде. Поэтому наиболее безопасная технология отработки восточного рудного тела рудника «Удачный» возможна с применением «Роботизированного комплекса для разработки полезных ископаемых в затопленных рудниках».

## 2.22. ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т.Ф. ГОРБАЧЕВА» (КУЗГТУ)

### *ЭНЕРГЕТИКО-ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ ИНТЕГРАЦИИ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС УГОЛЬНЫХ РЕГИОНОВ*

**Варнавский К.А.** (varnavskijka@kuzstu.ru), **Ермаков А.Н.** (ermakovan@kuzstu.ru), **Смирнова А.Д.** (smirnovaad@kuzstu.ru)

Ожидается публикация в журнале «Техника и технология горного дела» в №1 2026 года.

Разработана концептуальная энергетико-инфраструктурная модель интеграции центров обработки данных (ЦОД) в промышленный комплекс угольных регионов, направленная на формирование энерго-цифровых кластеров в условиях трансформации угледобывающих территорий.

Предложен интеграционный подход, объединяющий геолого-технологические, энергетические, инфраструктурные и цифровые факторы размещения и функционирования ЦОД. Модель учитывает потенциал дегазации угольных пластов и использование метана угольных месторождений в системах локальной генерации электро- и тепловой энергии, а также возможности комбинированного энергоснабжения на основе традиционных и возобновляемых источников энергии и систем накопления.

Сформирована структурная схема взаимодействия подсистем, обеспечивающая совместное моделирование энергетических потоков, режимов электроснабжения и устойчивости инфраструктуры с применением сценарного анализа и цифровых моделей. Показано, что интеграция энергоёмкой цифровой инфраструктуры с объектами угольной промышленности позволяет повысить эффективность использования существующих энергетических мощностей, снизить углеродную нагрузку и обеспечить рациональное использование высвобождаемой промышленной инфраструктуры.

Полученные результаты могут быть использованы при инженерном обосновании размещения ЦОД, модернизации промышленных площадок и разработке стратегий устойчивого развития угольных регионов.

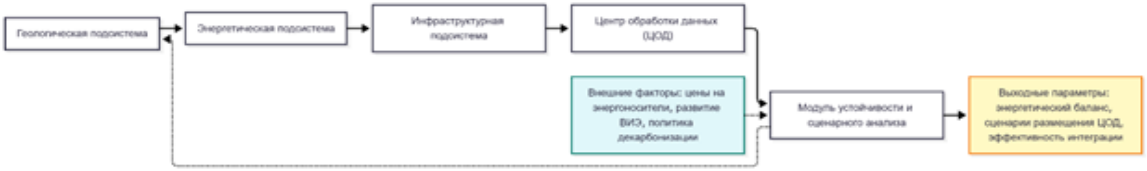



**Рисунок 1 - Структурная модель энергетико-инфраструктурной интеграции ЦОД**

## *ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В НЕТРОНУТЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ НА ОСНОВЕ ТИПОВОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ*

**Смирнова А.Д.** (smirnovaad@kuzstu.ru), **Михайлова Т.В.** (mdg@kuzstu.ru)

**Публикации:**

1. Смирнова, А.Д. Особенности определения мест заложения скважин заблаговременной дегазации на основе полевых и лабораторных исследований керна и геомеханического моделирования. / А.Д. Смирнова, Т.В. Михайлова // Техника и технология горного дела. – 2025. – № 4(31). – С. 47-67. – DOI: 10.26730/2618-7434-2025-4-47-67.

2. Смирнова, А.Д. Особенности моделирования угольного месторождения как коллектора метана. / А.Д. Смирнова, Д.М. Журавлев // Россия молодая: Сборник материалов XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 22 апреля – 25 апреля 2025 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2025. – С. 10220.1-10220.5.

Разработана типовая одномерная геомеханическая модель для горно-геологических условий Южно-Кузбасской группы угольных месторождений, позволяющая повысить эффективность освоения ресурсов и запасов метана угольных пластов в Кузбассе. Модель характеризует изменение давлений и естественных напряжений угленосной толщи в зависимости от истинной вертикальной глубины залегания и предназначена для прогноза неразгруженного от горного давления напряженно-деформированного состояния углевмещающего массива на участках, по которым отсутствуют прямые измерения.

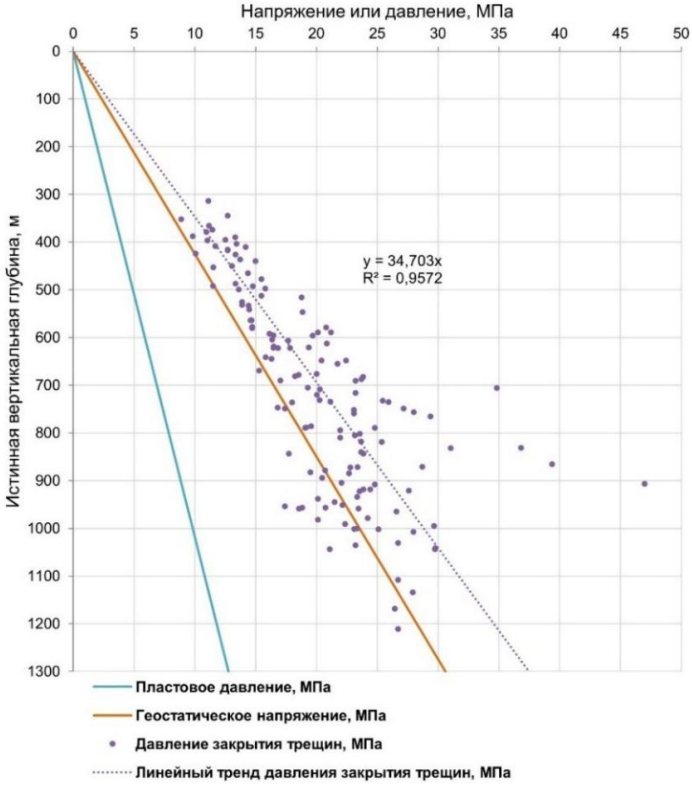



**Рисунок 2 - Типовая 1D геомеханическая модель для горно-геологических условий Южно-Кузбасской группы угольных месторождений**

## *ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ КОНВЕЙЕРА С МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ ЛЕНТЫ ДЛЯ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ*

**Гордин С.А.** (gordinsa@kuzstu.ru), **Ермаков А.Н.** (ermakovan@kuzstu.ru), **Захаров А.Ю.** (zay@kuzstu.ru), **Амосов А.А.** (amosovaa@kuzstu.ru)

**Публикации:**

1. Гордин С.А., Захаров А.Ю., Захарова А.Г., Атрушкевич В.А. Перспективы создания конвейера с магнитным подвесом ленты для горной промышленности. // Техника и технология горного дела. – 2025. – № 2(29). – С. 40-62. – DOI: 10.26730/2618-7434-2025-2-40-62.

2. Determining the Maximum Linear Mass of a Suspended Conveyor Belt Using PySR Symbolic Regression / S.A. Gordin, A.N. Ermakov, A.Yu. Zakharov, J. Wang // Mining. – 2025. – Vol. 5, No. 4. – P. 83. – DOI: 10.3390/mining5040083.

3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024621901 Российская Федерация. «Постоянные магниты» – для применения в моделировании магнитного подвеса: № 2024621625: заявл. 26.04.2024: опубл. 02.05.2024 / С.А. Гордин, А.Н. Ермаков, А.Ю. Захаров, А.А. Амосов; заявитель ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева».

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664747 Российская Федерация. Программа расчета силы магнитного смещения прямоугольных призм постоянных магнитов для моделирования магнитного подвеса конвейерной ленты: №2024663285: заявл. 07.06.2024: опубл. 24.06.2024 / С.А. Гордин, А.Н. Ермаков, А.Ю. Захаров; заявитель ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева».

5. Xie F. и др. Application of Wavelet Convolution and Scale-Based Dynamic Loss for Multi-Scale Damage Detection of Mining Conveyor Belt // Mining. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2026. - Т. 6. - № 1. - С. 8.

Проведена оценка потенциала применения систем магнитной левитации (MagLev) в транспортных системах горного производства с учётом их способности снижать сопротивление движению, увеличивать срок службы оборудования и повышать энергоэффективность транспортирования горной массы. На основе анализа научно-технической литературы и патентных исследований обобщены современные подходы к реализации магнитолевитационных систем, включая базовые принципы формирования магнитного подвеса, направления технологического развития и конструктивные особенности различных типов систем.

Выполнен анализ перспектив применения магнитолевитационных конвейеров для повышения эффективности транспортных процессов в горной промышленности с учётом существующих ограничений традиционных ленточных конвейеров, связанных с износом оборудования, ограничением скорости транспортирования и эксплуатационной производительности.

Показано, что наиболее перспективным направлением создания систем магнитного подвеса ленточных конвейеров для условий горного производства являются решения на основе постоянных магнитов, обеспечивающие минимальное энергопотребление, возможность управления конфигурацией магнитного поля и устойчивость к внешним эксплуатационным воздействиям.

Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения магнитолевитационных конвейерных систем для повышения надёжности, безопасности и экономической эффективности транспортирования горной массы. Вместе с тем установлена необходимость дальнейших исследований, направленных на обоснование технико-экономических параметров промышленного внедрения данных технологий.

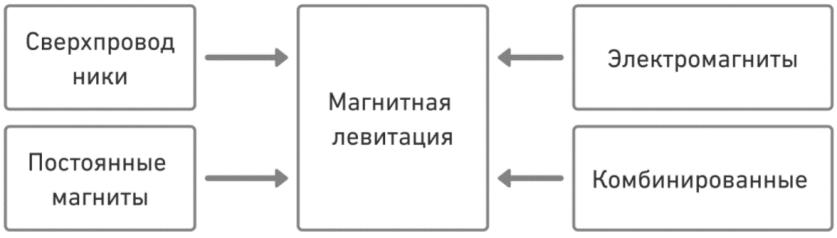



**Рисунок 3 - Способы создания магнитной левитации**

## *ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ*

**Шепелева С.А.** (shsa.fiz@kuzstu.ru), **Дырдин В.В.** (vvd1941@live.ru), **Николаев Ю.А.** (nikolaevjua@kuzstu.ru)

**Публикации:**

1. Шепелева С.А., Дырдин В.В. и др. Удельная энергия разрушения и газовыделение из угля выбросоопасных пластов при его разрушении до частиц определенного размера / С.А.

Шепелева, В.В. Дырдин, Ю.А. Николаев, В.Г. Михайлов, А.А. Трубицын // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 4. – С. 14-20. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-4-14-20.

2. Шепелева С.А., Дырдин В.В., Киряева Т.А. Методика расчета количества газа в микропоровой структуре угля // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – № 4. – С. 485-491.

Разработаны экспериментальное устройство для механического воздействия на пробу угля посредством сбрасывания груза заданной массы с регулируемой высоты и методика определения удельной энергии разрушения каменного угля. Проведены экспериментальные исследования разрушения образцов угля, отобранных из пласта, опасного по внезапным выбросам угля и газа.

По результатам экспериментов установлена зависимость удельной энергии разрушения от средневзвешенного радиуса образующихся частиц угля (рисунок 4), что позволяет количественно оценивать энергоёмкость процесса дезинтеграции угольного массива.

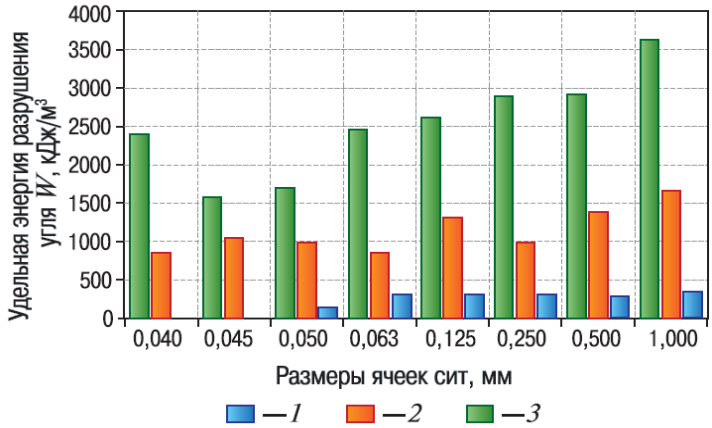



**Рисунок 4 – Распределение удельной энергии разрушения угля до частиц определенного размера: 1 – цикл № 1, число сбрасываний за цикл *N*=5; 2 – цикл № 4, *N*=5; 3 – цикл № 8, *N*=5**

Разработана методика прогнозирования максимального газовыделения при разрушении угля до частиц заданного размера. Установлено, что метан, локализованный в микропоровом пространстве угля и находящийся в сорбированном состоянии, выделяется преимущественно при механическом разрушении его структуры.

Показано, что с учётом дисперсного состава угля, природной газоносности пласта и распределения пор по размерам возможно расчетное определение потенциального объёма газовыделения на конкретном участке пласта. Полученные результаты создают основу для обоснования профилактических мероприятий по предупреждению внезапных выбросов угля и газа и повышения безопасности подземной разработки месторождений.

В рамках деятельности Научного центра «Цифровые технологии» активно развивается кооперация по НИОКТР с машиностроительными предприятиями Кузбасса. Так, в частности выполнены: энерго-кинематический расчет редуктора, геометрические и силовые расчеты зубчатых зацеплений, расчеты на допустимые радиальные нагрузки подшипников, прочностные расчеты деталей. Разработаны электронные модели редукторов и деталей редукторов. Проведены расчеты размерных цепей. Разработана конструкторская документация (сборочные чертежи, чертежи деталей и спецификации).

Изготовлен и испытан опытный образец редуктора B3SH, габарита №5, разработана конструкторская документация и изготовлен опытный образец габарита №12 и №10 для ленточных конвейеров.

Реализован проект по обратному проектированию деталей дробилки, модель MMD 850 с изготовлением изделия. Проведены проекты по обратному проектированию деталей системы защиты ковшей экскаваторов, сборочных единиц механизированных крепей.

Разработаны грузовые платформы для опытных образцов карьерных самосвалов «Юпитер 220» и «Юпитер 240», а также опытные образцы платформы самосвальной карьерного самосвала. В 2025 году изготовлена платформ «Юпитер 240». Изготовлены опытные образцы гидроцилиндров подъема самосвальной платформы карьерного самосвала «Юпи-

тер 220» и «Юпитер 240». Изготовлены опытные образцы мотор-колес карьерных самосвалов «Юпитер 220», «Юпитер 240».

## 2.23. ИНСТИТУТ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

Исследования в области горных наук в Институте природопользования НАН Беларуси охватывают вопросы углубленного изучения строения земной коры и литосферы, геодинамики, тектоники, региональной геологии, геоэкологии и геотехнологии. Традиционно сильным направлением исследований института являются работы в области добычи и глубокой переработки торфа и сапропеля. Комплексные исследования минерально-сырьевых торфяных и сапропелевых ресурсов выявили широкие перспективы их использования в различных отраслях экономики. Разработанные технологии переработки позволили создать технологические основы производства новых материалов и препаратов для использования в сельском хозяйстве, топливной энергетике, химико-технологическом, природоохранном, бальнеологическом и медицинском направлениях. Исследования последних лет направлены на:

выявление механизмов формирования и закономерностей пространственной изменчивости запасов торфа и сапропеля, разработку научных основ сырьевого обеспечения комплексного использования торфяных и сапропелевых ресурсов;

научное обоснование методов подготовки и модификации торфа и сапропеля для повышения качества продукции комплексной глубокой переработки;

оценку влияния механодеструкции и ультразвукового воздействия на изменения структуры и физико-химических свойств торфа, сапропеля и их смесей с целью повышения биологической активности продукции;

исследование процессов переноса влаги при сушке сапропеля в полевых условиях, разработку методов расчета ее продолжительности при изменчивости природных и технологических факторов;

разработку технологических режимов производства высококачественного кускового торфа как сырья для получения активных углей с заданными прочностными и сорбционными свойствами.

Особое внимание в работах института отводится сапропелю, который является ценным природным ресурсом и традиционно используется в Республике Беларусь для создания разнообразной продукции сельскохозяйственного, промышленного и медицинского профиля. Эффективное использование этого ресурса возможно при внедрении современных технологий его добычи.

Выполненные ранее исследования по определению запасов, типологического состава и специфики размещения озерного и подстилающего торф сапропеля показали, что примерно каждое третье торфяное месторождение на территории республики подстилается сапропелем, что свидетельствует об озерной стадии в его развитии [1]. Всего в Беларуси выявлено 1256 торфяных месторождений с сапропелем. Суммарные запасы сапропеля здесь составляют около 1,1 млрд $м^3$ [2].

В перечне перспективных для освоения сапропелевых месторождений в озерах и торфяниках насчитывается 95 объектов. Это месторождения, которые могут или уже реально вовлечены в хозяйственную деятельность по причине детально изученных и утвержденных балансовых запасов, имеющейся логистической инфраструктуры для организации разработки сырья по гидромеханизированной или экскаваторной технологии, доказанной в ходе детальной разведки рентабельности и целесообразности освоения имеющихся запасов сапропеля. Выделенные месторождения характеризуются благоприятными социальными и экономическими условиями для коммерческой реализации разработки сапропеля и приемлемыми для этого юридическими, нормативными и природоохранными условиями. Данные месторождения квалифицированы высокой степенью достоверности геологической информации о запасах и возможностью их извлечения в связи с благоприятными горно-геологическими условиями залегания, что подтверждается тем, что 47 озер из данного перечня ранее находились в разработке и в отдельные годы годовая суммарная добыча составляла более 1 млн т.

Рассчитанная в пределах административных областей и районов на основе данных о балансовых запасах перспективных месторождений как элементов национального богатства Республики Беларусь стоимость ресурсов сапропеля на 01.12.2025 по чистому дисконтированному доходу составляет 1,18 млрд долл. США [3].

В 2025 г. Институтом природопользования в рамках государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» и государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2021–2025 годы научно обоснованы, разработаны и испытаны новые технические средства и технологические решения, направленные на создание нового скважинного способа добычи сапропеля, залегающего под слоем торфа.

Разработка залегающего под торфом сапропеля по существующим технологиям имеет ряд существенных недостатков, что снижает технико-экономические показатели его добычи. Для извлечения сапропеля на торфяном месторождении (участке) необходимо провести осушительные мероприятия, свести древесную и кустарниковую растительность, удалить прикрывающий сапропель слой торфа, что приводит к значительному удорожанию сапропелевого сырья.

В ходе исследований выработаны современные требования к новым способам освоения месторождений сапропеля. Это совместная добыча сапропеля и торфосапропеля, возможность работы на неосушенных торфяных месторождениях, селективность извлечения сапропеля и торфосапропеля, круглогодичность проведения работ, независимость от погодных условий, совмещение технологических операций, замена многооперационных процессов на малооперационные, снижение количества задействованной техники и использование выпускаемого промышленного оборудования, поточность, а не цикличность технологических операций, применение универсальных транспортных средств.

Выполнение изложенных выше требований возможно при реализации скважинной гидродобычи сапропеля и торфосапропеля. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых впервые предложена В.Ж. Аренсом [4]. Современной разновидностью гидромеханизации добычи торфа и сапропеля на осушенных и находящихся в естественном состоянии месторождениях является метод скважинной гидродобычи [5-7], который осуществляется размывом отдельных генетических слоев залежи тонкими струями воды высокого давления с одновременным засасыванием получаемой пульпы (гидромассы) и дальнейшим транспортированием ее по трубопроводам на сушку или участок переработки (рисунок).

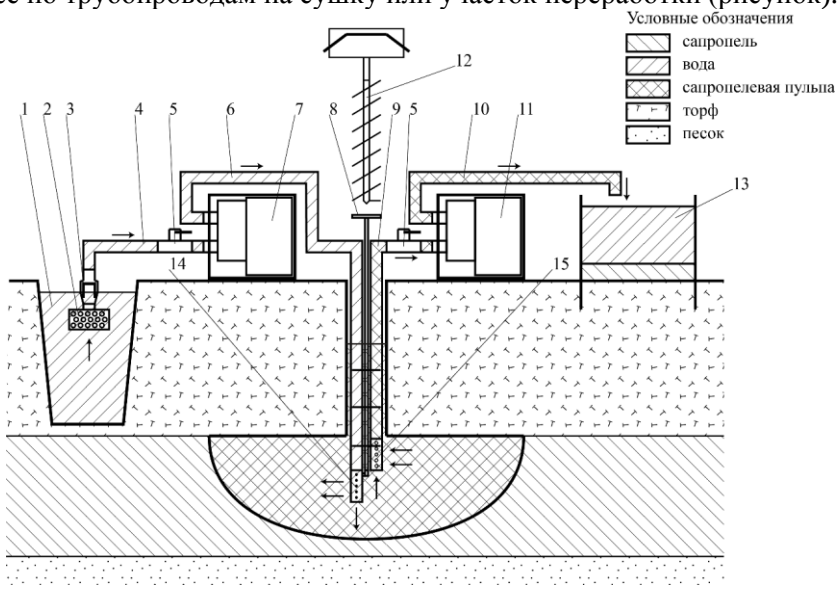



**Рисунок – Принципиальная схема экспериментальной установки для скважинной добычи сапропеля из-под торфа: 1 – водоём; 2 – фильтр; 3 – клапан обратный управляемый; 4 – рукав всасывающий для воды; 5 – кран шаровый; 6 – рукав нагнетающий для воды; 7 – мотопомпа высоконапорная; 8 – штанга управляющая; 9 – рукав всасывающий для пульпы; 10 – пульпопровод транспортирующий; 11 – мотопомпа грязевая; 12 – мотобур; 13 – емкость для обезвоживания (геотекстильный контейнер); 14 – устройство для размыва сапропеля; 15 – устройство для забора сапропелевой пульпы**

На выбранном для проверки возможности добычи сапропеля из-под торфа скважинным способом опытном участке торфяного месторождения Гала-Ковалевское Минской области запасы торфа значительно выработаны филиалом «Торфобрикетный завод «Сергеевичское» УП «Мингаз». Работы по добыче торфа фрезерным способом на участке прекращены. По данным изысканий средняя мощность торфа и сапропеля на участке составляет соответственно 0,86 м и 1,3 м. Грунтовые воды находятся на уровне 0,7 м, средняя влажность торфа 86%. Избыточно увлажненная торфо-сапропелевая залежь имеет низкие (на уровне 8-25 кПа) прочностные характеристики и оставшийся слой торфяной залежи вследствие низкой несущей способности не обеспечивает достаточную проходимость технологического оборудования. Присутствие сапропеля в наибольшей степени способствует оползневым процессам залежей торфа. Торфяная залежь обладает волокнистым каркасом, имеющим сцепление между отдельными агрегатами и ассоциатами, что обуславливает определенную несущую способность торфяной залежи. В целом состояние участка достаточно типично для выработанного торфяника, где исключено дальнейшее сельскохозяйственное и лесохозяйственное его использование.

Установлено, что для работы на торфяной залежи, подстилаемой органическим сапропелем, с применением технологического оборудования по добыче сапропеля с использованием экскаваторной или тракторной техники мощность сапропелевого слоя должна быть не менее 1,4 м. При работе экскаватора на торфяной залежи, подстилаемой карбонатным сапропелем, слой торфа для приемлемой проходимости машин может составлять 0,5-0,7 м. Для залежей сапропеля другого состава норма осушения перекрывающего торфа должна быть 0,8-1,0 м. Влажность верхнего слоя торфа для надежной проходимости оборудования должна быть не более 78%, а предельное напряжение сдвига торфа в поверхностном слое на глубине 0,0-0,25 м больше 20 кПа. Данные показатели по проходимости оборудования по торфяной залежи с подстилающим сапропелем заложены в критерии выбора технологий разработки торфоподстилающего сапропеля (таблица).

Таблица

**Критерии выбора технологий разработки сапропеля из-под торфа**

| Технология | Норма осушения, м | Мощность слоя торфа над сапропелем, м | | Средняя влажность торфа, % | Общая мощность торфа и сапропеля, м | | Тип разрабатываемого сапропеля |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | органическим | карбонатным и кремнеземистым | | торф+ органич. сапропель | торф+ карбонат. сапропель | |
| Экскаваторная | 0,8-1,0 | ≥ 1,4 | ≥ 0,5-0,7 | ≤ 78 | ≤ 3,0 | ≤ 4,5 | все типы |
| Скважинная | 0,2-0,6 | 0,4-2,5 | | не лимитируется | не лимитируется | | органический малозольный |

Для скважинного способа добычи с технологическим оборудованием значительно меньшей массы норма осушения может составлять 0,2-0,6 м, минимальная мощность оставшегося слоя торфа – 0,4 м, а максимальная зависит от длины шнека бурового оборудования и обычно составляет около 2 м. Средняя влажность торфа на поверхности залежи и общая мощность торфа и сапропеля для скважинного способа не лимитируются.

Размещенное на участке испытаний добывающее оборудование не требует прочного основания, а мобильная трубопроводная система из гибких труб позволяет выборочно подходить к размещению оборудования и скважин.

Проведенные на опытном участке успешные испытания показали возможность скважинной гидродобычи торфоподстилающего сапропеля. По сравнению с известными технологиями разработки способ более экологичен, практически не нарушает сложившееся гидрологическое и биосферное равновесие на заболоченной территории и на 80% сохраняет древесно-кустарничковый и моховой ярусы болотной растительности. Ввиду отсутствия дополнительного осушения торфяной залежи практически не происходит увеличения эмиссии парниковых газов, полностью предотвращается опасность возникновения торфяных пожаров на стадии добычи сапропеля и после нее.

Технология скважинной гидромеханизированной добычи залегающего под торфом сапропеля позволяет значительно сократить производственные затраты как на стадии освоения

месторождения частичным исключением этапов болотно-подготовительных работ, так и на стадии его эксплуатации за счет применения ресурсосберегающего трубопроводного транспорта подачи сапропеля на участок сушки, обезвоживания или непосредственно на переработку. Разработка позволит существенно, в 2,5-3 раза, сократить расходы на болотно-подготовительные работы при создании участка по добыче сапропеля по новой технологии. Окупаемость капитальных затрат при создании участка по скважинной добыче сапропеля составит менее одного года. Металлоемкость технологии снижена в 6-7 раз по сравнению с известным российским аналогом, а капитальные вложения – в 5 раз.

По сравнению с существующими способами разработки такого рода месторождений предлагаемый способ добычи более экологичен, так как практически не нарушает сложившееся гидрологическое и биосферное равновесие на заболоченной территории, ввиду отсутствия дополнительного осушения торфяной залежи практически не происходит увеличения эмиссии парниковых газов, на 80% сохраняется древесно-кустарничковый и моховой ярусы болотной растительности, коэффициент использования запасов сапропеля возрастает с 0,6 до 0,8, полностью предотвращается опасность возникновения торфяных пожаров на стадии добычи сапропеля и после нее.

Таким образом, предлагаемый новый способ гидродобычи сапропеля может занять собственную нишу среди направлений хозяйственного освоения выбывших из эксплуатации торфяных месторождений.

**Библиография**

1. Курзо Б.В. Закономерности формирования и проблемы использования сапропеля. – Минск: Бел. наука, 2005. – 224 с.

2. Гайдукевич О.М., Курзо Б.В., Кунцевич В.Б., Кляуззе И.В., Макаренко Т.И., Ворона М.В., Татков А.Ю., Сорокин А.И. Результаты научных и прикладных исследований в области генезиса, оценки ресурсов, добычи и переработки торфа и сапропеля. // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 33-52.

3. Гайдукевич О.М., Курзо Б.В., Сорокин А.И. Оценка запасов сапропеля в составе национального богатства Республики Беларусь. // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 126-136.

4. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых. / В.Ж. Аренс, Н.И. Бабичев [и др.]. – М.: Горная книга, 2007. – 291 с.

5. Косов В.И., Золотухин А.П. От геоэкологии до нанотехнологий. Композитные строительные и топливно-энергетические материалы из органогенных горных пород и отходов. – СПб., 2010. – 368 с.

6. Добрецов В.Б., Лигоцкий Д.Н., Зайцев В.А. Гидромеханизированная разработка донных озерных отложений. / Санкт-Петербургский гос. горный ин-т им. Г.В. Плеханова (техн. ун-т). – СПб., 1995. – 76 с.

7. Богатов Б.А., Войтенко В.С., Киреев А.М. Перспективы скважинной добычи полезных ископаемых в Беларуси. – Минск: Технопринт, 2004. – 257 с.

**Валерий Николаевич Захаров**
**Александр Германович Красавин**

# ОТЧЕТ О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНОГО СОВЕТА РАН И КРАТКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ УЧРЕЖДЕНИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ ГОРНОГО ПРОФИЛЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И СТРАН СНГ В 2025 ГОДУ

*Техническое редактирование и верстка Н.А. Вдовина*

---

Подписано в печать с оригинал-макета 10.06.2026 г. Формат 60x84 $^{1}/_{8}$. Бумага «Mega Copy Office». Печать офсетная. Набор компьютерный. Объем 17,50 п. л. Тираж 100 экз. Заказ №277.

---

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН
111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

Издание ИПКОН РАН, 111020, Москва, Крюковский тупик, 4.