

Издается Санкт-Петербургским горным
университетом императрицы Екатерины II

С 1907 ГОДА

E-ISSN 2541-9404
ISSN 2411-3336

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



ТОМ 266

№ 2 • 2024

ИНДЕКСИРУЕТСЯ
SCOPUS (Q1)
WEB OF SCIENCE (ESCI)

WWW.PMI.SPMI.RU



Научный журнал «Записки Горного института» с 1907 года издается Санкт-Петербургским горным университетом императрицы Екатерины II – первым высшим техническим учебным заведением России, основанным в 1773 году Указом Екатерины II как воплощение идей Петра I и М.В.Ломоносова о подготовке инженеров для развития горнозаводского дела.

На базе Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II работает Международный центр компетенций в горнотехническом образовании под эгидой ЮНЕСКО, способствующий активному взаимодействию журнала с международным научным сообществом.

Цель журнала – создание информационного пространства, в котором отечественные и зарубежные ученые смогут представить результаты теоретических и эмпирических исследований, посвященных проблемам минерально-сырьевого комплекса. Журнал привлекает ведущих специалистов к публикации научных статей и содействует их продвижению в международное научное пространство.

Публикуемые статьи освещают вопросы геологии, геотехнологии и инженерной геологии, горного и нефтегазового дела, обогащения, энергетики, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности, экономики сырьевых отраслей.

Журнал индексируется Scopus (Q1), Web of Science Core Collection (ESCI), DOAJ Seal, RSCI, GeoRef, Google Scholar, РИНЦ, входит в белый список Министерства образования и науки РФ, приравнен к журналам из перечня ВАК категории K1.

Журнал выходит 6 раз в год. Средний срок до первого решения – 1 месяц.

Статьи публикуются на безвозмездной основе. Перевод предоставляется автором.

На обложке экспонат Горного музея – малахит – минерал насыщенного зеленого цвета благодаря наличию соединений меди. По выражению А.Е.Ферсмана, это «камень яркой, сочной, жизнерадостной и вместе с тем шелковисто-нежной зелени». Основным источником малахита являются месторождения Демократической Республики Конго, США и других стран, однако по цвету и красоте узоров малахит зарубежных месторождений не может сравниться с уральским.

Горный музей – третья в мире по величине естественно-научная экспозиция, имеет более 230 тысяч экспонатов, среди которых драгоценные металлы и камни, уникальные коллекции минералов, руд, горных пород, палеонтологических остатков, метеоритов, собрание моделей и макетов горной и горнозаводской техники, изделия камнерезного и ювелирного искусства.

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА



РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1907 года

ISSN 2411-3336
е-ISSN 2541-9404

Том 266

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • 2024

Учредитель Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

В.С.Литвиненко, д-р техн. наук, профессор, академик Международной академии наук высшей школы, РАЕН, РАГН, МАНЭБ, ректор (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

С.Г.Скублов, д-р геол.-минерал. наук, профессор, член Российского минералогического общества, эксперт Российского научного фонда и РАН (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

С.В.Синявина, канд. техн. наук, директор издательского дома «Записки Горного института» (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

О.Е.Аксютин, д-р техн. наук, чл.-кор. РАН, член правления, начальник департамента (ПАО «Газпром», Москва, Россия)

А.А.Барях, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, директор (Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь, Россия)

В.Н.Бричкин, д-р техн. наук, профессор, проректор по подготовке научных кадров (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

С.Г.Гендлер, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, зав. кафедрой безопасности производств (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

О.М.Ермилов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, РАГН, зам. главного инженера по науке (ООО «Газпром добыча Надым» ПАО «Газпром», Надым, Россия)

В.П.Зубов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

Г.Б.Клейнер, д-р экон. наук, профессор, чл.-кор. РАН, заместитель директора (Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия)

А.В.Козлов, д-р геол.-минерал. наук, член Российского минералогического общества, зав. кафедрой геологии и разведки месторождений полезных ископаемых (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

Ю.Б.Марин, д-р геол.-минерал. наук, профессор, чл.-кор. РАН, почетный президент (Российское минералогическое общество, Санкт-Петербург, Россия)

В.А.Моренов, канд. техн. наук, доцент (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

М.А.Пашкевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой геоэкологии (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

Т.В.Пономаренко, д-р экон. наук, профессор (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

О.М.Прищепа, д-р геол.-минерал. наук, академик РАЕН, зав. кафедрой геологии нефти и газа (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

А.Г.Протосеня, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительства горных предприятий и подземных сооружений (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

В.Е.Сомов, д-р экон. наук, канд. техн. наук, академик РАЕН, директор (ООО «Кинеш», Кириши, Россия)

А.А.Тронин, д-р геол.-минерал. наук, директор (Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, Россия)

В.Л.Трушко, д-р техн. наук, профессор, академик Международной академии наук высшей школы, РАЕН, РАГН, МАНЭБ, зав. кафедрой механики (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

П.С.Цветков, канд. экон. наук, начальник управления по публикационной деятельности (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

А.Е.Череповицын, д-р экон. наук, профессор, зав. кафедрой экономики, организации и управления (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

Я.Э.Шклярский, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой общей электротехники (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

В.А.Шпенст, д-р техн. наук, профессор, декан энергетического факультета (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

Олег Анцуткин, профессор (Технологический университет, Лулео, Швеция)

Габриэль Вейсс, д-р наук, профессор, проректор по научной и исследовательской деятельности (Технический университет, Кошице, Словакия)

Хал Гургенчи, профессор (Школа горного машиностроения Квинслендского университета, Брисбен, Австралия)

Эдвин Кроке, д-р наук, профессор (Институт неорганической химии Фрайбергской горной академии, Фрайберг, Германия)

Чжоу Фубао, д-р наук, профессор, вице-президент (Китайский горно-технологический университет, Пекин, Китай)

Чжао Юэмин, д-р наук, профессор, директор научного комитета (Китайский горно-технологический университет, Пекин, Китай)

Разделы

•Геология •Геотехнология и инженерная геология •Экономика сырьевых отраслей •Энергетика

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-70453 от 20.07.2017

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.02

Редакция: начальник РИЦ В.Л.Лебедев, редакторы Е.С.Дрибинская, М.Г.Хачирова, Л.В.Набиева
Компьютерная верстка Н.Н.Сёдых, В.И.Каширина, Е.А.Головинская

© Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, 2024

Подписано к печати 25.04.2024. Формат 60 × 84/8. Уч.-изд.л. 41.
Тираж 300 экз. Заказ 190. Отпечатано в РИЦ СПбГУ.
Цена свободная.

Адрес учредителя и редакции: 21-я линия, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106
Тел. +7 (812) 328-8416; факс +7 (812) 327-7359;
E-mail: pmi@spmi.ru Сайт журнала: pmi.spmi.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Геология

Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В., Забродин С.М. Оценка устойчивости породного массива в районе подземной исследовательской лаборатории (Нижнеканский массив, участок Енисейский)	167
Ардалкар Р.М., Салунхе Й.Д., Гаонкар М.П., Мане С.Н., Гаусас О.А., Десаи Ш.Н., Редди А.В.Р. Распределение радиационных дефектов по глубине в облученных алмазах: данные конфокальной микроспектроскопии	179
Гоев А.Г. Скоростное строение земной коры и верхней мантии Печенгского рудного района и сопредельных территорий в северо-западной части Лапландско-Кольского орогена методом функций приемника.....	188
Кожанов Д.Д., Большакова М.А. Оценка вклада докембрийских отложений в формировании нефтеносности восточной части Волго-Уральского бассейна по результатам моделирования	199
Савельев Д.Е., Сергеев С.Н., Макатов Д.К. Микроструктурные особенности хромититов и ультрамафитов месторождения Алмаз-Жемчужина (Кемпирсайский массив, Казахстан) по данным изучения методом дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD).....	218

Геотехнология и инженерная геология

Виноградов Ю.И., Хохлов С.В., Зигангиров Р.Р., Мифтахов А.А., Суворов Ю.И. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением	231
Горланов Е.С., Леонтьев Л.И. Направления технологического развития алюминиевых электролизеров.....	246
Данильев С.М., Секерина Д.Д., Данильева Н.А. Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных.....	260
Ермилов О.М., Джалябов А.А., Васильев Г.Г., Леонович И.А. Моделирование эффективности работы сезоннодействующих охлаждающих устройств при изменении статистического распределения погодных условий.....	272
Имашев А.Ж., Суимбаева А.М., Мусин А.А. Прогнозная оценка разубоживания руды при отработке маломощных крутопадающих залежей системой поэтажных штреков.....	283
Предеин А.А., Гаршина О.В., Мелехин А.А. Технология ликвидации поглощений сшивающимся тампонажным материалом на основе цемента и сшитого полимера.....	295
Тарасов В.В., Антуков В.Н., Иванов О.В. Комплексная оценка деформирования системы жесткой армировки при конвергенции крепи шахтного ствола в неустойчивых породах.....	305
Цупкина М.В., Кирков А.Е., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н. Обоснование необходимости улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы на основе анализа данных об отработке сложноструктурных блоков	316
Чхэн Ван, Дань Ван, Цэнциен Чхэн, Чхэнлун Дуань, Чхэньян Чжоу. Изучение механизма тонкослойной сушки и диффузии низкосортного угля Внутренней Монголии и провинции Юньнань	326



Научная статья

Оценка устойчивости породного массива в районе подземной исследовательской лаборатории (Нижнеканский массив, участок Енисейский)

Д.Ж.Акматов^{1,2}, А.И.Маневич^{1,2}, В.Н.Татаринов^{1,3}✉, Р.В.Шевчук^{1,2,3}, С.М.Забродин¹¹ Геофизический центр РАН, Москва, Россия² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия³ Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В., Забродин С.М. Оценка устойчивости породного массива в районе подземной исследовательской лаборатории (Нижнеканский массив, участок Енисейский) // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 167-178. EDN ECCWUV

Аннотация. Приведены результаты исследования геодинамических и горно-геологических условий участка Енисейский (Красноярский край), выбранного для строительства подземной исследовательской лаборатории. Лаборатория создается на глубине 500 м с целью обоснования пригодности породного массива для захоронения высокоактивных радиоактивных отходов. Породы представлены слаботрещиноватыми гнейсами, гранитами и дайками метадолеритов. Для оценки устойчивости массива выполнены полевые наблюдения на коренных обнажениях пород, включающие определение показателей качества массива, измерение трещиноватости пород и рейтинговую классификацию устойчивости по методу Н.Бартона, а также ГНСС-наблюдения за деформациями земной поверхности. Эти данные использованы при разработке трехмерной структурной модели, включающей литологию, разрывные нарушения, интрузивные тела, упруго-прочностные свойства пород, размеры зон динамического влияния разломов. Модель станет базой для задания граничных условий и построения трехмерных вариационных моделей напряженно-деформированного состояния, выявления зон концентрации опасных напряжений, а также планирования натурных геомеханических экспериментов в горных выработках подземной лаборатории. Полученные значения модернизированного индекса Q^R для основных типов пород позволили их отнести к устойчивым и среднеустойчивым, что соответствует крепким и очень крепким породам по шкале Бартона и рейтингу массива по геомеханической классификации.

Ключевые слова: геоэкологическая безопасность; высокоактивные радиоактивные отходы; подземная исследовательская лаборатория; структурно-тектоническая модель; тектонический блок; разлом; рейтинговые оценки качества массива

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.

Поступила: 29.10.2022

Принята: 25.10.2023

Онлайн: 26.02.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. В России накоплен огромный объем радиоактивных отходов (РАО), хранение которых на земной поверхности представляет чрезвычайную опасность для населения и окружающей среды. Наиболее опасными являются высокоактивные РАО, содержащие радионуклиды с периодом полураспада более 10 тыс. лет. На современном уровне научно-технического прогресса самым надежным способом удаления их из биосферы является захоронение РАО в глубокие непроницаемые геологические формации (кристаллические породы, соли, туфы). Фундаментальным условием обеспечения геоэкологической безопасности захоронения РАО являются изоляционные способности породного массива и слабоактивный геодинамический режим территории. Концепция безопасности геологических хранилищ РАО основана на использовании принципа многобарьерности, когда изоляцию РАО обеспечивает комплекс инженерных и природных барьеров. Каждый из барьеров выполняет свои функции в течение определенного времени. Очевидно, что



самым долговечным является геологический барьер. Однако тектонические движения (медленные криповые и быстрые сейсмические) могут привести к разрушению структурно-тектонического блока (дальняя зона) с размещенными в нем выработками пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО). Не меньшую опасность представляют геомеханические процессы, приводящие к образованию высокоградиентных зон концентрации напряжений или ослаблению приконтурной части (ближней зоны) горных выработок ПГЗРО.

В 2022 г. в гранитогнейсовых породах Нижнеканского массива в 20 км севернее Красноярска началось строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) для принятия окончательного решения о возможности строительства ПГЗРО [1, 2]. Исследования в ПИЛ ведутся во многих развитых странах, использующих ядерные технологии: Швеции (Äspö), Финляндии (Onkalo), Швейцарии (Grimsel), Германии (Горлебен) [3-5], Японии (Mizunami), Китае (Бэйшань) и др. [6, 7]. В России разрабатывается программа исследований для ПИЛ Нижнеканского массива. Немаловажная часть этих исследований – геомеханические эксперименты. Для их проведения планируются специальные камеры и глубокие скважины [8-11]. Проектные решения по организации систем наблюдений включают обоснование методов и методик измерений оптимальных мест для датчиков и проведения натурных экспериментов, выбор необходимой аппаратуры и технических средств, взаимосвязь с другими экспериментами, алгоритмы обработки результатов наблюдений и т.д. [12].

В статье приведены результаты разработки трехмерной геомеханической модели породного массива на участке Енисейский как начальной стадии этих работ. Предполагается, что на ее основе будут планироваться схемы расположения камер и скважин для натурных геомеханических экспериментов, размещения датчиков сети мониторинга и задаваться граничные условия для численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) пород в пределах участка.

Методы. На рис. 1 приведен вариант объемно-планировочного решения расположения исследовательских выработок в ПИЛ на конец 2018 г. Лаборатория располагается на глубине 500 м от земной поверхности и включает три шахтных ствола (вентиляционный, эксплуатационный для спуска РАО и персонала), систему горизонтальных выработок, исследовательские камеры и скважины. Эта схема носит предварительный характер и будет уточняться в зависимости от выявления особенностей геологического строения массива [1]. В первую очередь еще

до проходки выработок должна быть разработана классификация устойчивости вмещающих пород, а также определены их критические свойства, влияющие как на долгосрочную стабильность ПГЗРО, так и обеспечение безопасных условий ведения горных работ на глубине 500 м при проходке выработок. При этом должны учитываться следующие основные параметры [13-15].

Зоны влияния разломов. Разломные зоны являются потенциальными путями для миграции нуклидов за пределы санитарной зоны ПГЗРО [16-18]. Зоны динамического влияния разломов представляют собой сильно нарушенные по отношению к внутренним частям структурных блоков породы. Если они пересекают площадку, то могут быть триггерами

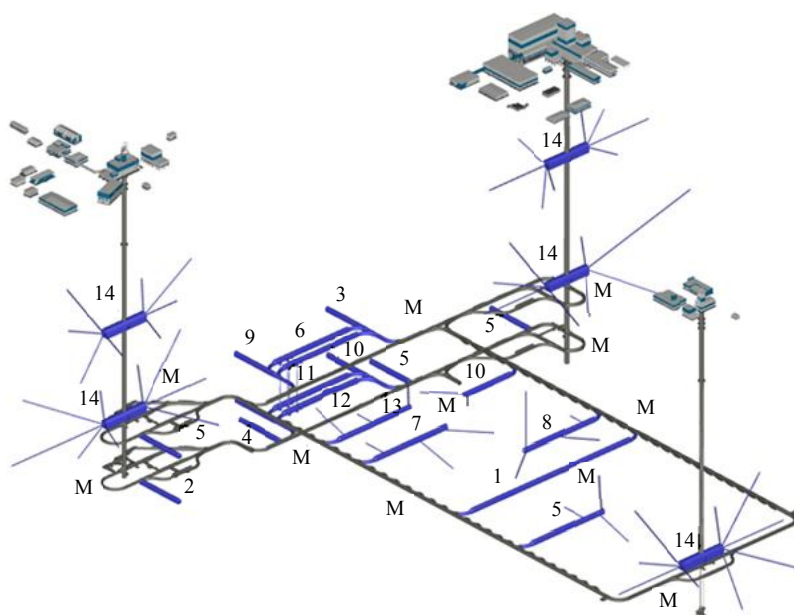


Рис. 1. Принципиальная схема ПИЛ (синим цветом выделены исследовательские выработки), цифрами – планируемые эксперименты по геомиграции (1-3); геохимии (4); геомеханике (5); инженерным барьерам (6-8); микробиологии (9); газовойделению (10); отработке технологии упаковки РАО (11, 12); прототипу захоронения (13); гидрогеологии (14); М – станции мониторинга



опасных геомеханических процессов в приконтурной части выработок и каналами инфильтрации подземных вод к контейнерам с РАО [19, 20].

Разломы классифицируются на три категории в зависимости от их длины [13, 14]:

- класс *A* – разломы с длиной в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен километров;
- класс *B* – разломы с длиной от нескольких километров до десятков километров;
- класс *C* – разломы, длина которых измеряется в метрах или сотнях метров.

Зона динамического влияния разломов в настоящей статье является довольно общим понятием, которое включает все типы трещиноватых зон. Ширина зоны динамического влияния для местных и локальных разломов рассчитывается согласно формуле, приведенной в работе Г.Г.Кочаряна [21],

$$F^W = kL, \quad (1)$$

где L – длина разлома, км; k – коэффициент, зависящий от масштаба и типа разрушения пород, диапазон изменения k от 0,1 до 0,2 для локальных и региональных разломов соответственно [22], некоторые авторы указывают меньшие значения k (до 10^{-4}).

Зонам разломов класса *A* запрещается захватывать строительную площадку ПГЗРО. Присутствие разломов класса *B* разрешено, но они не должны пересекать выработки, предназначенные для размещения РАО. Разломам класса *C* разрешается пересекать выработки, однако необходима рейтинговая оценка качества пород для принятия дополнительных мер.

Химический индекс подземных вод. Отражает основные химические свойства флюидов – кислотность, щелочность, содержание солей и других химических элементов, от которых зависит стойкость инженерных барьеров к коррозии. Химический индекс C_{chm}^R включает три параметра: TDS – содержание общих растворенных твердых веществ; pH – кислотность/щелочность; Cl – параметр, который указывает на концентрацию хлоридных ионов в воде. Значение суммарного химического индекса определяется в зависимости от состава подземных вод. При $6 < \text{pH} < 10$, $\text{TDS} < 50$ г/л, $\text{Cl} < 20$ г/л геохимическая обстановка вполне благоприятна и не снизит «качество» пород. Значение геохимического параметра определяется как 1,0. Если одно из этих требований не выполняется, то геохимическая обстановка считается в основном благоприятной и принимается значение 0,8. В противном случае геохимическая среда рассматривается как «малопригодная» и ей присваивается достаточно низкое значение 0,1.

Тепловой эффект. Вследствие распада радионуклидов вмещающие породы будут подвергаться воздействию повышенных температур длительный период времени (по различным оценкам порядка 120-150 °C в течение более 150 лет). В условиях одновременного воздействия горного давления и тектонических напряжений это может оказать существенное влияние на устойчивость пород. Свойства пород рассматриваются в двух аспектах. Величина теплопроводности может влиять на объемно-планировочные решения выработок ПГЗРО. Другой аспект – изменение физико-механических свойств под воздействием высокой температуры. Экспериментальные исследования в работе [23] подтвердили, что высокая температура может привести к значительному снижению механической прочности горных пород. В данной статье индекс теплового эффекта определяется как отношение прочности при одноосном сжатии при максимальной температуре $\sigma_{cd}^{T_{\max}}$ к значению прочности при комнатной температуре C_{cd} :

$$C_T^R = \frac{\sigma_{cd}^{T_{\max}}}{C_{cd}}. \quad (2)$$

Предлагается использовать средневзвешенное значение индекса теплового эффекта в случае, если на исследуемом участке отмечается несколько типов пород. Например, если присутствуют гранит и метаморфическая порода (гнейсы) в соотношении 70 и 30 % соответственно, то индекс рассчитывается с использованием формулы:

$$C_T^R = 0,7C_{T_{gran}}^R + 0,3C_{T_{metam}}^R. \quad (3)$$



Q-индекс по Н.Бартону. Согласно исследованиям, проведенным в подземной лаборатории «Äspö» (Швеция) [6], выявлено, что параметры коэффициента релаксации напряжений (SRF) и обводненности пород J_w не являются подходящими для оценки устойчивости массива при подземной изоляции РАО [24, 25]. Поэтому в системе оценки пригодности массива пород для захоронения РАО принято использовать произведение четырех параметров:

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a}, \quad (4)$$

где RQD – индекс качества горных пород; J_n – количество систем трещин; J_r – показатель шероховатости поверхностей трещин (шероховатость наиболее неблагоприятного разрыва); J_a – выветренность и изменение состояния трещин.

Индекс качества пород, характеризующий их структурную нарушенность, рассчитывается по формуле [26-28]:

$$RQD = \frac{L_\Sigma}{L} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где L_Σ – сумма длин расстояний между естественными трещинами длиной более 10 см, м.

Индекс гидравлической проводимости пород. Гидравлическая проводимость (скорость жидкости через поры и трещины) играет важную роль, так как в случае разрушения инженерных барьеров определяет скорость выноса радионуклидов в окружающую среду (в данном случае в р. Енисей). Гидравлическая проводимость зависит от проницаемости, насыщения, плотности и вязкости жидкости, индекс определяется следующим образом:

$$J_w^R = \begin{cases} 1,0, & \text{если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) \geq 90 \%; \\ 0,7, & 70 \% \text{ если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) < 90 \%; \\ 0,3, & 30 \% \text{ если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) < 70 \%; \\ 0,1, & 70 \% \text{ если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) < 30 \%, \end{cases} \quad (6)$$

где K – удельная гидравлическая проводимость (или проницаемость) горных пород.

Индекс отношения прочности к напряжению. Механическая устойчивость выработок в основном зависит от соотношения прочности и действующих напряжений в массиве пород [26, 29]. Обычно это оценивается по отношению прочности при одноосном сжатии к максимальному главному напряжению. Это отношение используют в качестве коэффициента запаса прочности [30]. В соответствии с классификацией устойчивости Бартона он определяется по формуле

$$SRF^R = \begin{cases} 0,5, & \text{если } (\sigma_c / \sigma_1 > 5) \geq 90 \%; \\ 1,0, & 70 \% \text{ если } (\sigma_c / \sigma_1 > 5) < 90 \%; \\ 5,0, & 40 \% \text{ если } (\sigma_c / \sigma_1 > 5) < 70 \%; \\ 20, & \text{если } (\sigma_c / \sigma_1 > 5) < 40 \%, \end{cases} \quad (7)$$

где σ_c – прочность пород при одноосном сжатии; σ_1 – максимальное напряжение в массиве; $\sigma_c / \sigma_1 > 5$ – процент данных о соотношении прочности и напряжений.

В работе [31] представлена система классификации горных пород на основе Q -индекса по Н.Бартону, но адаптированная под особенности подземной изоляции РАО. Оценочный индекс пригодности вмещающих пород включает факторы теплового воздействия, химического состава подземных вод и водопроницаемость вмещаемого массива. Модернизированный индекс определяется формулой

$$Q^R = C_{chm}^R C_T^R Q' \frac{J_w^R}{SRF^R}. \quad (8)$$

Классификация породного массива по классу устойчивости приведена в табл.1.



Таблица 1

Категории массива горных пород по степени устойчивости

Q^R	Класс	Степень устойчивости	Категория устойчивости массива
[40, 1000]	I	Высокая	Устойчивый
[10, 40]	II	Средняя	Среднеустойчивый
[0, 10]	III	Низкая	Неустойчивый

Характеристика породного массива. Нижнеканский массив расположен в зоне аккреции, на контакте двух крупных геологических структур – Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты [32]. Выбранный для строительства ПИЛ участок Енисейский имеет размеры приблизительно 2×3 км и находится на северо-западе гранитоидного Нижнеканского массива. На рис.2

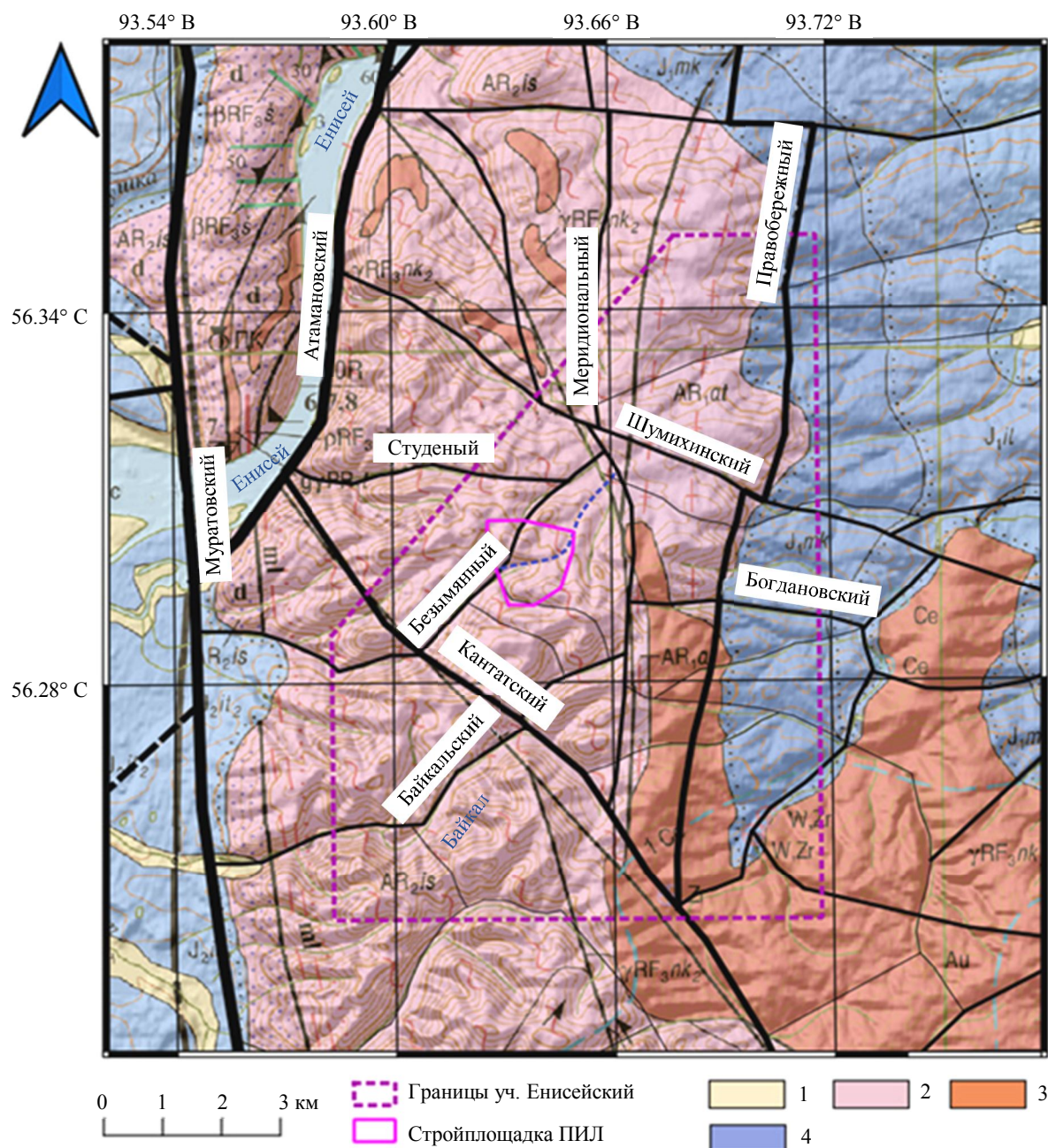


Рис.2. Структурно-тектоническая схема района. Черные линии – разломы: толстые – главные, средней толщины – региональные, тонкие – локальные, пунктирные – предполагаемые разломы

1 – аллювиальные отложения (галечники, пески); 2 – юрские отложения (песчаники, алевролиты, аргиллиты); 3 – ранние архейские гнейсы, кристаллосланцы атамановской серии; 4 – позднерифейские граниты биотитовые [33]

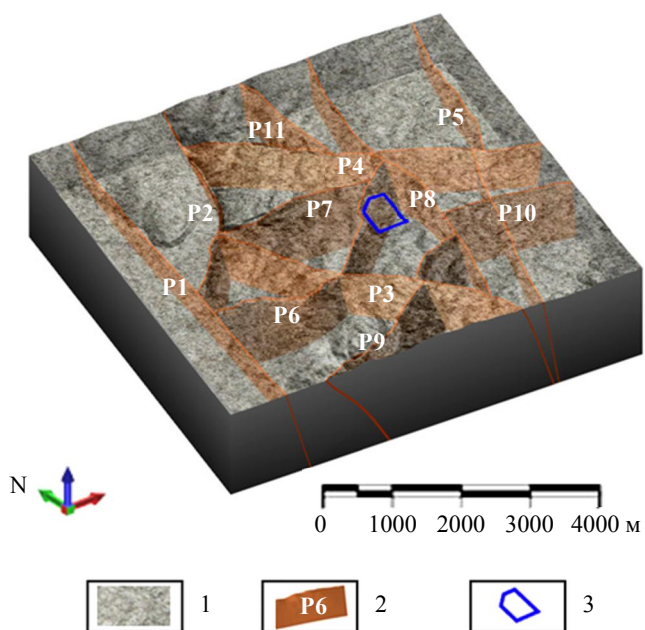


Рис.3. Трехмерная модель основных тектонических нарушений.

Разломы: P1 – Муратовский; P2 – Атамановский;
P3 – Кантатский; P4 – Шумихинский; P5 – Правобережный;
P6 – Безымянный; P7 – Студеный; P8 – Меридиональный;
P9 – Байкальский; P10 – Богдановский; P11 – № 1
1 – гнейс; 2 – разломы; 3 – контур площадки ПГЗРО

300 до 1000 м. Эти локальные разломы ориентированы на северо-восток, и их количество превышает 16. В соответствии с классификацией оценки пригодности, разломы класса *A* не достигают контур строительной площадки. Разлом класса *B* (Безымянный) пересекает строительную площадку, не достигая выработок ПГЗРО. Можно сделать вывод, что участок Енисейский оценивается как пригодный для строительства ПИЛ.

На участке Енисейский пробурено 17 скважин с отбором керна и выполнено определение физико-механических свойств горных пород (табл.2) [35]. По причине того, что документация керна для определения категорий устойчивости породных массивов не велась, в 2021-2022 гг. было выполнено геотехническое документирование скальных обнажений с целью определения степени нарушенности горных пород и оценки их устойчивости [33]. Статистическая обработка результатов показала, что трещины в зоне динамического влияния Муратовского разлома имеют северо-восточное направление (рис.4, *в*), Безымянного разлома – северо-восточное – юго-западное и юго-восточное – северо-западное (азимут $\sim 10^\circ$ и 130°) (рис.4, *з*). В отличие от гранитогнейсовых пород, дайковые комплексы метадолеритов менее трещиноваты [35].

показаны основные тектонические нарушения района [32]. Более детальная характеристика тектонических и геологических условий приведена в работах [9, 30-32, 34]. Правобережный и Шумихинский разломы разделяют участок Енисейский на три структурных блока. По геологическим данным, Правобережный разлом считается тектонически активным. По анализу морфологии рельефа выделяются локальные разломы и трещины. На расстоянии 2-3 км к западу от границы участка проходит активный Муратовский разлом, который многие геологи считают границей между Сибирской платформой и Западно-Сибирской плитой [8-9].

На основе разработанной классификации была построена 3D-модель участка, включающая 11 разломов различных классов. Трехмерная модель визуально показана на рис.3. Среди разломов два относятся к классу *A* и простираются более чем на 30 км. Они находятся в западной части исследуемой территории. В пределах строительной площадки ПИЛ выявлены разломы класса *C* длиной от

Таблица 2

Сводные физико-механические свойства горных пород на участке Енисейский

Характеристика	Породы	
	Гнейсы	Метадолериты
Объемный вес, т/м ³	2,75	2,91
Коэффициент Пуассона	0,27	0,29
Модуль упругости, МПа	$(7,0-7,7) \cdot 10^4$	$9,15 \cdot 10^4$
Модуль деформации, МПа	$5,9 \cdot 10^4$	$7,09 \cdot 10^4$
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	131,0	143,9
Предел прочности на растяжение, МПа	12,89	12,41
Предел прочности на сдвиг, МПа	57,15	99,6

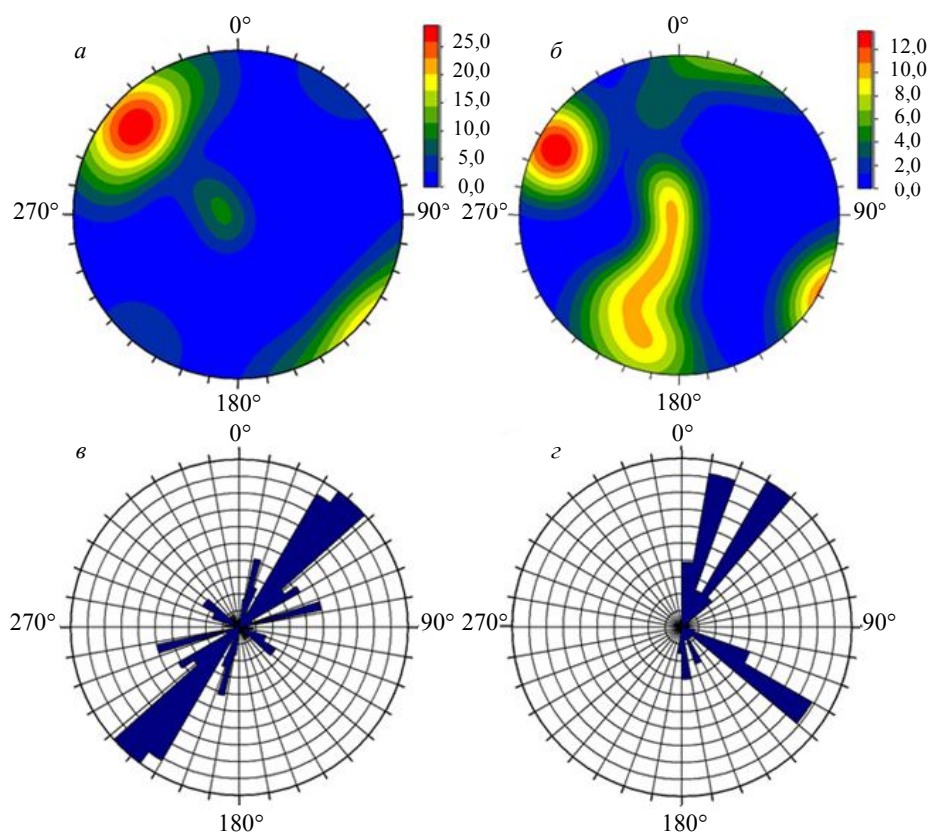


Рис.4. Стереогаммы трещиноватости пород Нижнеканского массива в зонах динамического влияния Муратовского (а) и Безымянного (б) разломов; роза-диаграмма трещиноватости в зонах динамического влияния Муратовского (в) и Безымянного (г) разломов

При задании граничных условий для моделирования полей напряжений очень важно правильное направление внешних тектонических усилий [36-39]. Результаты геолого-геофизических исследований показывают, что поле напряжений в районе характеризуется доминирующими напряжениями субгоризонтального сжатия по азимутам около 40° . Более детальное изучение современного НДС Нижнеканского массива приведено в работе [8]. По результатам анализа ориентации осей и скоростей деформаций, полученных средствами ГНСС, очевидно, что поле деформаций представляет собой весьма «мозаичную» картину (рис.5). Северная и восточная границы участка западнее от Правобережного разлома в основном характеризуются субмеридиональным растяжением. Западная граница участка, соответствующая оси Правобережного разлома, подвергается субмеридиональному сжатию и субширотному растяжению. Зона к северу от разлома Безымянный испытывает растяжение, в то время как блок, ограниченный Меркурьевским и Верхнешумихинским разломами, сжатие.

На расстоянии 3 км от участка Енисейский ранее были выполнены работы по оценке напряжений методом гидроразрыва. Они показали, что горизонтальное напряжение $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 13,5$ МПа, а вертикальное $\sigma_{zz} = 12$ МПа. В других работах [33, 40] отмечается, что напряжения в массиве составляют 21,4 МПа. Как видно, данные весьма противоречивые. При геотехнической документации скальных обнажений площадки выбирались равномерно в различных геологических условиях. Подробно изучалась зона динамического влияния Муратовского разлома, на расстоянии до 1 км от него были выполнены измерения на четырех геологических площадках. Еще три площадки были выбраны на удалении от местных тектонических нарушений – в массивах, не нарушенных интрузивными телами даек. Пять площадок исследований соответствовали разрывным нарушениям местного масштаба – Байкальский, Кантатский, Безымянный, Верхнешумихинский и Меркурьевский разломы. Еще четыре площадки описаны в ходе рекогносцировочных маршрутов,

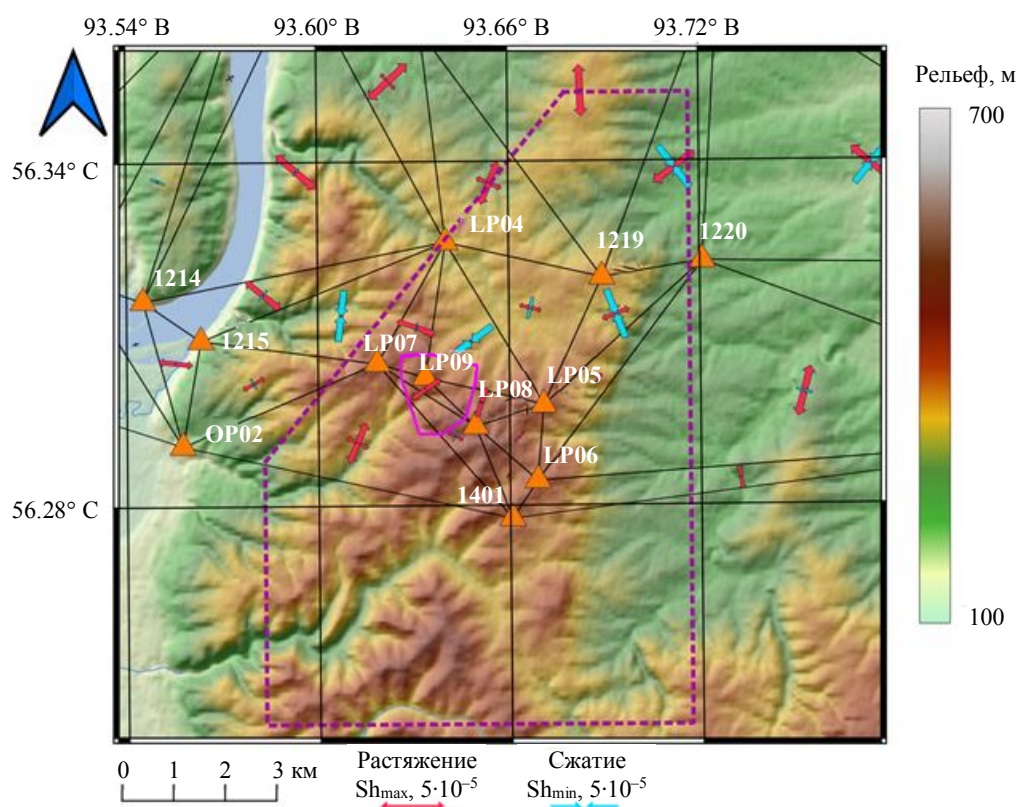


Рис.5. Главные оси и скорости горизонтальных деформаций, установленные по результатам наблюдений с использованием ГНСС за период с 2012 по 2021 г. [8]

в которых были зафиксированы интрузивные комплексы даек метадолеритов. Все данные обобщены по категориям устойчивости пород по величине Q^R и систематизированы в табл.3:

- категория 1 – 500-метровая зона динамического влияния Муратовского разлома. Породы состоят в основном из гранитов и гнейсов с прожилками кварца и дайки метадолеритов малой мощности;
- категория 2 – зоны динамического влияния разрывных нарушений местного масштаба. Породы выражены в основном гранитами и гнейсами с прожилками кварца дайки метадолеритов малой мощности;
- категория 3 – интрузивные комплексы, представленные дайками метадолеритов мощностью до 10-20 м;
- категория 4 – вне зоны динамического влияния разрывных нарушений. Породы выражены в основном гранитами и гнейсами.

Таблица 3

Классы устойчивости пород

Категория	Q'	C_{chm}^R	C_T^R	J_w^R	SRF	Q^R	Класс
1	13	1,0	0,80	1,0	0,5	20,8	II
2	86	1,0	0,88	1,0	0,5	151,4	I
3	22	1,0	0,87	0,8	0,5	30,6	II
4	68	1,0	0,85	0,7	0,5	80,9	I

Гидрохимические исследования показали: общая минерализация 50-450 мг/л, воды гидрокарбонатно-кальциевые [41], среднее значение pH = 8,1, общая жесткость не превышает 6,25 °Ж, содержание нитрат-иона ниже 3,76 мг/л, хлоридов – 0,9-7,5 мг/л. Следовательно, требования к геохимическим параметрам выполняются и геохимический параметр может быть принят как 1,0. Индекс



теплового эффекта принят $C_T^R = 0,88$ из анализа результатов физико-механических исследований и экспериментов в Китае [13]. Согласно работам [32, 42], коэффициент водопроницаемости для гранитогнейсовых пород Нижнеканского массива варьируется в диапазоне от 10^{-9} до 10^{-10} м/сут. Это означает, что они обладают низкой водопроводимостью. В соответствии с (6) величина J_W^R принимается равной 1,0. Конкретное значение соотношения прочности к главному напряжению, согласно (7), равно 6,2, следовательно величина SRF^R будет равна 0,5. Таким образом, оценка устойчивости породного массива (8) показала, что участок характеризуется хорошими значениями рейтинга качества и пригоден для строительства ПИЛ.

Следующим этапом работы стало создание трехмерной геологической модели по результатам анализа архивных геолого-геофизических данных [42-44]. На основе геологических разрезов и схем различных горизонтов были разработаны каркасная и блочная геолого-структурная модели участка Енисейский [33]. Литологическая модель включает три слоя пород: четвертичные отложения и образования коры выветривания с мощностью до 20 м. Верхний слой состоит из плагиогнейсов и биотитовых гнейсов с прослоями кристаллических сланцев. Нижний – из кордиерит-биотитовых с прослоями биотитовых и гранатсодержащих гнейсов (рис.6, а). Разрывные нарушения на участке представлены зонами дробления, милонитизации, тектоническими брекчиями и разрывами без смещения (рис.6, б, в) [33, 35]. Тектонические разрывы модели подразделяются на главные и второстепенные нарушения. Интрузивные и ультраметаморфические образования представлены густой сетью крутопадающих дайк метадолеритов с мощностью до 30 м (рис.6, г). Разрывные нарушения местного и локального масштаба подробно описаны в работе [33]. Кроме этого, в модель были включены зоны дробления и смятия по данным геологических разрезов. Эти зоны тесно коррелируют с главными разломами участка, достигая глубины до 700 м.

Блочная модель, составленная на основе каркасной (рис.6, а, в), представляет геологические структурные особенности в виде блоков

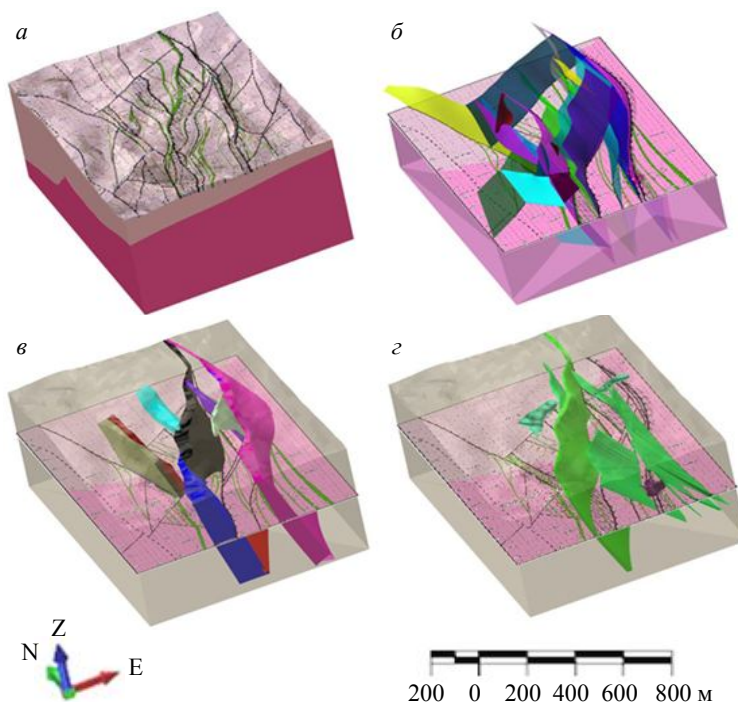


Рис.6. Трехмерное представление основных геологических структур 3D-модели участка Енисейский: а – литологическая модель; б – модель разрывных нарушений; в – зоны дробления, повышенной трещиноватости и брекчирования; г – интрузивные и дайковые комплексы

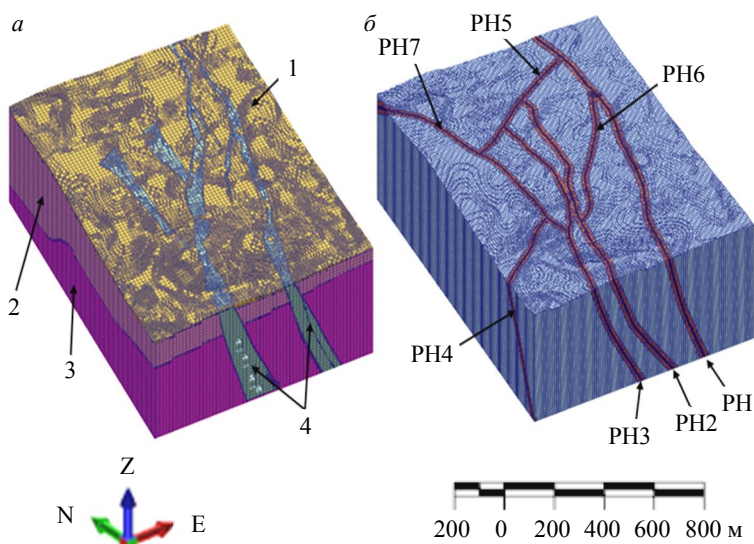


Рис.7. Каркасная модель: а – структурная блочная модель; б – зоны динамического влияния главных разрывных нарушений

1 – четвертичные отложения; 2 – верхняя толща; 3 – нижняя толща; 4 – зоны повышенной трещиноватости; разломы: PH1 – Верхнешумихинский; PH2 – Верхнемеркурьевский; PH3 – Меркурьевский; PH4 – Безымянный; PH5 – № 5; PH6 – № 6; PH7 – № 7



с определенными физико-механическими свойствами (рис.7, а). Эта модель используется для более детального и точного описания геологической структуры и поведения горного массива.

В каркасной модели (см. рис.6, б) разрывные нарушения строились в виде поверхностей (дислокаций) с нулевой шириной по причине недостатка информации о мощности разломов [33]. Используя эмпирические зависимости, были определены размеры зон динамического влияния разрывных нарушений, и на основе этой информации построена блочная модель рис.7, б.

Построение блочной модели разломов с зонами динамического влияния является важным инструментом для вариационного моделирования НДС, анализа и оценки геодинамических процессов, происходящих в массиве.

Заключение. Для безопасного захоронения высокоактивных РАО важно определить критические свойства горных пород, которые влияют как на долгосрочную стабильность геологического хранилища РАО, так и обеспечение безопасных условий горных работ. Анализ мирового опыта показал, что для этого эффективно используются эмпирические рейтинговые классификации. Для оценки устойчивости породного массива, вмещающего выработки ПГЗРО, существующие классификации были модернизированы.

В модернизированный индекс Q^R включены параметры, учитывающие разрывные зоны, соотношение прочности и действующих напряжений SRF, индекс Q и др. Предварительные результаты оценки устойчивости породного массива показали, что выбранный участок пригоден для строительства ПИЛ. Установлено, что участки породного массива в зоне динамического влияния основных тектонических разломов района являются менее устойчивыми, в то время как интрузивные породы, представленные дайковыми комплексами, более устойчивы.

Разработана трехмерная структурно-тектоническая модель участка Енисейский, которая станет впоследствии основой для численного вариационного моделирования напряженно-деформированного состояния массива и создания общей геомеханической модели участка. Построение блочной модели с зонами динамического влияния разрывных нарушений является первым шагом к более глубокому пониманию поведения разломов и их влияния на стабильность и безопасность горных массивов. Модель позволит выявить зоны концентрации опасных напряжений, а также спланировать натурные геомеханические эксперименты в горных выработках ПИЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорофеев А.Н., Большов Л.А., Линге И.И. и др. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 33-40.
2. Абрамов А.А., Большов Л.А., Дорофеев А.Н. и др. Подземная исследовательская лаборатория в Нижнеканском массиве: эволюционная проработка облика // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 9-21. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21
3. Joutsenvaara J., Holma M., Kotavaara O. et al. Callio Lab – the deep underground research centre in Finland, Europe // 17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, 26 August – 3 September 2021, Valencia, Spain. Journal of Physics Conference Series, 2022. Vol. 2156. № 012166. DOI: 10.1088/1742-6596/2156/1/012166
4. Qiangyong Zhang, Chuancheng Liu, Kang Duan et al. True Three-Dimensional Geomechanical Model Tests for Stability Analysis of Surrounding Rock During the Excavation of a Deep Underground Laboratory // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. Vol. 53. P. 517-537. DOI: 10.1007/s00603-019-01927-0
5. Цебаковская Н.С., Уткин С.С., Капырин И.В. и др. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. М.: Комтехпринт, 2015. 208 с.
6. Koyama T., Chijimatsu M., Shimizu H. et al. Numerical modeling for the coupled thermo-mechanical processes and spalling phenomena in Äspö Pillar Stability Experiment (APSE) // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 5. Iss. 1. P. 58-72. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.01.001
7. Saceanu M.C., Paluszny A., Zimmerman R.W., Ivars D.M. Fracture growth leading to mechanical spalling around deposition boreholes of an underground nuclear waste repository // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2022. Vol. 152. № 105038. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105038
8. Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И. Современная геодинамика южной части Енисейского кряжа по результатам спутниковых наблюдений // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 4. С. 64-79. DOI: 10.21455/gi2018.4-5
9. Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на Нижне-Канском геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 83-94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94



10. Manevich A.I., Tatarinov V.N., Kolikov K.S. Detection of crustal deformation anomalies with regard to spatial scale effect // Eurasian mining. 2019. № 2. P. 19-22. DOI: 10.17580/em.2019.02.04
11. Гупало В.С. Приоритетные параметры физических процессов в массиве пород при определении безопасности захоронения радиоактивных отходов // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 118-124. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.118
12. Demenkov P.A., Karasev M.A., Petrov D.N. Predicting Land-Surface Deformations During The Construction of Underground Facilities of Complex Spatial Configuration // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. Iss. 11. P. 1161-1171.
13. Liang Chen, Ju Wang, Zihua Zong et al. A new rock mass classification system QHLW for high-level radioactive waste disposal // Engineering Geology. 2015. Vol. 190. P. 33-51. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.02.006
14. Ju Wang, Liang Chen, Rui Su, Xingguang Zhao. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10. Iss. 3. P. 411-435. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002
15. Tong Y., Yue Y., Huang Z. et al. Modified RMR Rock Mass Classification System for Preliminary Selection of Potential Sites of High-Level Radioactive Waste Disposal Engineering // Sustainability. 2022. Vol. 14 (23). P. 1-17. DOI: 10.3390/su142315596
16. Zhang Q., Liu C., Duan K. et al. True Three-Dimensional Geomechanical Model Tests for Stability Analysis of Surrounding Rock During the Excavation of a Deep Underground Laboratory // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. Vol. 53. P. 517-537. DOI: 10.1007/s00603-019-01927-0
17. Протосеня А.Г., Карасаев М.А., Беляков Н.А. Разработка численной модели прогноза предельного состояния массива с использованием критерия прочности Ставрогина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 1. С. 40-48.
18. Ковалев О.В. Горно-геомеханический прогноз размещения отходов в горных выработках, в том числе в сейсмоопасных районах добычи сырья // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 61-71.
19. León Vargas R.P., Friedel M., Hassanzadegan A. et al. BARIK: an extended Hoek–Brown-based anisotropic constitutive model for fractured crystalline rock // Safety of Nuclear Waste Disposal. 2023. Vol. 2. P. 119-120. DOI: 10.5194/sand-2-119-2023
20. Xie He-ping, Gao Feng, Ju Yang et al. Quantitative definition and investigation of deep mining // Journal of the China Coal Society. 2015. Vol. 40. № 1. P. 1-10. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1690
21. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.
22. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1983. 112 с.
23. Wang F., Konietzky H. Thermo-Mechanical Properties of Granite at Elevated Temperatures and Numerical Simulation of Thermal Cracking // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019. Vol. 52. Iss. 10. P. 3737-3755. DOI: 10.1007/s00603-019-01837-1
24. Barton N. A review of mechanical over-closure and thermal over-closure of rock joints: Potential consequences for coupled modelling of nuclear waste disposal and geothermal energy development // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 99. № 103379. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103379
25. Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 5. Iss. 4. P. 249-261. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.05.008
26. Еременко В.А., Айнбиндер И.И., Марысюк В.П., Наговицин Ю.С. Разработка инструкции по выбору типа и параметров крепи выработок рудников Талнаха на основе количественной оценки состояния массива горных пород // Горный журнал. 2018. № 10. С. 101-106. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.18
27. Шапошник Ю.Н., Усков В.А. Определение качественной характеристики (RQD) и рейтинга (RMR) рудного массива в подземных выработках шахты «Скалистая» // XIII Международный научный конгресс и выставка «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», 19-21 апреля 2017 г., Новосибирск, Россия. Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 2017. Т. 2. № 2. С. 99-107.
28. Протосеня А.Г., Вербилло П.Э. Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 51-57. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.51
29. Андерсон Е.Б., Савоненков В.Г., Любцева Е.Ф. и др. Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов (Южно-Енисейский кряж) // Труды Радиового института им. В.Г.Хлопина. 2006. Т. XI. С. 8-64.
30. Коваленко А.А., Захаров Н.Е., Пуль Э.К., Золотин В.Г. Геомеханические аспекты разработки кимберлитового месторождения трубки «Интернациональная» // Горный журнал. 2019. № 2. С. 27-31. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.05
31. Yong Ye, Liang Chen, Jian Liu. Study on Rock Mass Classification Methods Used in the Geological Disposal of High-level Radioactive Waste // 11th Conference of Asian Rock Mechanics Society, 21-25 October 2021, Beijing, China. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. Vol. 861. № 4. № 042118. DOI: 10.1088/1755-1315/861/4/042118
32. Кочкин Б.Т., Мальковский В.И., Юдинцев С.В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). М.: ИГЕМ РАН, 2017. 384 с.
33. Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В. Трехмерная структурно-тектоническая модель Енисейского участка (Нижнеканский массив) // Горный журнал. 2023. № 1. С. 69-74. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.11
34. Кочкин Б.Т. Задачи изучения геологической среды участка Енисейский на текущем этапе реализации проекта захоронения // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 76-91. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-76-91
35. Морозов О.А., Расторгуев А.В., Неуважаев Г.Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 46-62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62
36. Тарасов Б.Г. Веерный механизм динамических трещин сдвига как источник парадоксов прочности и хрупкости горных пород // Горный журнал. 2020. № 1. С. 18-23. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.03
37. Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А. Геомеханическая модель рудника. Часть 1. Создание // Горный журнал. 2020. № 1. С. 42-48. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.08
38. Abdulla H. Al Nuaimi, Williams L.G. Sensitivity study of risk to future generations from geological disposal of radioactive waste in high strength rock in the UAE // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2022. Vol. 15. Iss. 3. P. 218-231. DOI: 10.1016/j.jrras.2022.06.013



39. Gunzburger Y., Magnenet V. Stress inversion and basement-cover stress transmission across weak layers in the Paris basin, France // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 617. P. 44-57. DOI: [10.1016/j.tecto.2014.01.016](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.01.016)
40. Леонтьев А.В., Рубцова Е.В., Скулкин А.А. К оценке напряженно-деформированного состояния породного массива Нижнеканского региона // XVI Международный научный конгресс и выставка «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск, Россия. Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 2020. Т. 2. С. 109-116. DOI: [10.33764/2618-981X-2020-2-109-116](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2020-2-109-116)
41. Еременко В.А., Винников В.А., Косырева М.А., Лагутин Д.В. Определение параметров залегания трещин в породном массиве на основе оптической съемки скважин и интервального геотехнического документирования неориентированных кернов // *Горный журнал*. 2022. № 1. С. 21-26. DOI: [10.17580/gzh.2022.01.04](https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.04)
42. Xuechao Wu, Gang Liu, Zhengping Weng et al. Constructing 3D geological models based on large-scale geological maps // *Open Geosciences*. 2021. Vol. 13. Iss. 1. P. 851-866. DOI: [10.1515/geo-2020-0270](https://doi.org/10.1515/geo-2020-0270)
43. Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А. Геомеханическая модель рудника. Часть 2. Использование // *Горный журнал*. 2020. № 2. С. 35-44. DOI: [10.17580/gzh.2020.02.04](https://doi.org/10.17580/gzh.2020.02.04)
44. Курцев Б.В., Федотов Г.С. Геомеханическое сопровождение горных работ с использованием ГГИС Micromine // *Горный журнал*. 2022. № 1. С. 45-50. DOI: [10.17580/gzh.2022.01.08](https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.08)

Авторы: Д.Ж.Акматов, младший научный сотрудник, аспирант, <https://orcid.org/0000-0001-6435-464X> (Геофизический центр РАН, Москва, Россия; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия), А.И.Маневич, научный сотрудник, старший преподаватель, <https://orcid.org/0000-0001-7486-6104> (Геофизический центр РАН, Москва, Россия; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия), В.Н.Татарин, член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, victat@wdcb.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7546-2072> (Геофизический центр РАН, Москва, Россия; Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия), Р.В.Шевчук, младший научный сотрудник, аспирант, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3461-6383> (Геофизический центр РАН, Москва, Россия; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия; Институт физики Земли РАН им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия), С.М.Забродин, главный специалист, <https://orcid.org/0000-0003-2834-9311> (Геофизический центр РАН, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Распределение радиационных дефектов по глубине в облученных алмазах: данные конфокальной микроспектроскопии

Р.М.Ардалкар, Й.Д.Салунхе, М.П.Гаонкар, С.Н.Мане, О.А.Гаисас,
Ш.Н.Десаи, А.В.Р.Редди✉

Геммологический институт Индии, Мумбаи, Индия

Как цитировать эту статью: Ардалкар Р.М., Салунхе Й.Д., Гаонкар М.П., Мане С.Н., Гаисас О.А., Десаи Ш.Н., Редди А.В.Р. Распределение радиационных дефектов по глубине в облученных алмазах: данные конфокальной микроспектроскопии // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 179-187. EDN XGGRVF

Аннотация. Исследована природа окраски пяти алмазов. Согласно результатам исследования с применением методов инфракрасной спектроскопии на основе преобразования Фурье, исследования поглощения в УФ, видимой и ближней ИК-областях (UV-Vis-NIR) и фотолюминесцентной спектроскопии, они являются природными алмазами типа Ia. Распределение интенсивности окраски по глубине определялось путем измерения интенсивности пика ФЛ при 741 нм (центр GR1) при возбуждении лазером с длиной волны 633 нм на рамановском конфокальном микроскопе. Для учета геометрических факторов профили распределения дефектов были нормализованы относительно интенсивности рамановского пика алмаза (691 нм). Для двух алмазов интенсивность пика GR1 (741 нм) резко снижалась до глубины 10 мкм, а затем сравнивалась с фоновым уровнем, что характерно для облучения α -частицами из природных источников, таких как уран. В трех кристаллах профили незначительно меняются с глубиной, а интенсивность окраски близка к равномерной, что характерно для электронного или нейтронного облучений.

Ключевые слова: конфокальная рамановская микроскопия; цветной алмаз; профиль глубины; ионизирующее излучение; облучение; фотолюминесценция; нормализация; GR1

Поступила: 10.02.2023

Принята: 20.09.2023

Онлайн: 10.01.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. Известно, что собственные дефекты или дефекты, обусловленные примесями, придают окраску многим алмазам [1]. Бесцветные алмазы – самые дорогие, но также спросом пользуются и алмазы фантазийной окраски [2]. Остаются актуальными исследования по обесцвечиванию алмазов или повышению интенсивности фантазийной окраски.

Наиболее распространенные методы обесцвечивания – обработка высоким давлением и высокой температурой (НРНТ) [3] и воздействие на алмазы контролируемыми дозами ионизирующего излучения высокой энергии, часто с последующим отжигом при высоких давлении и температуре. Облучение алмазов нейтронами, электронами высокой энергии или α -частицами создает в алмазе радиационные дефекты (вакансии и межузельные атомы), которые поглощают свет в видимом диапазоне. Это приводит к изменению цвета кристалла алмаза от сине-зеленого до коричневого [4]. Алмаз получает дозу облучения в природных условиях при контакте с природными радиоактивными веществами, например ураном и продуктами его распада [5]. Глубина проникновения α -частиц в алмаз не превышает 30 мкм. Таким образом, при контактном облучении α -частицами вокруг точки контакта образуются так называемые пятна пигментации – окрашенные участки.

Для улучшения окраски алмазов в лаборатории их подвергают воздействию высокоэнергетических электронов или γ -лучей [6]. Энергия излучения выбирается так, чтобы при воздействии не происходили ядерные реакции с образованием остаточной радиоактивности* [7-11]. Дальность и энергия излучения** имеют решающее значение в облучении алмазов. Центры окраски и их распределение

* Regulation for the Safe Transport of Radioactive Material. 2018 Ed. Specific Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series № SRR-6 (Rev. 1).

** Knoll G.F. Radiation Detection and Measurements. New York: John Wiley & Sons Inc., 1999. 802 p.



в объеме кристаллов исследуют спектроскопическими методами. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) алмазов обычно получают посредством возбуждения соответствующим лазером. При применении лазера с длиной волны 633 нм заметной особенностью в ФЛ-спектре алмаза, подвергнутого ионизирующему излучению, является пик при 741 нм, соответствующий центру GR1 – нейтральной вакансии [12].

Конфокальная рамановская спектроскопия с пространственным разрешением около 0,1 мкм [13] является одним из универсальных инструментов измерения распределения по глубине дефектов в тонких пленках, полимерных композитах, твердых телах, в том числе в алмазах и т.д. По сравнению с другими методами [14-16] конфокальная рамановская микроскопия дает более низкое разрешение, однако другие преимущества делают ее вполне подходящей для измерения распределения дефектов по глубине, особенно в твердых телах, таких как алмазы.

В данной работе представлено исследование распределения по глубине дефектов в пяти цветных алмазах, а также измерены характеристики ИК- и УФ-видимых областей методом спектроскопии. Целью работы является определение того, подвергались ли эти кристаллы воздействию ионизирующего излучения.

Методы. Физические свойства пяти исследованных образцов приведены в таблице.

Описание алмазов

Название*	Вес, карат**	Цвет	Огранка	Тип***
S.G.1	3,12	Зеленый	Грубая	Ia
S.G.2	4,83	Зеленый	Грубая	Ia
T.B.1	0,015	Синий	Круглая	IaA
T.B.2	3,23	Синий	Грубая	IaAB
T.B.3	12,13	Синевато-зеленый	Грубая	Ia

* Названия образцов, данные после первоначальных исследований: T.B. – для обработанных алмазов; S.G. – для алмазов, подвергшихся воздействию короткопробежного излучения в земной коре или в лаборатории.

** 1 карат = 200 мг.

*** Типы алмазов идентифицируются методом ИКФС.

Изображения алмазов. Оптические изображения пяти алмазов были получены при белом свете с помощью цифровой зеркальной камеры Canon EOS 90D с объективом 18-135 IS USM. Люминесцентные (флуоресцентные и фосфоресцентные) изображения всех алмазов были получены с использованием прибора Diamond View корпорации De Beers с источником УФ-возбуждения (≤ 230 нм). Эти изображения были использованы для изучения закономерностей роста.

Спектроскопические измерения. Измерения ИК-поглощения проводились на приборе Thermo Nicolet iS50 с приставкой диффузного рассеяния (DRIFT) и детектором DLaTGS (дейтерированный, легированный L-аланином триглицинсульфат). Спектры усреднялись по 100 сканированиям в диапазоне от 8000 до 400 см^{-1} с разрешением 4 см^{-1} при комнатной температуре.

Спектры поглощения в УФ-видимой областях регистрировались в диапазоне от 200 до 800 нм с помощью спектрометра Cary Varian 5000, имеющего в качестве источников дейтериевую лампу для УФ-области и вольфрам-галогенную лампу для видимой и ИК-областей. Эта система снабжена фотоумножителем в качестве детектора для УФ-видимой области и детектором из поликристаллического сульфида свинца (PbS) для ИК-области. Измерения проводились при температуре 77 К.

Спектры фотолюминесценции измеряли с помощью рамановского спектрометра Renishaw InVia Reflex с конфокальной оптикой и детектором на ПЗС (устройстве с зарядовой связью). Использован объектив с увеличением 100 \times и рабочим расстоянием лазера между линзой и образцом 0,33 мм. Для спектральных исследований использованы два лазерных источника: 405 нм (для спектрального диапазона 407-743 нм) и 633 нм (для спектрального диапазона 637-991 нм). Для изучения пространственного распределения дефектов использован лазер с длиной волны 633 нм. Спектральные измерения проводились при температуре 77 К. Изучение профиля распределения



дефектов GR1 по глубине проводились при комнатной температуре с интервалом 4 мкм на воздухе по пику 741 нм с использованием лазера 633 нм.

Распределение центра GR1 как функция глубины. Конфокальный рамановский спектрометр имеет пространственное разрешение по высоте Z 0,1 мкм и выше, диапазон перемещения до 200 мкм. Длительные измерения при температуре жидкого азота приводят к образованию инея на поверхности кристалла, который уменьшает сигнал ФЛ, поэтому измерения проводились при комнатной температуре. Анализ данных GR1 как функции глубины показал, что достаточная глубина регистрации составляет 60 мкм.

Анализ площади пика. Конфокальный рамановский спектрометр имеет встроенные инструменты спектрального анализа. Одним из инструментов является «подгонка кривой», с помощью которого определяется положение пика, рассчитывается интенсивность пика (площадь пика) и высота пиков (центроида), а также анализируются все пики. Этот инструмент идентифицирует минимумы слева и справа от выбранного пика (L и R) с помощью последовательного дифференцирования. Фоновые значения, соответствующие каналам L и R , принимаются как среднее значение по пяти точкам вокруг минимумов. Предполагается, что значения в небольшом интервале между L и R изменяются линейно. Таким образом, фон для каждого пика рассчитывается по правилу трапеций, площадь пика вычисляется путем вычитания фона из интегрированной площади. В случае числа пиков программное обеспечение распознает канал, соответствующий этому пику (центроиде), а число пиков определяется путем вычитания фона, соответствующего центроиде.

Для проверки анализ спектров проводился с использованием аппроксимации пиков распределением Гаусса. Результаты, полученные обоими способами обработки данных, одинаковы.

Диапазон интегральной интенсивности пиков составляет от фонового уровня до 80000, для линейной интенсивности от фонового уровня – до 10000. Во всех случаях установленные площади пиков значительно превышают фоновый уровень и являются значимыми.

Результаты и обсуждение. Все пять алмазов, исследованные в данной работе, изучались на приборе Diamond View, а также с использованием спектроскопических методов.

Изображения алмазов. Оптические изображения пяти алмазов представлены на рис.1. Люминесцентные изображения, полученные с помощью Diamond View, показаны на рис.2. В Diamond View все алмазы, за исключением Т.В.1, демонстрировали синюю флуоресценцию без фосфоресценции, в то время как Т.В.1 демонстрировал зеленую флуоресценцию с синими пятнами. Особенности анатомии кристаллов подтвердили их природное происхождение. Наблюдаемая синяя флуоресценция обусловлена наличием центра N3 (415 нм). Интересно, что Е.Васильев и др. наблюдали гетерогенное распределение оптических центров в алмазе наряду с синей флуоресценцией N3-центров [17].



Рис.1. Оптические изображения исследованных алмазов в белом свете

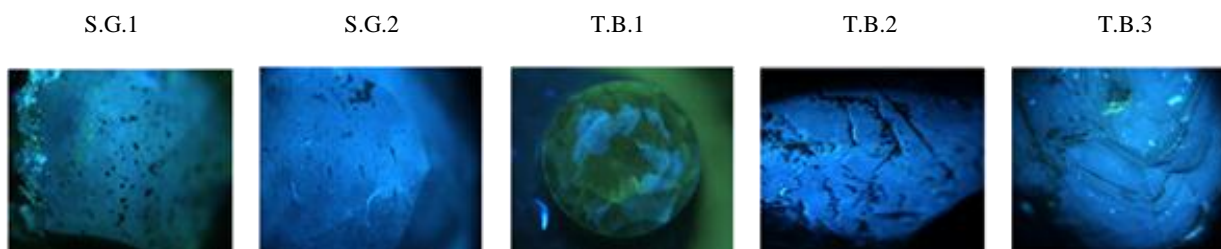


Рис.2. Люминесцентные изображения изученных алмазов в Diamond View (УФ < 230 нм)

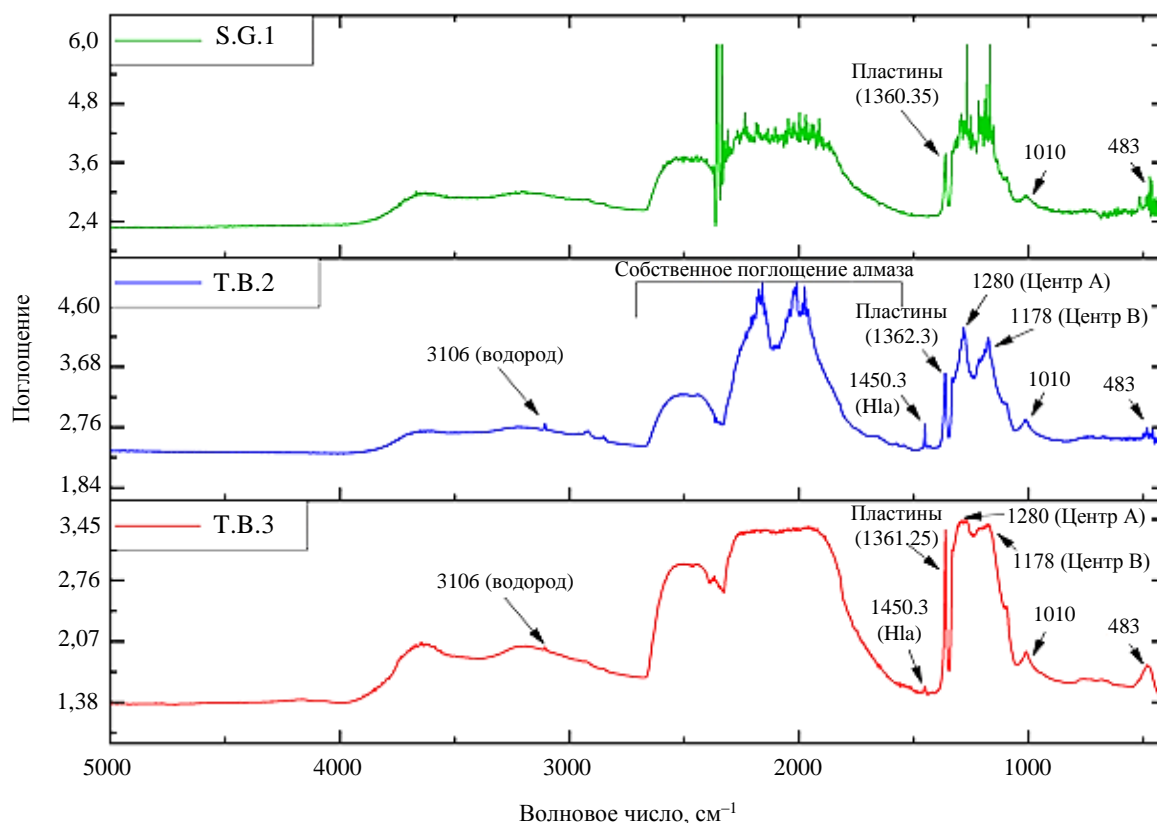


Рис.3. ИКФС спектры S.G.1, T.B.2 и T.B.3

Спектры ИКФС. Спектры ИК поглощения были записаны для идентификации и характеристики типов центров, присутствующих в алмазах [18, 19]. ИКФС-спектры всех пяти кристаллов продемонстрировали характерные пики природного алмаза типа Ia, соответствующие центрам A (1282 cm^{-1}) и B (1178 cm^{-1}), которые обусловлены азотными дефектами. ИК-спектры кристаллов S.G.1, T.B.2 и T.B.3 для сравнения приведены на рис.3. Все заметные пики поглощения в спектрах маркированы.

Широкая полоса около 482,33 cm^{-1} соответствует центру A. Резкий пик дефектов «пластины» наблюдался в диапазоне от 1360 до 1370 cm^{-1} , он характерен для природных алмазов типа Ia. Пики при 3106 и 1010,36 cm^{-1} обусловлены колебанием углерод-водородной связи (C–H). Слабый пик при 1450,30 cm^{-1} (центр N1a) присутствовал в спектре кристаллов T.B.2 и T.B.3, но отсутствовал в S.G.1. Наблюдаемый центр N1a может возникать после облучения электронами и отжига [20]. Отсутствие пика N1a в ИК-спектре S.G.1 может означать, что алмаз не был отожжен после облучения.

УФ-видимая и ближняя ИК-области спектра. Спектры поглощения пяти алмазов были измерены при температуре 77 К. Два спектра, соответствующие образцам S.G.1 и T.B.1, приведены на рис.4.

Спектры алмазов S.G.1 и S.G.2 демонстрировали пик поглощения при 415 нм (N3), который является наиболее распространенной особенностью природных алмазов типа Ia [21]. Также наблюдался слабый пик при 503 нм, принадлежащий центру N3. Спектр S.G.1 имел пик поглощения при 496 нм, обусловленный центром N4. Центры N3 и N4 встречаются в алмазах, которые подвергаются воздействию естественного или искусственного излучения.

Спектр поглощения T.B.3 имеет сходные характеристики со спектром T.B.1, который демонстрировал сильнейшее поглощение в области 350-380 нм. Отмечается, что в спектрах поглощения алмазов T.B.1, T.B.2 и T.B.3 наиболее выраженный пик центра GR1 был обнаружен при 741 нм. Этот дефект возникает после воздействия на алмазы природного или искусственного ионизирующего излучения [12]. Пик при 394 нм (центр ND1) присутствовал в T.B.1 и T.B.3, а также наблюдались слабые сигналы при 430, 503 и 723 нм. G.Davies и A.T.Collins [22] отмечали, что в алмазах, подвергнутых облучению электронами с последующим отжигом, присутствовало больше нейтральных вакансий V^0 (центр GR1), чем вакансий V^- (центр ND1). В спектрах поглощения

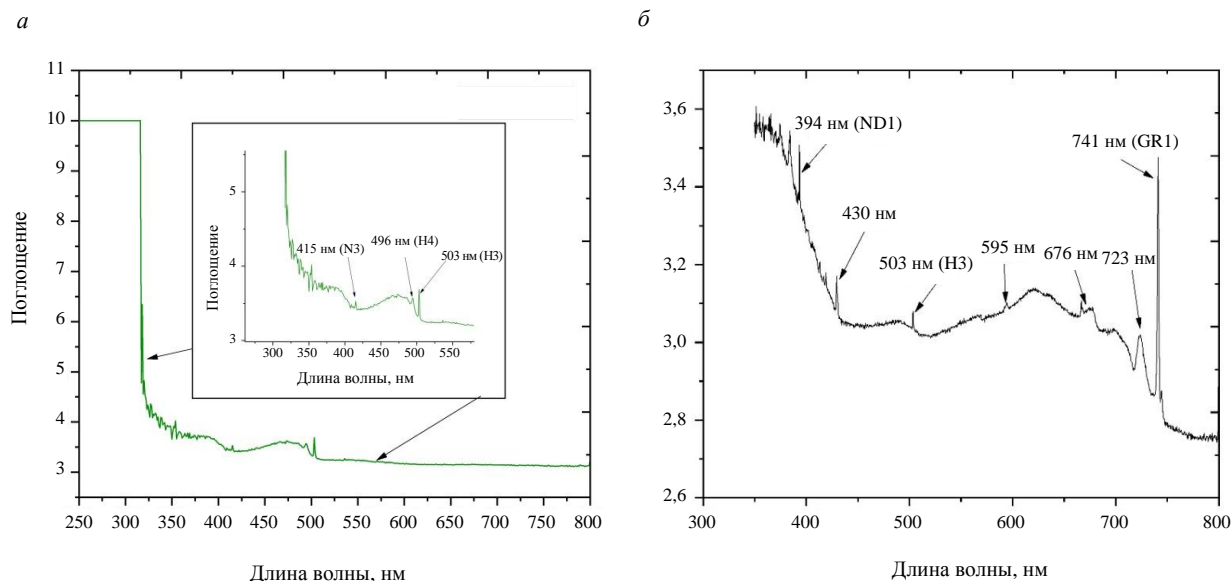


Рис.4. УФ-видимая и ближняя ИК-области спектра поглощения: а – S.G.1; б – T.B.1

образцов T.B.1 и T.B.3 наблюдался пик при 595 нм, связанный с первичным радиационным повреждением и отжигом*. Аналогичное наблюдение было сделано A.Osvet et al., которые сообщили, что эти дефекты возникли после нейтронного облучения природных алмазов типа Ia [23]. Пики при 676 и 723 нм наблюдались в спектрах образцов T.B.1 и T.B.3, что связано с воздействием излучения высокой энергии и последующим отжигом при высокой температуре. Эти особенности отсутствовали на спектре поглощения алмаза T.B.2 интенсивного синего цвета. В данном случае поглощение насыщалось в областях 200-400 и 550-670 нм, и линии при 394, 595 и 676 нм находились в области непрозрачности.

Спектры фотолюминесценции. Спектры люминесценции (фото-, катодо-, термолюминесценции и т.д.) алмаза дают характерные пики излучения для идентификации центров окраски и дефектов [24-28]. Спектры ФЛ пяти алмазов были измерены при температуре жидкого азота (77 К) с использованием лазерного возбуждения 405 и 633 нм (рис.5).

Спектры ФЛ кристаллов при лазерном возбуждении 405 нм показали интенсивный пик при 415 нм, обусловленный сильным центром N3. Присутствие этого пика во всех пяти спектрах указывает на то, что эти алмазы являются природными, что подтверждается данными ИК- и УФ-спектроскопии. В спектрах фотолюминесценции алмазов S.G.1 и S.G.2 пики наблюдаются при 415 нм (N3) и

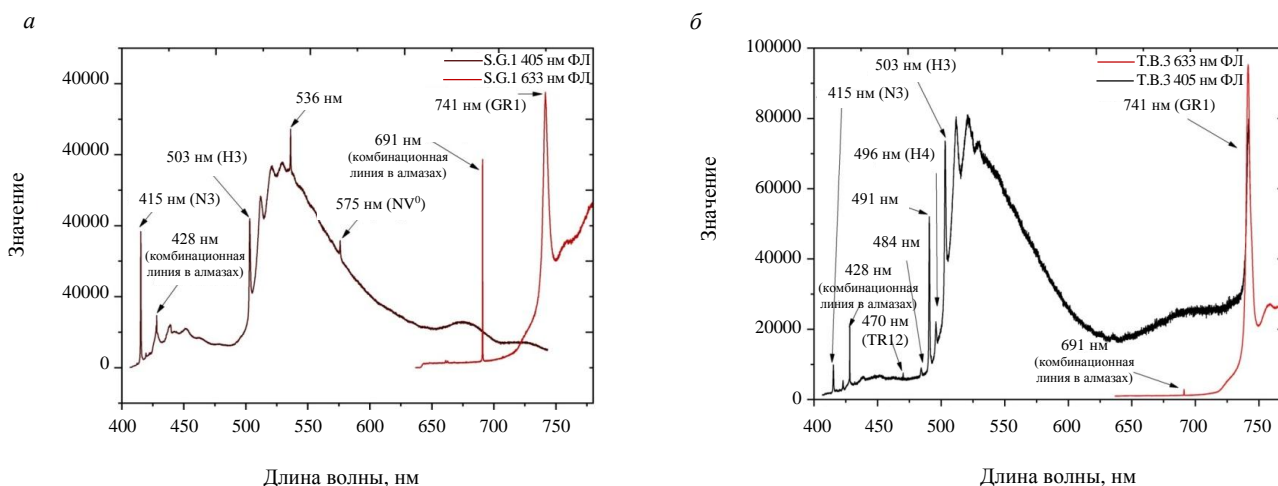


Рис.5. Спектры ФЛ S.G.1 (а) и T.B.3 (б) при лазерных возбуждениях 405 и 633 нм

* Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond. Berlin: Springer – Verlag, 2001. P. 213.



503 нм (НЗ). Спектр ФЛ образца S.G.1 также продемонстрировал пик при 536 нм, который присутствует в природных алмазах. Эта линия является признаком радиационного облучения*. В спектре образца Т.В.3 также наблюдается слабый пик при 470 нм (центр TR12). Дефект TR12 возникает вследствие высокоэнергетического облучения как природных, так и синтетических алмазов [29]. Наблюдаемый пик при 575 нм обусловлен наличием центра NV⁰. Отмечается, что этот центр присутствует в азотсодержащих природных и синтетических алмазах. Интенсивный пик ФЛ при 503 нм, соответствующий центру НЗ, присутствовал в спектрах всех алмазов кроме S.G.2. Слабый пик при 503 нм можно было наблюдать у S.G.2 при использовании лазера более высокой мощности в 10 % (36 мВт) вместо 1 % (3,6 мВт), используемой для других алмазов.

Распределение центра GR1 как функция глубины. Методы изменения окраски алмаза разрабатывались на протяжении десятилетий и описаны в ряде обзоров [11, 30, 31]. Однородная радиационная окраска поверхности может быть достигнута, если алмаз полностью находится в среде с источником α -излучения в природе или лаборатории. Подобные воздействия, приводящие к однородной окраске алмаза, редко наблюдаются в природе. Алмазы, подвергшиеся искусственному ионизирующему излучению, такому как пучки электронов высокой энергии, могут иметь центры окраски по всему объему [4]. Воздействие на алмазы нейтронов или электронов высокой энергии вызывает изменения в алмазах, и эти изменения изучались до и после отжига алмазов [25]. Глубина и интенсивность окраски зависят от энергии и дозы ионизирующего излучения соответственно. Также возможно, что облученные алмазы могут быть подвергнуты воздействию высокотемпературного отжига при стабилизирующем давлении для оптимизации интенсивности окраски [30]. При обработке искусственным излучением обычно стараются воздействовать на алмазы со всех сторон, чтобы окраска распространялась по всему объему алмаза. Поэтому профили изменения цвета алмазов по глубине в работе измерялись с разных направлений с помощью конфокального рамановского микроскопа.

Для визуализации трехмерной картины распределения дефектов была получена серия спектров как функция глубины (рис.6).

Во всех спектрах были рассчитаны площади и высота линии GR1 (741 нм), а также линии комбинационного рассеяния (691 нм). Распределения по площади пиков и числа пиков для выбранного алмаза качественно сходны и почти параллельны. Поэтому при дальнейшем анализе использовалась только высота пиков как функция глубины.

N.J.Everall [13] и N.A.Freebody et al. [32] подробно описали получения точных профилей глубины с использованием конфокальной рамановской микроскопии и указали, что полученное разрешение ниже по сравнению с другими методами. Целью настоящего исследования является изучение распределения дефектов GR1, а не определение точной глубины, поэтому использованное пространственное разрешение соответствовало задаче.

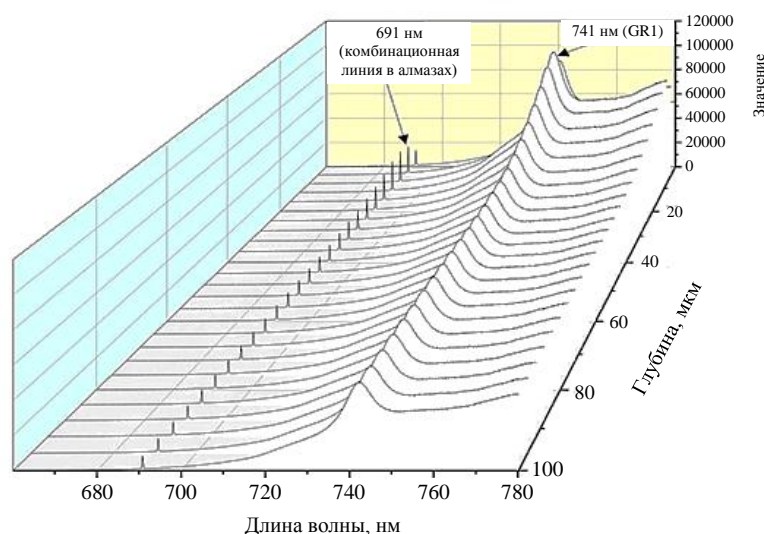


Рис.6. Спектры ФЛ как функция глубины Т.В.2 при лазерном возбуждении 633 нм

* Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond. Berlin: Springer – Verlag, 2001. P. 244, 285, 279, 290, 317.



Высота пиков нормировалась интенсивностью линии комбинационного рассеяния, измеренной в том же спектре. В аналогичной ситуации при изучении ядерного деления и ядерных реакций [33, 34] один из авторов использовал метод внутренней нормализации. Единственным условием было то, что выбранная эмиссионная линия (в γ -спектрометрии) должна присутствовать в каждом спектре и иметь корреляцию с изучаемой реакцией. Подобные методы обработки применялись в данных исследованиях, поскольку каждый спектр имеет линию комбинационного рассеяния алмаза, пиковая интенсивность которой зависела от интенсивности лазера, веса алмаза, эффективности обнаружения и т.д. Поэтому линия комбинационного рассеяния в алмазах использовалась для нормализации интенсивности пика 741 нм. Исходя из этого, данные GR1 были разделены по точкам на соответствующие площади рамановских пиков, нормированные по мощности лазера. Аналогичная процедура нормализации применялась S.C.Lawson et al. [35], а также Е.А.Васильевым и др. [36]. Нормализованные данные были использованы для получения распределений дефектов, представленных на рис.7.

Из рис.7 видно, что в профилях образцов S.G.1 и S.G.2 интенсивность сначала резко снизилась, а затем стала почти параллельной оси X с медленным изменением (без изменения) интенсивности линии как функции глубины. Таким образом, обе кривые продемонстрировали два отчетливых наклона: быстрое уменьшение высоты пиков до 10 мкм и далее медленное изменение (без изменений). Это указывает на то, что окраска алмазов локализована в слое нескольких микрометров от поверхности. Подтверждается, что эти два алмаза могли подвергнуться воздействию α -излучения ближнего действия. Таким образом, наличие центра GR1 может быть связано с взаимодействием на алмаз α -лучей, полученных либо из источника α -излучения, такого как уран и продукты его распада в земной коре, либо из источника α -излучения в лаборатории, поскольку такого можно также достичь в лаборатории, подвергая алмазы воздействию пучков тяжелых ионов низкой энергии.

Профили распределения дефектов в других образцах приведены на рис.7 с квадратами (Т.В.3), перевернутыми треугольниками (Т.В.1) и ромбами (Т.В.2). Во всех трех профилях первоначальный медленный рост наблюдается примерно до 10 мкм, а затем начинается медленное уменьшение [37]. Первоначально рабочее расстояние лазера поддерживается на поверхности (нулевой глубине) алмаза. Таким образом, площадь и интенсивность линии GR1 обусловлены возбуждением лазером и излучением GR1 из атомов на поверхности образца. По мере увеличения глубины возбуждающее излучение взаимодействует с большим количеством центров GR1, что приводит к увеличению интенсивности пика GR1. При проникновении через слои алмаза может произойти поглощение некоторых фотонов с длиной волны 741 нм, что приведет к снижению интенсивности. Также возможно, что другие дефекты в алмазах могут поглощать испускаемые фотоны ФЛ. Конечным результатом является увеличение интенсивности пика ФЛ при 741 нм.

После достижения максимальной интенсивности линии 741 нм (центр GR1) сигнал может стать постоянным, тогда как поглощение света другими дефектами будет увеличиваться. Это может привести к медленному снижению интенсивности при 741 нм в зависимости от глубины, как показано на рис.7.

Исходя из приведенных данных, глубина слоя с дефектами GR1 в алмазах S.G.1 и S.G.2 была оценена примерно в 10 мкм. В случае искусственно облученных алмазов профили распределения становятся постоянными, почти параллельные оси X, что указывает на объемную равномерность облучения. Это может быть связано с объемным эффектом искусственного облучения алмазов и (или) с тем, что алмазы после воздействия могли быть подвергнуты дальнейшей обработке. Возможно, наблюдаемое снижение интенсивности (рис.7) можно использовать для определения энергии применяемого облучения. Однако эта задача выходит за рамки настоящих исследований.

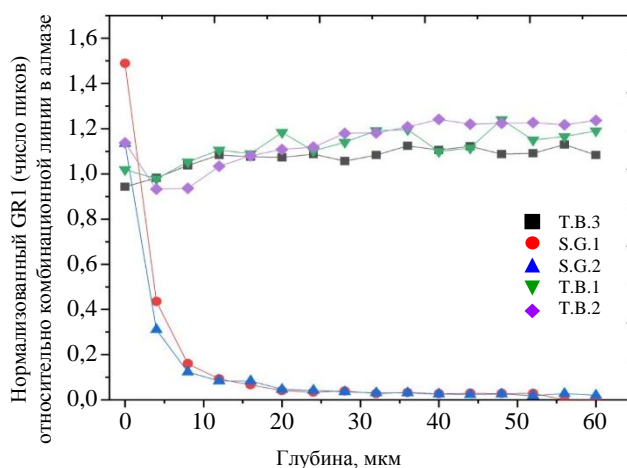


Рис.7. Профиль глубины всех алмазов с использованием нормализованных чисел GR1 пиков



Заклучение. Исследованы пять окрашенных алмазов для определения естественной или искусственной природы облучения. Изучение методами спектроскопии люминесценции, поглощения в ИК-, УФ-видимом диапазонах показало, что эти кристаллы – природные алмазы типа Ia. По УФ-видимому и ФЛ-спектрам было установлено, что три алмаза подвергались воздействию объемного искусственного излучения. Эти результаты подтверждены профилями распределения дефектов GR1 по глубине во всех пяти образцах. Профили измерялись с нормированием интенсивности линии ФЛ GR1 при 741 нм на линию комбинационного рассеяния с использованием конфокального рамановского микроскопа с лазером 633 нм в качестве источника возбуждения. Распределение дефектов GR1 по глубине кристаллов характеризуется двумя типами профилей, один из которых соответствует контакту алмазов с такими материалами, как уран и продукты его распада, которые испускают α -частицы с малой глубиной проникновения, а также β - и γ -лучи с большой глубиной проникновения. Второй тип обусловлен воздействием только β - и γ -лучей с большой глубиной проникновения. В трех кристаллах центры GR1 распределены по глубине равномерно. Подобный вид распределения характерен для ионизирующего излучения с большой глубиной проникновения (дальнодействующие электроны, нейтроны) и последующего отжига.

Авторы выражают благодарность д-ру Анику Госвами за помощь при подготовке рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Magaña S.E., Ardon T., Smit K.V. et al. Natural-Color Pink, Purple, Red, and Brown Diamonds: Band of Many Colors // *Gems & Gemology*. 2018. Vol. 54. № 4. P. 352-377. DOI: [10.5741/GEMS.54.4.352](https://doi.org/10.5741/GEMS.54.4.352)
2. *Gems & Gemology in Review: Coloured Diamonds* / Ed. by J.M.King. Carlsband: The Gemological Institute of America, 2006. 317 p.
3. Fisher D. Brown diamonds and high pressure high temperature treatment // *Lithos*. 2009. Vol. 112. S. 2. P. 619-624. DOI: [10.1016/j.lithos.2009.03.005](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.005)
4. Campbell B., Mainwood A. Radiation Damage of Diamond by Electron and Gamma Irradiation // *Physica status solidi (a)*. 2000. Vol. 181. Iss. 1. P. 99-107. DOI: [10.1002/1521-396X\(200009\)181:1<99::AID-PSSA99>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/1521-396X(200009)181:1<99::AID-PSSA99>3.0.CO;2-5)
5. Vasilev E.A., Kozlov A.V., Petrovsky V.A. Volume and Surface Distribution of Radiation Defect in Natural Diamonds // *Journal of Mining Institute*. 2018. Vol. 230. P. 107-115. DOI: [10.25515/PMI.2018.2.107](https://doi.org/10.25515/PMI.2018.2.107)
6. Shigley J.E. *Gems & Gemology in Review: Treated Diamonds*. Carlsband: The Gemological Institute of America, 2005. 301 p.
7. Desai S.N. Radiation induced colour enhancement of diamonds // International conference on peaceful uses of atomic energy, 29 September – 1 October 2009, New Delhi, India. Proceedings of international conference on peaceful uses of atomic energy, 2009. Vol. 2. P. 589-590.
8. Sahavat S., Kornduangkao A., Thongcham K. et al. Color Enhancement of Natural Type Ia Diamond Using a Neutron-Irradiation and Annealing Method // *Kasetsart Journal (Natural Science)*. 2009. Vol. 43. Iss. 1. P. 216-229.
9. Crookes W. On the Action of Radium Emanations on Diamond // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1904. Vol. 74. Iss. 497. P. 47-49. DOI: [10.1098/rspl.1904.0077](https://doi.org/10.1098/rspl.1904.0077)
10. Patent № US 7604846B2. Manufacturing method of colored diamond by ion implantation and heat treatment / Jaewon Park, Jaehyung Lee, Changwon Sohn, Byungho Choi. Publ. 20.10.2009.
11. Khmel'nitsky R.A., Dravin V.A., Tal A.A. et al. Damage accumulation in diamond during ion implantation // *Journal of Materials Research*. 2015. Vol. 30. Iss. 9. P. 1583-1592. DOI: [10.1557/jmr.2015.21](https://doi.org/10.1557/jmr.2015.21)
12. Clark C.D., Norris C.A. Photoluminescence associated with the 1.673, 1.944 and 2.498 eV centres in diamond // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. 1971. Vol. 4. № 14. P. 2223-2229. DOI: [10.1088/0022-3719/4/14/036](https://doi.org/10.1088/0022-3719/4/14/036)
13. Everall N.J. Modelling and Measuring the Effect of Refraction on the Depth Resolution of Confocal Raman Microscopy // *Applied Spectroscopy*. 2000. Vol. 54. Iss. 6. P. 773-782. DOI: [10.1366/0003702001950382](https://doi.org/10.1366/0003702001950382)
14. Suzuki S., Kakita K. A Comparative Study of GDOES, SIMS and XPS Depth Profiling of Thin Layers on Metallic Materials // *Journal of Surface Analysis*. 2005. Vol. 12. Iss. 2. P. 174-177.
15. Babu S.R., Preisser N., Micheli S.K. Image Processing Procedure to Evaluate Inclusion Dissolution in a Slag Observed by High-Temperature Confocal Scanning Laser Microscopy // *Metals*. 2022. Vol. 12. Iss. 4. № 531. DOI: [10.3390/met12040531](https://doi.org/10.3390/met12040531)
16. Datta J., Biswas H.S., Rao P. et al. Study of depth profile of hydrogen in hydrogenated diamond like carbon thin film using ion beam analysis techniques // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2014. Vol. 328. P. 27-32. DOI: [10.1016/j.nimb.2014.02.127](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.02.127)
17. Vasilev E., Petrovsky V., Kozlov A. et al. The story of one diamond: the heterogeneous distribution of the optical centres within a diamond crystal from the Ichetju placer, northern Urals // *Mineralogical Magazine*. 2019. Vol. 83. Iss. 4. P. 515-522. DOI: [10.1180/mgm.2019.32](https://doi.org/10.1180/mgm.2019.32)
18. Collins A.T., Spear P.M. Optically active nickel in synthetic diamond // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1982. Vol. 15. № 12. P. L183-L187. DOI: [10.1088/0022-3727/15/12/006](https://doi.org/10.1088/0022-3727/15/12/006)
19. Collins A.T. Optical Centres Produced in Diamond by Radiation Damage // *New Diamond and Frontier Carbon Technology*. 2007. Vol. 17. № 2. P. 47-61.
20. Woods G.S., Collins A.T. The 1450 cm⁻¹ infrared absorption in annealed, electron-irradiated type I diamonds // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. 1982. Vol. 15. № 26. P. L949-L952. DOI: [10.1088/0022-3719/15/26/013](https://doi.org/10.1088/0022-3719/15/26/013)



21. Елисеев А.П. Термостимулированная люминесценция и послесвечение природных алмазов: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Свердловск: Уральский политехнический институт им. С.М.Кирова, 1977. 20 с.
22. Davies G., Collins A.T. Vacancy complexes in diamond // *Diamond and Related Materials*. 1993. Vol. 2. Iss. 2-4. P. 80-86. DOI: [10.1016/0925-9635\(93\)90035-Z](https://doi.org/10.1016/0925-9635(93)90035-Z)
23. Osvet A., Palm V., Sildos I. Spectral hole burning and uniaxial stress study of radiation-induced defects in diamond // *Journal of Applied Physics*. 1996. Vol. 79. Iss. 11. P. 8290-8293. DOI: [10.1063/1.362469](https://doi.org/10.1063/1.362469)
24. Breeding C.M., Eaton-Magña S., Shigley J.E. Natural-Color Green Diamonds: A Beautiful Corundum // *Gems and Gemology*. 2018. Vol. 54. № 1. P. 2-27. DOI: [10.5741/GEMS.54.1.2](https://doi.org/10.5741/GEMS.54.1.2)
25. Hainschwang T., Respinge A., Notari F. et al. A comparison of diamonds irradiated by high fluence neutrons or electrons, before and after annealing // *Diamond and Related Materials*. 2009. Vol. 18. Iss. 10. P. 1223-1234. DOI: [10.1016/j.diamond.2009.04.011](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2009.04.011)
26. Vasilev E., Kriulina G., Klepikov I. Luminescence of natural diamond in the NIR range // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2020. Vol. 47. Iss. 7. № 31. DOI: [10.1007/s00269-020-01099-2](https://doi.org/10.1007/s00269-020-01099-2)
27. Sastry M.D., Gaonkar M.P., Nagar Y.C. et al. Optically stimulated luminescence (OSL) and laser excited photo luminescence of electron beam treated (EBT) diamonds: Radiation sensitization and potential for tissue equivalent dosimetry // *Diamond and Related Materials*. 2011. Vol. 20. Iss. 8. P. 1095-1102. DOI: [10.1016/j.diamond.2011.06.012](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.06.012)
28. Vasilev E., Zedgenizov D., Zamyatin D. et al. Cathodoluminescence of Diamond: Features of Visualization // *Crystals*. 2021. Vol. 11. Iss. 12. P. 1522. DOI: [10.3390/cryst11121522](https://doi.org/10.3390/cryst11121522)
29. Davies G., Foy C., O'Donnell K. The TR12 vibronic band in diamond // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. 1981. Vol. 14. № 28. P. 4153-4165. DOI: [10.1088/0022-3719/14/28/016](https://doi.org/10.1088/0022-3719/14/28/016)
30. Collins A.T., Kanda H., Kitawaki H. Colour changes produced in natural brown diamonds by high-pressure, high-temperature treatment // *Diamond and Related Materials*. 2000. Vol. 9. Iss. 2. P. 113-122. DOI: [10.1016/S0925-9635\(00\)00249-1](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(00)00249-1)
31. Collins A.T. The colour of diamond and how it may be changed // *The Journal of Gemmology*. 2001. Vol. 27. Iss. 6. P. 341-359. DOI: [10.15506/jog.2001.27.6.341](https://doi.org/10.15506/jog.2001.27.6.341)
32. Freebody N.A., Vaughan A.S., Macdonald A.M. On optical depth profiling using confocal Raman spectroscopy // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2010. Vol. 396. Iss. 8. P. 2813-2823. DOI: [10.1007/s00216-009-3272-0](https://doi.org/10.1007/s00216-009-3272-0)
33. Reddy A.V.R., Goswami A., Tomar D.S. et al. Charge Distribution in 96 MeV ^{16}O Induced Fission of ^{238}U // *Radiochimica Acta*. 1994. Vol. 64. P. 149-154. DOI: [10.1524/ract.1994.64.34.149](https://doi.org/10.1524/ract.1994.64.34.149)
34. Acharya R., Nair A.G.C., Reddy A.V.R., Goswami A. Standard-less analysis of Zircaloy clad samples by an instrumental neutron activation method // *Journal of Nuclear Materials*. 2004. Vol. 326. Iss. 2-3. P. 80-85. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2003.12.013](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2003.12.013)
35. Patent № EP1430291B1. Examining a diamond / S.C.Lawson, P.M.Spear, P.M.Martineau. Publ. 14.02.2007.
36. Васильев Е.А., Иванов-Омский В.И., Помазанский Б.С., Богущ И.Н. Тушение люминесценции N3 центра примесью азота в природном алмазе // Письма в журнал технической физики. 2004. Т. 30. № 19. С. 802-803. DOI: [10.1134/1.1813714](https://doi.org/10.1134/1.1813714)
37. Ardalkar R., Salunkhe Y., Gaonkar M. et al. Depth profile studies on natural and artificially irradiated diamonds // 71st Diamond conference (Poster-45) 6-10 July 2021, Warwick U.K, University of Warwick, Coventry.

Авторы: Р.М.Ардалькар, магистр физики, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5981-9972> (Геммологический институт Индии, Мумбаи, Индия), Й.Д.Салунхе, магистр геофизики, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-9256-6447> (Геммологический институт Индии, Мумбаи, Индия), М.П.Гаонкар, магистр химии, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3053-7867> (Геммологический институт Индии, Мумбаи, Индия), С.Н.Мане, магистр химии, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0587-7923> (Геммологический институт Индии, Мумбаи, Индия), О.А.Гаусас, магистр физики, научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0002-5851-2909> (Геммологический институт Индии, Мумбаи, Индия), Ш.Н.Десаи, бакалавр технических наук, оценщик и поверенный по алмазам, <https://orcid.org/0009-0000-0101-0102> (Геммологический институт Индии, Мумбаи, Индия), А.В.Редди, д-р хим. наук, заведующий отделом, avramanareddy1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3396-9606> (Геммологический институт Индии, Мумбаи, Индия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Скоростное строение земной коры и верхней мантии Печенгского рудного района и сопредельных территорий в северо-западной части Лапландско-Кольского орогена методом функций приемника

А.Г.Гоев

Институт динамики геосфер имени академика М.А.Садовского РАН, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Гоев А.Г. Скоростное строение земной коры и верхней мантии Печенгского рудного района и сопредельных территорий в северо-западной части Лапландско-Кольского орогена методом функций приемника // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 188-198. EDN NZMXJC

Аннотация. Представлено исследование земной коры и верхней мантии Печенгского рудного района, а также сопредельных территорий северо-западной части Кольского региона. Методом функций приемника, по данным новой и двух постоянных широкополосных сейсмических станций получены одномерные модели распределения сейсмических скоростей до глубины 300 км. Станции расположены в северных частях Финляндии и Норвегии, а также в Печенгском районе Российской Федерации. Несмотря на близкое (не более 100 км) расположение станций скоростные модели существенно разнятся, что свидетельствует о гетерогенности строения литосферы. Так для станции, расположенной в Финляндии, выявлен градиентный коро-мантийный переход, не прослеживающийся в двух других моделях. На глубинах около 150 км обнаружена зона пониженных скоростей, связанная со средне-литосферной неоднородностью, которая не обнаружена под Печенгским рудным районом. Также в строении земной коры Печенгского района выявлены аномально высокие значения параметра V_p/V_s до глубины около 20 км. С учетом того, что сейсмическая станция установлена в непосредственной близости от крупнейших медно-никелевых месторождений, эта аномалия может интерпретироваться как реликт протерозойской плюмовой активности.

Ключевые слова: Кольский п-ов; Лапландско-Кольский ороген; литосфера; мантия; метод функции приемника; рудоносность; плюм

Благодарность. Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда, грант № 21-17-00161, кроме обзора тектонической истории всего Фенноскандинавского щита, осуществленного в соответствии с темой 122040400015-5.

Поступила: 31.05.2023

Принята: 27.12.2023

Онлайн: 09.04.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. Фенноскандинавский (Балтийский) щит – один из самых хорошо изученных докембрийских регионов Земли. Его основная, центральная, часть сформировалась в палеопротерозойское время – Свекофенская провинция (1,8-2,0 млрд лет назад) и Трансскандинавский изверженный пояс (1,6-1,8 млрд лет назад). Кроме того, на его юго-западной оконечности находится Свеконорвежский пояс возрастом 0,9-1,2 млрд лет [1]. Наиболее древние архейские породы обнажаются в северо-восточной части щита на территории Кольского п-ова, который, в свою очередь, состоит из трех основных тектонических элементов – Мурманского, Кольского и Беломорского блоков (Кольский и Беломорский блоки совместно с более мелкими Умбинско-Терским и Стрельнинским террейнами некоторыми исследователями объединяются в Лапландско-Кольский ороген [2]). Расположение основных тектонических элементов приведено на рис.1. Таким образом, в структуре Фенноскандинавского щита проявляется явная тенденция к «удревнению» пород с запада на восток, что совместно с отсутствием осадочного чехла делает его удобным полигоном для изучения эволюции Земли.

Лапландско-Кольский ороген (ЛКО), занимающий центральную часть Кольского п-ова, заключен между Мурманским блоком на севере и Карельским блоком на юге. Он представляет собой хорошо экспонированный участок щита, обнажающий все важнейшие тектонические элементы,

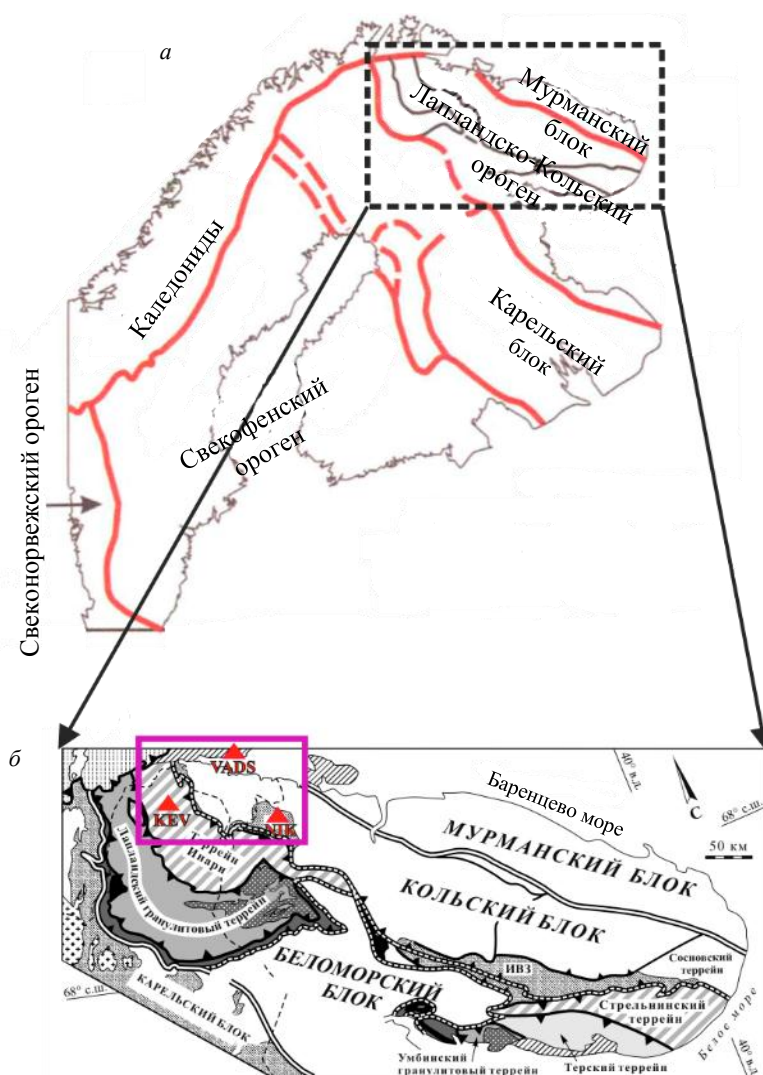


Рис.1. Тектоническая схема Фенноскандинавского щита по [3, 4] (а) и детальная тектоническая схема Кольского региона по [4, 5] (б). Красными треугольниками отмечено положение использованных в данной работе сейсмических станций VADS, NIK и KEV; фиолетовым прямоугольником показан регион исследования

тем самым обеспечивая понимание закономерностей геодинамических процессов с неоархейского до палеопротерозойского возрастов. ЛКО был центром крупных плюмовых процессов в позднем неоархее и до палеопротерозойского периода [6-8], что привело к рифтогенезу и распаду суперконтинента Кенорланд [9-12], а затем к образованию океанической коры, субдукции и генерации палеопротерозойской ювенильной континентальной коры [13, 14]. Кроме того, ЛКО известен обилием крупных месторождений никелевых и железных руд, апатита, платины, палладия, титана, бадделеита и т.д.

В статье представлены новые сейсмологические результаты исследований строения литосферы северо-западной части ЛКО, особое внимание уделено находящемуся в этой зоне Печенгскому рудному району и расположенной в нем сейсмической станции «Никель» (NIK). Повышенный интерес к исследованиям этой области вызван не только возможностью решения широкого комплекса фундаментальных научных задач, но и наличием одного из крупнейших сульфидных медно-никелевых месторождений.

Первые исследования глубинного строения Печенгского района были начаты в 1960-1963 гг. под руководством И.В.Литвиненко (Ленинградский горный институт) с помощью метода глубинного сейсмического зондирования по профилю Баренцево море – Печенга – Ловно и позднее были продолжены многими учеными [15]. Кроме того, в рамках Печенгской структуры был уникальный



эксперимент по сверхглубокому бурению скважины СГ-3, вскрывшей породы земной коры до глубины 12262 м, позволивший верифицировать результаты косвенных геофизических исследований прямыми наблюдениями. По мере накопления новых данных и изменения представлений об эволюции Земли менялись и представления о развитии Печенгской структуры и процессе генезиса месторождений полезных ископаемых. Согласно одной из наиболее современных концепций, их генерация связывается с плюмовым палеопротерозойским процессом, способствовавшим поднятию к поверхности недеплетированного материала примитивных магм, следы которых можно обнаружить и в настоящее время [16, 17].

Методы. Для получения глубинных скоростных разрезов в работе был применен метод функций приемника (Receiver function, RF). В его основе лежит использование обменных волн, формирующихся на контрастных сейсмических границах в районе сейсмической станции, при прохождении через них колебаний от удаленных сейсмических событий. Эти волны характеризуют ту часть среды, в которой они были сформированы. Таким образом, получаемые с применением RF результаты можно эффективно локализовать и интерпретировать путем расчета мест формирования обменных волн (или «точек обмена») на интересующих глубинах.

Метод разделяется на две составляющие по типам используемых обменных фаз – P -функцию приемника (или PRF), которая основывается на анализе обменных и кратных волн P - S (P_s), и, соответственно, S -функцию приемника (или SRF), построенную на обменных и кратных волнах S - P (S_p). Их совместное моделирование позволяет получить устойчивый скоростной разрез земной коры и верхней мантии [18, 19].

Для получения функций приемника был использован подход, многократно апробированный и детально описанный в литературе [20]. Наиболее важные аспекты методики: на первом этапе сейсмические события отбирались в соответствии с эпицентрными расстояниями; для анализа PRF использовались события, находящиеся в диапазоне расстояний 30 - 100° , для SRF – в диапазоне расстояний 65 - 100° . Для получения параметров анализируемых событий (времени в очаге, глубины и координат) использовался каталог CMT (Global Centroid Moment Tensor Catalog) [21, 22]. Кроме того, ввиду существенной удаленности очагов событий от станции, землетрясения магнитудой менее $5,5$ не рассматривались. Для дальнейшего анализа отбирались события с импульсной формой колебания первой падающей волны (P для PRF и S для SRF) и высоким (более 3) отношением сигнал/шум. Сейсмограмма каждого отобранного события фильтровалась (в работе использован фильтр Баттерворта второго порядка с граничным периодом 5 с для получения PRF и 8 с при расчете SRF), после чего проводился переход из трехкомпонентной системы координат ZNE в лучевую систему координат LQT для PRF и LAB – для SRF. В лучевой системе координат LQT компонента L соответствует направлению колебаний в падающей P -волне, Q – перпендикулярна L в плоскости P - SV , T – ортогональна плоскости LQ . В системе координат LAB компонента L соответствует направлению выхода падающей волны, A – направлению поляризации S -волны, B – ортогональна L и A . Для стандартизации записей и минимизации влияния особенностей очагового процесса, к индивидуальным функциям приемника применялась деконволюция в предположении, что L - и A -компоненты в PRF и SRF с точностью до нормирующего коэффициента определяются формой падающей волны и минимально зависят от параметров среды. В процессе деконволюции подбирался фильтр, который приближает наблюдаемые волновые формы на L - и A -компонентах к импульсной форме типа дельта-функции.

Для выявления обменных волн от исследуемых сейсмических границ в земной коре и верхней мантии индивидуальные функции приемника суммировались. Причем механизм суммирования для PRF и SRF различается. В первом случае индивидуальные записи суммировались с поправками, которые зависят от параметра луча данной падающей волны и глубины границы обмена (строился стек). Все события приводились к одним значениям параметра луча – $6,4$ с/град, а затем для каждой целевой глубины и для каждого события рассчитывались индивидуальные временные поправки, на которые «сдвигалась» сейсмограмма перед суммированием. Суммарные трассы рассчитывались для многих предполагаемых глубин конверсии. SRF суммировались с учетом весовых коэффициентов за уровень шума на каждой из трасс и за отклонение поляризации падающей S -волны от плоскости P - SV , а также относительно референтного (обычно среднего по всем зарегистрированным индивидуальным записям) эпицентрального расстояния. Подробно способ расчета этих коэффициентов приведен в работе [23].



Для расчета глубинных скоростных разрезов решалась обратная задача на основе совместной инверсии PRF и SRF. Поиск оптимальных моделей (минимизация) проходил с использованием хорошо известного алгоритма Левенберга – Марквардта [24]. Была использована модель среды, состоящая из латерально однородных слоев. Прямая задача по расчету синтетических функции приемника решалась с помощью матричного алгоритма Томсона – Хаскелла [25]. Для получения искомых скоростных моделей использовался вероятностно-статистический подход с генерацией множества случайных пробных априорных моделей. Его основным преимуществом является независимость от начальной скоростной модели, сформированной на основе априорной информации, которая часто является неполной или отсутствует для изучаемого района.

В представленной работе варьируемыми параметрами в индивидуальных моделях являлись: скорость поперечной волны V_s , отношение скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s и мощность каждого слоя; среда описывалась 14 слоями. Для данных каждой сейсмической станции было рассчитано по 100000 случайных начальных моделей и синтетические PRF и SRF, по которым затем минимизировались. Итоговая скоростная модель строилась как медиана по выборке из 2-3 % лучших решений (тех, синтетические PRF и SRF от которых наилучшим образом согласуются с наблюдениями). Для стабилизации инверсии и более корректной оценки абсолютных скоростей по разрезу в процесс решения обратной задачи были включены также невязки времен пробега обменных волн от границ 410 и 660 км в верхней мантии относительно модели IASP91 (Δtp и Δts) [26], как было показано в работе [27]. Для получения окончательного распределения варьируемых параметров пространство параметров модели было разбито на ячейки. Решение представлено как область сгущения минимизированных случайных исходных моделей, синтетические PRF и SRF от которых лучше всего соответствуют наблюдаемым данным. Выделяются те ячейки, через которые прошло наибольшее количество отобранных минимизированных пробных моделей. Использованный механизм получения решения обратной задачи подробно описан в работе [28].

Исходные данные. В качестве исходных данных в работе использованы записи новой сейсмической станции НИК, расположенной в пос. Никель Мурманской обл. вблизи крупнейших медно-никелевых месторождений Печенгского района. Станция открыта в 2020 г. и укомплектована широкополосным велосиметром с частотным диапазоном 0,03-50 Гц и сейсмическим регистратором RefTek 130.

Для оценки качества данных, получаемых новой сейсмической станцией НИК, были проведены исследования регистрируемого микросейсмического фона. Для этого по записям каждой из компонент (Z , N , E) по всему набору непрерывных сейсмических данных за все время регистрации была рассчитана спектральная плотность мощности шума SPM (рис.2), которая сравнивалась с допустимыми

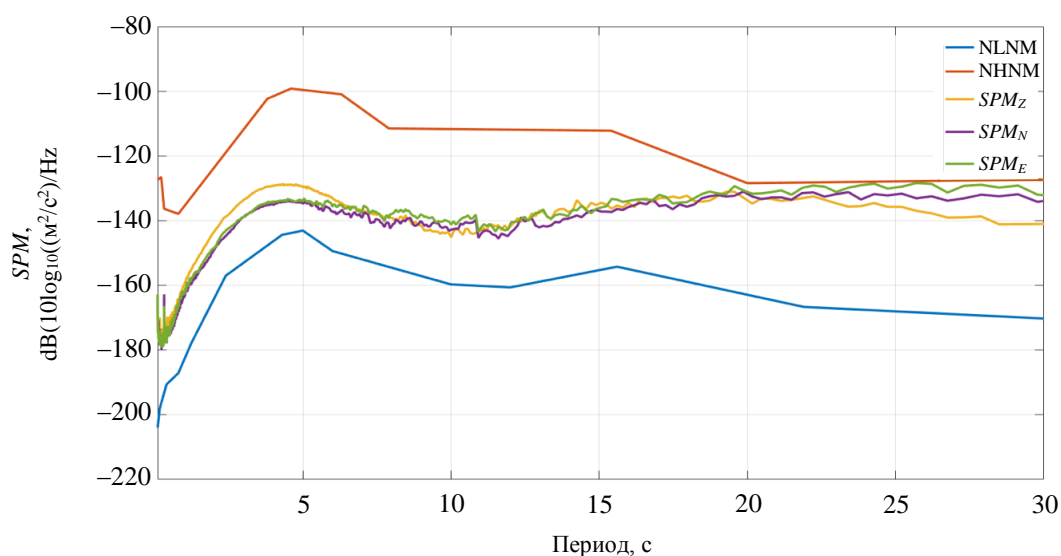


Рис.2. Распределение спектральных плотностей мощности микросейсмического шума для каждой из компонент (SPM_Z , SPM_N , SPM_E) по данным станции «Никель» NLNM и NHNM – минимальные и максимальные допустимые значения этого параметра



значениями этого параметра, полученными по наблюдениям 75 «эталонных» сейсмических станций мировой сети*. Уровень микросейсмического шума не выходил за пределы стандартных значений для всех регистрируемых периодов, и, более того, станцию можно отнести к разряду «тихих» при анализе сигналов с периодом до 15 с.

Помимо данных станции НИК, в работе также были проанализированы данные двух других широкополосных сейсмических станций мировой сети, расположенных в северо-западной части ЛКО, – «Вадсо» (VADS) и «Кево» (KEV). Обе станции являются стационарными, работают более семи лет и укомплектованы велосиметрами с граничным периодом регистрации не менее 120 с, что обеспечивает высокое качество регистрируемого сейсмического материала. Основные характеристики использованных сейсмических станций приведены в таблице.

**Основные параметры сейсмических станций
и количество рассчитанных индивидуальных функций приемника PRF и SRF**

Код станции	Название станции	Широта	Долгота	Год открытия	Тип датчика	Полоса пропускания, Гц	PRF	SRF
НИК	Никель	69,24	30,13	2020	RefTek 151-30	0,03-50	41	32
VADS	Вадсо	70,12	29,36	2016	Trillium 120 PA	0,008-30	85	143
KEV	Кево	69,75	27,00	1993	STS 1	0,002-10	247	200

На основе проанализированного объема сейсмических данных для станции VADS были рассчитаны 143 индивидуальных SRF и 85 индивидуальных PRF; для станции KEV – 200 SRF, 247 PRF; для станции НИК – 32 SRF, 41 PRF. Распределение эпицентров отобранных событий приведено на рис.3. Распределение эпицентров использованных событий позволяет избежать азимутальной зависимости при получении скоростных моделей после суммирования индивидуальных PRF и SRF даже для станции НИК, по которой имеется наименьший объем данных. По периметру сетки отложены значения азимута в градусах, вдоль азимутальных направлений отложены эпицентральные расстояния в градусах.

Результаты. Особенностью метода функций приемника является высокая чувствительность получаемых глубинных скоростных моделей к контрастам сейсмических скоростей при не всегда точных оценках их абсолютных значений. Эту проблему можно решить, используя значения обнаруженных невязок времен пробега обменных волн от границ зоны фазовых переходов в верхней

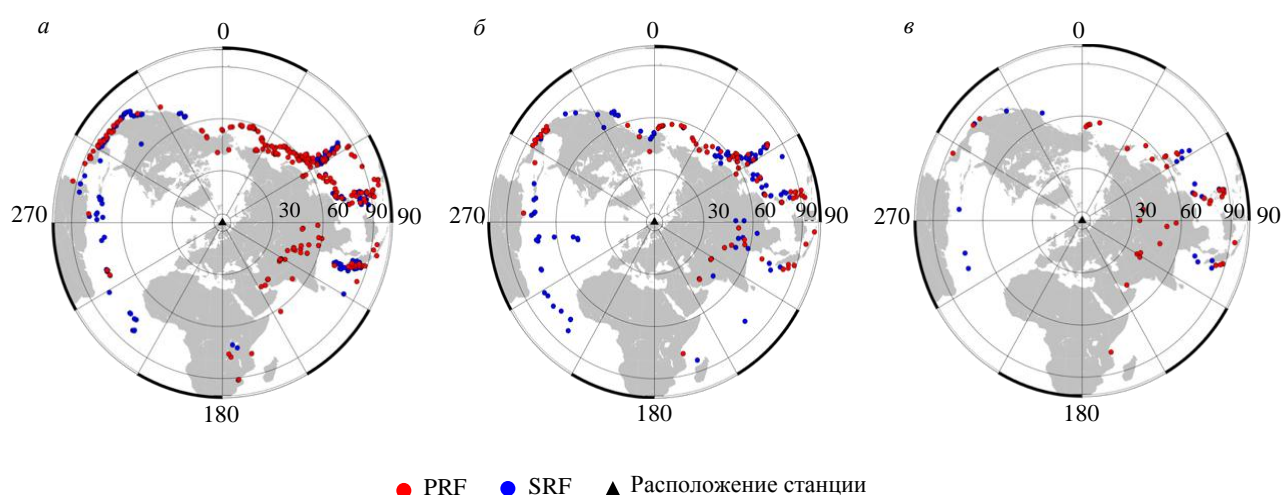


Рис.3. Распределения эпицентров отобранных событий для расчета индивидуальных PRF и SRF для станций KEV (а), VADS (б) и НИК (в)

* Peterson J. Observation and modeling of seismic background noise: Open-File Report 93-322. Albuquerque: U.S. Department of Interior, Geological Survey, 1993. 94 p. DOI: [10.3133/ofr93322](https://doi.org/10.3133/ofr93322)



мантии на глубинах около 410 и 660 км [27]. Кроме того, наличие хорошо определяемых на записях фаз от этих глобальных границ является дополнительным индикатором высокого качества исходных данных. Для определения отмеченных невязок по данным PRF каждой из анализируемых станций, в соответствии с описанной выше методикой, были построены стеки (рис.4).

Анализируемые обменные волны P_s от границ зоны фазовых переходов P410s и P660s хорошо выделяются на записях. Причем обращает на себя внимание «фокусировка» этих фаз, т.е. максимальная амплитуда фазы наблюдается на трассе, отвечающей ожидаемой глубине (около 410 или 660 км). От каждой из станций получены согласованные (с точностью до ошибки измерения, составляющей примерно 0,1 с) значения времен вступления этих фаз. Согласно стандартной скоростной модели Земли IASP91 для параметра луча 6,4 с/град, к которому приведены отмеченные записи, фазы P410s и P660s должны фиксироваться на записях на 44 и 67,9 с. Для всех анализируемых данных наблюдаются согласованные отрицательные невязки времен $t_{\text{набл}} - t_{\text{станд}} = -1$, причем как для фазы P410s, так и для фазы P660s. Зарегистрированное таким образом «опережение» наблюдаемых времен вступления изучаемых фаз свидетельствует о средних повышенных скоростях в верхней мантии.

На основе совместного моделирования PRF и SRF, а также невязок времен пробега обменных волн P410s и P660s были получены скоростные модели земной коры и верхней мантии до глубины около 300 км для каждой из анализируемых станций (рис.5). Наиболее значимой выявленной особенностью строения верхней мантии является слой относительно пониженных скоростей в районе станции VADS на глубинах 140-170 км. На тех же глубинах выделяется слой пониженных скоростей и по данным станции KEV, однако существенно менее выраженный. По данным станции NIK слой относительно пониженных скоростей на глубине около 150 км не проявляется.

Скоростное строение земной коры изучаемого района не демонстрирует ярких особенностей или ярко контрастных сейсмических границ (рис.6). Средние значения скоростей в коре, полученные по данным станции VADS, существенно выше как значений стандартной скоростной модели Земли IASP91, так и значений по данным станций KEV и NIK. Кроме того, привлекает внимание существенное различие в строении коро-мантийного перехода. Согласно модели в районе станции VADS, он представляет собой единый раздел на глубине около 46 км, тогда как в районе станции

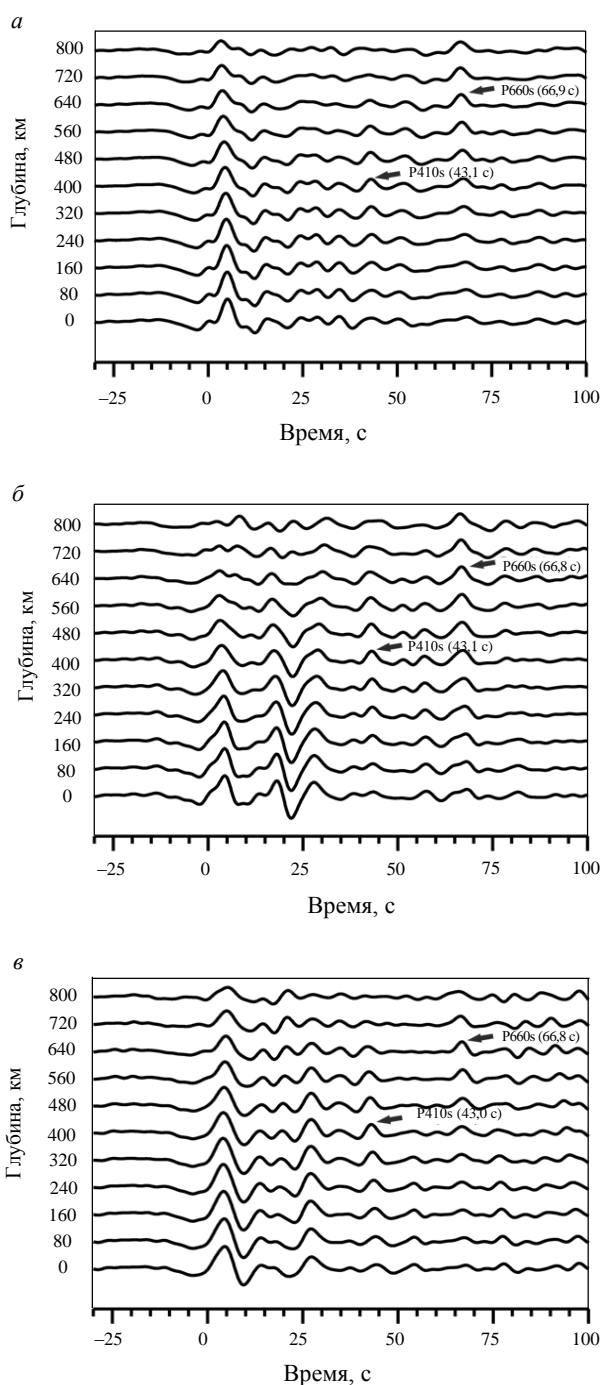


Рис.4. Стеки записей PRF для станций KEV (а), VADS (б) и NIK (в) (в скобках указаны отмеченные времена запаздывания максимальных значений амплитуд обменных волн относительно времени вступления первой P -волны; для каждой трассы указана целевая глубина конверсии)

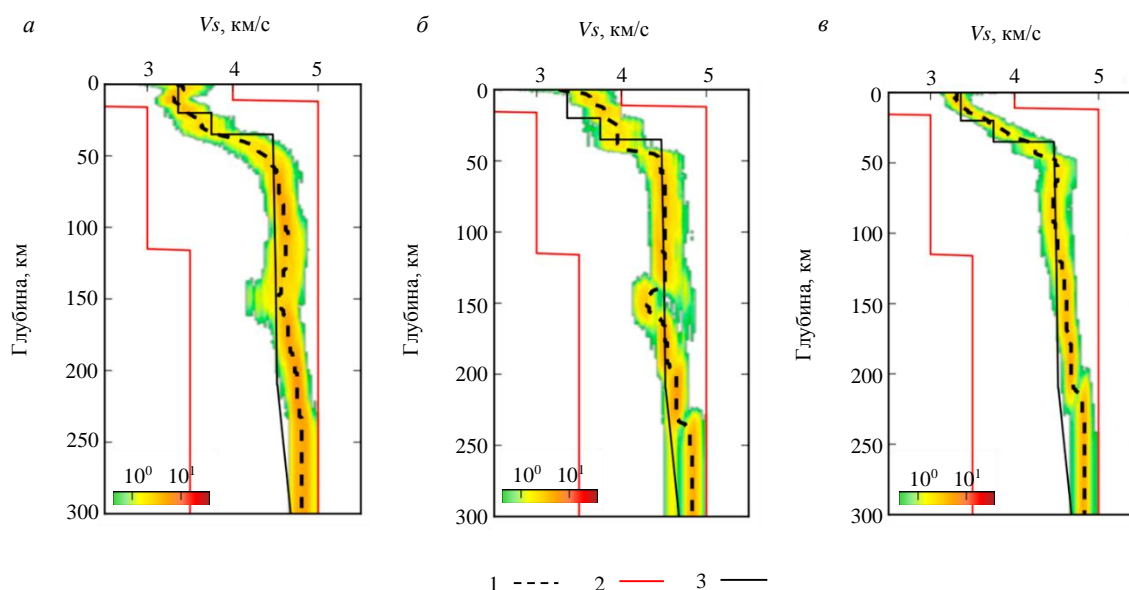


Рис.5. Скоростные модели поперечных волн V_s до глубин около 300 км для станций KEV (а), VADS (б) и NIK (в) (поля сгущения индивидуальных минимизированных случайных моделей)

1 – итоговые медианные модели; 2 – границы формирования случайных начальных моделей; 3 – модель IASP91

KEV выявлен градиентный слой с выходом на стандартные для мантии значения скоростей на глубине около 55 км. В модели, характеризующей Печенгский рудоносный район (данные станции NIK), выявляются две значимые границы в нижней коре – на глубинах 37 и 47 км; причем стандартные мантийные скорости достигаются на глубине около 47 км, что делает ее предпочтительной при определении сейсмической границы Мохо.

Обсуждение результатов. Несмотря на относительную близость расположения сейсмических станций, сейсмические модели скоростного строения литосферы северо-западной части ЛКО существенно отличаются. Причем отличия прослеживаются не только в структуре земной коры, но и в верхней мантии. Согласованные по всем станциям результаты достигаются только при анализе особенностей строения границ на глубинах 410 и 660 км.

По модели распределения скоростей V_s , полученной на основе данных станции VADS, можно сделать вывод о наличии в верхней мантии слоя пониженных скоростей на глубинах 140-170 км.

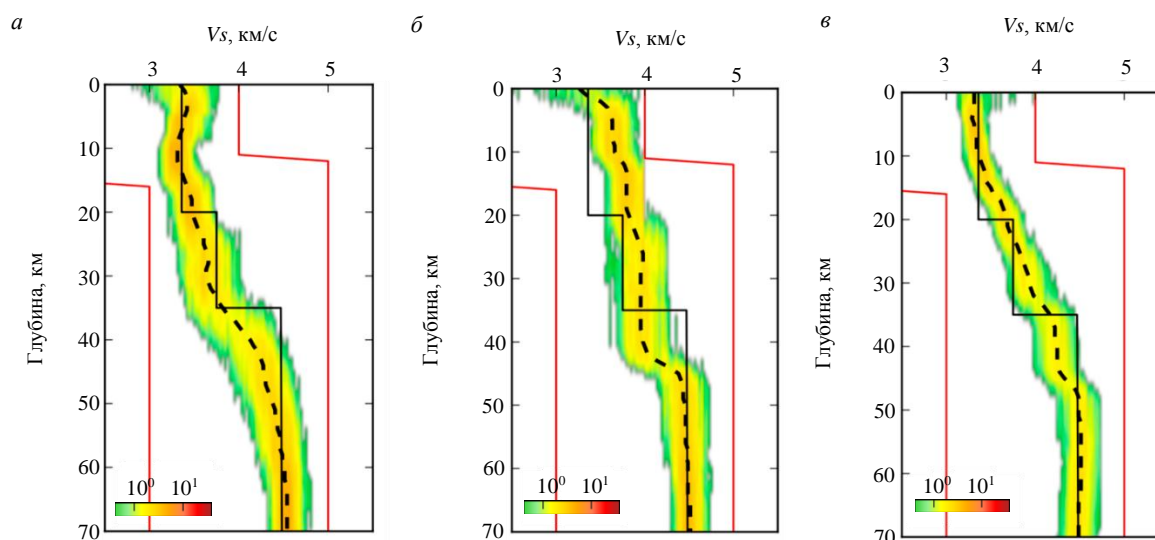


Рис.6. Скоростные модели поперечных волн V_s до глубин около 70 км для станций KEV (а), VADS (б) и NIK (в) (условные обозначения см. на рис.5)



По модели, полученной по данным станции KEV, на указанных глубинах также выявляется тенденция к понижению сейсмических скоростей, однако выделяется она не явно и констатировать наличие или отсутствие слоя пониженных скоростей по имеющимся данным нельзя. Относительно малые глубины (около 140-170 км), на которых обнаружен этот слой, не позволяют связывать его с астеносферой [29]. Вероятно, в данном случае в разрезе выявляется среднелитосферная неоднородность или MLD (mid-lithosphere discontinuity). Наличие этого слоя в различных регионах Земли, в том числе и Фенноскандинавском щите, впервые показано на основе сейсмических данных в работе [30]. Очевидно, этот слой является глобальным, во всяком случае для областей кратонов. Однако глубины его залегания, мощность, а также сейсмические скорости в нем различаются для различных тектонических структур и, вероятно, зависят от условий их формирования [31-33]. Стоит обратить внимание, что для большинства регионов Земли этот слой определяется в диапазоне глубин 100-150 км. В частности, для центральной и восточной частей Кольского региона на основе анализа данных сверхдлинного профиля «Кварц», отработанного с применением «мирных ядерных взрывов», показано наличие этого слоя на глубинах около 80-140 км [34]. Для территории Финляндии, по данным сейсмической томографии, также выявлен слой пониженных скоростей, причем его параметры различаются для северной и южной частей Финляндии. В частности, глубина его залегания увеличивается с юга на север [35]. В районе установки станции KEV он определен на глубине около 180 км, что не противоречит оценкам автора с учетом точности методики RF на этих глубинах.

В настоящее время не существует единой модели, описывающей механизм формирования и природу MLD. Среди высказываемых гипотез можно выделить следующие: реологическую – расслоенность при температуре, близкой к точке солидуса [36]; петрофизическую – расслоенность в условиях либо частичного подплава вещества [37], либо в присутствии базальтовых расплавов [36, 38]; изменение деформационных свойств с глубиной [39].

Несхожесть глубины и структуры коро-мантийного перехода, зафиксированного по данным станций KEV и VADS, не может быть однозначно интерпретирована на основе данных всего трех сейсмических станций. Для того, чтобы оказать существенное влияние на структуру зоны Мохо, необходим вклад масштабного тектонического процесса. Наиболее логично связать выявленную особенность с артефактами процессов формирования Каледонского орогена, сформированного в результате коллизии микроконтинентов Балтика-Авалония-Лаврентия [40, 41]. Изменение сейсмической резкости Мохо может быть связано с переработкой в процессе деформации, вызвавшей утрату высокоскоростного слоя нижней коры, обнаруженного в центральной и южной Швеции [42] (который, возможно, был переработан в эклогиты, местами обнаруживаемые на поверхности вдоль побережья Норвегии).

Наибольший интерес представляет модель глубинного строения Печенгского региона, полученная на основе данных новой сейсмической станции NIK (рис.7). Она расположена в непосредственной близости от крупнейших медно-никелевых месторождений Котсельваара-Каммикиви и Ждановского восточного рудного узла, а также в 42 км от Кольской сверхглубокой скважины СГ-3.

В полученной модели скоростного строения земной коры контрастные сейсмические границы не выявляются. В нижней части скоростного разреза как V_p , так и V_s выделяются две сейсмические границы на глубинах 37 и 47 км соответственно. Причем значения скоростей начинают соответствовать стандартным для верхней мантии на глубинах около 47 км. Сложная двухэтапная структура перехода кора – мантия с двумя границами M1 и M2 в целом подтверждается результатами, полученными на основе других геофизических методов [43, 44]. Такое «расщепление» коро-мантийного перехода может быть интерпретировано реликтом масштабного тектонического процесса, например мантийного диапира или плюма, предположительно существовавшего на территории Печенгского района в протерозойское время [16]. Необходимо отметить, что следы мантийных диапиров в современном строении среды обнаружены в различных регионах Земли (например, на Дальнем Востоке России [45]).

Еще одной яркой особенностью полученных новых глубинных моделей является зона аномально высоких значений параметра V_p/V_s (~ 2), начинающаяся от поверхности и достигающая глубин около 20 км. Полученные методом RF скоростные модели можно пространственно локализовать для заданной глубины. Чтобы определить регион, который характеризуется скоростными



моделями, могут быть вычислены «точки обмена», т.е. проекции на дневную поверхность областей формирования обменных волн для заданной глубины. На рис.7 показаны точки обмена для глубины 20 км и оконтурирована характеризующая полученными скоростными моделями область. Наличие зоны с такими высокими V_p/V_s в земной коре может свидетельствовать не только о сохранившейся промежуточной магматической камере [46], которая может содержать в себе полезные ископаемые, но и о сохранности на изучаемой территории реликтового магматического канала, через который материал достигал поверхности.

Прямое сопоставление скоростных разрезов, полученных в рамках представленной работы, с результатами исследований СГ-3 затруднено по ряду причин. В первую очередь это вызвано длиннопериодным характером данных, используемых в методике RF, что способствует существенному латеральному осреднению и, конечно, не позволяет определять слои мощностью в несколько сотен метров, выявленные путем анализа керна Кольской сверхглубокой скважины [47]. Кроме того, в рамках работ на СГ-3 существенно более точно определены скорости V_p , тогда как метод RF в большей степени фокусируется на определении V_s . При этом необходимо отметить, что полученные автором значения сейсмических скоростей находятся в качественном согласии со значениями, показанными по разрезу СГ-3 и в современных региональных объемных томографических моделях Печенгской структуры [43, 47].

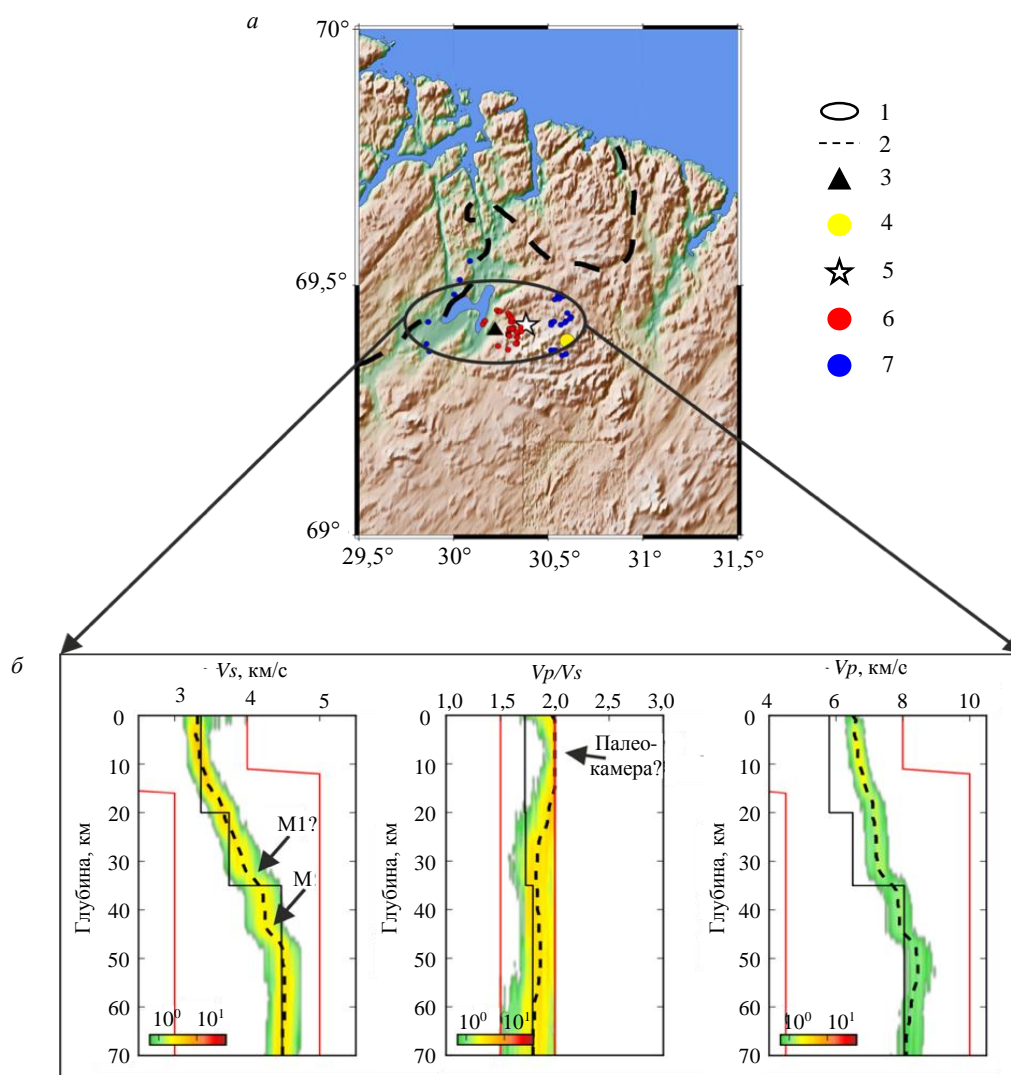


Рис.7. Карта Печенгского района (а) и модели распределения (б) V_s , V_p/Vs и V_p с глубиной (условные обозначения см. на рис.5)

1 – область, характеризующаяся скоростными моделями; 2 – государственная граница;
3 – сейсмическая станция НИК; 4 – Кольская сверхглубокая скважина; 5 – рудник Каула-Котсельваара;
6 – точки обмена PRF для глубины 20 км; 7 – точки обмена SRF для глубины 20 км



Заключение. Проанализированы сейсмологические данные трех сейсмических станций, расположенных в северо-западной части Лапландско-Кольского орогена. Две из них являются постоянными – KEV в северной части Финляндии и VADS в северо-восточной части Норвежских каледонид, а также одной новой станции NIK, установленной в 2020 г. в Печенгском рудном районе. В рамках проведенных исследований показано, что литосфера изучаемой территории имеет неоднородное скоростное строение не только в рамках земной коры, но и в верхней мантии до глубины примерно 200 км. В структуре верхней мантии прослеживается зона пониженных скоростей на глубинах около 150 км, вероятно, связанная со среднелитосферной неоднородностью (MLD). Причем наиболее ярко MLD проявляется в северной части Финляндии, существенно слабее эта область выявляется в структуре под Норвежскими каледонидами и не маркируется под Печенгским районом. Выявлены существенные отличия в строении коро-мантийного перехода, представленного единым разделом на глубине 46 км (по данным станции VADS), градиентного слоя с выходом на стандартные для мантии значения скоростей сейсмических волн на глубине около 55 км (по данным станции KEV) и сложной зоной с двумя границами на глубинах около 37 и 47 км под Печенгской структурой (по данным станции NIK). При этом, с учетом абсолютных значений скоростей, нижняя граница выглядит более предпочтительной при обнаружении границы Мохо.

В модели среды Печенгского рудного района, от поверхности и до глубин около 20 км, выявлено наличие аномально высоких значений отношения V_p/V_s (~ 2) в районе крупнейших медно-никелевых месторождений Котсельваара-Каммикиви и Ждановского восточного рудного узла. Такие высокие значения, характерные, в частности, для пород недеплетированной мантии, могут быть связаны с реликтом промежуточной магматической камеры, сформированной в процессе протерозойского рифтогенеза.

Выявленные аномалии в строении коро-мантийного перехода, значений V_p/V_s , а также отсутствие MLD под Печенгским районом (на соседних территориях показано его наличие) могут быть совместно интерпретированы как артефакты протерозойского этапа плюмового магматизма, характерного для Печенгского района и подтвержденного комплексом геологических и изотопно-геохимических данных [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Daly J.S., Balagansky V.V., Timmerman M.J., Whitehouse M.J. The Lapland–Kola orogen: Palaeoproterozoic collision and accretion of the northern Fennoscandian lithosphere // *European Lithosphere Dynamics: Geological Society Memoirs*. London: Geological Society, 2006. Vol. 32. P. 579–598. DOI: [10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.35](https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.35)
2. Hjelt S.-E., Daly J.S. SVEKALAPKO colleagues. SVEKALAPKO: evolution of Palaeoproterozoic and Archaean Lithosphere // *Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents*. Uppsala: EUROPROBE Secretariat, Uppsala University, 1996. P. 56–67.
3. Gorbatshev R., Bogdanova S. Frontiers in the Baltic Shield // *Precambrian Research*. 1993. Vol. 64. Iss. 1–4. P. 3–21. DOI: [10.1016/0301-9268\(93\)90066-B](https://doi.org/10.1016/0301-9268(93)90066-B)
4. Мудрук С.В., Балаганский В.В., Горбунов И.А., Раевский А.Б. Альпинотипная тектоника в палеопротерозойском Лапландско-Кольском орогене // *Геотектоника*. 2013. № 4. С. 13–30. DOI: [10.7868/S0016853X1304005X](https://doi.org/10.7868/S0016853X1304005X)
5. Балаганский В.В., Глазнев В.Н., Осипенко Л.Г. Раннепротерозойская эволюция северо-востока Балтийского щита: террейновый анализ // *Геотектоника*. 1998. № 2. С. 16–28.
6. Amelin Y.V., Semenov V.S. Nd and Sr isotopic geochemistry of mafic layered intrusions in the eastern Baltic shield: implications for the evolution of Paleoproterozoic continental mafic magmas // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1996. Vol. 124. Iss. 3–4. P. 255–272. DOI: [10.1007/s004100050190](https://doi.org/10.1007/s004100050190)
7. Lobach-Zhuchenko S.B., Arestova N.A., Chekulaev V.P. et al. Geochemistry and petrology of 2.40–2.45 Ga magmatic rocks in the north-western Belomorian Belt, Fennoscandian Shield, Russia // *Precambrian Research*. 1998. Vol. 92. Iss. 3. P. 223–250. DOI: [10.1016/S0301-9268\(98\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00076-X)
8. Шарков Е.В., Богатилов О.А., Красивская И.С. Роль мантийных плюмов в тектонике раннего докембрия восточной части Балтийского щита // *Геотектоника*. 2000. № 2. С. 3–25.
9. Williams H., Hoffman P.F., Lewry J.F. et al. Anatomy of North America: thematic geologic portrayals of the continent // *Tectonophysics*. 1991. Vol. 187. Iss. 1–3. P. 117–134. DOI: [10.1016/0040-1951\(91\)90416-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90416-P)
10. Pesonen L.J., Elming S.-Å., Mertanen S. et al. Palaeomagnetic configuration of continents during the Proterozoic // *Tectonophysics*. 2003. Vol. 375. Iss. 1–4. P. 289–324. DOI: [10.1016/S0040-1951\(03\)00343-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00343-3)
11. Mints M.V., Konilov A.N. Geodynamic crustal evolution and long-lived supercontinents during the Palaeoproterozoic: evidence from granulite-gneiss belts, collisional and accretionary orogens // *The Precambrian Earth, Tempos and Events*. Elsevier, 2004. Vol. 12. P. 223–239.
12. Балаганский В.В., Мици М.В., Дэйли Дж.С. Палеопротерозойский Лапландско-Кольский ороген // *Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE*. М.: ГЕОКАРТ; ГЕОС, 2006. Вып. 2. С. 158–171.
13. Daly J.S., Balagansky V.V., Timmerman M.J. et al. Ion microprobe U–Pb zircon geochronology and isotopic evidence for a trans-crustal suture in the Lapland–Kola Orogen, northern Fennoscandian Shield // *Precambrian Research*. 2001. Vol. 105. Iss. 2–4. P. 289–314. DOI: [10.1016/S0301-9268\(00\)00116-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00116-9)
14. Lahtinen R., Huhma H. A revised geodynamic model for the Lapland-Kola Orogen // *Precambrian Research*. 2019. Vol. 330. P. 1–19. DOI: [10.1016/j.precamres.2019.04.022](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.04.022)
15. Шаров Н.В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. 173 с.



16. Скуфьин П.К., Баянова Т.Б. Раннепротерозойский вулкан центрального типа в Печенгской структуре и его связь с рудоносным габбро-верлитовым комплексом, Кольский полуостров // Петрология. 2006. Т. 14. № 6. С. 649-669.
17. Арзамасцев А.А., Степанова А.В., Самсонов А.В. и др. Базитовый магматизм северо-восточной части Фенноскандии (2,06-1,86 млрд лет): геохимия вулканитов и корреляция с дайковыми комплексами // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2020. Т. 28. № 1. С. 3-40. DOI: 10.31857/S0869592X20010020
18. Kosarev G.L., Oreshin S.I., Vinnik L.P. et al. Heterogeneous lithosphere and the underlying mantle of the Indian subcontinent // Tectonophysics. 2013. Vol. 592. P. 175-186. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.02.023
19. Oreshin S., Kiselev S., Vinnik L. et al. Crust and mantle beneath western Himalaya, Ladakh and western Tibet from integrated seismic data // Earth and Planetary Scientific Letters. 2008. Vol. 271. Iss. 1-4. P. 75-87. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.03.048
20. Винник Л.П. Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16-27. DOI: 10.31857/S0002-33372019116-27
21. Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1981. Vol. 86. Iss. B4. P. 2825-2852. DOI: 10.1029/JB086iB04p02825
22. Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2012. Vol. 200-201. P. 1-9. DOI: 10.1016/j.pepi.2012.04.002
23. Farra V., Vinnik L. Upper mantle stratification by P and S receiver functions // Geophysical Journal International. 2000. Vol. 141. Iss. 3. P. 699-712. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2000.00118.x
24. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. New York: Cambridge University Press, 2007. 1256 p.
25. Haskell N.A. Crustal reflection of plane P and SV waves // Journal of Geophysical Research. 1962. Vol. 67. № 12. P. 4751-4768. DOI: 10.1029/JZ067i012p04751
26. Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. 1991. Vol. 105. Iss. 2. P. 429-465. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x
27. Vinnik L., Kozlovskaya E., Oreshin S. et al. The lithosphere, LAB, LVZ and Lehmann discontinuity under central Fennoscandia from receiver functions // Tectonophysics. 2016. Vol. 667. P. 189-198. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.11.024
28. Алеших И.М. Построение решения обратной задачи по ансамблю моделей на примере инверсии приемных функций // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 63-66. DOI: 10.31857/S2686739721010047
29. Wang Z., Kusky T.M. The importance of a weak mid-lithospheric layer on the evolution of the cratonic lithosphere // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 190. P. 557-569. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.02.010
30. Thybo H., Perchuc E. The Seismic 8° Discontinuity and Partial Melting in Continental Mantle // Science. 1997. Vol. 275. Iss. 5306. P. 1626-1629. DOI: 10.1126/science.275.5306.1626
31. Yang H., Artemieva I.M., Thybo H. The Mid-Lithospheric Discontinuity Caused by Channel Flow in Proto-Cratonic Mantle // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2023. Vol. 128. Iss. 4. № e2022JB026202. DOI: 10.1029/2022JB026202
32. Weijia Sun, Li-Yun Fu, Erdinc Saygin, Liang Zhao. Insights Into Layering in the Cratonic Lithosphere Beneath Western Australia // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018. Vol. 123. Iss. 2. P. 1405-1418. DOI: 10.1002/2017JB014904
33. Rychert C.A., Shearer P.M. A Global View of the Lithosphere-Asthenosphere Boundary // Science. 2009. Vol. 324. Iss. 5926. P. 495-498. DOI: 10.1126/science.1169754
34. Егорова Т.П., Павленкова Г.А. Сейсмо-плотностные модели земной коры и верхней мантии Северной Евразии по сверхдлинным сейсмическим профилям «Кварц», «Кратон» и «Кимберлит» // Физика Земли. 2015. № 2. С. 98-115. DOI: 10.7868/S0002333715010044
35. Silvennoinen H., Kozlovskaya E., Kissling E. POLENET/LAPNET teleseismic P wave travel time tomography model of the upper mantle beneath northern Fennoscandia // Solid Earth. 2016. Vol. 7. Iss. 2. P. 425-439. DOI: 10.5194/se-7-425-2016
36. Thybo H. The heterogeneous upper mantle low velocity zone // Tectonophysics. 2006. Vol. 416. Iss. 1-4. P. 53-79. DOI: 10.1016/j.tecto.2005.11.021
37. Yuan H., Romanowicz B. Lithospheric layering in the North American craton // Nature. 2010. Vol. 466. Iss. 7310. P. 1063-1068. DOI: 10.1038/nature09332
38. Rader E., Emry E., Schmerr N. et al. Characterization and Petrological Constraints of the Midlithospheric Discontinuity // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2015. Vol. 16. Iss. 10. P. 3484-3504. DOI: 10.1002/2015GC005943
39. Shun-ichiro Karato, Olugboji T., Park J. Mechanisms and geologic significance of the mid-lithosphere discontinuity in the continents // Nature Geoscience. 2015. Vol. 8. № 7. P. 509-514. DOI: 10.1038/ngeo2462
40. Corfu F., Gasser D., Chew D.M. New perspectives on the Caledonides of Scandinavia and related areas: introduction // New Perspectives on the Caledonides of Scandinavia and Related Areas. London: Geological Society, 2014. Special Publications. Vol. 390. P. 9-43. DOI: 10.1144/SP390.28
41. Егоров А.С., Винокуров И.Ю., Телегин А.Н. Научно-методические приемы повышения геологической и прогнозно-поисковой эффективности государственного геологического картирования российского арктического шельфа // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 447-458. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.447
42. Buntin S., Artemieva I.M., Malehmir A. et al. Long-lived Paleoproterozoic eclogitic lower crust // Nature Communications. 2021. Vol. 12. № 6553. DOI: 10.1038/S41467-021-26878-5
43. Исанина Э.В. Сейсмологические исследования методом МОВЗ в районе Кольской скважины СГ-3 // Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы: Лапландско-Печенгский район. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1997. С. 101-115.
44. Шаров Н.В., Исанина Э.В., Крупнова Н.А. Глубинное строение района бурения Кольской сверхглубокой скважины (по сейсмическим данным) // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2007. Т. 10. № 2. С. 309-319.
45. Алексеев В.И. Глубинное строение и геодинамические условия гранитоидного магматизма Востока России // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 259-265. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.259
46. Лобанов К.В., Чичеров М.В., Чижова И.А. и др. Глубинное строение и рудообразующие системы Печенгского рудного района (Арктическая зона России) // Арктика: экология и экономика. 2019. № 3 (35). С. 107-122. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-107-122
47. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования. М.: МФ «ТЕХНОНЕФТЕГАЗ», 1998. 260 с.

Автор А.Г.Гоев, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, andr.goev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9477-5963> (Институт динамики геосфер имени академика М.А.Садовского РАН, Москва, Россия).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Оценка вклада докембрийских отложений в формировании нефтеносности восточной части Волго-Уральского бассейна по результатам моделирования

Д.Д.Кожанов✉, М.А.Большакова

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Кожанов Д.Д., Большакова М.А. Оценка вклада докембрийских отложений в формировании нефтеносности восточной части Волго-Уральского бассейна по результатам моделирования // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 199-217. EDN OCPXEN

Аннотация. Рассмотрены результаты геохимического анализа органического вещества и нефтей протерозоя (RF-V комплекс) и палеозоя (продуктивные интервалы D₂, D₃, C₁₋₂) восточной части Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна. Полученные данные подкреплены результатами 2D-бассейнового моделирования по четырем региональным профилям, два из которых расположены в Камской и два в Бельской частях Камско-Бельского авлакогена. Скорректированы ранее полученные данные о степени катагенетической преобразованности нефтегазоматеринских толщ рифей-вендского нефтегазоносного комплекса, построены карты катагенеза. Приводятся новые доказательства наличия докембрийских нефтей в продуктивных комплексах палеозоя. Изучаемые нефти являются смешанными – образованными за счет продуктов генерации нефтегазоматеринских толщ рифея, венда и палеозоя (девонского и раннекаменноугольного возраста). По результатам моделирования выявлено, что основными нефтегазоматеринскими толщами в RF-V комплексе Камской части Камско-Бельского авлакогена являются отложения калтасинской свиты нижнего рифея и верещагинской свиты верхнего венда, в Бельской – толщи калтасинской, кабаковской, ольховской, приютовской, шиханской и леузинской свит рифея и старопетровские отложения в венде. Установлено, что увеличение интервала главной зоны нефтеобразования и газообразования происходит в юго-восточном направлении. В обеих впадинах Камско-Бельского авлакогена выделяется единая нефтяная система, функционирующая в отложениях стратиграфического интервала от рифея до нижнего карбона. В ее составе в качестве основных нефтегазоматеринских толщ рассматриваются толщи рифея-венда, коллектора приурочены к карбонатному комплексу рифея, терригенным отложениям верхнего венда и среднего девона, а покрывкой служат породы верхнего девона-турне.

Ключевые слова: Волго-Уральский бассейн; бассейновое моделирование; геохимия; органическое вещество; докембрий; нефтяная система

Поступила: 28.02.2023

Принята: 05.03.2024

Онлайн: 08.04.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. Анализ возможных источников нефти и газа в нефтегазоносных бассейнах (НГБ) является одной из ключевых задач при поиске месторождений углеводородов (УВ). Особенную роль играет оценка возможных источников УВ в тех бассейнах, в которых прогнозируется наличие нескольких нефтегазоматеринских толщ (НГМТ). Одним из таких объектов является Волго-Уральский нефтегазоносный бассейн (ВУ НГБ). Указанный регион расположен на востоке Восточно-Европейской платформы и приурочен к одноименной антеклизе. Осадочный разрез бассейна представлен отложениями рифея, венда, девона, карбона и перми. В структурном отношении разделен на два крупных комплекса – авлакогеновый (RF) и плитный (V-P). Стратиграфическое наполнение рифейского комплекса впадин Камско-Бельского авлакогена (КБА) различное [1, 2], в связи с чем в данной работе анализ этих отложений производится отдельно – для Камской и Бельской частей.

Промышленная нефтегазоносность ВУ НГБ в основном связана с продуктивными нефтегазоносными комплексами (НГК) терригенного девона (ардатовский, муллинский и пашийский горизонты), верхнего девона (терригенно-карбонатные отложения франского и фаменского возраста), нижнего (тульский и бобриковский горизонты) и среднего карбона (башкирско-московские отложения), нередко нефтегазоносными являются толщи нижней перми (ассельский, сакмарский и артинский пласты). Нижележащие отложения венда включают несколько небольших месторождений нефти (Соколовское, Сивинское, Шарканское, Дебесское) [1, 3, 4].



Причина практически полного отсутствия залежей УВ в рифей-вендском (RF-V) комплексе на сегодняшний день до конца не ясна. Возможно, это связано с разрушением ранее сформированных залежей или с наличием лишь незначительного количества органического вещества (ОВ) для генерации УВ. В качестве причины рассматривается отсутствие непроницаемой покрышки в RF-V комплексе (Д.И.Иванов, 2008), за счет чего УВ, сгенерированные рифей-вендскими породами, мигрировали и сконцентрировались в вышележащих отложениях палеозоя (Pz) [3].

На основе данных литературного обзора и собственных аналитических исследований был проведен анализ условий накопления и преобразования ОВ рифея, венда и верхнего девона-турне. По ограниченному набору биомаркерных параметров (распределение нормальных алканов, хейлантанов и стеранов) установлена генетическая связь палеозойских и протерозойских нефтей с ОВ докембрия*.

Результаты проведенного 2D-бассейнового моделирования подтвердили полученные данные, а также позволили выявить пространственные и временные особенности развития нефтяных систем изучаемой части бассейна.

Цель исследования – на основе биомаркерного анализа и 2D-бассейнового моделирования проанализировать влияние НГМТ RF-V на формирование нефтегазоносности осадочного чехла восточной части ВУ НГБ.

Задачи:

- Собрать и проанализировать данные о геологическом строении и нефтегазоносности пород рифея-венда восточной части ВУ НГБ.
- Рассмотреть имеющиеся публикации о составе (в том числе биомаркерном) ОВ протерозойских НГМТ России и мира.
- Выполнить геохимический анализ ОВ отложений докембрия и нефтей продуктивных комплексов V₂, D₂, D₃, C₁₋₂ методами изотопной геохимии и хромато-масс-спектрометрии.
- На основе полученного материала построить 2D-бассейновые модели по региональным профилям в пределах Камской и Бельской впадин КБА.
- Проанализировать работу нефтяных систем региона, оценить роль НГМТ разного возраста в формировании нефтегазоносности региона, а также представить непротиворечащую имеющейся информации модель нефтяных систем.

Материалы и методы. *Геохимический анализ.* Проанализировано 12 проб нефтей и 8 образцов битумоидов, экстрагированных из НГМТ докембрийского возраста (V₂кс – кочешорская свита). Образцы нефти выбирались по принципу территориальной близости к прибортовым зонам КБА (исходя из рекомендаций, предложенных в предыдущей работе [3]). Использовались образцы нефтей из продуктивных интервалов следующих площадей: Дебесская (V₂kr), Соколовская (V₂kr), Сивинская (D₃tm), Кудымкарская (D₃tm), Краснокамская (D₃tm), Куединская (D₂ps), Касибская (D₂ps), Мишкинская (D₃dm), Кулигинская (D), Савинская (C₁t) и Гожанская (C₁bb). Битумоиды были экстрагированы из углеродистых отложений кочешорской свиты (V₂кс) Ефимовской площади (рис.1).

Разделение экстрактов и нефтей на группы проводили на стеклянных колонках, заполненных аргентированным силикагелем марки АСКГ с размером зерен 0,1-0,2 мм. После смачивания силикагеля гексаном в колонку переносили навеску мальтенов. Далее проводили элюирование гексаном фракции парафинонафтеновых УВ. Фракцию ароматических УВ десорбировали и элюировали толуолом. После окончания разделения флаконы с фракциями ставили под вытяжной шкаф до полного испарения растворителя. Дальнейший геохимический анализ аналитических групп ОВ и нефтей производился методом хромато-масс-спектрометрии на базе газового хроматографа Agilent 6890B, снабженного масс-спектрометром Agilent 5977A MSD.

Бассейновое моделирование. Проведение 2D-бассейнового моделирования позволило выявить и проиллюстрировать пространственно-временные особенности развития нефтяных систем изучаемой части бассейна. В работе использованы четыре региональных профиля – по одному субширотному и одному субмеридиональному для Камской и Бельской впадин КБА соответственно (рис.1).

* Идею о возможном наличии в продуктивных комплексах палеозоя нефтей, генерированных докембрийскими НГМТ, в разное время высказывали В.И.Козлов, К.Р.Чепикова, И.А.Ларочкина, Г.Н.Гордадзе и др. Однако до настоящего времени комплексная аргументация в пользу этого положения приведена не была.

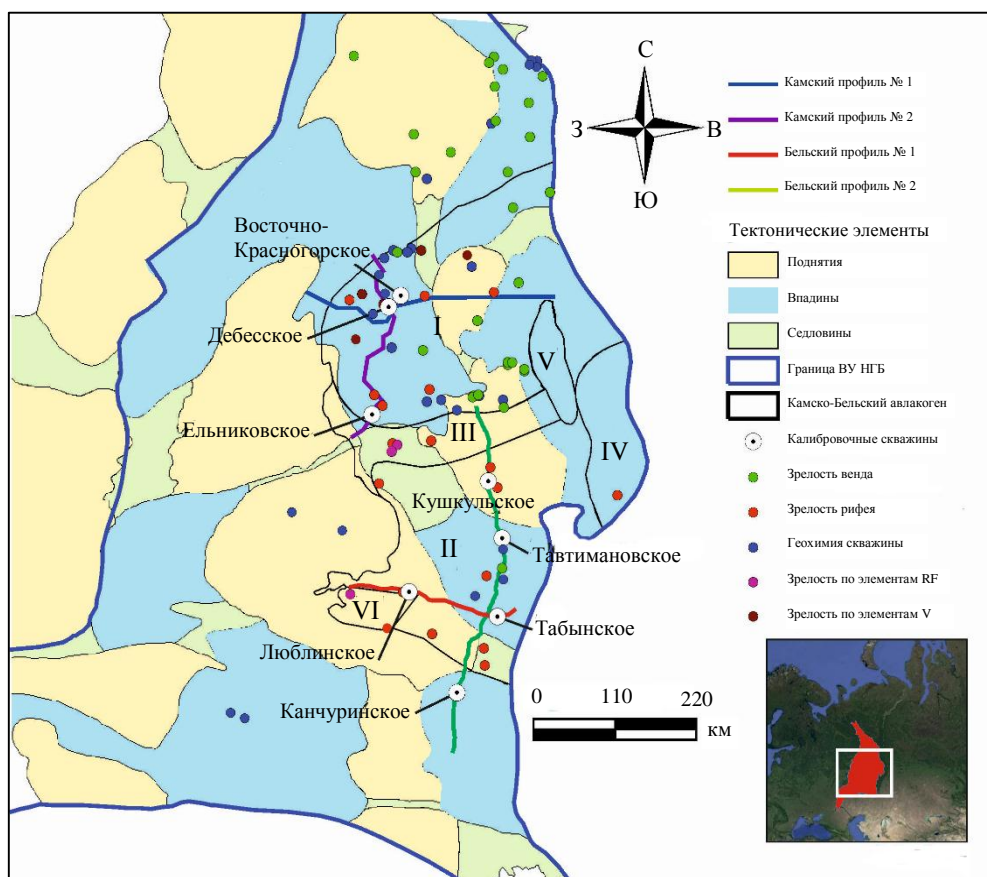


Рис.1. Карта фактического материала на тектонической основе

Структуры Камско-Бельского авлакогена:

I – Камская впадина; II – Бельская впадина;

III – Орьбаш-Татышлинско-Чернушинская приподнятая зона; IV – Дружининский выступ;

V – Осинцево-Красноуфимский выступ; VI – Новотроицкая терраса

Исходные материалы были заимствованы из производственных отчетов разных лет (2005-2009 г.). Суммарная протяженность профилей составляет свыше 1450 км. Стратиграфическое и литологическое наполнение разрезов в моделях выполнено в соответствии с региональными схемами, палеогеографическими реконструкциями и данными скважин [1]. Моделирование проведено по нескольким сценариям – с наличием НГМТ в RF-V комплексе и без. Литологическая характеристика закладывалась с учетом различных палеофациальных карт и реконструкций (рис.2).

В модели учтены *эрозионные события*, происходившие на территории ВУ НГБ. На рубеже рифей-венда мощность эродируемых отложений не превышала 1500 м, при этом максимальная мощность эродированных отложений характерна именно для северных районов [5, 6]. Начало раннего палеозоя также ознаменовалось для восточной окраины Восточно-Европейской платформы значительным эрозионным событием. Предполагается, что в это время было денудировано до 1000 м рифей-вендских отложений. В конце поздней перми и начале триаса территория вновь испытала восходящие вертикальные движения, за счет чего было «срезано» до 250-300 м горных пород.

Разломная тектоника. Территория исследуемого бассейна за время своего формирования претерпевала достаточно большое количество изменений, обусловленных историей геологического развития региона и в большей мере его геодинамическими перестройками. Во всех структурных этажах прослеживаются проявления разломной тектоники. Основные зоны проявления дизъюнктивных нарушений в пределах восточной части Волго-Уральского бассейна приурочены к границам различных блоков фундамента (Татарский, Башкирский и Пермский своды), что обусловлено архей-раннепротерозойскими процессами образования зон консолидации протоформ. Типичным для этих разломов является северо-западное (почти меридиональное) простирание. Предполагается, что «раскрытие» имеющихся разломов происходило во времена тектонической активизации (в конце венда и поздней перми-триасе).

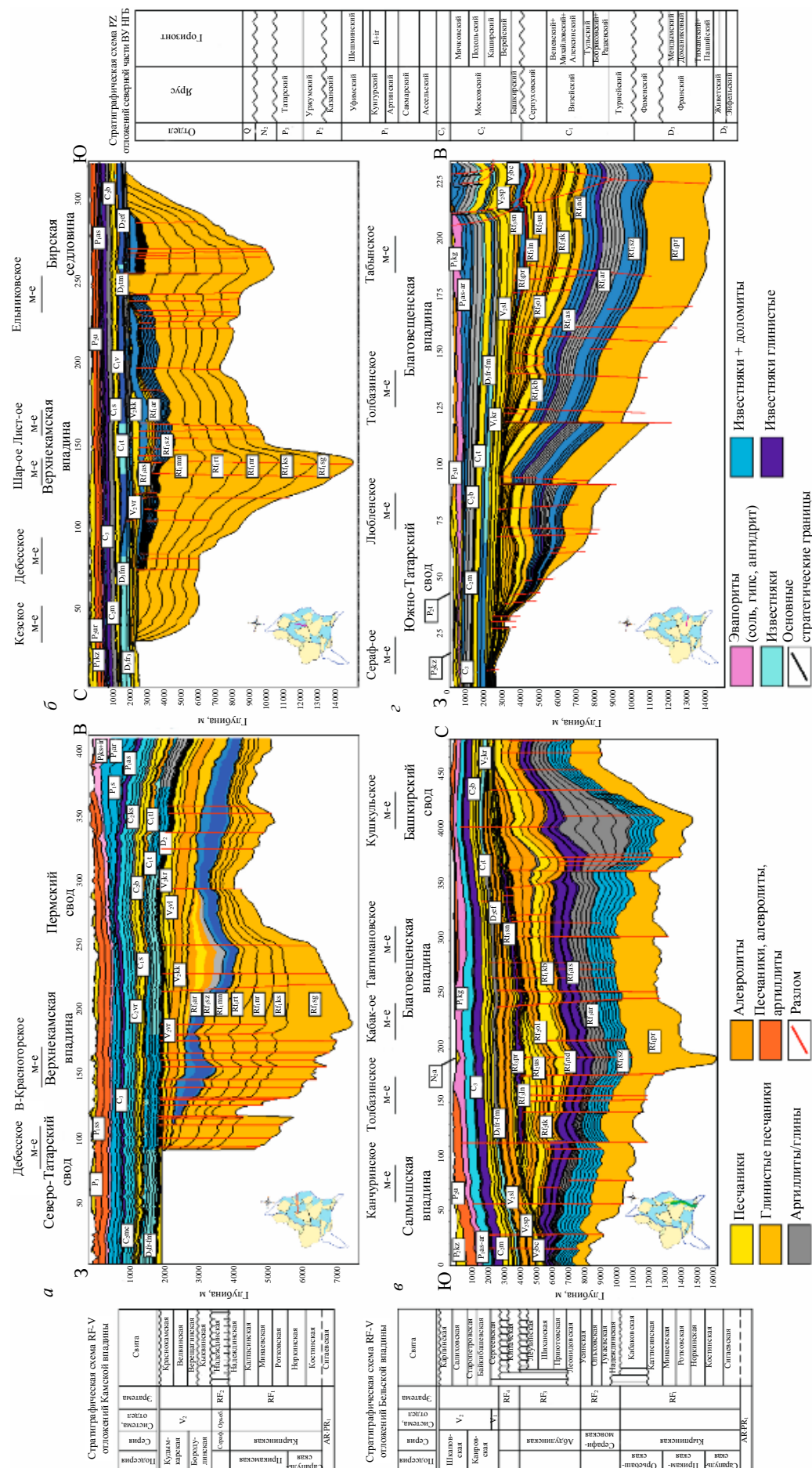
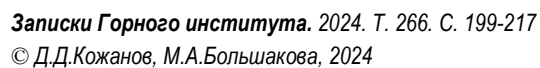


Рис.2. Литолого-стратиграфические профили с положением линии разреза на структурной карте ВУ НГБ и стратиграфическими колонками



Граничные условия. Значения теплового потока по времени подбирались в соответствии с геотектоническим режимом развития бассейна [7]. На рифейском (авлакогеновом) этапе в зонах активного рифтогенеза (восточная часть территории) величина глубинного теплового потока достигала значений 50-60 мВт/м². Время закрытия рифтового бассейна в RF₃-V₁ характеризовалось умеренным тепловым потоком до 50 мВт/м². На границе венда-кембрия тепловой поток мог повышаться до значений 55 мВт/м². В дальнейшем вплоть до границы перми-триаса тепловой поток был стабильным (на уровне 40-50 мВт/м²). После этого на мезо-кайнозойском этапе отмечается снижение величины теплового потока, особенно в западных районах исследуемой территории (до уровня 19 мВт/м²). Значения теплового потока были ранжированы по площади и разрезу. Наибольшие значения указанного параметра наблюдаются во впадинных частях разреза. Данные по значениям современных пластовых температур были заимствованы из справочников и фондовых отчетов. Параметры, внесенные в модель, отражены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики нефтегазоматеринских толщ

Породы	Литология	Мощность, м	Тип органического вещества	Сорг ₀ , %	НI ₀ , мгУВ/ гТОС
RF ₁ sz	Аргиллит	До 300 (суммарно)	II	1,5	900
RF ₁ ar	Мергель доломитистый	До 100	II	1,5	600
RF ₂ ol	Аргиллит	До 50	II	0,47	400
RF ₃ shn	Аргиллит	До 50	II	0,53	650
V ₂ vr (sp)	Аргиллит	До 100	II	5	710
D ₂ af	Аргиллит	30	II/III	1,0	250
D ₃ fr-fm	Кремнистый аргиллит	До 60	II	2,0-10,7	600-710
C ₂ vr	Углистый аргиллит	30	II/III	0,54	300

Характеристики НГМТ. В качестве исходных геохимических параметров использовались аналитические значения содержания органического углерода (ТОС₀ – Total organic carbon) и водородного индекса (НI₀ – Hydrogen Index), пересчитанные на исходные значения. Детальное описание характеристик ОБ НГМТ было приведено в предыдущей работе [3], а также отражено в табл. 1. В связи с тем, что ОБ различных (по возрасту, типу и распространению) НГМТ обладает различными индивидуальными характеристиками, кинетические модели, подобранные для моделирования, лишь отчасти отражают характер реализации генерационного потенциала изучаемых отложений.

Степень катагенетической преобразованности ОБ различных НГМТ оценивалась на основании литературных данных [2, 8, 9]. Калибровка моделей производилась по данным современных пластовых температур и скважин, расположенных на площадях Канчуринской, Тавтимановской, Кушкульской, Любленской, Табынской, Дебесской, Восточно-Красногорской, Лозолукской, Есенеиной, Баклановской, Ельниковской и др. (табл.2); по значениям *Ro* ((Vitrinit) Reflection in oil), снятым с карт, и зонам катагенеза, выделенным ранее авторами [4, 8, 9]; и по положению месторождений по площади и разрезу.

Геологическая характеристика. Тектоника. Тектонический облик территории исследования представлен тремя структурными этапами. Нижний – авлакогеновый, расположен в границах КБА – структуры древнего заложения. Он подразделяется на Камскую и Бельскую впадины, разделенные Орьебаш-Татышлинско-Чернушинской приподнятой зоной. На востоке выделены приподнятые блоки кристаллического фундамента – Осинцевско-Красноуфимский и Дружининский выступы (см. рис.1).

В среднем (синеклизном) структурном этапе выделяются две впадины – северная (Верхнекамская) и южная (Шкапово-Шиханская), разделенные между собой Сарапульско-Яныбаевской седловиной. Все структуры сложены отложениями верхнего венда. Стратиграфическое наполнение впадин схоже между собой, однако наименование комплексов разное. Ниже представлено краткое описание стратиграфии рифея-венда отдельно для северной и южной впадинных частей изучаемой территории.



Таблица 2

Основные калибровочные параметры, используемые в модели

Месторождение	Структура	Глубина, м / T , °C	Глубина, м / R_o , %	Градация катагенеза
Канчуринское	Салмышская впадина	25/4	25/0,5	—
Тавтимановское	Благовещенская впадина	2067-2125/41	2067-2125/0,5	—
Кушкульское	Башкирский свод	25/6	25/0,5	—
Любленское	Южно-Татарский свод	1413-1451/28	—	—
Табынское	Благовещенская впадина	339/12	—	—
		1585/31		
		1669/36		
Дебесское	Верхнекамская впадина	1276/26	—	1797/ПК ₃ -МК ₁
		1760/36		
		1306/26		
Восточно-Красногорское	Верхнекамская впадина	1580/28	—	1705/ПК ₃
		1611/28		
		1292/27		
Лозолокское	Верхнекамская впадина	1383/28	—	1724/МК ₁
		—		
Есенийское	Верхнекамская впадина	—	—	2011/ПК ₃
		1267/23		
Баклановское	Пермский свод	1276/24	—	2446/МК ₁
		1631/29		
		786/18,5		
Ельниковское	Бирская седловина	895/23	—	—
		1410/28		
		1470/29		

Третий (современный) структурный этаж в пределах рассматриваемой территории представлен в составе Верхнекамской, Бымско-Кунгурской, Юрюзано-Сылвенской, Благовещенской и Салмышской впадин, Пермского, Башкирского и Татарского сводов, а также Бирской седловины. Сходство в стратиграфическом и фациальном облике различных частей указанного структурного этажа позволило нам рассматривать отложения палеозоя согласно региональным стратиграфическим схемам (рис.2).

Стратиграфия. Стратиграфическое наполнение впадин КБА различное – северная (Камская) часть выполнена отложениями нижнего и фрагментарно среднего рифея, южная (Бельская) сложена породами всех трех серий рифея – кыргинской (нижний), серафимовской (средний) и абдулинской (верхний). В состав нижнерифейского комплекса осадочного чехла северной (Камской) впадины входят терригенные отложения сарапульской и прикамской серий, а также глинисто-карбонатные толщи калтасинской свиты кыргинской серии. Верхневендская часть вышележащей Верхнекамской впадины представлена в составе кыквинской, верещагинской, велвинской и краснокамской свит [1]. Разрез рифей-вендской части Бельской впадины КБА выражен значительно шире. Помимо нижнерифейских отложений, здесь также присутствуют преимущественно терригенные породы среднего и терригенно-карбонатные толщи верхнего рифея. Верхневендский терригенный комплекс указанной части Волго-Уральского региона представлен практически в том же объеме, однако наименование стратиграфических подразделений здесь иное: байкибашевская, старопетровская, салиховская и карлинская свиты (рис.2).

Нефтегазоносность. В разрезе осадочного чехла бассейна выделяют несколько нефтеносных и нефтегазоперспективных комплексов, каждый из которых характеризуется сходными условиями нефтегазонакопления и типами залежей УВ. Границы НГК проводятся по регионально выдержанным непроницаемым покрывкам. В качестве нефтематеринских пород рифей-вендского комплекса рассматриваются толщи калтасинской свиты нижнего рифея, а также глинистые отложения верещагинской и старопетровской свит верхнего венда. В палеозойской части в качестве НГМТ выступают отложения афонинского горизонта среднего девона, доманиковая высокоуглеродистая



формация верхнего девона-турне и угленосные породы верейского горизонта среднего карбона. В Бельской части, помимо перечисленных, имеются также нефтематеринские отложения кабаковской, ольховской и шиханской свит рифея. Основными коллекторами являются терригенные отложения верхнего венда, среднего девона, а также карбонатные толщи среднего-верхнего карбона и нижней перми. Покрышками служат аргиллиты верхнего венда, глинисто-карбонатно-кремнистые толщи верхнего девона-турне, а также карбонатно-эвапоритовые отложения кунгурского яруса нижней перми.

Наличие значительного количества НГМТ в совокупности с благоприятными термобарическими условиями для образования жидких и газообразных УВ, присутствие в разрезе коллекторов и покрышек обусловили появление значительного числа месторождений нефти и газа на территории бассейна. Большинство из них приурочено к структурам, облекающим крупные выступы фундамента: Южно-Татарскому, Северо-Татарскому, Пермскому и Башкирскому сводам, Бирской и Косьвинско-Чусовской седловинам. Наибольшее количество залежей выявлено в отложениях среднего девона и нижнего-среднего карбона. В вышележащих толщах залежей УВ меньше – с верхнедевонско-турнейского комплекса до нижнепермского НГК происходит постепенное снижение количества выявленных залежей. По всей видимости, глинисто-карбонатные отложения верхнего девона-турне являются покрышкой, препятствующей свободному перемещению УВ.

В пределах Камской впадины КБА нефтегазоносность докембрийских отложений ВУ НГБ связана с кыквинскими и краснокамскими отложениями верхнего венда (Сивинское, Соколовское, Шарканское, Дебесское месторождения и др.). В рифейском комплексе наблюдались лишь незначительные нефте- и газопроявления, отмеченные в отложениях калтасинской свиты [2, 4].

На территории Бельской впадины КБА рифей-вендских нефтяных и газовых месторождений обнаружено не было. Однако нефте- и газопроявления представлены достаточно широко в отложениях калтасинской, тукаевской, ольховской и усинской свит рифея, а также в байкибашевских, салиховских и карлинских толщах верхнего венда [2, 4].

Геохимические особенности органического вещества и нефтей докембрийского возраста. Из истории геологического развития известно, что биотические сообщества архея-протерозоя представлены в основном бактериями, а также примитивными водорослями и простейшими (фито- и зоопланктон). Это отразилось в повсеместном преобладании гопанов над стеранами [10]. Накопление ОВ происходило исключительно в морской среде в условиях аридного и умеренного климата (за исключением времени Лапландского оледенения) [11, 12]. На это четко указывает также отношение трициклических терпанов t_{19}/t_{23} , значение которого обычно ниже 0,5 [13].

Исходный тип керогена определяется как II – аквагенное (сапротелевое) ОВ. При этом геохимический облик исходного ОВ может быть нередко искажен происходившими в прошлом процессами преобразования НГМТ [14]. Поэтому в настоящее время можно наблюдать появление III и IV типов керогена, что, однако, противоречит составу биосферы того времени [10, 15, 16]. Противоречивость в определении обстановок накопления ОВ в докембрии отразилась и в распределении стеранов C27:C28:C29. Так, особенностью докембрийских нефтей является преобладание этилхолестана над собственно холестаном и метилхолестаном [17-19]. Обычно такое распределение характерно для гумусового ОВ. В качестве еще одной геохимической особенности древних нефтей выделяют наличие высоких концентраций монометилалканов (12-, 13-монометилалканы, 2-, 3-монометилалканы [11, 20]) и диметилалканов (2,7-диметилалканы) [21]. Природа этого явления на данный момент до конца не ясна. Тем не менее очевидно, что наличие этих УВ соединений характерно лишь для узкого стратиграфического интервала (венд) и малого количества НГБ мира (Восточная Сибирь и Оман) [10]. Своеобразным маркером докембрийского ОВ является облегченный изотопный состав углерода. После проведенного анализа многочисленных публикаций выявлено, что большинство нефтей имеет значения показателя $\delta^{13}\text{C}$ от -30 до -31 ‰. Такая особенность также объясняется природой исходного ОВ (аквагенное, бактериогенное). Отметим, что для большинства докембрийских нефтей отношение $\delta^{15}\text{N}_{\text{sed}}$ варьируется в диапазоне от 0 до $+8$ ‰ [22].

По всей видимости, выявленные геохимические особенности свидетельствуют об агрессивности окружающей среды того времени [22-24], высокой солености вод [22], малом разнообразии живых организмов [11, 22, 25], малоокислородном составе атмосферы [26] и затяжных эпохах оледенения Земли (Гренландское, Лапландское и др.) [11, 27].



Обсуждение результатов. Геохимический анализ нефтей PR_2 и Pz изучаемого региона. Авторами были проведены геохимические исследования ОВ и нефтей из докембрийских и палеозойских отложений восточной части ВУ НГБ (табл.3). Выявлены степени катагенетической преобразованности, источник нефти продуктивных комплексов V_2 - Pz , а также определены палеогеографические обстановки среды накопления исходного ОВ.

Таблица 3

Расчетные коэффициенты, полученные по результатам хромато-масс-спектрометрии нефтей и экстрактов

Скважина, площадь	Тип флюида	Стратиграфический интервал	Среда								Зрелость			
			Pr/Ph	$Pr/n-C_{17}$	$Ph/n-C_{18}$	$t_{19/t23}$	C_{27}/C_{29}	$C_{28\beta}/C_{29\beta\beta}$	ETR (4)	DBT/P	Ts/Tm	MPR (1)	MPI 1 (2)	MDR (3)
Дебесская, 600	Э	V_2kr	0,3	0,66	0,48	0,06	0,1	0,14	0,6	0,04	0,4	1,0	0,4	0,3
Соколовская, 52	Н	V_2kr	1,13	0,86	0,85	0,1	0,1	0,15	0,7	0,08	0,4	0,8	0,7	2,8
Сивинская, 1	Н	D_{3tm}	1,12	0,75	0,85	0,12	0,1	0,15	0,7	0,07	0,6	1,2	0,7	8
Кудымкарская, 1	Н	D_{3tm}	0,89	0,76	0,85	0,06	0,5	0,3	0,8	1,1	0,23	0,7	0,5	1,8
Краснокамская, 207	Н	D_{3tm}	1,13	0,73	0,65	0,11	0,5	0,4	0,7	0,64	0,65	0,6	0,5	2,5
Куединская, 2	Н	D_{2ps}	0,63	0,81	1,19	0,04	0,4	0,4	0,9	0,71	0,13	1,3	0,8	2,4
Касибская, 3	Н	D_{2ps}	1,29	0,67	0,53	0,17	0,6	0,3	0,7	0,65	0,6	0,6	0,5	3,2
Мишкинская, 185	Н	D_{3dm}	0,55	1,02	1,76	0,02	0,7	0,4	0,9	1,3	0,09	1,6	0,9	1,4
Кулигинская, 61	Н	D	0,68	0,79	1,13	0,05	0,5	0,3	0,9	–	0,19	–	–	–
Савино, 140	Н	C_{1t}	0,62	1,09	1,78	0,02	0,7	0,3	0,9	0,68	0,14	1,2	0,8	1,8
Гожанская, 3	Н	C_{1bb}	0,63	0,93	1,38	0,02	0,6	0,3	0,9	1,1	0,2	1,0	0,9	1,7
Красновишерская, 2.4 (1 экстр)	Э	V_2kc	1,0	0,78	0,8	0,26	1,2	1,12	0,7	0,09	0,5	1,0	0,7	3,9
Красновишерская, 2.4 (Г)	Э	V_2kc	0,24	0,95	1,0	0,1	1,2	1,1	0,6	0,06	0,5	1,1	0,9	2,2
Красновишерская, 2.4 (хол)	Э	V_2kc	0,07	0,77	0,76	0,05	1,1	1,1	0,6	0,12	0,5	1,0	1,0	1,4
Красновишерская, 301-2	Э	V_2kc	0,23	0,56	0,54	0,07	0,9	0,85	0,7	0,03	0,5	2,6	0,9	5,0
Красновишерская, 301-2 (2 экстр)	Э	V_2kc	1,04	0,79	0,79	0,3	1,1	1,12	0,7	0,1	0,5	1,1	0,7	3,4
Красновишерская, 301-2 (Г)	Э	V_2kc	0,13	0,72	0,85	0,11	1,1	1,2	0,6	0,07	0,5	1,3	1,0	1,6
Красновишерская, 301-2 (хол)	Э	V_2kc	0,04	0,72	0,67	0,04	1,0	1,0	0,6	0,07	0,5	0,8	0,9	1,3
Красновишерская, 301-26	Э	V_2kc	0,18	0,53	0,48	0,07	0,9	0,8	0,7	0,04	0,5	2,0	0,9	4,6

Примечание: Н – нефть; Э – экстракты; DBT – дибензотиофены; P – фенантрен; Pr – пристан; Ph – фитан; $n-C_{17-18}$ – нормальные алканы; $C_{27}:C_{28}:C_{29}$ – стераны; $t_{19/t23}$ – хейлантаны; Ts/Tm – трисноргопаны.

Генетические особенности. Дадим характеристику генетических особенностей ОВ и нефтей (рис.3, а). Отношения DBT/P и Pr/Ph (рис.3, б) показывают, что ОВ венда относится к литофациальной зоне 2 (озерные бедные серой отложения). Здесь же расположены значения, полученные по результатам изучения нефтей V-Pz. Часть проб тяготеет к зоне 3 (морские глины и другие озерные отложения). Образцы ОВ доманиковых отложений ВУ НГБ [28] практически полностью расположены в зоне 1Б (морские карбонаты и морские мергели).



Для генетической привязки исследуемых нефтей и корреляции ОВ-нефть также была использована тригонограмма отношения стеранов C27:C28:C29 (рис.3, в). Все исследованные образцы ОВ и нефтей подразделяются на четыре геохимические группы. В первую вошли нефти, отобранные из продуктивных интервалов докембрийского возраста, а также нефть Сивинского месторождения (D_{3tm}). Для этих проб установлено резкое преобладание стерана C29. Другая группа представлена ОВ НГМТ верхневендского и верхнедевонского возрастов. Для нее характерно преобладание стерана C27, что связано с сапропелевым типом исходного ОВ [28]. Третья группа – образцы ОВ и нефтей доманиковых отложений Волго-Уральского и Тимано-Печорского НГБ, в которых увеличивается содержание стерана C29. Данная особенность объясняется смешанным (II/III типом исходного ОВ).

Изучаемые нами нефти образуют четвертую группу, расположенную между ОВ доманиковых отложений и нефтями протерозоя. Установлено, что все исследуемые нефти характеризуются значительными содержаниями этилхолестана C29. В общем объеме стеранов его доля варьируется от 51 до 88 % (рис.3, в). Данная особенность указывает на преимущественно древнее бактериогенное происхождение ОВ. Для проведения комплексной генетической характеристики изучаемых нефтей и ОВ нами также была построена диаграмма Кеннона – Кассоу (рис.3, г). Выяснено, что эти образцы находятся в зонах смешанного и морского ОВ, тогда как доманиковые имеют исключительно морской генезис. Интересно, что зрелость нефтей и ОВ (определяемая с помощью данного графика) закономерно увеличивается в зависимости от возраста вмещающих отложений.

Катагенетическая характеристика. Помимо генетических особенностей нами также была предпринята попытка определения степени зрелости нефтей на основе биомаркерных характеристик. С этой целью авторами проведен молекулярный анализ по методике, описанной Matthias Radke [31]. Рассчитаны следующие коэффициенты (табл.3):

$$MPR = [2 - MP]/[1 - MP]; \quad (1)$$

$$MPI\ 1 = 1,5 ([2 - MP] + [3 - MP])/([P] + [1MP] + [9 - MP]); \quad (2)$$

$$MDR = [4 - MDBT]/[1 - MDBT], \quad (3)$$

где MP – метилфенантроны; P – фенантрен; MDBT – метилдибензотиофены.

Дальнейший расчет показателя *Rm* (Mean Vitrinite Reflectance) проводился по графикам, представленным в статье [32]. Градации катагенеза определялись по данным В.Т.Фролова (1992). Все исследуемые нефти были генерированы НГМТ на градациях катагенеза МК₁-МК₂. Отношение Ts/Tm также демонстрирует относительно высокую зрелость – значения данного показателя изменяются от 0,13 до 0,65 (табл.3). Выявленные значения в целом совпадают с положением катагенетических зон, определенных ранее для RF-V [2, 4]. Тем не менее нельзя исключать влияние верхнедевонско-турнейских НГМТ, так как в близлежащих структурах (Соликамская депрессия, восточная часть Верхнекамской впадины, Бельская впадина и др.) присутствуют зрелые породы данного возраста. В связи с этим необходимо проводить комплексную возрастную характеристику источников УВ в изучаемой части бассейна.

Следующий график, косвенно указывающий на возраст НГМТ, строится на основании отношений стеранов C27/C29 и хейлантанов t19/t23 (рис.3, д). Указанные параметры определены авторами неслучайно, так как в данном случае они позволяют нам разделить ОВ на чисто морское и чисто континентальное. Также выделяется и своеобразная «зона противоречий», при которой отношение трициклических УВ будет указывать на аквагенное происхождение ОВ, а стераны – на древность. В результате при нанесении полученных значений на график исследуемые нами нефти и битумоиды вновь попали в область древнего морского ОВ.

Для большей достоверности полученных результатов авторами был построен еще один график, также основанный на отношении стеранов C28 и C29 и хейлантанового индекса (рис.3, е),

$$ETR = (t28 + t29)/(t28 + t29 + Ts). \quad (4)$$

По данным Т.В.Абау [32] анализ распределения значений указанных коэффициентов позволяет определить возрастную привязку НГМТ, генерировавших флюид. Интересно, что на данном графике практически все (за исключением нефти Чутырского месторождения) изучаемые образцы



также оказались в зоне, отвечающей возрастному интервалу – нижний палеозой и древнее (рис.3, е). Поскольку в разрезе осадочных отложений изучаемой части Волго-Уральского бассейна толщи нижнего палеозоя не выявлены, не остается сомнений в том, что данные нефти были генерированы ОВ докембрия. Древнее ОВ и генерированные им УВ соединения характеризуются наличием изотопно легкого углерода. В восточной части Волго-Уральского НГБ такие нефти встречаются на месторождениях Соколовское, Сивинское, Дебесское ($\delta^{13}\text{C}$ от -31 до -30 ‰). Углерод ОВ палеозоя изотопно более тяжелый ($\delta^{13}\text{C}$ от -27 до -28 ‰) [33]. Данная особенность позволяет проводить корреляцию по типу нефть – ОВ НГМТ. На основе ретроспективных данных [33] также был проведен подобный анализ. Выяснилось, что в нефтях отложений среднего-верхнего девона и нижнего карбона показатель $\delta^{13}\text{C}$ варьируется в пределах от $-27,3$ до $-30,5$ ‰, в среднем не превышая значений -29 ‰. Изотопно легкий углерод в нефтях палеозойской части разреза свидетельствует о наличии УВ, генерированных древними (докембрийскими) НГМТ. Эти особенности (тип ОВ, ТОС_0 , HI_0) были использованы в моделировании при выявлении источников УВ месторождений изучаемой части бассейна. Анализ результатов моделирования проводился с учетом выявленной связи между нефтями протерозоя и палеозоя.

Результаты бассейнового моделирования. Модели по четырем региональным профилям, расположенным в Бельской и Камской частях КБА (см. рис.1, 2), построены с учетом истории тектонического развития, палеогеографических особенностей образования и дальнейшего преобразования (эрозионные события) толщ осадочного чехла бассейна. Модель была скалибрована по значениям современных пластовых температур и показателю отражения витринита (см. табл.2, рис.4). Таким образом, эти модели корректны и могут быть рассмотрены при изучении процессов генерации, миграции и аккумуляции УВ в исследуемой части бассейна.

По результатам проведенного моделирования получены значения температурного градиента для разных частей бассейна. Сводные части характеризуются наибольшими значениями температурного градиента, особенно в самой верхней их части, где вниз по разрезу идет постепенное снижение показателя (своды Башкирский – $2,4\text{--}3,3$ и Южно-Татарский – $2,0\text{--}3,1$ °C/100 м). Высокими значениями характеризуются крупные впадины Благовещенская и Верхнекамская от $2,7$ до $2,93$ м и от $2,6$ до $3,4$ °C/100 м. Чуть ниже уровень данного показателя в Бымско-Кунгурской впадине и Юрюзано-Сылвенской депрессии. Самые низкие значения прогнозируются для Салмышской впадины и Бирской седловины – в пределах $1,0\text{--}2,5$ °C/100 м. Проведена оценка степени катагенетической преобразованности отложений по разрезам. Главные зоны нефтеобразования (ГЗН) и газообразования (ГЗГ) расположены в интервале глубин от $1,6$ до $4,1$ км в северной части и от $1,6$ до $5,8$ км в южной. Максимальные градации катагенеза достигаются на глубинах > 5 км у Камской и $> 6,6$ км у Бельской впадин КБА. Разница в температурном режиме связана в первую очередь с мощностью осадочного чехла, значительные интервалы ГЗН и ГЗГ в пределах Бельской впадины обусловлены близостью Предуральского краевого прогиба. Степень зрелости ОВ НГМТ по площади оценивалась по результатам бассейнового моделирования с учетом данных пиролиза из фоновых и ретроспективных источников [8, 34, 35]. Корректировка границ выделенных катагенетических зон производилась с помощью структурных карт. В результате построены карты-схемы катагенеза для кровли отложений нижнего рифея ($\text{RF}_{1\text{kl}}$) (рис.5, а) и верхнего венда ($\text{V}_{2\text{vr}}$, $\text{V}_{2\text{sp}}$) (рис.5, б).

Степень катагенетической преобразованности ОВ отложений рифея зависит от глубины их максимального погружения. Увеличение метаморфизма ОВ идет в юго-восточном направлении, достигая максимума в пределах Бельской впадины (ГЗГ). Большая же часть изученных отложений находится в пределе ГЗН.

Вендские толщи характеризуются меньшей преобразованностью – метаморфизм ОВ увеличивается в восточном и юго-восточном направлениях. Наименее преобразованные толщи расположены в северо-западной части исследуемого региона – здесь градации катагенеза не превышают значений ПК_3 . Далее на восток развивается зона МК_1 , которая постепенно сменяется на МК_2 . На востоке, в пределах Юрюзано-Сылвенской депрессии и Соликамской впадины, значения степени преобразованности ОВ достигают градаций МК_3 и выше. Значительная часть площади развития вендского комплекса отложений, как и у рифея, расположена в пределах ГЗН.

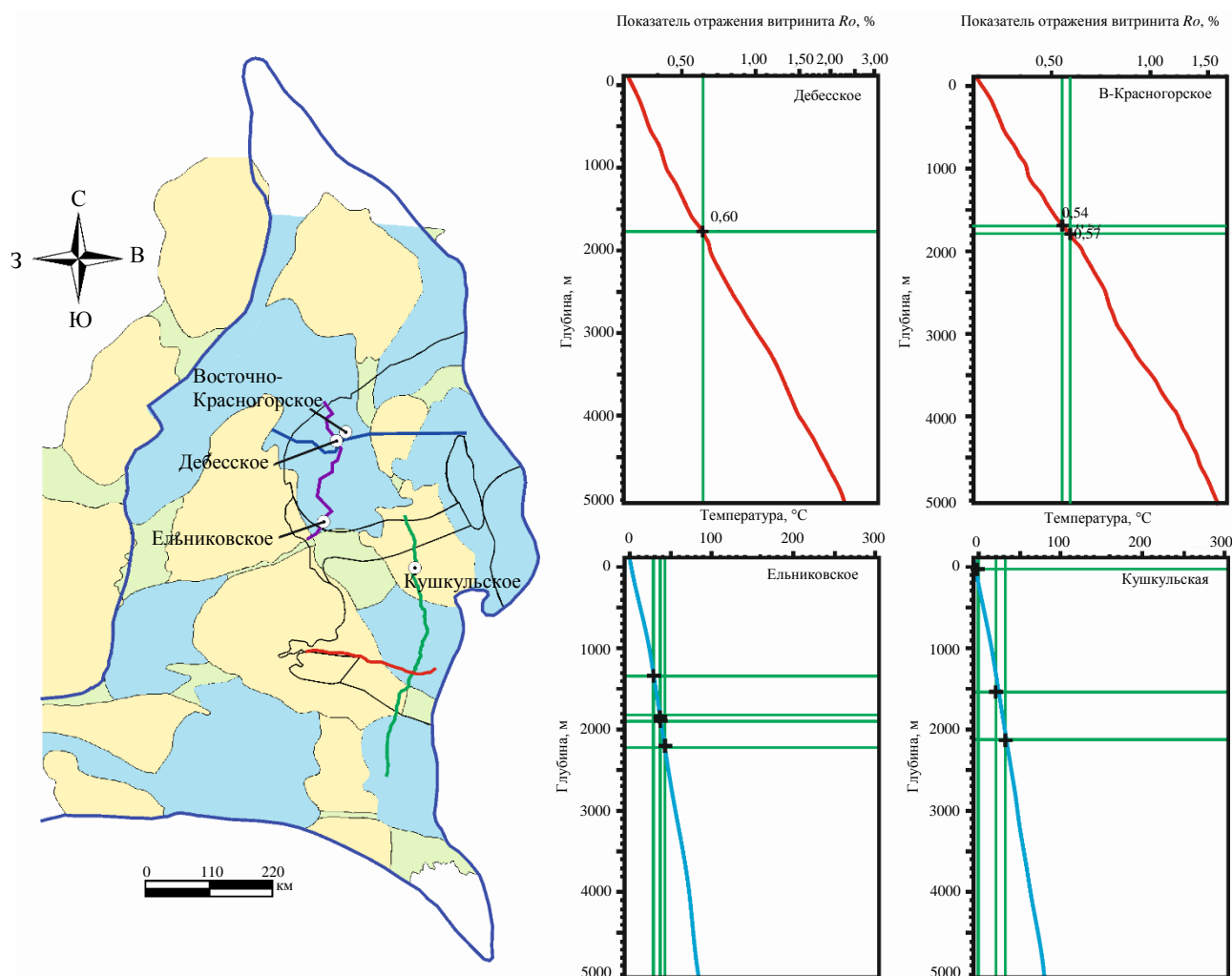


Рис.4. Примеры калибровочных графиков по значениям показателя отражения витринита и пластовой температуры

Вышележащие комплексы среднего девона-перми в пределах района исследований преобразованы значительно меньше. Большая часть верхнедевонско-турнейского комплекса, рассматриваемого в качестве НГМТ, расположена в зонах МК₁, увеличение зрелости происходит во впадинах (Верхнекамская и Благовещенская), а также в восточном и юго-восточном направлениях, где рассматриваемые толщи преобразованы до МК₂-МК₃. Нефтегазоматеринские породы среднего карбона по результатам проведенного моделирования на большей части территории не вошли в зону генерации нефти и газа, однако в пределах Благовещенской и Верхнекамской впадин степень преобразованности этих отложений достигает стадии МК₁ (рис.5). Таким образом, наиболее интенсивные процессы генерации были развиты в НГМТ рифея-венда.

Изучая процессы, происходящие в нефтяных системах, особое внимание следует уделить времени генерации, миграции и аккумуляции, а также формированию ловушек. Проявление того или иного процесса зависит от истории геологического развития региона, а именно от скорости осадконакопления, времени и мощности эрозионных процессов, локальных и региональных изменений температурного поля.

По результатам бассейнового моделирования НГМТ калтасинской свиты начали генерировать жидкие и газообразные углеводороды еще в конце раннего рифея. При этом в Бельской части генерация продолжилась вплоть до позднего рифея. Предвендское несогласие привело к приостановке генерации толщами рифея. Последующее нефте- и газообразование приходится уже на поздний карбон-пермь в Камской и на ранний карбон в Бельской впадинах [36]. НГМТ верхнего венда и частично девона также достигают уровня, необходимого для начала генерации УВ, при этом образование нефти и газа продолжается (рис.6, 7).

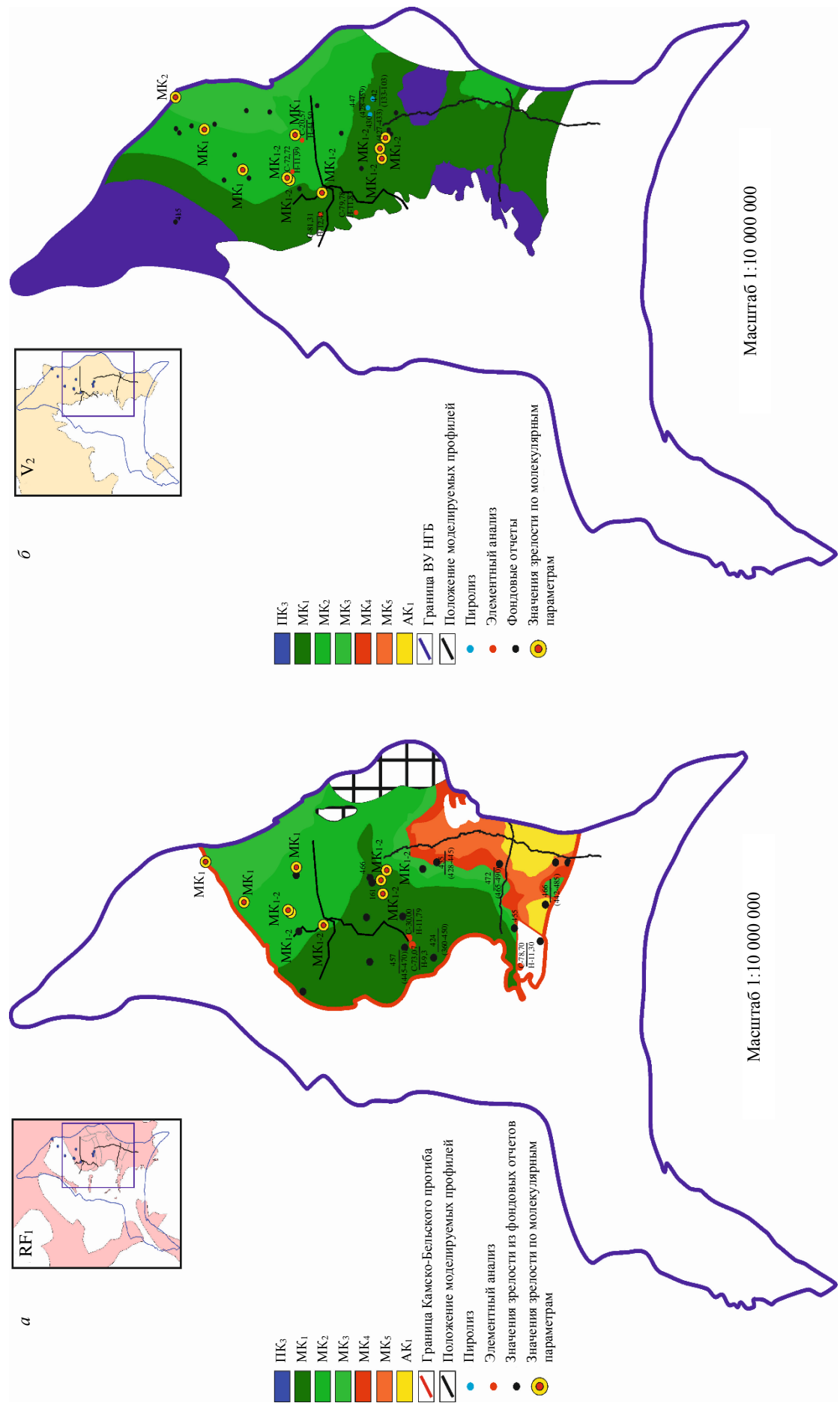


Рис.5. Карты-схемы катагенеза по кровле RF₁ (а); кровле V₂ (б)
Дробью обозначены вариации значений показателя T_{max} : в числителе – среднее значение, в знаменателе – минимальное и максимальное

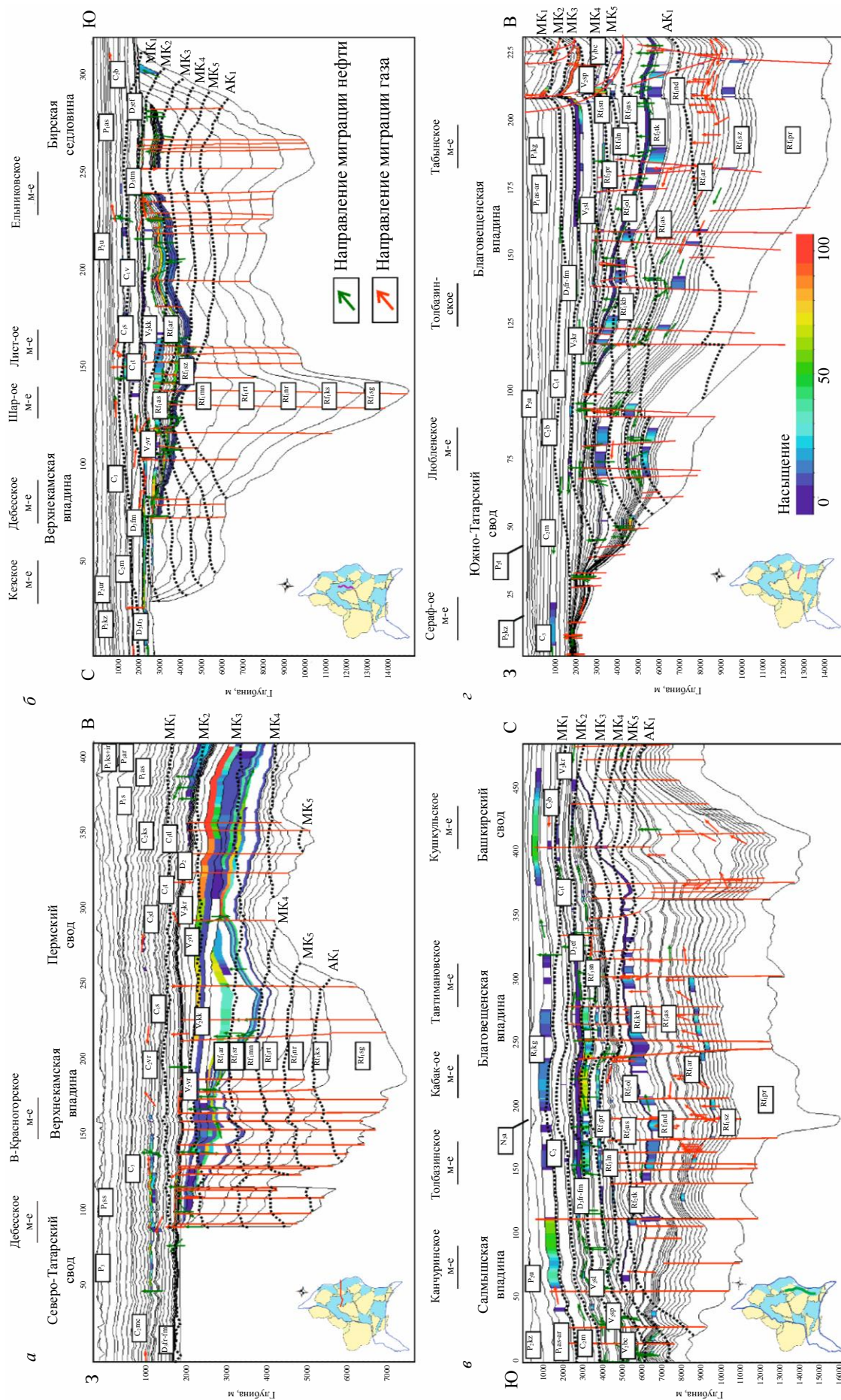
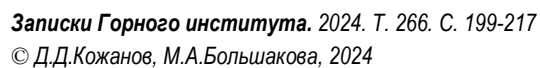


Рис. 6. Положение зон аккумуляции нефти и газа на профилях с положением линии разреза на структурной карте ВУ НГБ

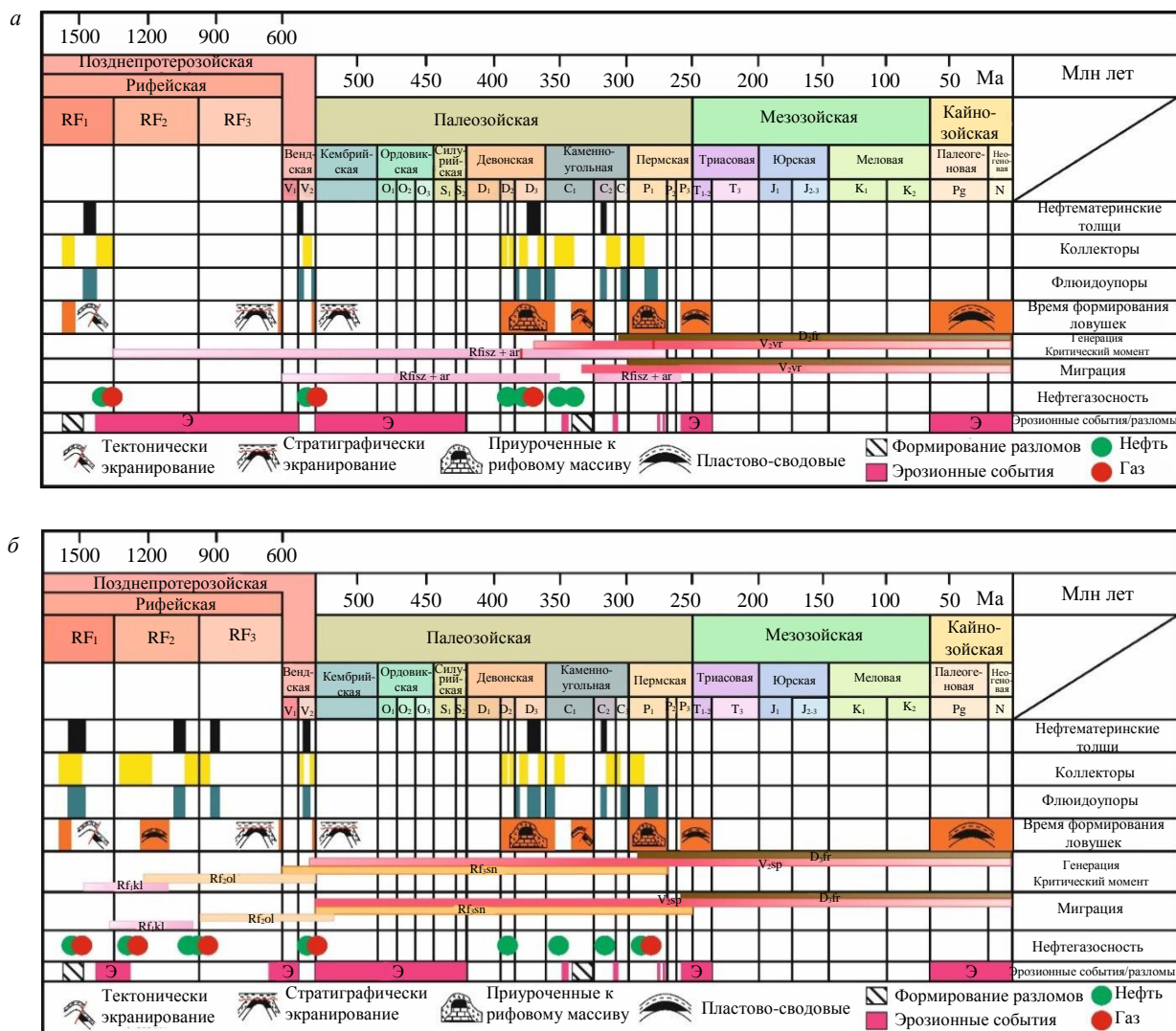


Рис.7. Шкала событий, построенная по результатам 2D-бассейнового моделирования для Камской (а), Бельской (б) частей КБА

Длительность процессов нефте- и газообразования обусловила значительную преобразованность НГМТ RF-V. Так, степень трансформации НГМТ рифея достигает в Камской впадине значений 85-90 %, в Бельской впадине рифей полностью исчерпал свой потенциал. Индекс трансформации вендских нефтематеринских толщ в северной (Камской) части КБА приблизительно равен 50-60 %, в южной части значения варьируются в интервале от 31 до 97 %. Наименее преобразованными являются породы верхнего девона-турне, максимальная степень трансформации этих толщ равна 52 %, но в большинстве своем не превышает 30 %. Таким образом, НГМТ рифея-венда к настоящему времени практически полностью выработали свой нефтегенерационный потенциал. Доманиковые толщ, напротив, имеют высокий потенциал к генерации жидких и газообразных УВ, однако степень их выработанности на большей части исследуемой площади довольно низкая [37], что вызывает сомнения в вопросе о превалировании данного источника при формировании месторождений УВ в указанной части Волго-Уральского бассейна.

Формирование прогнозных скоплений жидких и газообразных УВ в северной и южной частях исследуемой территории происходило многоэтапно. В южной (Бельской) части миграция флюидов, генерированных НГМТ калтасинской свиты, началась еще в конце раннего рифея. В это время происходит формирование преимущественно нефтяных залежей в отложениях саузовской и ашитской подсвит. В среднем рифее содержание в них газа существенно увеличивается, новые скопления формируются в тукаевской свите. К концу позднего рифея происходит увеличение общего



объема аккумулярованного флюида, а также появляются новые залежи в отложениях усинской и леонидовской свит. Во второй половине позднего венда УВ заполняют ловушки в байкибашевских, салиховских и карлинских толщах. Ближе к концу девона залежи нефти образуются в терригенном девоне. В среднем-позднем карбоне происходит заполнение сначала бобриковских, а затем башкирских резервуаров. Скопления УВ в отложениях нижней перми формируются в самом конце палеозойского этапа развития, а также в современное время.

В северной (Камской) части бассейна процессы образования залежей УВ происходили несколько по-иному. По причине того, что мощность осадочного чехла достаточно меньше, чем в южной части, процессы генерации, миграции и аккумуляции УВ были более «растянутыми» по времени. Заполнение ловушек в отложениях калтасинской свиты отмечалось также в конце раннего рифея. В венде, во время активизации общего погружения бассейна, эти процессы продолжились, однако имели скорее инерционный характер. Заполнение резервуаров V_2 происходило в конце позднего венда и в дальнейшем в позднем палеозое.

В девоне-перми залежи были сформированы также в отложениях среднего-верхнего девона и нижнего-среднего карбона. В отличие от южной части ВУ НГБ, преимущественным типом флюида для всех залежей здесь является нефть. Важным вопросом анализа результатов моделирования является определение типов и времени формирования ловушек. Тектонически экранированные ловушки были образованы в конце раннего карбона и в поздней перми. Образование стратиграфически экранированных ловушек связано с крупнейшими эрозионными событиями, происходившими в среднерифейско-ранневендское время, а также в раннем палеозое. Отмечаются ловушки, приуроченные к рифовым постройкам, сформировавшимся в позднем девоне – раннем карбоне (в пределах Камско-Кинельской системы прогибов) и в ранней перми. Моделирование было проведено по нескольким сценариям – с наличием НГМТ в RF-V комплексе и без. Установлено, что при втором варианте прогнозные скопления УВ практически не образуются (даже при содержании в доманиковых НГМТ $\text{ТОС} = 10\%$, $\text{НІ} = 710 \text{ мгУВ/гТОС}$ и мощности $> 30 \text{ м}$). Решающим фактором в процессе генерации УВ является фактор преобразованности НГМТ.

В восточной части исследуемой территории отмечаются зоны аккумуляции УВ, генерированных не только НГМТ RF-V, но и углеродистыми толщами $D_3fr_2-C_1t$. Накопление жидких и газообразных УВ происходит в отложениях московского яруса среднего карбона и ассель-артинских отложениях нижней перми. Прогнозируемые скопления нефти и газа в изученной части разреза совпали с положением реальных залежей и месторождений УВ на рис.6. В обеих впадинах КБА начиная с отложений рифея и заканчивая толщами нижнего карбона выделяется единая нефтяная система, в которой в качестве основных НГМТ рассматриваются толщи RF-V, коллектора приурочены к терригенному комплексу среднего девона, а покрышкой служат горные породы верхнего девона-турне. Такая нефтяная система характерна преимущественно для западных и центральных областей КБА и вышележащих комплексов. В восточной части бассейна, в непосредственной близости к Предуральскому краевому прогибу, отложения верхнего девона-турне выступают уже не в роли покрышек, а в качестве НГМТ, что связано с их большей погруженностью и наличием зон, отвечающих ГЗН и ГЗГ. При этом они также остаются надежным флюидоупором для УВ, генерированных НГМТ RF-V.

Существование единой нефтяной системы контролируется также и другим важным фактором – наличием флюидоупора между протерозойским и палеозойским комплексами. В качестве указанного элемента нефтяной системы зачастую рассматриваются глинистые породы верхнего венда – толщи верещагинской и старопетровской свит. Однако данные отложения в течение геологической истории развития региона подвергались различным эрозионным процессам, что обусловило ограниченность их распространения по площади, а также их практически полное отсутствие в западных частях бассейна. Отсутствие надежных флюидоупоров в венде могло способствовать перетоку УВ в вышележащие продуктивные комплексы, а также формированию единой нефтяной системы от рифея-венда до верхнего девона-турне. При этом интересным дополнением к выдвинутой гипотезе является факт единства гидродинамической системы между рифей-вендским глинисто-карбонатным комплексом и терригенным комплексом среднего девона [4, 38, 39].



По результатам проведенного моделирования выявляются два источника УВ в восточной части ВУ НГБ – НГМТ рифей-вендского и среднефранско-турнейского возраста. Эти выводы, подкрепленные данными геохимического анализа, проведенного ранее, позволяют нам отметить существенное влияние докембрийских НГМТ на формирование нефтегазоносности восточной части ВУ НГБ.

Заключение. Получены следующие выводы:

- В разрезе рифейских отложений Камской впадины и вышележащих комплексах венда-палеозоя выделяются НГМТ – RF₁kl, V₂vr, D₃fr₂-C₁t, в Бельской – RF₁kb, RF₂ol, RF₃sn, V₂sp. Продуктивные интервалы связаны с отложениями V₂kr, D₂ps, C₁bb, C₂m (на севере) и RF₂tk, RF₂ol, RF₂us, V₂bc, V₂sl, V₂kr, D₂ps, C₁bb, C₂m, P₁as,sm,ar (на юге).
- По отношениям стеранов, хейлантанов и нормальных алканов установлена генетическая связь между вендскими и палеозойскими нефтями и органическим веществом докембрия.
- Бассейновое моделирование позволило сделать заключение о том, что НГМТ RF-V комплекса оказывали существенное влияние на формирование нефтегазоносности исследуемого региона.
- Зонами аккумуляции УВ, генерированных НГМТ RF-V, являются прибортовые и приподнятые зоны КБА.
- На основе геолого-геохимических данных в восточной части ВУ НГБ выделена единая нефтяная система – от RF₁ до D₃-C₁.

Показано, что отложения осадочного чехла рифей-каменноугольного возраста в пределах восточной части ВУ НГБ следует рассматривать как части единой нефтяной системы. Нефть и газ, накопившиеся в отложениях девонско-каменноугольного возраста, были сгенерированы как рифей-вендскими, так и палеозойскими толщами. Причем вклад докембрийских НГМТ велик настолько, что исключение их из моделирования приводит к отсутствию наблюдаемой нефтегазоносности палеозоя.

Геохимически (по отношениям стеранов, хейлантанов и нормальных алканов) показана генетическая связь нефтей палеозойских и протерозойских коллекторов с ОВ докембрийских НГМТ. Предложена непротиворечивая модель формирования нефтегазоносности исследованной части ВУ НГБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергеева Н.Д., Пучков В.Н. Стратиграфическая схема рифея и венда Волго-Уральской области (изменения и дополнения) // Геологический сборник № 12. Информационные материалы. СПб., 2015. С. 3-22.
2. Гиниятова Л.Ф., Башкова С.Е., Карасева Т.В. Анализ развития рифей-вендских отложений северо-восточной части Волго-Уральской НГП в связи с их нефтегазоносностью // Вестник Пермского университета. Геология. 2017. Т. 16. № 3. С. 275-282. DOI: 10.17072/psu.geol.16.3.275
3. Кожанов Д.Д., Большакова М.А., Хонта И.С. и др. Геолого-геохимические условия формирования нефтегазоносности рифей-вендских отложений северной части Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 2. С. 73-86. DOI: 10.18599/grs.2021.2.7
4. Проворов В.М., Неганов В.М., Передереева Г.Л. и др. Перспективы нефтегазоносности рифейвендских отложений Бедражской площади и сопредельных районов Калтасинского авлакогена // Вестник Пермского университета. Геология. 2007. Вып. 4 (9). С. 32-45.
5. Лозин Е.В. Глубинное строение и нефтегазоносность Волго-Уральской области и смежных территорий // Литосфера. 2002. № 3. С. 46-48.
6. Постников Д.В., Удовиченко Э.М. Анатектиты и метасоматиты в составе отложений докембрия северных районов Русской платформы // Доклады Академии наук СССР. 1969. Т. 184. № 3. С. 672-675.
7. Allen P.A., Allen J.R. Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment. Wiley-Blackwell, 2013. 632 p.
8. Канев А.С., Фортунатова Н.К., Швеи-Тэнэнта-Гурий А.Г. Перспективы нефтеносности отложений доманикового типа Волго-Уральской нефтегазоносной провинции // Новые направления нефтегазовой геологии и геохимии. Развитие геолого-разведочных работ. Сборник научных статей, 24-26 ноября 2017, Пермь, Россия. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2017. С. 139-148.
9. Масагутов Р.Х., Минкаев В.Н., Илеменова О.Д. Комплексное геолого-геохимическое изучение доманиковых отложений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (на примере Башкортостана) // Актуальные проблемы нефтегазовой отрасли. Сборник докладов научно-практических конференций журнала «Нефтяное хозяйство» 2017 г. М.: Изд-во «Нефтяное хозяйство», 2018. С. 65-78.
10. Конторович А.Э., Трофимук А.А., Башарин А.К. и др. Глобальные закономерности нефтегазоносности докембрия Земли // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 8. С. 6-42.



11. Ситар К.А., Георгиевский Б.В., Большакова М.А., Сауткин Р.С. Комплексная оценка условий формирования нефтегазоматеринского потенциала отложений неопротерозоя // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 2. С. 47-59. DOI: [10.18599/grs.2022.2.8](https://doi.org/10.18599/grs.2022.2.8)
12. Young G.M. Aspects of the Archean-Proterozoic transition: How the great Huronian Glacial Event was initiated by rift-related uplift and terminated at the rift-drift transition during break-up of Lauroscandia // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 190. P. 171-189. DOI: [10.1016/j.earscirev.2018.12.013](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.12.013)
13. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The Biomarker Guide. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. Vol. 2. Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History. 1155 p. DOI: [10.1017/CBO9781107326040](https://doi.org/10.1017/CBO9781107326040)
14. McKirdy D.M., Hahn J.H. Composition of Kerogen and Hydrocarbons in Precambrian Rocks // Mineral Deposits and the Evolution of the Biosphere. Dahlem Workshop Report. Berlin: Springer, 1982. Vol. 3. P. 123-154. DOI: [10.1007/978-3-642-68463-0_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-68463-0_8)
15. Agrawal V., Sharma S. Testing Utility of Organogeochemical Proxies to Assess Sources of Organic Matter, Paleoredox Conditions, and Thermal Maturity in Mature Marcellus Shale // Frontiers in Energy Research. 2018. Vol. 6. № 42. DOI: [10.3389/fenrg.2018.00042](https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00042)
16. Woltz C.R., Porter S.M., Agić H. Total organic carbon and the preservation of organic-walled microfossils in Precambrian shale // Geology. 2021. Vol. 49. № 5. P. 556-560. DOI: [10.1130/G48116.1](https://doi.org/10.1130/G48116.1)
17. Melnik D.S., Parfenova T.M. Aromatic Hydrocarbons and Dibenzothiophenes from the Late Neoproterozoic Khatyspyt Formation (Siberian Platofm) // 30th International Meeting on Organic Geochemistry, 12-17 September 2021, Montpellier, France. European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. Vol. 2021. 2 p. DOI: [10.3997/2214-4609.202134203](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202134203)
18. Parfenova T.M., Melnik D.S. First insights into organic geochemistry of the Late Neoproterozoic Kharayutekh formation, Northeastern Siberia // 30th International Meeting on Organic Geochemistry, 12-17 September 2021, Montpellier, France. European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. 2 p. DOI: [10.3997/2214-4609.202134024](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202134024)
19. Spaak G., Weijers J., Akbas F. et al. Significance of long chain alkylated aromatic compounds for Neoproterozoic-Cambrian petroleum systems // Third EAGE Geochemistry Workshop. European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. 6 p. DOI: [10.3997/2214-4609.2021623003](https://doi.org/10.3997/2214-4609.2021623003)
20. Дахнова М.В., Жеглова Т.П., Можегова С.В. Генерационные характеристики ОБ и распределение биомаркеров в битумоидах нефтематеринских пород рифея, венда и кембрия Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 5-6. С. 953-961.
21. Каширцев В.А., Советов Ю.К., Костырева Е.А. и др. Новый гомологический ряд молекул-биометок из вендских отложений Бирюсинского Присяяня // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 6. С. 698-702.
22. Craig J., Biffi U., Galimberti R.F. et al. The palaeobiology and geochemistry of Precambrian hydrocarbon source rocks // Marine and Petroleum Geology. 2013. Vol. 40. P. 1-47. DOI: [10.1016/j.marpetgeo.2012.09.011](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.09.011)
23. Swanner E.D., Maisch M., Wu W., Kappler A. Oxidic Fe(III) reduction could have generated Fe(II) in the photic zone of Precambrian seawater // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. № 4238. DOI: [10.1038/s41598-018-22694-y](https://doi.org/10.1038/s41598-018-22694-y)
24. Tosca N.J., Jiang C.Z., Rasmussen B., Muhling J. Products of the iron cycle on the early Earth // Free Radical Biology and Medicine. 2019. Vol. 140. P. 138-153. DOI: [10.1016/j.freeradbiomed.2019.05.005](https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2019.05.005)
25. Dongya Zhu, Quanyou Liu, Jingbin Wang et al. Transition of seawater conditions favorable for development of microbial hydrocarbon source – Reservoir assemblage system in the Precambrian // Precambrian Research. 2022. Vol. 374. № 106649. DOI: [10.1016/j.precamres.2022.106649](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106649)
26. Кузнецов В.Г. Геохимические обстановки седиментации докембрия // Литология и полезные ископаемые. 2020. № 2. С. 117-130. DOI: [10.31857/S0024497X20010036](https://doi.org/10.31857/S0024497X20010036)
27. Peng Liu, Yonggang Liu, Yiran Peng et al. Large influence of dust on the Precambrian climate // Nature Communications. 2020. Vol. 11. № 4427. DOI: [10.1038/s41467-020-18258-2](https://doi.org/10.1038/s41467-020-18258-2)
28. Орлова А.Ю., Хисамов Р.С., Базаревская В.Г. и др. Геохимия органического вещества отложений карбонатного девона Южно-Татарского свода // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 2. С. 87-98. DOI: [10.18599/grs.2021.2.8](https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.8)
29. Bazhenova O.K., Bazhenova T.K., Fadeeva N.P. Upper Proterozoic Formations of Russian Plate-Independent Petroleum Systems // 67th EAGE Conference & Exhibition, 13-16 June 2005, Madrid, Spain. European Association of Geoscientists & Engineers, 2005. DOI: [10.3997/2214-4609-pdb.1.P143](https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.1.P143)
30. Бушнев Д.А., Смирнов М.Б., Бурдельная Н.С., Валяева О.В. Молекулярные и структурно-групповые особенности нефтей верхнего девона Тимано-Печорской провинции // Геохимия. 2017. № 9. С. 811-823. DOI: [10.7868/S0016752517080027](https://doi.org/10.7868/S0016752517080027)
31. Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils // Marine and Petroleum Geology. 1988. Vol. 5. Iss. 3. P. 224-236. DOI: [10.1016/0264-8172\(88\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0264-8172(88)90003-7)
32. Abay T.B., Fossum K., Karlsen D.A. et al. Petroleum geochemical aspects of the Mandawa Basin, coastal Tanzania: the origin of migrated oil occurring today as partly biodegraded bitumen // Petroleum Geoscience. 2021. Vol. 27. Iss. 1. № petgeo2019-050. DOI: [10.1144/petgeo2019-050](https://doi.org/10.1144/petgeo2019-050)
33. Галимов Э.М., Винниковский С.А., Пьянков Н.А., Кузнецова Н.Г. Генетические типы нефтей Пермского Прикамья по изотопному составу углерода // Геология нефти и газа. 1972. № 1. С. 33-39.
34. Козлова И.А., Шадрина М.А. Геолого-геохимическая оценка возможности нефтегазообразования в верхнепротерозойских отложениях на территории Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. 2013. Т. 12. № 8. С.18-27.
35. Баженова Т.К. Нефтегазоматеринские формации древних платформ России и нефтегазоносность // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2016. Т. 11. № 4. 29 с. DOI: [10.17353/2070-5379/45_2016](https://doi.org/10.17353/2070-5379/45_2016)
36. Кузнецов Н.Б., Керимов В.Ю., Осипов А.В. и др. Эволюция, геодинамика поднадвиговых зон Предуральяского краевого прогиба и геомеханическое моделирование формирования скоплений углеводородов // Геотектоника. 2018. № 3. С. 3-20. DOI: [10.7868/S0016853X18030013](https://doi.org/10.7868/S0016853X18030013)
37. Prischepa O., Nefedov Y., Nikiforova V., Ruiming X. Raw material base of Russia's unconventional oil and gas reserves (hydrocarbons shale strata) // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 10. 22 p. DOI: [10.3389/feart.2022.958315](https://doi.org/10.3389/feart.2022.958315)



38. Корякин С.Ю., Львовская Я.Л. Прогноз нефтегазоносности слабоизученной территории восточной части Ракшинской седловины, Висимской моноклинали и южного окончания Камского свода на основе седиментационного и бассейнового моделирования // Геология нефти и газа. 2022. № 5. С. 31-38. DOI: [10.31087/0016-7894-2022-5-31-38](https://doi.org/10.31087/0016-7894-2022-5-31-38)

39. Koryakin S.Yu., Lvovskaya Ya.L., Vinokurova E.E. et al. Forecast of Oil and Gas Potential of the Devonian Terrigenous Complex in Central Part of the Perm Region Based on the Results of Sedimentation and Basin Modeling // Geomodel, 6-10 September 2021, Gelendzhik, Russia. European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. Vol. 2021. 6 p. DOI: [10.3997/2214-4609.202157028](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202157028)

Авторы: Д.Д.Кожанов, аспирант, dmitriikozhanov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2641-918X> (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), М.А.Большакова, канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-9240-291X> (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Микроструктурные особенности хромититов и ультрамафитов месторождения Алмаз-Жемчужина (Кемпирсайский массив, Казахстан) по данным изучения методом дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD)

Д.Е.Савельев¹✉, С.Н.Сергеев², Д.К.Макатов³¹ Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия² Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия³ Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Республика Казахстан

Как цитировать эту статью: Савельев Д.Е., Сергеев С.Н., Макатов Д.К. Микроструктурные особенности хромититов и ультрамафитов месторождения Алмаз-Жемчужина (Кемпирсайский массив, Казахстан) по данным изучения методом дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD) // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 218-230. EDN FJNEDQ

Аннотация. Методом дифракции обратно-рассеянных электронов изучены микроструктурные особенности главных породообразующих минералов вмещающих ультрамафитов (оливина, ортопироксена) и хромшпиннелида из руд месторождения Алмаз-Жемчужина. Для ультрамафитов получены статистические диаграммы кристаллографической ориентировки оливина и ортопироксена, свидетельствующие о формировании минеральной ассоциации в условиях высокотемпературного субсолидусного пластического течения в верхней мантии. Основными механизмами являлись трансляционное скольжение и синектоническая рекристаллизация. Деформация оливина происходила преимущественно по системам (010)[100] и (001)[100]. В текстурно-структурных особенностях хромититов запечатлены процессы пластического течения, наиболее выраженные в линзовидно-полосчатых рудах. Микроструктурные карты в кодировке обратных полюсных фигур показывают различия в гранулометрическом составе руд: участки, состоящие из вкрапленных хромититов, характеризуются более мелкозернистой структурой по сравнению с линзовидными обособлениями массивного строения. Анализ микроструктурных карт показывает, что при переходе от вкрапленных к массивным рудам отмечается широкое развитие рекристаллизационных процессов, приспособление соседних зерен друг к другу, результирующее к гомогенизации кристаллографической ориентировки в агрегатах. Полученные данные развивают представления о реоморфической природе хромититовых сегрегаций в офиолитовых дунитах. Предполагается, что укрупнение структуры массивных хромититов критически связано с увеличением концентрации рудных зерен в ходе твердофазной сегрегации внутри пластического потока, когда отдельные зерна хромшпиннелида, изначально разделенные силикатным материалом, начинают приходить в непосредственный контакт друг с другом.

Ключевые слова: офиолиты; хромититы; оливин; пластическая деформация; EBSD; Кемпирсай

Благодарность. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00019. Исследования проведены в ЦКП «Структурные и физико-механические исследования материалов» (ИПСМ РАН).

Поступила: 27.02.2023

Принята: 25.10.2023

Онлайн: 08.02.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. С ультрамафитами Кемпирсайского массива, расположенного в Актюбинской области Республики Казахстан, связаны наиболее крупные запасы хромититов офиолитового типа – «подиформных месторождений» [1-3], которые отличаются от стратиформных резкой изменчивостью морфологических характеристик и постоянной ассоциацией с предельно истощенными мантийными дунитами. Специфическая морфология залежей, резкая морфоструктурная изменчивость, неизменная приуроченность к дунитам и отсутствие четких признаков магматического образования способствовали возникновению различных моделей происхождения месторождений данного типа. Для интерпретации генезиса подиформных залежей за долгую историю их изучения были предложены различные модели с преобладанием роли как магматических, так



и метасоматических процессов. В последние десятилетия наиболее закрепились позиции реакционно-магматической [4-6] и флюидно-метасоматической гипотез [7, 8], в некоторых работах предполагается ведущая роль твердофазной дифференциации [9].

Построение полноценных динамических моделей образования подформных хромититов трудно представить без использования количественных данных об их структуре на различных масштабных уровнях. До начала XXI в. и появления методов дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD) это было практически невозможно, и микроструктурные исследования были ограничены изучением прозрачных анизотропных минералов вмещающих пород – оливина и пироксенов федоровским методом [10-12].

Широкое распространение электронной микроскопии с EBSD-детекторами с начала XXI в. сделало возможным получение количественной информации о внутреннем строении оптически изотропных и непросвечивающих материалов, в том числе минералов кубической сингонии [13-15] и различных рудных минералов [16-18]. В последние годы этот метод изучения стал широко применяться для оценки роли пластических деформаций в мантийных ассоциациях [19-21] и определения сейсмической анизотропии в верхней мантии различных регионов по микроструктурным особенностям ультраосновных ксенолитов в кимберлитах и щелочных базальтах [22-24].

Для выяснения условий образования хромититов месторождения Алмаз-Жемчужина в юго-восточной части Кемпирсайского массива авторами изучены вещественные, макро- и микроструктурные особенности хромититов и вмещающих их ультрамафитов методом дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD). Основными задачами исследований являлись: получение статистических данных о кристаллографической ориентировке порообразующих силикатов (оливина, ортопироксена) ультрамафитов, сравнение их с экспериментальными данными; определение механизмов пластической деформации и рекристаллизации оливина и ортопироксена; микроструктурное изучение агрегатов зерен хромшпинелида, получение данных о реальной структуре рудных зерен; оценка роли деформации и рекристаллизации в формировании хромититов. Предварительные результаты изучения образцов частично изложены в работе [25].

Методы. В полевом сезоне 2022 г. авторами изучены образцы хромититов различных структурных типов из отвалов и скважин месторождения Алмаз-Жемчужина (рис.1), а также наиболее свежих образцов вмещающих дунитов и перидотитов, отобранных из керна глубоких горизонтов данного объекта (глубина от 420 до 1100 м).

На предварительной этапе применялись методы оптической и электронной микроскопии. Всего изучено 50 образцов перидотитов, дунитов и хромититов, отобранных как из керна скважин, так и из отвалов месторождения. Состав минералов определялся на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega Compact с энерго-дисперсионным детектором Xplorer-15 Oxford Instruments в Институте геологии УФИЦ РАН. Обработка спектров производилась автоматически при помощи программного пакета AzTec One с использованием методики TrueQ. При съемке использованы следующие установки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 3 нА, время накопления спектра в точке 60 с в режиме Point&ID, диаметр пучка около 3 мкм.

Для микроструктурных исследований выбраны три образца наиболее свежих ультрамафитов из скважины GT-HY-1 и два образца хромититов из отвала месторождения Алмаз-Жемчужина. Из них были изготовлены препараты, ориентированные относительно макроскопических элементов текстуры – полосчатости, минеральной уплоченности и линейности. Микроструктурное изучение препаратов проведено методом дифракции обратно-рассеянных электронов (ДОЭ/EBSD) на микроскопе Tescan Mira в Институте проблем сверхпластичности металлов РАН. Поверхность препаратов для EBSD-анализа была подготовлена двухступенчатой полировкой сначала механическим методом с использованием алмазных паст, а затем финишной механо-химической полировкой с использованием суспензии на основе коллоидного оксида кремния (для снятия наклепа).

Основной метод микроструктурных исследований в настоящей работе – EBSD – основан на локальном анизотропном рассеянии электронов на кристаллической решетке [26, 27], что позволяет получить линии Кикучи, которые сравниваются с эталонными для фаз, присутствующих в образце, затем преобразуются в данные о кристаллографической ориентировке в любой точке исследуемого образца. Происходит автоматическая идентификация фаз в каждой точке, в памяти сохраняются координаты X и Y этих точек. В современных приборах реализована возможность

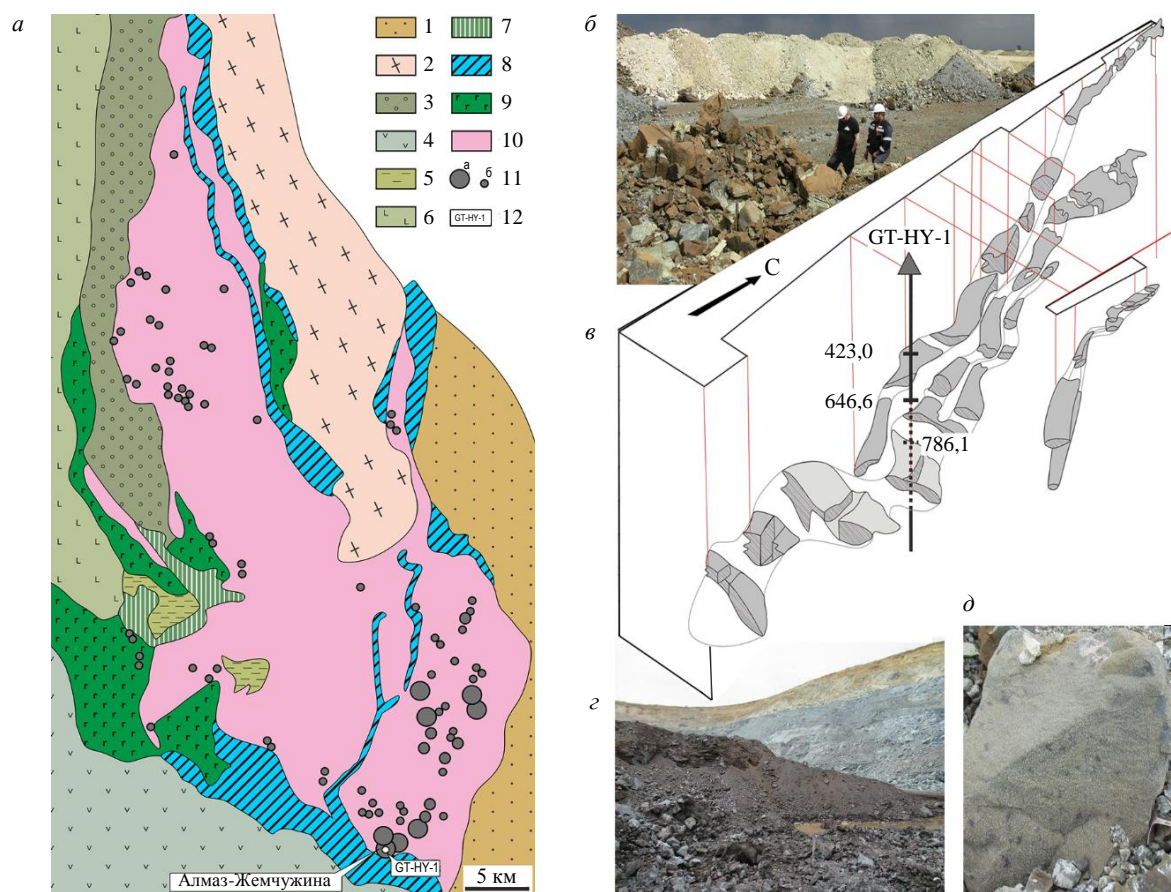


Рис. 1. Геологическая позиция месторождения Алмаз-Жемчужина и расположение изученных образцов:
 а – обзорная карта массива по [34]; 1-6 – стратифицированные породы; 1 – Южноугоджарская зона (базальты (S-D₁, D₂), флишоиды и олистохромы (D₃-C₁); 2 – Эбетинская зона (базальт-андезит-риодацитовая, карбонатно-силицитовая и граувакковая формации (V?PZ₁₋₂); 3-6 – Сакмарская зона (3 – базальт-андезит-дацитовая, граувакковая, фтанитовая и карбонатная формации (PZ₁₋₂), 4 – подушечные лавы и пирокластика базальт-андезит-риодацитовая с участием фтанитов и глинисто-кремнистых сланцев (PZ₁₋₂), 5 – фтаниты и карбонатные сланцы (O₂), 6 – подушечные лавы толеитовых базальтов с линзами фтанитов (O₂); 7-10 – Кемпирсайский массив: 7 – пакеты параллельных диабазовых даек и изотропные роговообманковые габбро, 8 – Кызылкаинская формация пироксенит-габбрового состава, 9 – Кокпектинская формация оливиновых габбро и троктолитов, 10 – породы верхнемантийного разреза: гарцбургиты, лерцолиты, дуниты; 11 – хромититы (а – уникальные и крупные месторождения; б – рядовые месторождения и рудопроявления), 12 – расположение изученных скважин, месторождений; б – отвалы месторождения Алмаз-Жемчужина; в – блок-диаграмма рудного узла, включающего месторождения Алмаз-Жемчужина, Миллионное и Первомайское, расположение изученных образцов керна;
 г – массивные хромититы в забое одного из карьеров; д – образец густовкрапленного хромитита

высокоскоростного сканирования с шагом от десятых долей до нескольких десятков микрометров [28], в результате которого программное обеспечение (например, Channel 5) позволяет построить различные карты в пространстве Хафа с разрешением 100 пикселей.

В настоящей работе EBSD-сканирование препаратов проводилось с шагом от 10 до 20 мкм с детализацией в некоторых случаях до 2 мкм. В образцах серпентинизированных ультрамафитов были получены преимущественно текстурные диаграммы, а в хромититах удалось получить достаточно качественные карты в кодировке обратных полюсных фигур (ОПФ). Всего было изучено 25 участков на семи препаратах из пяти образцов.

Результаты исследований. Кемпирсайский массив представляет собой один из крупнейших на Урале массивов ультрамафитов офиолитового типа, вмещающий самые крупные в мире месторождения хромовых руд данного формационного типа. На современном эрозионном срезе массив имеет форму тела грушевидной формы, удлиннен с севера на юг, согласно главному направлению уральских структур, и расширяется к юго-востоку (рис. 1). Массив почти полностью сложен породами так называемого мантийного разреза – гарцбургитами, лерцолитами и дунитами, которые вблизи поверхности полностью превращены в серпентиниты. Благодаря тому, что серпентинизация



была ограничена низкотемпературной фацией с образованием петельчатого серпентина, первичную природу серпентинитов легко можно диагностировать по наличию псевдоморфоз баститов по пироксенам. На массиве наибольшим распространением пользуются апогарцбургитовые серпентиниты, содержащие 70-80 об.% оливина, 20-25 об.% ортопироксена и незначительную примесь хромшпинелида, который обычно сохраняет свой состав.

В юго-восточной части массива, наряду с однородными гарцбургитами, широким распространением пользуется дунит-гарцбургитовый комплекс, строение которого определяется частым чередованием апогарцбургитовых серпентинитов и серпентинитов без псевдоморфоз по ортопироксену (аподунитовых). Именно с дунит-гарцбургитовым комплексом связаны наиболее продуктивные месторождения хромититов массива.

Помимо ультраосновных пород, внутри массива встречается довольно много даек мафитового состава, среди которых наибольшим распространением пользуются габбродиабазы тыгашайской формации [29]. В приконтактных частях массива развиты довольно крупные тела дифференцированного состава (Кокпектинский комплекс) [29, 30], а также толеитовые базальты сугралинского комплекса и амфиболиты [31]. Следует отметить, что амфиболиты перекрывают южный контакт массива, под который погружается хромититовая залежь наиболее крупного месторождения массива – Алмаз-Жемчужина.

При изучении шлифов и аншлифов методами оптической и электронной микроскопии установлено, что главными минералами руд являются высокохромистые шпинелиды ($Cr/Cr + Al = 0,8-0,83$) (табл.1), что полностью согласуется с данными [1, 2] а также серпентин и хлорит, замещающие первичный оливин. Хромшпинелиды содержат минеральные включения, которые распределены весьма неравномерно. Наиболее распространенные минералы включений – оливин (часто серпентинизированный) и амфибол, реже встречаются флогопит, пироксены и сульфиды основных металлов (Fe, Ni, Cu, Co), а также минералы платиновой группы [32, 33].

Таблица 1

Состав рудообразующих хромшпинелидов месторождения Алмаз-Жемчужина

Оксид	Состав, мас. %*									
TiO ₂	0,22	0,46	0,20	0,18	0,17	–	–	0,28	0,23	
Al ₂ O ₃	9,66	10,32	8,88	8,79	9,04	8,64	8,85	10,56	9,56	
Cr ₂ O ₃	62,16	61,97	63,18	62,64	62,56	63,13	63,64	61,03	62,47	
Fe ₂ O ₃ **	2,1	0,24	3,48	2,37	2,94	3,23	3,12	2,11	1,34	
FeO	13,13	13,1	11,1	12,3	11,85	11,33	12,5	12,2	12,4	
MgO	13,39	13,28	14,92	13,72	14,33	14,42	14,09	14,00	13,77	
NiO	–	–	–	–	0,18	0,24	–	0,20	–	
Total	100,7	99,5	101,8	100,0	101,1	101,0	102,2	100,4	99,8	
Элемент	Состав, аpfu									
Al	0,367	0,395	0,332	0,336	0,341	0,326	0,331	0,398	0,364	
Cr	1,582	1,590	1,582	1,606	1,580	1,599	1,597	1,545	1,597	
Mg	0,642	0,642	0,704	0,663	0,682	0,688	0,666	0,668	0,663	
Fe ³⁺	0,052	0,010	0,081	0,065	0,064	0,083	0,080	0,054	0,019	
Fe ²⁺	0,352	0,351	0,297	0,325	0,324	0,298	0,325	0,322	0,351	
Ti	0,005	0,011	0,005	0,004	0,004			0,007	0,006	
Ni					0,005	0,006		0,005		
#Cr	0,81	0,80	0,83	0,83	0,82	0,83	0,83	0,79	0,81	
#Mg	0,65	0,65	0,70	0,67	0,68	0,70	0,67	0,67	0,65	

*Данные SEM EDS [33]; прочерк – содержания ниже предела обнаружения.

**Содержание рассчитано по стехиометрии минерала.

Почти все образцы ультрамафитов из керна скважин характеризуются отчетливо выраженными макроскопическими структурными элементами – минеральной уплощенностью (S) и линейностью (L) (рис.2, а, б). Минеральная уплощенность обусловлена предпочтительной ориентировкой по форме таблитчатых зерен пироксенов и часто параллельной той же плоскости агрегатной полосчатости. Линейность определяется по удлинению зерен (пироксен, оливин) или агрегатов

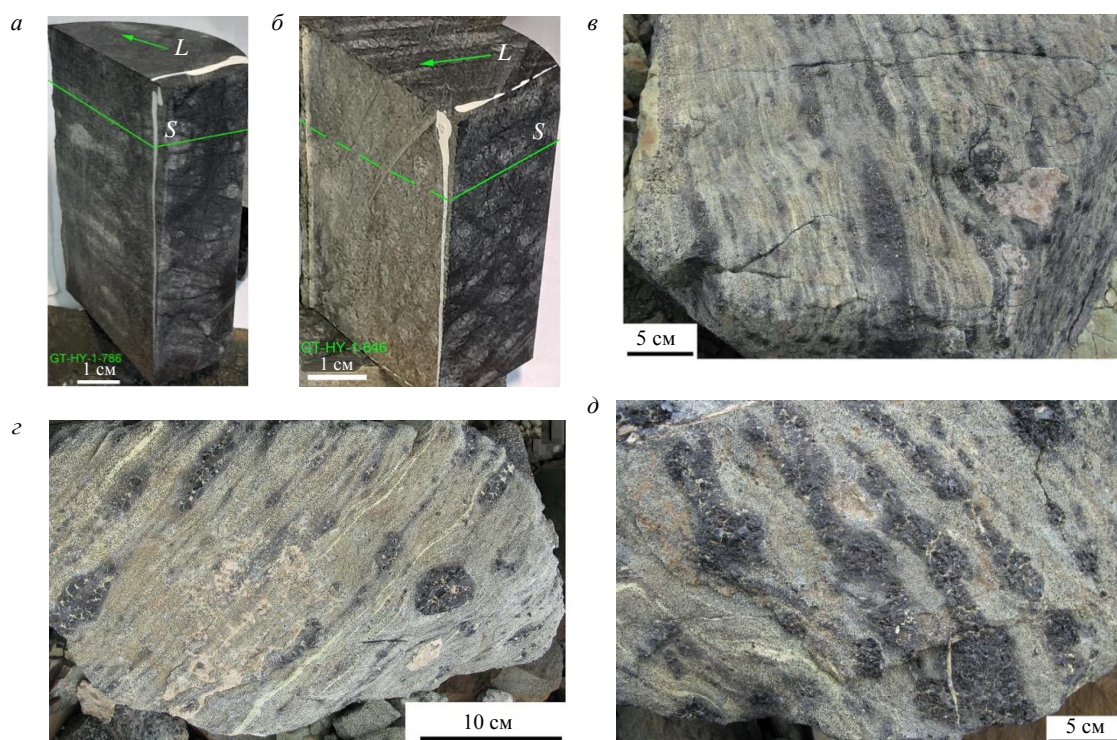


Рис.2. Общий вид исследованных образцов вмещающих ультрамафитов из керна глубоких скважин (а, б) и линзовидно-полосчатых хромититов из отвалов (в-д)

хромшпинелидов в плоскости минеральной уплощенности. В хромититах данные макроскопические структурные элементы наиболее ярко проявлены в образцах полосчатых вкрапленных руд и в линзовидно-полосчатых рудах, которые в достаточно большом количестве встречаются нами в отвалах месторождения Алмаз-Жемчужина (рис.2, в-д). Руды этого типа наиболее ярко демонстрируют участие в их образовании процессов твердофазного пластического течения мантийного материала. Образцы хромититов данной разновидности были использованы для микроструктурных исследований.

Петрографическое изучение вмещающих ультрамафитов показало, что дуниты в значительной степени затронуты серпентинизацией (не менее 70 об.%), тогда как в лерцолитах встречаются участки довольно хорошей сохранности (серпентин составляет менее 40 об.% породы). Главные породообразующие минералы лерцолитов демонстрируют признаки высокотемпературной деформации: кинк-банд структуры, волнистое погасание (рис.3, а), порфирокластические структуры, обусловленные ассоциацией деформированных крупных зерен ортопироксена и зон синтектонической рекристаллизации (RZ), сложенных агрегатами мелких зерен – необластов (рис.3, б). Внутри крупных деформированных зерен энстатита часто отмечается образование ламелей диопсида, амфибола и мельчайших зерен хромшпинели (рис.3, в). Представление о типичном минералогическом составе лерцолитов, размере и морфологии зерен породообразующих минералов дает ЭДС-карта на рис.3, г.

Состав породообразующих минералов ультрамафитов типичен для пород мантийного разреза офиолитов: оливин высокомагнезиальный, причем от лерцолитов к дунитам происходит рост концентрации форстеритового минала от 90-92 до 95-96 %. Ромбический пироксен также представлен высокомагнезиальной разновидностью – энстатитом, а клинопироксен – кальциево-магниевого разновидности – диопсидом. Состав хромшпинелидов варьирует в довольно значительном диапазоне, но ограничен изоморфизмом в ряду пикотит-хромит от 0,4 Cr# ($(\text{Mg}_{0,645}\text{Fe}_{0,355})_{1,00}(\text{Al}_{1,187}\text{Cr}_{0,759}\text{Fe}_{0,054})_{2,00}\text{O}_4$) в лерцолитах до 0,8-0,85 ($(\text{Mg}_{0,704}\text{Fe}_{0,296})_{1,00}(\text{Cr}_{1,582}\text{Al}_{0,332}\text{Fe}_{0,081}\text{Ti}_{0,005})_{2,00}\text{O}_4$) в дунитах и хромититах. В лерцолитах постоянным второстепенным минералом является амфибол, состав которого соответствует кальций-магниевого разновидностям (паргасит-магнезиальная роговая обманка). В хромититах оливин из включений в зернах хромшпинелида обладает

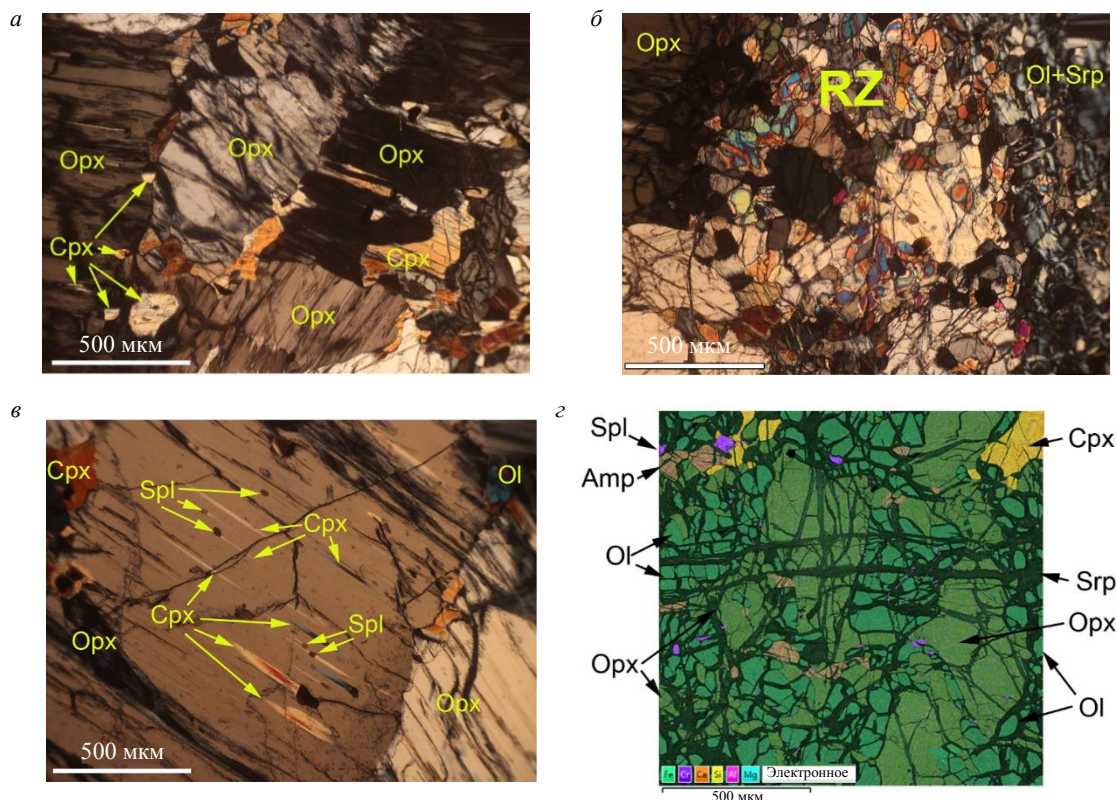


Рис.3. Петрографические особенности ультрамафитов из скважины GT-HY-1:

- а* – крупные деформированные зерна ортопироксена с включениями клинопироксена; *б* – зона рекристаллизации (RZ), сложенная мелкими новообразованными зернами (необластами) вблизи крупного деформированного зерна ортопироксена; *в* – выделения новых фаз внутри зерна ортопироксена, подверженного пластической деформации; *г* – типичная ЭДС-карта лерцолита из рудовмещающей толщи месторождения Алмаз-Жемчужина; Amp – амфибол; Cpx – клинопироксен; Ol – оливин; Opx – ортопироксен; Spl – хромшпинелид; Srp – серпентин

максимально магнезиальным составом (Fe_{97-98}) и аномально высокими концентрациями никеля (до 1,8 мас.% NiO) (табл.2). По результатам использования геотермометров [35-37] закрытие обменных реакций между оливином и хромшпинелидом происходило в интервале температур 700-850 °C и фугитивности кислорода от $-1,04$ до $+2,8 \Delta FMQ$.

Таблица 2

Состав оливина из включений в хромшпинелидах месторождения Алмаз-Жемчужина

Оксид	Состав, мас.%								
SiO ₂	41,30	41,31	41,38	41,11	40,61	41,50	41,10	42,56	42,75
FeO	2,77	2,94	1,87	2,12	2,45	2,58	2,62	2,97	2,51
MgO	54,71	55,38	55,06	54,47	53,84	56,05	54,78	54,94	55,26
NiO	0,65	0,69	1,66	1,83	1,51	0,95	0,94	1,41	0,67
Total	99,4	100,3	100,0	99,5	98,4	101,1	99,4	101,9	101,2
Элемент	Состав, apfu								
Si	0,982	0,973	0,978	0,978	0,978	0,969	0,977	0,993	1,000
Fe	0,055	0,058	0,037	0,042	0,049	0,050	0,052	0,058	0,049
Mg	1,951	1,956	1,953	1,944	1,944	1,963	1,953	1,923	1,939
Ni	0,012	0,013	0,032	0,035	0,029	0,018	0,018	0,027	0,013
Fo	0,973	0,971	0,981	0,979	0,975	0,975	0,974	0,971	0,975

Изучение образцов ультрамафитов методом EBSD позволило получить серию текстурных диаграмм (прямых полюсных фигур) для главных породообразующих минералов – оливина и ортопироксена. К сожалению, полные микроструктурные карты получить не удалось вследствие значительной серпентинизации пород, а в ряде случаев из-за искаженной кристаллической решетки ортопироксенов.

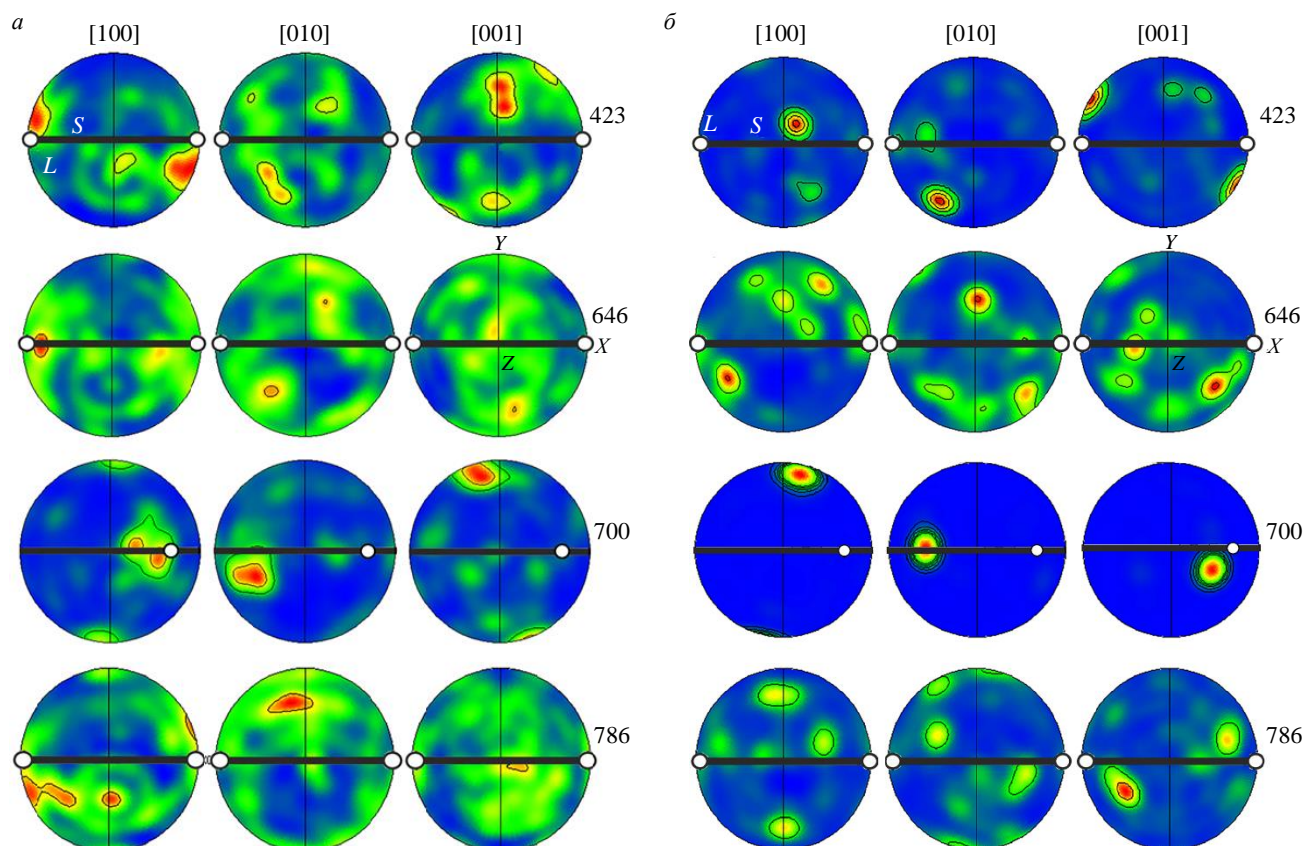


Рис.4. Прямые полюсные фигуры для породообразующего оливина (а) и ортопироксена (б) из образцов ультрамафитов скважины GT-HY-1. Верхняя полусфера равноплощадной проекции; S – проекция плоскости минеральной уплощенности и полосчатости; L – выходы линейности

Текстуры, полученные для оливина и ортопироксена из вмещающих ультрамафитов, характеризуются довольно сильной предпочтительной кристаллографической ориентировкой обоих минералов. Выявлены следующие типы текстур оливина: 1) максимум оси [100] вблизи плоскости минеральной уплощенности и рядом с выходом линейности, при этом ось [001] образует максимум на плоскости уплощенности перпендикулярно линейности, а максимум оси [010] расположен перпендикулярно плоскости уплощенности (образцы 646, 786, рис.4, а); 2) максимум оси [100] также расположен вблизи плоскости уплощенности и выхода линейности, но две другие оси меняются местами: максимум [010] расположен на плоскости уплощенности, а максимум [001] перпендикулярен ей (образец 700, рис.4, а).

В ортопироксене почти во всех случаях фиксируется совпадение или незначительное отклонение оси [001] от выхода линейности (рис.4, б), что говорит о направлении скольжения. Плоскости скольжения в разных образцах определяются по-разному: (100) – в образце 700, (010) – в образце 423 и множественные плоскости в двух других образцах (рис.4, б). Наряду с трансляционным скольжением, в изученных образцах ультрамафитов значительную роль играла синтектоническая рекристаллизация, которая в некоторой степени усложнила петроструктурные узоры.

Для микроструктурных исследований был выбран образец густовкрапленного хромитита линзовидно-полосчатой текстуры (рис.5, а) с четко выраженными макроскопическими структурными элементами – полосчатостью и линейностью, из которого были изготовлены препараты размером 20×30 мм (рис.5, б).

Макроскопическое и минераграфическое изучение показало, что образец представляет собой сочетание участков полосчатой текстуры и средне-густовкрапленной структуры с размером индивидов хромшпинелида 0,1-1 мм и агрегатов хромшпинелида массивного строения линзовидной формы с включениями силикатного материала. Размер индивидов в массивных агрегатах визуально определяется в пределах 1-5 мм, однако более точно определить размер зерен не представляется

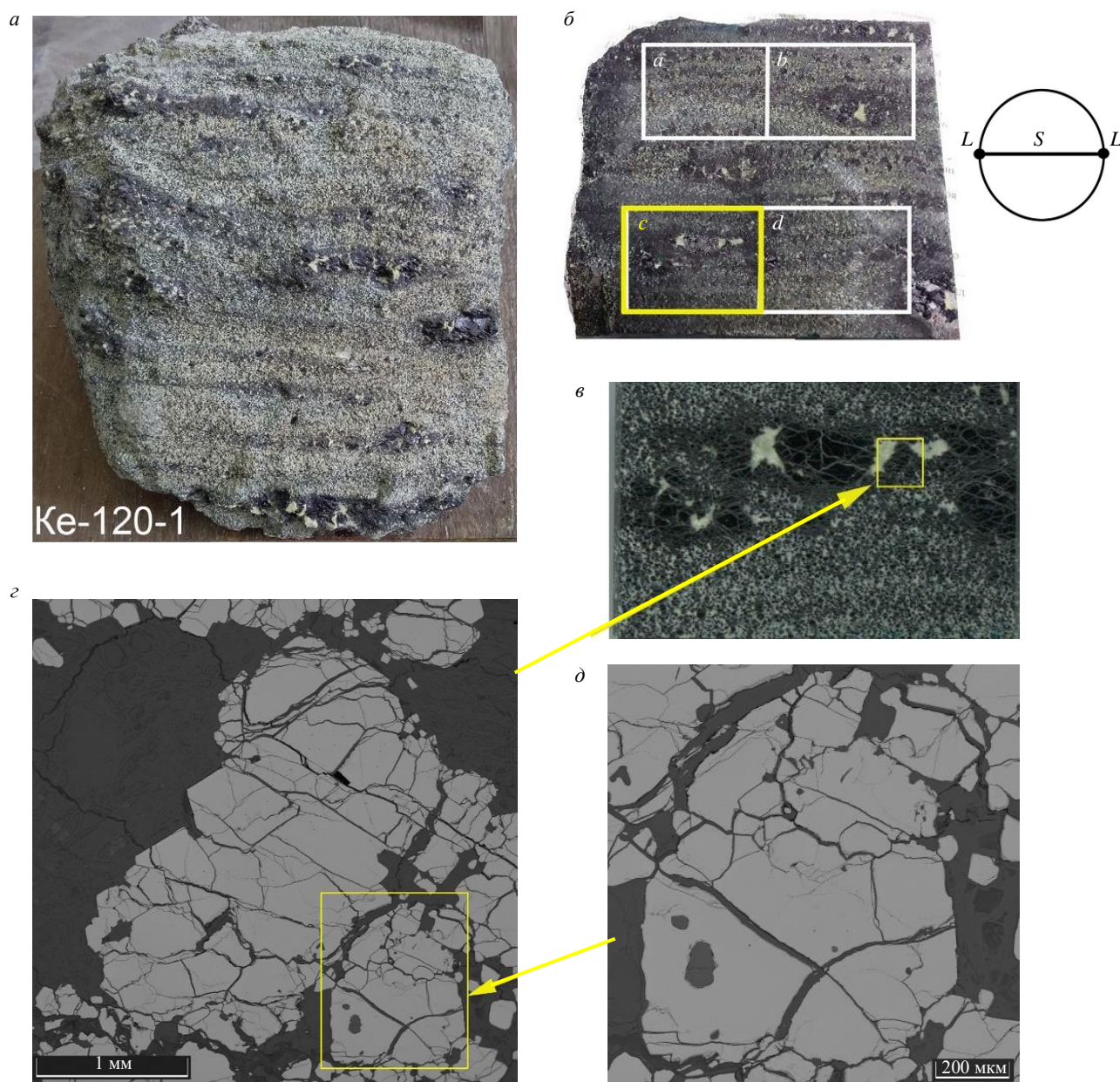


Рис.5. Общий вид и детали строения исследованного образца хромитита линзовидно-полосчатой текстуры Ке-120-01:

a – общий вид образца до препарирования; *б* – вид части среза перпендикулярно к полосчатости и макроскопические структурные элементы; *в* – общий вид препарата, изученного методом EBSD;

г – деталь препарата с агрегатами массивного строения; *д* – один из исследованных участков

возможным из-за изотропного характера оптических свойств хромшпинелида (кубическая сингония, непрозрачность) и трещиноватости зерен (рис.5, *в-д*). Исследования микроструктуры с применением методов EBSD были проведены на препарате *с* (рис.5, *б*), шаг сканирования составил на большей части участков 20 мкм, а один из них был изучен более детально с шагом 10 мкм (рис.5, *в-д*).

Проведенные инструментальные микроструктурные исследования в целом подтвердили предположения о различном гранулометрическом строении участков с разной текстурой (структурой), что наиболее отчетливо проявляется на картах, составленных в цветной кодировке обратных полюсных фигур (ОПФ) (рис.6). В левой части рис.6 приведены карты контраста Кикучи полос (КП), которые характеризуют качество выполненных измерений, во всех приведенных примерах оно является хорошим, о чем свидетельствует однородность изображений и преобладание светлых тонов (высокий контраст КП). Более темные участки свидетельствуют о большей степени

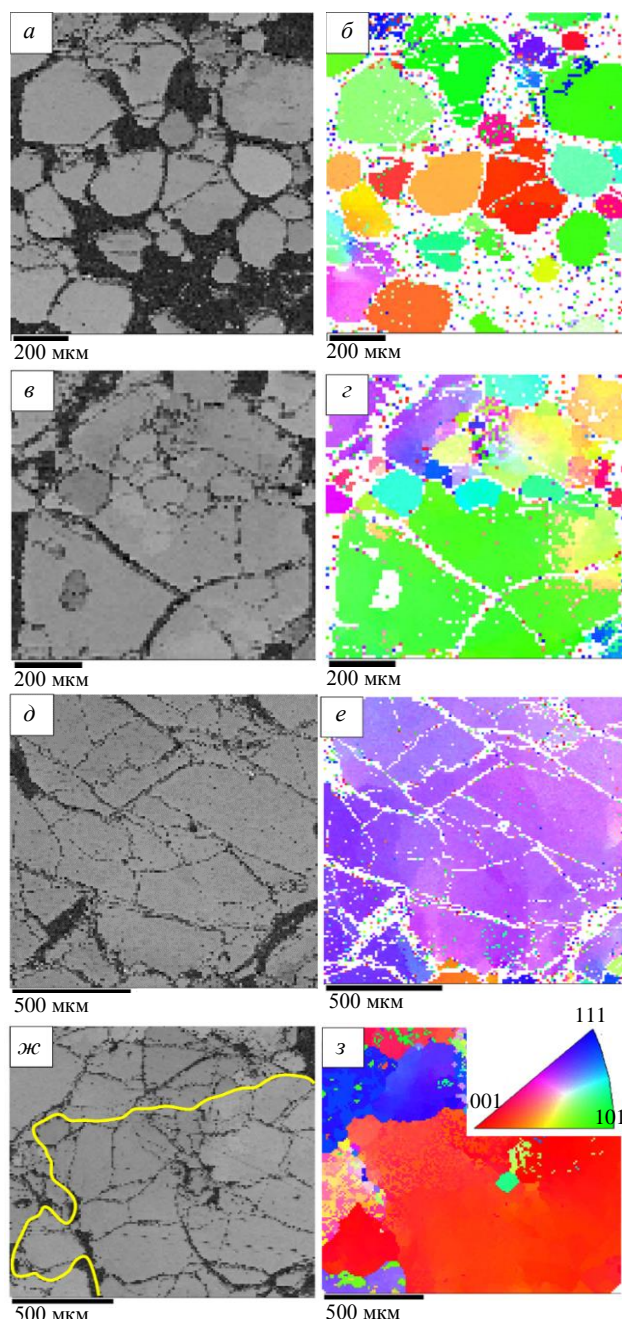


Рис.6. Микроструктурные карты участков образца хромитита линзовидно-полосчатой текстуры Ке-120-01: а, б – участок вкрапленного строения (а – контраст Кичуши полос (КП), б – карта ОПФ); в, г – участок переходного строения от вкрапленного к массивному, показан на рис.5, д (в – контраст КП, г – карта ОПФ); д-з – участки массивного строения (д, ж – контраст КП, е, з – карты ОПФ); ж – желтым цветом показана граница зерна с ориентировкой {001} на фрагменте з, на врезке – цветовой ключ к картам ОПФ

кристаллографических ориентировок данного минерала при значениях индекса $M = 0,1-0,4$ (рис.7). Следует отметить, что лишь в образце 700 отмечается совпадение максимума интенсивности выходов одной из осей [001] с направлением линейности и максимума оси [100], направленного перпендикулярно к плоскости минеральной уплотненности, что характерно для системы скольжения (100)[001]. Данная система скольжения является наиболее типичной также и для ортопироксенов. В двух других образцах получены более размытые текстурные узоры, что может быть связано

искаженности кристаллической решетки минералов. Для понимания карт ОПФ на врезке (рис.6, з) приведен типовой цветовой ключ для кристаллов кубической сингонии.

На участках вкрапленного строения, где зерна хромита отделены друг от друга силикатным матриксом, большинство зерен имеет однородную ориентировку, размер зерен составляет 70-250 мкм (рис.6, а, б). Однако некоторые зерна обнаруживают доменное строение (субзеренную структуру), разориентировка между субзернами составляет до 15° .

В агрегатах хромшпинелида переходного типа (на контакте вкрапленной и массивной зон) отмечается наличие разнотекстурной структуры с двумя максимумами размеров участков однородной ориентировки: 70-200 мкм и более 500 мкм (рис.6, в, г). Внутри участков второго типа часто можно наблюдать как локальные неоднородности с малоугловыми границами $1-10^\circ$, так и небольшие по размерам включения, отделенные от матрикса большеугловыми границами (более 15°).

Внутренние части участков массивного строения представляют собой области с практически однородной структурой, величина угла разориентировки не превышает 5° (рис.6, д, е). Границы между блоками однородного строения могут быть резкими и при этом совершенно независимыми от наблюдаемых визуально физических разделов, выраженных тонкими трещинами (рис.6, ж, з).

Помимо изучения главных породообразующих и рудообразующих минералов ультрамафитов (оливина и ортопироксена) и хромитов (хромшпинелид) южной части Кемпирсайского массива, нами была исследована внутренняя структура более редких для ультрамафитов минералов – клинопироксенов, которые представлены кальций-магнезиальной разновидностью – диопсидом ($\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$). Заметное присутствие диопсида отмечается в трех изученных образцах частично серпентинизированных перидотитов – 646, 700 и 786. Изучение методом EBSD позволило выявить наличие довольно сильных предпочтительных

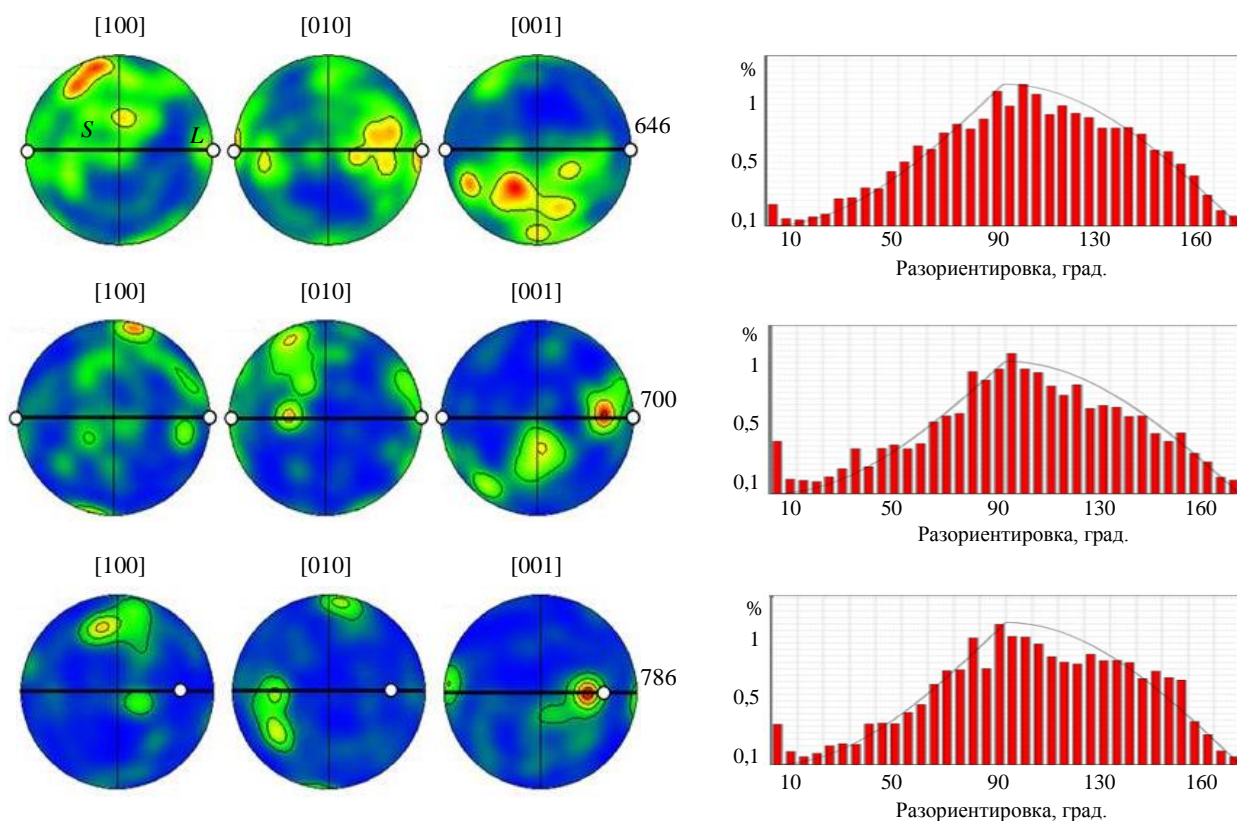


Рис. 7. Прямые полюсные фигуры для клинопироксенов из образцов ультрамафитов скважины GT-HY-1

с двумя основными причинами: значительной долей рекристаллизованных зерен диопсида в изученных образцах, а также с присутствием кристаллов, испытавших плавление (фрагментов закристаллизованного частичного расплава).

Обсуждение результатов. Полученные петрографические, минералогические и микроструктурные данные в целом согласуются с общими закономерностями строения ультрамафитовых комплексов и залежей хромитов [4], хотя в частностях расходятся с некоторыми известными положениями. В изученном хромитовом разрезе довольно широко распространены лерцолиты с глиноземистым шпинелидом. Дуниты содержат высокохромистый акцессорный хромшпинелид, а оливин из включений весьма обогащен никелем [32, 33]. Все это говорит о высокой степени деплетирования окорудных ультрамафитов, хотя в целом разрез представлен относительно слабо истощенными породами верхней мантии.

Полученные микроструктурные данные говорят о формировании ультрамафитов в условиях высокотемпературного пластического течения, сопровождавшегося синектонической рекристаллизацией [25]. Судя по текстурным диаграммам, в оливине проявились две системы скольжения (010)[100] и (001)[100], которые соответствуют типам текстур А и Е по классификации [38]. Оба типа текстур диагностированы в экспериментах при стрессе до 300 МПа, при этом тип А реализуется в «сухих» (< 200 ppm H/Si), а тип Е во «влажных» условиях (200-1000 ppm H/Si) [38].

В ортопироксене получены более сложные петроструктурные узоры, что связано с меньшей пластичностью данного минерала по сравнению с оливином [39, 40] и, как следствие, наличием нескольких групп зерен – деформированных порфирокластов с доменным строением и необластов, сформированных в ходе синектонической рекристаллизации.

Макротекстурные и микроструктурные особенности хромитов также были сформированы в условиях пластического течения вмещающих дунитов с рассеянным рудным материалом. Особенно ярко это проявлено в линзовидно-полосчатых разновидностях руд. Различия в гранулометрическом составе участков вкрапленного и массивного строения хорошо объясняются именно с позиции твердофазного генезиса руд. Согласно реоморфической модели [9, 32, 41], наиболее мобильными членами мантийных разрезов офиолитов являются дуниты, образующиеся в результате



деформационно-индуцированного распада ортопироксенов [41]. Этот же процесс ведет к первичному повышению концентрации хромшпинелидов, которые кристаллизуются из примесных количеств хрома и алюминия, входивших в пироксены. Поскольку оливин является самым реологически слабым минералом верхней мантии [39], то в дунитовых зонах локализуется пластическое течение и связанная с ним твердофазная дифференциация вещества. Вследствие значительно более высокой реологической жесткости, зерна хромшпинелидов в оливиновом агрегате преимущественно ведут себя как жесткие включения, которым в таком твердофазном потоке энергетически выгодно образовывать скопления – сегрегации, как было показано физико-математическим моделированием в работе [9].

Таким образом, внутри дунитов могла происходить сегрегация зерен хромита с формированием линзовидно-полосчатых скоплений, причем в центральных частях линз создавались условия для соприкосновения изначально рассеянных рудных зерен, на их контактах происходило нивелирование изначальной разориентировки, т.е. образовалось новое зерно с однородной кристаллографической ориентацией. Подобный механизм был предложен для объяснения особенностей микроструктуры в хромититах Индии [42] и близок к «спеканию под давлением» (high-P sintering), который предлагается для объяснения генезиса крупнозернистых массивных хромититов как в офиолитовых, так и в расслоенных комплексах [43, 44].

Микроструктурные исследования подтвердили ранее высказанное предположение о том, что размеры индивидов хромшпинелида критически зависят от структурных особенностей, а те, в свою очередь, от стадии процесса сегрегации. На ранней стадии каждое зерно хромшпинелида окружено зернами оливина, и поэтому размер рудных зерен имеет один максимум, соответствующий условиям деформации и всегда равен или меньше размера оливиновых зерен. Однако, когда сегрегация достигает некоего критического уровня, который может быть условно обозначен как «начало соприкосновения зерен», начинается рост агрегатов хромита (аккреция) и стирание ориентационных различий. Такой направленности процесса способствует значительно меньшая деформируемость хромита по сравнению с оливином и замедление пластического течения вблизи участков с повышенной концентрацией рудных зерен. Близкий к описанному механизм роста крупных зерен (порфиробластов) более реологически сильных минералов (в частности, гранатов) в метаморфических породах был описан в работе [45].

Заключение. Проведенные микроструктурные исследования хромититов и вмещающих ультрамафитов месторождения Алмаз-Жемчужина позволили получить количественные данные о внутренней структуре пород. Установлено, что становление ультрамафитов происходило в условиях субсолидусного высокотемпературного (650-950 °C) пластического течения. Статистические данные о кристаллографической ориентировке оливина свидетельствуют о том, что основным механизмом деформации являлось трансляционное скольжение по системам (010)[100] и (001)[100], подчиненное значение имела синтектоническая рекристаллизация. В ортопироксене пластическое течение также реализовалось по механизму трансляционного скольжения: системы (100)[001] и (010)[001], при этом синтектоническая рекристаллизация проявлена значительно сильнее по сравнению с оливином. Хромититы также демонстрируют текстуры и структуры, сформированные в условиях пластического течения. Вкрапленные руды имеют более мелкозернистое строение по сравнению с массивными: в образовании структуры последних важная роль принадлежала аккреции рудных зерен, которая сопровождалась унификацией их кристаллографической ориентировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко Г.Г. Роль тектоники при кристаллизации хромитовых руд Кемпирсайского плутона. М.: Наука, 1969. 217 с.
2. Павлов Н.В., Кравченко Г.Г., Чупрынина И.И. Хромиты Кемпирсайского плутона. М.: Наука, 1968. 179 с.
3. Melcher F., Grum W., Simon G. et al. Petrogenesis of the Ophiolitic Giant Chromite Deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a Study of Solid and Fluid Inclusions in Chromite // Journal of Petrology. 1997. Vol. 38. Iss. 10. P. 1419-1458. DOI: [10.1093/петрол/38.10.1419](https://doi.org/10.1093/петрол/38.10.1419)
4. González-Jiménez J.M., Griffin W.L., Proenza J.A. et al. Chromitites in ophiolites: How, where, when, why? Part II. The crystallization of chromitites // Lithos. 2014. Vol. 189. P. 140-158. DOI: [10.1016/j.lithos.2013.09.008](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.09.008)
5. Yao Wu, Mengjing Xu, Zhenmin Jin et al. Experimental constraints on the formation of the Tibetan podiform chromitites // Lithos. 2016. Vol. 245. P. 109-117. DOI: [10.1016/j.lithos.2015.08.005](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.08.005)



6. Fahui Xiong, Basem Zoheir, Richard Wirth *et al.* Mineralogical and isotopic peculiarities of high-Cr chromitites: Implications for a mantle convection genesis of the Bulqiza ophiolite // *Lithos*. 2021. Vol. 398-399. № 106305. DOI: [10.1016/j.lithos.2021.106305](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106305)
7. Johan Z., Martin R.F., Ettler V. Fluids are bound to be involved in the formation of ophiolitic chromite deposits // *European Journal of Mineralogy*. 2017. Vol. 29. Iss. 4. P. 543-555. DOI: [10.1127/ejm/2017/0029-2648](https://doi.org/10.1127/ejm/2017/0029-2648)
8. Пушкарев Е.В., Каменецкий В.С., Морозова А.В. и др. Онтогенез рудных хромшпинелидов и состав включений как индикаторы пневматолито-гидротермального образования платиноносных хромитов массива Кондер (Алданский щит) // *Геология рудных месторождений*. 2015. Т. 57. № 5. С. 394-423. DOI: [10.7868/S0016777015050044](https://doi.org/10.7868/S0016777015050044)
9. Савельев Д.Е., Федосеев В.Б. Твердофазное перераспределение минеральных частиц в восходящем мантийном потоке как механизм концентрации хромита в офиолитовых ультрамафитах (на примере офиолитов Крака, Южный Урал) // *Георесурсы*. 2019. Т. 21. № 1. С. 31-46. DOI: [10.18599/grs.2019.1.31-46](https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.31-46)
10. Казаков А.Н. Динамический анализ микроструктурных ориентировок минералов. Л.: Наука, 1987. 272 с.
11. Саранчина Г.М., Кожневников В.Н. Федоровский метод (определение минералов, микроструктурный анализ). Л.: Недра, 1985. 208 с.
12. Чернышов А.И., Юричев А.Н. Структурная эволюция дунитов и хромитов Харчерузского массива (Полярный Урал) // *Геотектоника*. 2016. № 2. С. 62-77. DOI: [10.7868/S0016853X1602003X](https://doi.org/10.7868/S0016853X1602003X)
13. Клепиков И.В., Васильев Е.А., Антонов А.В., Кудрявцев А.А. Пирамиды роста граней {110} в природном алмазе // *Записки Российского минералогического общества*. 2021. Т. 150. № 1. С. 127-133. DOI: [10.31857/S0869605521010068](https://doi.org/10.31857/S0869605521010068)
14. Klepikov I.V., Vasilev E.A., Antonov A.V. Regeneration Growth as One of the Principal Stages of Diamond Crystallogenes // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 327. DOI: [10.3390/min12030327](https://doi.org/10.3390/min12030327)
15. Васильев Е.А., Криулина Г.Ю., Гаранин В.К. Термическая история алмаза кимберлитовых трубок Архангельская и имени А.П.Карпинского-I // *Записки Горного института*. 2022. Т. 255. С. 327-336. DOI: [10.31897/PMI.2022.57](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.57)
16. Till J.L., Moskowicz B.M. Deformation microstructures and magnetite texture development in synthetic shear zones // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 629. P. 211-223. DOI: [10.1016/j.tecto.2014.04.026](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.04.026)
17. Vukmanovic Z., Barnes S.J., Reddy S.M. *et al.* Morphology and microstructure of chromite crystals in chromitites from the Merensky Reef (Bushveld Complex, South Africa) // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2013. Vol. 165. Iss. 6. P. 1031-1050. DOI: [10.1007/s00410-012-0846-1](https://doi.org/10.1007/s00410-012-0846-1)
18. Yudovskaya M.A., Costin G., Shilovskikh V.V. *et al.* Bushveld symplectic and sieve-textured chromite is a result of coupled dissolution-precipitation: a comparison with xenocrystic chromite reactions in arc basalt // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2019. Vol. 174. Iss. 9. № 74. DOI: [10.1007/s00410-019-1613-3](https://doi.org/10.1007/s00410-019-1613-3)
19. Bernard R.E., Behr W.M., Becker T.W., Young D.J. Relationships Between Olivine CPO and Deformation Parameters in Naturally Deformed Rocks and Implications for Mantle Seismic Anisotropy // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019. Vol. 20. Iss. 7. P. 3469-3494. DOI: [10.1029/2019GC008289](https://doi.org/10.1029/2019GC008289)
20. Kumamoto K.M., Warren J.M., Hansen L.N. Evolution of the Josephine Peridotite Shear Zones: 2. Influences on Olivine CPO Evolution // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019. Vol. 124. Iss. 12. P. 12763-12781. DOI: [10.1029/2019JB017968](https://doi.org/10.1029/2019JB017968)
21. Soustelle V., Manthilake G. Deformation of olivine-orthopyroxene aggregates at high pressure and temperature: Implications for the seismic properties of the asthenosphere // *Tectonophysics*. 2017. Vol. 694. P. 385-399. DOI: [10.1016/j.tecto.2016.11.020](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.020)
22. Michibayashi K., Mainprice D., Fujii A. *et al.* Natural olivine crystal-fabrics in the western Pacific convergence region: A new method to identify fabric type // *Earth and Planetary Science Letters*. 2016. Vol. 443. P. 70-80. DOI: [10.1016/j.epsl.2016.03.019](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.03.019)
23. Munjae Park, Youngwoo Kil, Haemyeong Jung. Evolution of Deformation Fabrics Related to Petrogenesis of Upper Mantle Xenoliths Beneath the Baekdusan Volcano // *Minerals*. 2020. Vol. 10. Iss. 9. № 831. DOI: [10.3390/min10090831](https://doi.org/10.3390/min10090831)
24. Skemer P., Hansen L.N. Inferring upper-mantle flow from seismic anisotropy: An experimental perspective // *Tectonophysics*. 2016. Vol. 668-669. P. 1-14. DOI: [10.1016/j.tecto.2015.12.003](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.12.003)
25. Савельев Д.Е., Макатов Д.К., Сергеев С.Н. Микроструктурные особенности хромитов и ультрамафитов месторождения Алмаз-Жемчужина (Кемпирсайский массив, Казахстан) // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н.Чирвинского*. 2023. № 26. С. 230-235. DOI: [10.17072/chirvinsky.2023.230](https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2023.230)
26. Варюхин В.Н., Паишинская Е.Г., Заводеев А.В., Бурховецкий В.В. Возможности метода дифракции обратнорассеянных электронов для анализа структуры деформированных материалов. Киев: Наукова думка, 2014. 104 с.
27. Адамс Б.Л. Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении. М.: Техносфера, 2014. 544 с.
28. Даниленко В.Н., Миронов С.Ю., Беляков А.Н., Жильев А.П. Применение EBSD анализа в физическом материаловедении (обзор) // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78. № 2. С. 28-46.
29. Савельев А.А., Савельева Г.Н. Офиолиты Кемпирсайского массива: основные черты структурно-вещественной эволюции // *Геотектоника*. 1991. № 6. С. 57-75.
30. Балыкин П.А., Конников Э.Г., Кривенко А.П. и др. Петрология постгарцбургитовых интрузивов кемпирсайско-хабарнинской офиолитовой ассоциации (Южный Урал). Свердловск: Институт геологии и геохимии, 1991. 159 с.
31. Абдуллин А.А., Авдеев А.В., Сеитов Н.С. Офиолиты силура Сакмарской и Орь-Илецкой зон Мугоджар // *Труды Института геологических наук КазССР*. 1975. С. 39-74.
32. Savelliev D.E., Makatov D.K., Rakhimov I.R. *et al.* Silicates from Lherzolites in the South-Eastern Part of the Kempirsay Massif as the Source for Giant Chromitite Deposits (the Southern Urals, Kazakhstan) // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 8. № 1061. DOI: [10.3390/min12081061](https://doi.org/10.3390/min12081061)
33. Savelliev D.E., Makatov D.K., Vishnevskiy A.V., Gataullin R.A. Accessory Minerals in the Chromitite Ores of Dzharlybutak Ore Group of Kempirsay Massif (Southern Urals, Kazakhstan): Clues for Ore Genesis // *Minerals*. 2023. Vol. 13. Iss. 2. № 263. DOI: [10.3390/min13020263](https://doi.org/10.3390/min13020263)
34. Савельева Г.Н., Перцев А.Н. Мантийные ультрамафиты в офиолитах Южного Урала, Кемпирсайский массив // *Петрология*. 1995. Т. 3. № 2. С. 115-132.
35. Ballhaus C., Berry R.F., Green D.H. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1991. Vol. 107. Iss. 1. P. 27-40. DOI: [10.1007/BF00311183](https://doi.org/10.1007/BF00311183)



36. Ono A. Fe-Mg partitioning between spinel and olivine // The Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists. 1983. Vol. 78. Iss. 4. P. 115-122. DOI: [10.2465/ganko1941.78.115](https://doi.org/10.2465/ganko1941.78.115)
37. Roeder P.L., Campbell I.H., Jamieson H.E. A re-evaluation of the olivine-spinel geothermometer // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1979. Vol. 68. Iss. 3. P. 325-334. DOI: [10.1007/BF00371554](https://doi.org/10.1007/BF00371554)
38. Haemyeong Jung. Crystal preferred orientations of olivine, orthopyroxene, serpentine, chlorite, and amphibole, and implications for seismic anisotropy in subduction zones: a review // Geosciences Journal. 2017. Vol. 21. Iss. 6. P. 985-1011. DOI: [10.1007/s12303-017-0045-1](https://doi.org/10.1007/s12303-017-0045-1)
39. Yamamoto J., Ando J., Kagi H. et al. In situ strength measurements on natural upper-mantle minerals // Physics and Chemistry of Minerals. 2008. Vol. 35. Iss. 5. P. 249-257. DOI: [10.1007/s00269-008-0218-6](https://doi.org/10.1007/s00269-008-0218-6)
40. Savelyev D.E. Chromitites of the Kraka ophiolite (South Urals, Russia): geological, mineralogical and structural features // Mineralium Deposita. 2021. Vol. 56. Iss. 6. P. 1111-1132. DOI: [10.1007/s00126-021-01044-5](https://doi.org/10.1007/s00126-021-01044-5)
41. Савельев Д.Е., Пучков В.Н., Сергеев С.Н., Мусабилов И.И. О деформационно-индуцированном распаде энстатита в мантийных перидотитах и его значении для процессов частичного плавления и хромитообразования // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476. № 2. С. 200-204. DOI: [10.7868/S0869565217260176](https://doi.org/10.7868/S0869565217260176)
42. Ghosh B., Misra S., Morishita T. Plastic deformation and post-deformation annealing in chromite: Mechanisms and implications // American Mineralogist. 2017. Vol. 102. Iss. 1. P. 216-226. DOI: [10.2138/am-2017-5709](https://doi.org/10.2138/am-2017-5709)
43. Johnson C. Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan: Submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Ph.D. Cardiff University, 2012, p. 468.
44. White J.C., White S.H. On the structure of grain boundaries in tectonites // Tectonophysics. 1981. Vol. 78. Iss. 1-4. P. 613-628. DOI: [10.1016/0040-1951\(81\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90032-9)
45. Spiess R., Peruzzo L., Prior D.J., Wheeler J. Development of garnet porphyroblasts by multiple nucleation, coalescence and boundary misorientation-driven rotations // Journal of Metamorphic Geology. 2001. Vol. 19. Iss. 3. P. 269-290. DOI: [10.1046/j.1525-1314.2001.00](https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2001.00)

Авторы: Д.Е.Савельев, д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, savl71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8910-6992> (Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия), С.Н.Сергеев, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5494-390X> (Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия), Д.К.Макатов, докторант PhD, <https://orcid.org/0009-0006-5059-2851> (Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагитова, Караганда, Республика Казахстан).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением

Ю.И.Виноградов¹✉, С.В.Хохлов¹, Р.Р.Зигангиров¹,
А.А.Мифтахов², Ю.И.Суворов²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

² АО «ПОЛЮС Алдан», пос. Нижний Куранах, Республика Саха (Якутия), Россия

Как цитировать эту статью: Виноградов Ю.И., Хохлов С.В., Зигангиров Р.Р., Мифтахов А.А., Суворов Ю.И. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 231-245. EDN RUUFNM

Аннотация. Выбор рациональной технологии ведения буровзрывных работ с позиций обеспечения необходимого гранулометрического состава взорванной горной массы и уменьшения разубоживания руды прямо связан с точным определением свойств горного массива. Районирование массива горных пород по их крепости, буримости и взрываемости не учитывает изменчивость геологического строения подготавливаемого к взрыву блока, что приводит к завышенному удельному расходу взрывчатых веществ. Решение данной проблемы особенно актуально для предприятий, разрабатывающих месторождения с высокой степенью изменчивости геологического строения даже в пределах взрывающегося блока, в частности на россыпных месторождениях. Перерасход взрывчатых веществ ведет к неоптимальному для данных условий и технологии горных работ гранулометрическому составу взорванной горной массы. Определять физико-механические свойства горных пород на месторождениях со сложным геологическим строением необходимо на каждом подготавливаемом к взрыву блоке. При расчете параметров буровзрывных работ необходимо применять корреляционную зависимость между физико-механическими свойствами этих пород и параметрами бурения. Зависимость, определяемая по разработанной методике, прошла апробацию в промышленных условиях, а гранулометрический состав взорванной горной массы замерялся косвенным методом на основе производительности экскаватора. Полученные результаты показали повышение производительности экскавации, что свидетельствует о правильности подхода к решению проблемы идентификации пород взрывающегося блока.

Ключевые слова: буровзрывные работы; энергоемкость бурения; измерение параметров бурения; удельный расход взрывчатых веществ

Поступила: 10.04.2023

Принята: 27.12.2023

Онлайн: 22.02.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. Открытые разработки составляют 70 % всех разработок месторождений полезных ископаемых [1, 2]. По мере углубления карьеров коэффициент крепости горных пород возрастает, что приводит к интенсификации взрывных работ и увеличению затрат на их проведение [3], при этом дробление массива горных пород взрывом является первым звеном в цепи технологических процессов горного производства и составляет около 30 % от общих затрат на добычу полезного ископаемого [4-6]. Поэтому необходимо рационально распределять энергию взрыва для снижения затрат на бурение и взрывание при обеспечении оптимального по себестоимости добычи гранулометрического состава взорванной горной массы, который позволит получить максимальную прибыль [7-10]. Все эти условия закладываются в параметры буровзрывных работ, при расчете которых учитываются свойства применяемых взрывчатых материалов и свойства объекта воздействия взрыва – массива горных пород. Он характеризуется физико-механическими свойствами слагающих его пород и степенью трещиноватости, которые обуславливают прочностные свойства разрушаемого объекта, что влияет и на обоснование наиболее рациональной системы разработки месторождения [11].

Постановка проблемы. Одной из ключевых проблем взрывного дела в мире является неопределенность строения массива взрывающегося блока, а следовательно, невозможность определения физико-механических свойств пород, слагающих блок. Эти свойства напрямую влияют на качество дробления, и, как следствие, на себестоимость добычи полезного ископаемого. В работе



С.Н.Жарикова показано, что в параметры БВР закладывается значительный запас, что ведет к перерасходу взрывчатых веществ [12]. Поэтому определение строения подготавливаемого к взрыву блока является важной задачей как с позиции экономики, так и с позиции рационального использования ресурсов. Результатом ее решения станет возможность рационального распределения энергии заряда в зависимости от физико-механических свойств горных пород блока.

При ведении открытых горных работ расчет параметров БВР ведется на основе объемной гипотезы С.Вобана, устанавливающей связь между объемом взрывающегося блока V и необходимым для этого количеством взрывчатого вещества Q [13]:

$$Q = qV,$$

где q – удельный расход ВВ, кг/м³.

Но энергия взрыва, передаваемая породе, как известно, зависит от свойств взрывчатых веществ, условий взрывания заряда и свойств горных пород. Следовательно, величина заряда может быть выражена в виде функции всех переменных, влияющих на качество взрыва [14]:

$$Q = f(W, H, a, l_3, d_3, E, \rho, D, c_i),$$

где W, H, a, l_3, d_3 – геометрические параметры – линия наименьшего сопротивления (ЛНС), высота уступа, расстояние между зарядами, длина заряда, диаметр заряда соответственно; E, ρ, D – характеристики ВВ – весовая мощность, плотность, скорость детонации соответственно; c_i – коэффициент, отражающий свойства породы, расположения заряда и т.д.

У.Лангефорс предложил изменять объемную концентрацию энергии в разных частях скважины – для лучшей проработки подошвы уступа плотность заряда в нижней части скважины необходимо увеличить на 60 % по сравнению с основной частью заряда. Также он предлагает в качестве основного заряда использовать простейшие взрывчатые вещества на основе аммиачной селитры и нефтедобавок, а в нижней части заряжать динамиты, так как данный тип ВВ обладает высокой водоустойчивостью, плотностью и энергетикой.

Решение У.Лангефорса можно применять и при взрывании неоднородного массива горных пород: создавая в разных частях скважины заряды ВВ с различной энергетикой в соответствии с физико-механическими свойствами пород на данных участках скважины, можно рационально распределить энергию взрыва во взрываемом блоке и тем самым обеспечить оптимальное качество дробления взорванной горной массы [15]. Однако в то время не существовало технологии, позволяющей оперативно определять, какие породы слагают блок. При этом необходимо отметить, что проблема рационального распределения энергии взрыва в зависимости от физико-механических свойств горных пород не нова. В 50-х годах прошлого столетия в США для решения этой проблемы были разработаны взрывчатые вещества, удельную теплоту взрыва которых можно было изменять непосредственно во время заряжания путем изменения плотности ВВ и процентного соотношения компонентов. Эти ВВ получили название «Сларри». Они представляют собой водный раствор окислителя (как правило, аммиачной селитры), выполняющий роль сплошной или диспергирующей фазы, в которой диспергирован как избыточный твердый окислитель, так и сенсибилизирующие горючие добавки [16, 17]. В.Л.Барон и В.Х.Кантор описывают зарядную машину американской компании «Мак Киссик», которая позволяет готовить смесь АС-ДТ с добавкой алюминия, причем количество добавки можно регулировать, а подачу начинать и останавливать в любой момент заряжания скважины [18]. Это дает возможность формировать заряд с переменной энергией по высоте уступа и расширяет область применения смеси АС-ДТ. Там же представлена зарядная машина «Иреко Кэмикалз», предназначенная для заряжания водосодержащих взрывчатых веществ, позволяющая регулировать объемную концентрацию энергии заряда при заряжании скважин в зависимости от физико-механических свойств горных пород.

В основе расчета необходимого количества ВВ в скважине и для всего блока лежит гипотеза Вобана, единственной важной задачей при расчете параметров БВР остается определение оптимального удельного расхода ВВ, который является основным энергетическим показателем взрывных работ.

Б.Н.Кутузов предложил рассчитывать проектный удельный расход на основании эталонного для данного типа пород удельного расхода при диаметре зарядов 200-250 мм [19]:



$$q_{\text{пр}} = \frac{q_{\text{эт}} e k_d \rho}{2,6}, \quad (1)$$

где $q_{\text{эт}}$ – эталонный удельный расход для данного массива горных пород, определенный на основании опытных взрывов и учитывающий физико-механические свойства пород и трещиноватость данного массива; e – коэффициент работоспособности ВВ; k_d – поправочный коэффициент на размер кондиционных кусков; ρ – плотность породы.

Выражение (1) учитывает следующие физико-механические свойства горных пород – предел прочности на одноосное сжатие образца горных пород через эталонный удельный расход и плотность пород. Структурное ослабление массива ввиду трещиноватости учитывается также через эталонный удельный расход. Значение эталонного удельного расхода не является константой, так как физико-механические свойства пород и трещиноватость массивов с различным генезисом и одинаковым петрографическим составом различаются.

В.В.Ржевский предложил рассчитывать эталонный удельный расход для дробления массива горных пород следующим образом [20]:

$$q_{\text{эт}} = 0,1 k_t (\sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{раст}} + \sigma_{\text{ср}}) + 40 \rho, \quad (2)$$

где k_t – коэффициент, зависящий от трещиноватости массива; $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие; $\sigma_{\text{раст}}$ – предел прочности на растяжение; $\sigma_{\text{ср}}$ – предел прочности при срезе; ρ – плотность породы.

Расчетная формула проектного удельного расхода по методу В.В.Ржевского основана на расчете проектного удельного расхода через эталонный [21]:

$$q_{\text{пр}} = q_{\text{эт}} K_{\text{ВВ}} K_d K_t K_{\text{сз}} K_{\text{об}} K_{\text{с.п}},$$

где $K_{\text{ВВ}}$ – коэффициент, учитывающий тип ВВ; K_d – коэффициент, учитывающий диаметр скважины; K_t – коэффициент, учитывающий трещиноватость массива; $K_{\text{сз}}$ – коэффициент, учитывающий фактическую форму и степень сосредоточения заряда; $K_{\text{об}}$ – коэффициент, учитывающий объем взрывающей породы; $K_{\text{с.п}}$ – коэффициент, учитывающий количество свободных поверхностей.

Формула, разработанная «Гипрорудой», очень похожа на формулу В.В.Ржевского, так как для расчета проектного удельного расхода применяется эталонный для данного типа пород [19]:

$$q_{\text{пр}} = q_{\text{эт}} K_{\text{ВВ}} K_d K_{\text{др}} K_b,$$

где $K_{\text{др}}$ – коэффициент, учитывающий степень дробления; K_b – коэффициент, учитывающий угол наклона скважины.

Формула «Союзвзрывпрома» учитывает крепость горных пород непосредственно, а трещиноватость – через средний размер куска в массиве [13]:

$$q_{\text{пр}} = 0,13 \rho f^{0,25} (0,6 + 3,3 \cdot 10^{-3} d_3 d_0) \left(\frac{0,5}{d_k} \right)^{0,4} K_{\text{ВВ}} \cdot 10^{-3},$$

где d_3 – диаметр заряда, мм; d_0 – средний размер куска в массиве, м; d_k – размер кондиционного куска в развале горной массы, м.

Физический смысл удельного расхода ВВ заключается в том, что он отражает удельные энергозатраты ВВ на дробление данного массива горных пород [21]:

$$e_{\text{ВВ}} = qE,$$

где E – энергия взрыва 1 кг ВВ, кДж/кг.

Рассматривая представленные формулы удельного расхода, можно увидеть, что в трех из них учитывается тип ВВ через коэффициент относительной работоспособности [22]:

$$K_{\text{ВВ}} = \frac{E_{\text{эт}}}{E_{\text{ВВ}}},$$

где $E_{\text{ВВ}}$, $E_{\text{эт}}$ – энергии взрыва 1 кг применяемого ВВ и эталонного соответственно.



Тогда, определив эталонные энергозатраты на дробление 1 м³ горных пород, можно по энергетическим характеристикам предполагаемого к использованию ВВ определить его удельный расход. А это, в свою очередь, позволит менять объемную концентрацию энергии на различной глубине скважины в соответствии с физико-механическими свойствами пород, залегающих на данной глубине.

М.Ф.Друкованый и др. предложили для расчетов зарядов в слоистом массиве применять средневзвешенное значение удельного расхода, определяемое в соответствии с мощностью каждого слоя*:

$$q = \frac{q_1 H_1 + q_2 H_2 + q_3 H_3}{H_1 + H_2 + H_3},$$

где q_1, q_2, q_3 – удельный расход ВВ для пород первого, второго и третьего слоев соответственно; H_1, H_2, H_3 – мощность каждого слоя.

Данная зависимость может применяться для месторождений, где слоистость достаточно точно определяется по обнажениям пород на свободных поверхностях блока. Для тех массивов, где строение непостоянно и меняется в пределах небольшого участка взрываемого блока, применять формулу М.Ф.Друкованого и др. не представляется целесообразным. Поэтому встает вопрос о способах определения геологического строения взрываемого блока и физико-механических свойств горных пород, слагающих этот блок.

Имеющиеся зависимости не позволяют определить эталонные удельные энергозатраты для каждого типа пород конкретного месторождения. Действительно, выражение (2) основано на допущении о том, что при взрыве горных пород сжимающая, растягивающая и сдвиговая нагрузки играют одинаковую роль при разрушении пород взрывом, однако современные представления физики разрушения пород при взрыве говорят о преобладающей растягивающей нагрузке. И даже этот факт справедлив исключительно для монолитных ненарушенных тел, какими массивы горных пород не являются. Тем самым определение эталонных удельных энергозатрат при дроблении горных пород взрывом возможно исключительно экспериментальным способом, и эти значения будут справедливы только для пород исследуемого месторождения. Но даже при наличии значений эталонных удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом (удельный расход ВВ) задача определения строения подготавливаемого к взрыву блока остается нерешенной.

Рассмотрим технологические показатели, отражающие совокупность физико-механических свойств горных пород.

Как известно, для относительной оценки трудности разрушения горных пород применяется коэффициент крепости горных пород М.М.Протодяконова [23]:

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{10}, \quad (3)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа.

Этот коэффициент является критерием относительной оценки свойств горных пород, а его значение справедливо только для пород конкретного месторождения, где такая оценка производилась.

Для классификации горных пород по трудности разрушения при бурении применяются классификации по буримости. Ряд классификаций создан на основе времени бурения погонного метра скважины, трудности бурения (безразмерный коэффициент), удельной энергоемкости бурения [24]. Наличие различных классификаций по одному и тому же процессу свидетельствует как о сложности проблемы, так и о незавершенности ее решения. Невозможно сопоставить шкалы, основанные на времени бурения, так как при их составлении применяются различные станки, в частности, в классификации по СНИП-82 – бурильный молоток ПР-30 по всем породам, а в Единой классификации по буримости для пород до 11 категории применяется станок СБР-160, а с 12 и выше – СБШ-250.

* Друкованый М.Ф., Дубнов Л.В., Иванов К.И. и др. Справочник по буровзрывным работам. М.: Недра, 1976. 631 с.



Для оценки горных пород по необходимому на дробление горных пород количеству ВВ существует общая классификация по взрываемости, составленная Б.Н.Кутузовым и В.Ф.Плужниковым для стандартных условий (высота уступа 12-15 м, диаметр скважин около 250 мм, ВВ – граммонит 79/21, схема инициирования – диагональная с короткозамедленным взрыванием), при взрыве выход крупной фракции (свыше 1000 мм) близок нулю*. В соответствии с этим были получены значения удельных расходов для каждой категории по взрываемости, при этом в классификации учитывается трещиноватость и содержание в массиве отдельностей более 500 мм и более 1500 мм. У данной классификации имеются два недостатка – большой разброс значений удельного расхода для одной и той же категории и соответствие нескольких категорий по буримости для одной категории по взрываемости. В табл. 1 отражены соответствия каждой из трех категорий**.

Таблица 1

Сводная таблица классификаций горных пород по крепости, буримости и взрываемости

Предел прочности на одноосное сжатие, Па · 10 ⁵	Коэффициент крепости по шкале М.М.Протодяконова	Категория буримости по ЕНБ	Категория взрываемости по Б.Н.Кутузову и В.Ф.Плужникову
100-300	1-3	V-VII	I
200-450	2-5	VII-X	II
300-650	3-7	IX-XII	III
500-800	5-8	XI-XIII	IV
700-1200	7-12	XIII-XV	V
1100-1600	11-16	XIV-XVI	VI
1450-2050	15-20	XV-XVIII	VII
1950-2500	20	XVII-XX	VIII
2350-3000	20	XIX-XX	IX
2850 и более	20	XX	X

Районирование массива по категориям взрываемости, буримости, крепости горных пород, т.е. фактически по физико-механическим свойствам горных пород и трещиноватости массива, необходимо для принятия оптимальных решений по планированию горных работ. Однако все способы районирования основаны на непосредственном воздействии с массивом взрывчатых веществ или фотосъемке уступов, бортов карьера. При этом ни один из способов не может дать представление о физико-механических свойствах пород непосредственно, а принимая во внимание то, что составление шкал по буримости, взрываемости и крепости является незавершенной работой, определять свойства пород необходимо на взрываемом блоке с применением определенных инструментов.

Определить физико-механические свойства горных пород с достаточной точностью позволяют лабораторные испытания на основании образцов, полученных при отборе керна из массива [25]. В настоящее время образцы горных пород позволяют получить большой объем информации, на основании которой проектируются буровзрывные работы. Главным недостатком данного способа является большое количество времени, проходящее с момента отбора образцов до получения информации. Помимо этого, требуется тщательная полировка торцевых поверхностей, их параллельность, монолитность образцов [26]. Плюс ко всему, необходимо обеспечить сохранность образцов керна при их изъятии из массива и транспортировке. При этом, согласно стандартам, требуется большое количество материала по массе и длине, что не всегда выполнимо [26].

Выходом из этой ситуации может служить испытание образцов горных пород неправильной формы путем сжатия их сферическими инденторами, разработанное в Санкт-Петербургском горном университете [27]. Суть метода заключается в фиксации разрушающей силы и измерении площади поверхности отрыва и площади поверхностей зон разрушенной породы на контакте с инденторами.

* Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом. М.: Горная книга, 2007. 471 с.

** Трубецкой К.Н., Потапов М.Г., Виноцкий К.Е. и др. Открытые горные работы. М.: Горное бюро, 1994. 590 с.



Для проведения таких испытаний не требуются образцы правильной формы, что сокращает время и затраты на их проведение. Исследования показали состоятельность данного метода – разброс значений, полученных в ходе испытаний цилиндрических образцов и образцов неправильной формы, невелик. Однако это все равно требует соответствующего оборудования, кадров, а также обработки большого количества данных.

Перспективным направлением определения физико-механических свойств горных пород и трещиноватости массива является применение технологии измерения параметров бурения (MWD – measurement while drilling) [28-31]. Суть технологии заключается в измерении параметров бурения, таких как давление подачи, давление на вращателе, энергетических характеристик соответствующих агрегатов, скорости бурения и т.д. Для получения информации о свойствах пород не требуется наличие оборудования (кроме установленного на буровом станке), специально обученных людей. Интерпретация данных производится с помощью компьютерных программ, рассчитывающих параметры БВР на основе установленных закономерностей.

Впервые эту технологию использовали в 1911 г. в нефтяной отрасли и лишь в 1970-х гг. ее внедрили в горно-добывающую. Классифицировать породы по их удельной механической энергии бурения предложил Р.Тил, который вывел формулы для расчета этой энергии при различных способах бурения [32]. Уравнения учитывают нагрузку на буровую коронку, скорость вращения долота, его крутящий момент и скорость бурения.

Х.Шуннесон показал, что параметры бурения можно применять для оценки физико-механических свойств горных пород, если эти свойства существенно различаются, т.е. меняется геологическое строение [33, 34].

И.Е.Долгий и Н.И.Николаев утверждают, что при бурении затраченная на разрушение энергия определяется всей совокупностью физико-механических свойств горных пород, и предлагают оценивать горные породы по удельной объемной работе разрушения [35].

И.А.Тангаев создал классификацию горных пород по буримости, предложив оценивать породы по их удельной энергоемкости бурения шарошечным способом [36]:

$$e = \frac{N}{v},$$

где N – мощность вращателя, кВт; v – скорость бурения.

Учитывая, что определение физико-механических свойств горных пород как на образцах, так и геофизическими методами, крайне трудоемко и требует специальных условий, технология MWD является наилучшим вариантом решения проблемы идентификации пород [32].

Алгоритм идентификации пород:

- выявить типы пород, слагающих массив данного месторождения;
- установить физико-механические свойства данных пород в лабораторных условиях на образцах;
- получить корреляционную зависимость между параметрами бурения и физико-механическими свойствами горных пород;
- определить удельные энергозатраты на дробление взрывом каждого типа пород.

Методы. Для определения зависимости между параметрами бурения и физико-механическими свойствами горных пород Куранахского рудного поля была разработана следующая методика:

- Геологическая служба выбирает один или несколько технологических блоков, где породы, по мнению геолога, соответствуют характерным типам пород, слагающих массив месторождения Куранахского рудного поля.

- Во время технологического бурения анализируются параметры бурения, начиная с глубины 4-5 м от устья скважины (энергоемкость бурения, осевые нагрузки, техническая скорость бурения и т.д.) по показателям бортового контроллера «Кобус».

- Выбираются три-четыре скважины с одинаковыми параметрами (за основу берется удельная энергоемкость бурения) для каждого характерного типа пород.

- Рядом с выбранными скважинами организуется геологоразведочное бурение с отбором керна с глубины от устья скважины 4-5 м. Расстояние разведочных скважин от технологической



не должно превышать 1 м. С каждой геологоразведочной скважины отбирается 1-1,5 м керна одного типа пород. Для каждого типа пород отбирается не менее 3 м керна.

В геологоразведочном бурении применялся станок колонкового бурения на гусеничном шассе Boart Longyear LV 75, позволяющий бурить скважины диаметром 108 мм (диаметр внешней трубы) и получать керн диаметром 67 мм. Керн отбирался в соответствии с ГОСТ 12071 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов». Каждый отобранный образец был помещен в стрейтч-пленку для защиты от влаги и помечен (наименование породы, глубина отбора и место отбора). Параллельно велся полевой журнал с более развернутым описанием каждого метра керна.

Для бурения технологических скважин применялся станок Atlas Copco DML, диаметр скважин 230 мм. На станке установлен бортовой контроллер «Кобус», который является частью программного комплекса BlastMaker, позволяющего получать информацию о параметрах бурения в реальном времени. Для исключения влияния износа шарошечных долот на показатели бурения применялись новые долота.

В лабораторных условиях определялись следующие физико-механические свойства: пределы прочности на одноосное сжатие, растяжение по образующим, срез со сжатием и плотность, согласно соответствующим ГОСТам. При бурении технологических скважин фиксировались цвет шлама, его влажность, различные звуки, возникавшие при бурении (стук, скрежет).

Результаты апробировались путем взрывания технологического блока. Идентификация пород блока проводилась как по удельной энергоёмкости бурения, так и по продуктам бурения (буровому шламу) методом наблюдения.

По результатам анализа геологической документации были выявлены характерные для изучаемого месторождения типы горных пород: известняки мелкозернистые доломитизированные; известняки среднезернистые плотные доломитизированные; песчаники мелкозернистые; суглинки различной пластичности. Результаты геологического бурения отражены в табл.2. В табл.3 представлены результаты лабораторных испытаний полученных образцов горных пород на одноосное сжатие, растяжение и срез со сжатием.

Таблица 2

Геологическое строение участков

Инженерно-геологическая скважина	Глубина, м	Мощность, м	Краткое описание грунтов
1	0,0-1,7	1,7	Супесь песчанистая пластичная
	1,7-5,4	3,7	Известняк коричнево-серый доломитизированный
	5,4-9,1	3,7	Щебенистый грунт (известняк, куски до 10 см)
	9,1-9,5	0,4	Известняк коричнево-серый доломитизированный окремненный
	9,5-10,9	1,4	Щебенистый грунт (известняк серо-коричневый ожелезненный кавернозный, куски до 20 см)
	10,9-14,0	3,1	Известняк серо-коричневый ожелезненный кавернозный (оксид кремния IV)
2	0,0-4,9	4,9	Суглинок тяжелый красно-коричневый, мягкопластичный (с 0,7 м тугопластичный) ожелезненный
	4,9-8,0	3,1	Песок коричневый плотный водонасыщенный, неоднородный, включения мелкого щебня до 10 %
	8,0-11,3	3,30	Суглинок тяжелый красно-коричневый тугопластичный
	11,3-14,0	2,7	Суглинок легкий коричневый тугопластичный (до мягкопластичного)
	14,0-15,0	1,0	Известняк красно-коричневый ожелезненный кавернозный
3	0,0-1,0	1,0	Супесь коричневая пластичная щебенистая до 25 % (осадочные породы)
	1,0-1,5	0,5	Щебенистый грунт (до 10 см), осадочные породы – песчаник
	1,5-4,0	2,5	Песчаник серо-коричневый мелкозернистый, выветрелый слабосцементированный ожелезненный, RQD = 40 %
	4,0-5,0	1,0	Щебенистый грунт (до 20 см) (осадочные породы – песчаник)



Окончание табл.2

Инженерно-геологическая скважина	Глубина, м	Мощность, м	Краткое описание грунтов
3	5,0-13,5	8,5	Песчаник мелкозернистый коричнево-серого цвета, RQD = 40 %, с 10 м появились коричневые пятна ожелезнения до 2 см, с 11 м появились каверны до 0,5 см
	13,5-15,0	1,5	Щебенистый грунт (осадочная порода – песчаник) окремненный до 20 см
4	0,0-1,2	1,2	Суглинок тяжелый красно-коричневый тугопластичный ожелезненный, щебенистый (включения осадочных пород – 30 %) с частыми прослоями песка коричневого цвета мощностью до 0,5-1 см
	1,2-4,3	3,1	Щебенистый грунт (известняк серый до 10 см)
	4,3-7,9	3,6	Суглинок мягкий красно-коричневый, с частыми прослоями песка красно-коричневого цвета мощностью до 3 см, включения мелкого щебня осадочных пород до 15 %, мерзлый грунт
	7,9-9,9	2,0	Щебенистый грунт (известняк светло-серый до 20 см), заполнитель супесь светло-серая до 20 %
	9,9-15,0	5,1	Известняк коричнево-серый ожелезненный доломитизированный, RQD = 80 %, с тонкими прослоями кварцита

Таблица 3

**Результаты испытаний образцов горных пород
на одноосное сжатие, растяжение и срез со сжатием**

Инженерно-геологическая скважина	Тип грунта	Глубина отбора, м	Плотность ρ , г/см ³	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{раст}$, МПа	$\tau_{срез}$, МПа
1	Известняк	2,5-2,65	—	—	—	51,40
	—	3,5-3,7	2,49	105,5	11,65	—
	—	4,3-4,8	2,66	107,5	11,88	—
	—	5,0-5,15	2,28	66,3	6,5	—
	—	9,3-9,4	—	—	—	67,65
	—	11,3-11,65	2,15	19,1	1	—
	—	12,5-12,7	2,38	59,9	3	—
	—	12,7-13,0	2,6	73,8	3,55	46,66
	—	13,0-13,25	2,36	46,6	2,3	—
2	Известняк	14,6-14,75	2,12	30,4	1,5	—
3	Песчаник	1,65-1,8	2,58	14,3	0,57	—
	—	1,8-2,0	2,58	19,3	0,77	—
	—	3,0-3,3	2,62	28,7	2,5	—
	—	3,5-3,8	2,25	28,7	—	6,22
	—	5,1-5,3	2,57	40,4	1,62	—
	—	5,5-5,7	2,54	36,6	1,46	—
	—	5,7-6,0	2,61	32,5	1,33	—
	—	7,0-7,3	2,32	47,9	4,57	35,67
	—	9,0-9,3	2,58	14,3	0,57	—
	—	9,6-9,7	2,61	14,6	0,6	—
	—	10,0-10,2	2,55	37,4	3,4	—
	—	10,2-10,4	2,35	37,4	—	21,93
	—	10,4-10,7	2,53	12,8	0,53	—
	—	11,5-11,7	2,58	32,5	2,1	—
	—	12,0-12,5	2,56	30,7	1,25	—
	—	13,1-13,25	—	—	4,41	57,12



Окончание табл.3

Инженерно-геологическая скважина	Тип грунта	Глубина отбора, м	Плотность ρ , г/см ³	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{раст}$, МПа	$\tau_{срез}$, МПа
4	Известняк	12,0-12,15	—	—	25,02	206,2
	—"	12,5-12,7	2,59	94	3,9	—
	—"	12,7-13,0	—	—	—	61,55
	—"	13,0-13,2	2,62	95	4,2	—
	—"	13,3-13,7	2,55	111,7	7,67	91,53
	—"	14,65-15,0	2,63	69	2,8	—

Перед началом бурения технологических скважин инженер-проектировщик БВР в программном комплексе BlastMaker задавал местоположение участков работ (блоков) на плане месторождения и указывал количество скважин для каждого блока (табл.4).

На рис.1, 2 представлены фиксируемые бортовым контроллером параметры бурения и график распределения удельной энергоемкости бурения шарошечным способом. На рис.3, а показано распределение значений энергоемкости бурения, выдаваемого программным обеспечением BlastMaker в зависимости от коэффициента крепости горных пород, полученного по результатам испытаний образцов горных пород. Коэффициент крепости горных пород определялся по формуле (3) через предел прочности образца на одноосное сжатие. По данному распределению видно, что часть значений является ошибочной. Это может объясняться тем, что бурение станком шарошечного бурения велось по нарушенным породам. Данное явление обусловлено крайним непостоянством строения массива Куранахского рудного поля. В результате выборка значений проводилась с учетом результатов наблюдений, в частности, по буровому шламу. Полученный массив данных обрабатывался методом кластерного анализа с применением ИНС-классификатора. Кластерный анализ позволяет сократить количество данных для моделирования [37], а применение нейронных сетей позволяет «развиваться» математической модели по мере появления новых данных [38, 39]. На рис.3, б показано распределение отфильтрованных значений и отображена корреляционная зависимость между удельной энергоемкостью бурения и коэффициентом крепости отобранных горных пород.

Из графика (рис.3, б) видно, что значения удельной энергоемкости бурения шарошечным способом и коэффициентом крепости горных пород аппроксимируется логарифмической функцией с коэффициентом достоверности 0,84:

$$E = 14,566 \ln f + 9,3502,$$

где E – удельная энергоемкость бурения, выдаваемая BlastMaker, МДж/м³; f – коэффициент крепости горных пород.

Тогда коэффициент крепости можно определить как

$$f = e^{\frac{E-9,3502}{14,566}}.$$

Таблица 4

Соответствие блоков и технологических скважин инженерно-геологическим скважинам

Инженерно-геологическая скважина	Номер блока	Номер скважины
1	5-550-1	БЛОК-5-550-1-1
		БЛОК-5-550-1-2
		БЛОК-5-550-1-3
2	5-550-2	БЛОК-5-550-2-1
		БЛОК-5-550-2-2
		БЛОК-5-550-2-3
		БЛОК-5-550-2-4
3	5-550-3	БЛОК-5-550-3-1
		БЛОК-5-550-3-2
		БЛОК-5-550-3-3
4	5-550-4	БЛОК-5-550-4-1
		БЛОК-5-550-4-2
		БЛОК-5-550-4-3

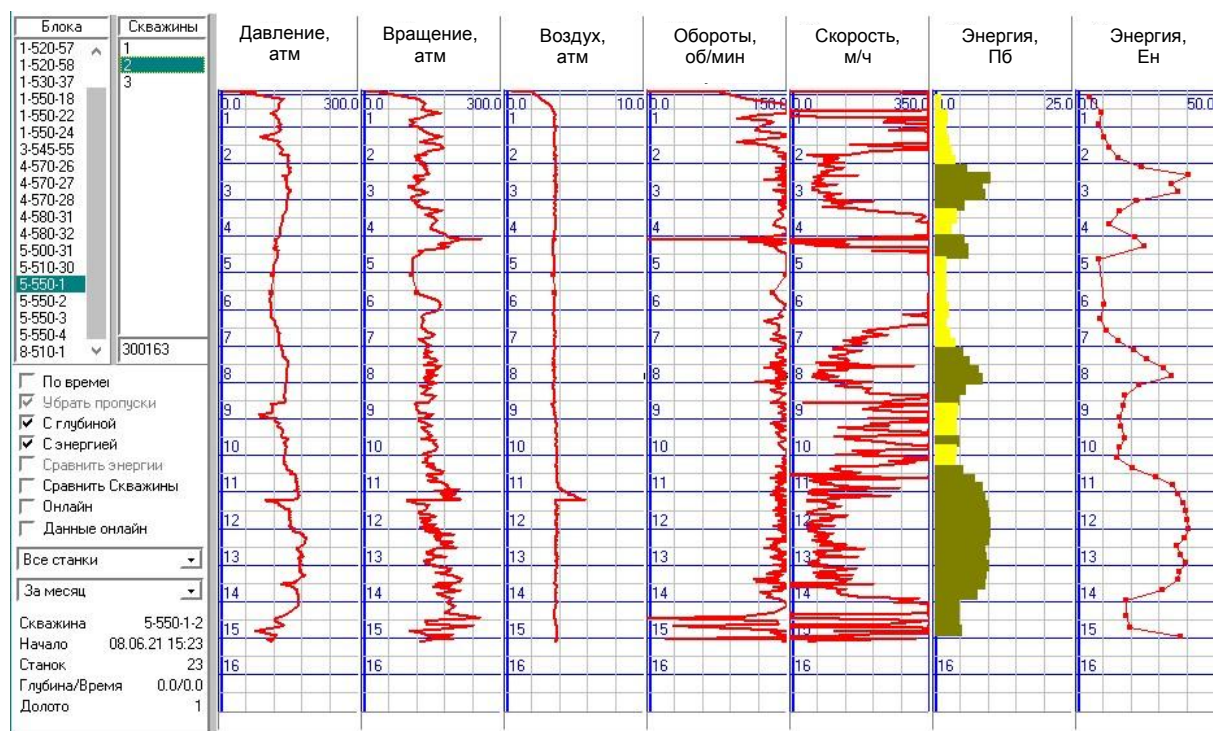


Рис.1. Параметры бурения взрывных скважин, выдаваемые программным обеспечением BlastMaker

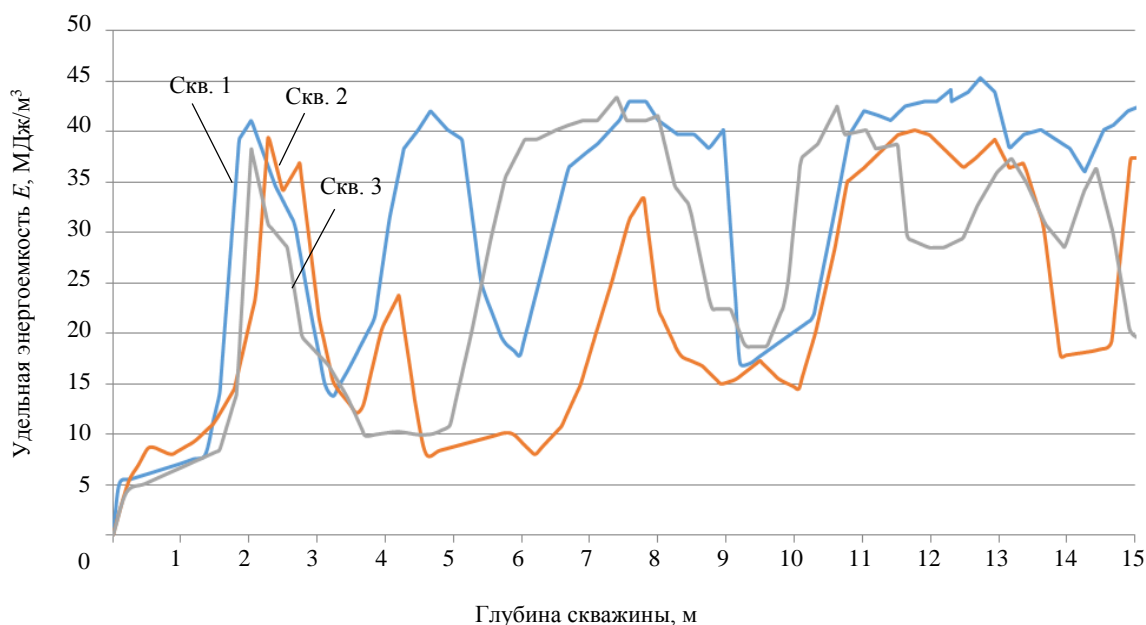


Рис.2. Зависимость удельной энергоёмкости шарошечного бурения на блоке 5-550-1 от глубины скважины

Анализ данных показал следующее:

- плотность горных пород не влияет на параметры шарошечного бурения;
- предел прочности образца на растяжение оказывает влияние на значения осевого давления;
- количества значений предела прочности образца горной породы на срез со сжатием недостаточно для выявления статистически значимых корреляционных зависимостей.

На основании этого в качестве основного параметра бурения скважин шарошечным способом была принята удельная энергоёмкость бурения.

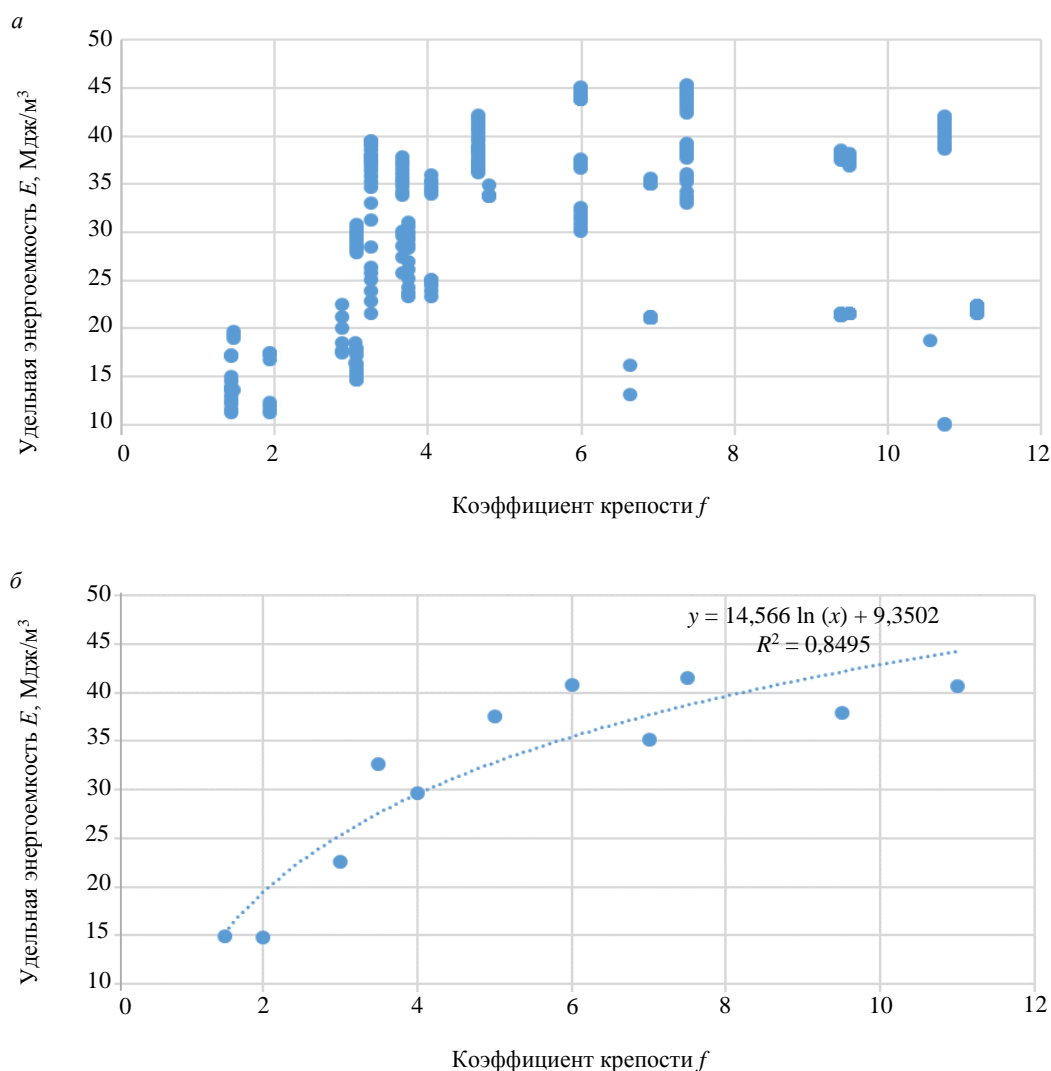


Рис.3. Распределение значений энергоемкости бурения в соответствии со значениями коэффициента крепости горных пород, фиксируемое BlastMaker (а) и после фильтрации данных (б)

Апробация результатов проводилась на технологических блоках, сложенных, по данным геологической разведки, глинистыми породами и известняком. Сначала взрывной блок обуривался станками шарошечного бурения с установленным на них бортовым контроллером «Кобус», после чего полученные данные по энергоемкости бурения использовались для выбора требуемой конструкции заряда и расчета массы ВВ в каждой скважине. В процессе подготовки блока к взрыву одна половина блока заряжалась в соответствии с принятой на предприятии технологией.

Параметры буровзрывных работ на экспериментальных блоках: сетка скважин $a \times b$ – 6×7 , 6×6 , 6×6 м; удельный расход q – 0,58, 0,57, 0,69 кг/м³; тип забойки – песчано-глинистая смесь; система инициирования – неэлектрическая («Искра»).

Вторая половина заряжалась в соответствии с данными, полученными при бурении: в скважинах, где коэффициент крепости пород был больше двух, создавались сплошные заряды гранулита РП; в скважинах, где встречались породы с меньшим коэффициентом крепости, создавались рассредоточенные заряды. Такая же конструкция зарядов применялась и на скважинах, в которых бурение велось по породам с коэффициентом крепости меньше двух. В качестве забойки применялась песчано-глинистая смесь, позволяющая удерживать газообразные продукты взрыва в скважине достаточно долго, чтобы полностью передать энергию взрыва на стенки взрывной скважины [40]. При этом сетка скважин оставалась неизменной.



Рис.4. Планы расположения буровзрывных скважин на экспериментальных блоках (зеленым контуром обведены участки, где зарядка велась по удельной энергоёмкости бурения)

На рис.4 представлены планы экспериментальных блоков, на которых выделены участки, где зарядание велось в соответствии с предложенным методом. Средства инициирования как на участках со стандартными параметрами БВР, так и на экспериментальных участках были соединены в единую взрывную сеть.

В результате осмотра места взрыва было определено, что на стандартных участках блока, где заряды во всех скважинах были сосредоточены, при взрыве образовывались воронки выброса, что говорит о чрезмерной массе ВВ, а на экспериментальных участках количество и размеры воронок были меньше (рис.5). Производительность экскавации на экспериментальных участках блоков, по данным журнала экскавации, оказалась на 15-20 % выше, чем на стандартных, что свидетельствует об актуальности предложенного авторами подхода к определению параметров БВР по результатам измерения удельной энергоёмкости бурения.

Обсуждение результатов. Измерение физико-механических свойств горных пород и параметров бурения может являться единственно верным способом для идентификации пород, так как каждый параметр определяется непосредственно на образцах и на массиве горных пород. Важно понимать, что полученная корреляционная зависимость справедлива исключительно для пород Куранахского рудного поля, тогда как предлагаемая методика ее определения универсальна для всех месторождений. Использование данной методики целесообразно на тех месторождениях, где физико-механические свойства пород резко отличаются.

Дальнейшим шагом является определение эталонных удельных энергозатрат на дробление взрывом различных по крепости горных пород, слагающих массив Куранахского рудного поля. Это позволит решить задачи оптимизации энергетических затрат на взрывные работы и расчета необходимого для дробления данного участка массива горных пород массы заряда.

Закключение. На основании изучения отечественного и международного опыта было определено,

что качество взрыва зависит от удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом, которые, в свою очередь, зависят от физико-механических свойств горных пород. Несмотря на наличие возможностей распределения энергии заряда, достижение необходимой объемной концентрации энергии в различных частях скважины, эти методы используются только на тех горнодобывающих предприятиях, где строение массива известно с достоверной точностью, например, на месторождениях с неизменной слоистостью, и эту слоистость можно определять по обнажениям слоев на откосе уступа. На месторождениях со сложным геологическим строением, где



Рис.5. Результаты проведения буровзрывных работ на экспериментальном блоке (желтым цветом выделены воронки на участке блока со стандартными параметрами, зеленым – с экспериментальными)

изменения строения массива наблюдается в пределах относительно небольших участков, определение строения по обнажениям на открытых поверхностях не является достоверным. В результате расчет параметров БВР, как правило, ведется по наиболее крепким породам, что приводит к перерасходу ВВ и неоптимальному качеству дробления.

Определение этих свойств на каждом взрываемом блоке путем испытания образцов горных пород является очень трудоемкой работой и требует много времени. В свою очередь, известно, что параметры бурения – скорость бурения, энергоемкость бурения, осевое давление, оказываемое на забой, мощность вращателя – реагируют на изменения этих свойств во время разрушения пород. Предложен алгоритм решения проблемы рационального распределения энергии по глубине скважины в зависимости от физико-механических свойств пород. Определение корреляционной зависимости между параметрами бурения и этими свойствами позволит идентифицировать породы блока, тем самым дав информацию о физико-механических свойствах горных пород, но не даст возможности установить необходимое количество взрывчатых веществ как по глубине скважины, так и по площади. Для этого требуется определить эталонные удельные энергозатраты на дробление каждого типа пород, слагающих массив. Таким образом, идентификация пород на основании значений параметров бурения и определение удельных энергозатрат на дробление этих пород позволяет рационально распределить энергию взрыва как по глубине скважины, так и по площади блока, что даст возможность достичь необходимого качества дробления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yastrebova K.N., Moldovan D.V., Chernobay V.I. Solving the Issue of Ventilating Atmosphere of Opencast Mining by Resloping Bench Face // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29. № 1. P. 1-6.
2. Фомин С.И., Говоров А.С. Обоснование выбора бортового содержания полезных компонентов в руде при проектировании карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12. С. 169-182. DOI: [10.25018/0236_1493_2023_12_0_169](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_0_169)
3. Kanchibotla S.S., Vizcarra T.G., Musunuri S.A.R. et al. Mine to mill optimisation at Paddington gold operations // The 6th International conference on Semi-Autogenous and High Pressure Grinding Technology, 20-24 September 2015, Vancouver, Canada. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 2015. 13 p.
4. Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 822-832. DOI: [10.31897/PMI.2022.84](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.84)
5. Bhatawdekar R.M., Edy M.T., Danial J.A. Building Information Model for Drilling and Blasting for Tropically Weathered Rock // Journal of Mines, Metals and Fuels. 2019. Vol. 67. Iss. 11. P. 494-500.
6. Должиков В.В., Рядинский Д.Э., Яковлев А.А. Влияние интервалов замедления на амплитуды волн напряжений при изучении модели взрыва системы скважинных зарядов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 18-32. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_62_0_18](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_18)
7. Виноградов Ю.И., Хохлов С.В. Метод расчета параметров буровзрывных работ на заданный гранулометрический состав взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S1-4. С. 20-29.



8. Маринин М.А., Рахманов Р.А., Должиков В.В., Сушкова В.И. Исследование влияния параметров взорванной горной массы на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 35-48. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_35
9. Abbaspour H., Drebenstedt C., Badroddin M., Maghamini A. Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 6. P. 839-848. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.06.009
10. Жуковский Ю.Л., Королев Н.А., Малькова Я.М. Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 686-700. DOI: 10.31897/PMI.2022.91
11. Рассказов М.И., Потачук М.И., Цой Д.И. и др. Изучение горно-геологических особенностей и определение физико-механических свойств горных пород золоторудного месторождения Делькен // Проблемы недропользования. 2020. № 2 (25). С. 116-126. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.116
12. Жариков С.Н. Взаимосвязь удельных энергетических характеристик процессов шарошечного бурения и взрывного разрушения массива горных пород: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: Институт горного дела УрО РАН, 2011. 25 с.
13. Крюков Г.М. Модель взрывного рыхления горных пород на карьерах. Выход негабарита. Средний размер кусков породы в развале. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2005. 28 с. (препринт).
14. Лангефорс У., Кильстрем Б. Современная техника взрывной отбойки горных пород. М.: Недра, 1968. 284 с.
15. Salmi E.F., Sellers E.J. A review of the methods to incorporate the geological and geotechnical characteristics of rock masses in blastability assessments for selective blast design // Engineering Geology. 2021. Vol. 281. № 105970. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105970
16. Simioni S., Sidler R., Dual J., Schweizer J. Field measurements of snowpack response to explosive loading // Cold Regions Science and Technology. 2015. Vol. 120. P. 179-190. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.06.011
17. Zou D. Explosives // Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering. Singapore: Springer, 2017. P. 105-170. DOI: 10.1007/978-981-10-1989-0_3
18. Барон В.Л., Кантор В.Х. Техника и технология взрывных работ в США. М.: Недра, 1989. 376 с.
19. Ржевский В.В. Физико-технические параметры горных пород. М.: Наука, 1975. 212 с.
20. Угольников В.К., Симонов П.С. Определение переводных коэффициентов при расчете эквивалентных зарядов дробления // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2007. № 4 (20). С. 14-17.
21. Жариков С.Н. Энергоемкость экскавации горной массы и взаимосвязь выемки со смежными процессами горных работ // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2017. Т. 4. № 1. С. 179-186.
22. Хоменко О.Е., Кононенко М.Н., Ляшенко В.И. Обоснование технологий и средств для проведения горизонтальных горных выработок с использованием эмульсионных взрывчатых веществ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2021. Т. 19. № 3. С. 5-15. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-5-15
23. Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Болотнев А.Ю. Оценка коэффициента крепости горных пород косвенными методами // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2021. № 3. С. 28-35. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-28-35
24. Необутов Г.П. Оценка на буримость горных пород Нежданинского золоторудного месторождения в Якутии // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 7 (85). С. 38-43. DOI: 10.23670/IRJ.2019.85.7.007
25. Господариков А.П., Трофимов А.В., Куркин А.П. Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 539-548. DOI: 10.31897/PMI.2022.87
26. Кузнецов Н.Н., Пак А.К. О влиянии отношения размеров образцов скальных горных пород на результаты определения их прочности при одноосном сжатии // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 2. С. 246-253.
27. Коришунов В.А., Павлович А.А., Бажуков А.А. Оценка сдвиговой прочности горных пород по трещинам на основе результатов испытаний образцов сферическими инденторами // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 606-618. DOI: 10.31897/PMI.2023.16
28. Navarro J., Seidl T., Sanchidrián J.A. et al. Blastability and Ore Grade Assessment from Drill Monitoring for Open Pit Applications // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021. Vol. 54. Iss. 6. P. 3209-3228. DOI: 10.1007/s00603-020-02354-2
29. Navarro J., Schunnesson H., Ghosh R. et al. Application of drill-monitoring for chargeability assessment in sublevel caving // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. Vol. 119. P. 180-192. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.03.026
30. Rai P., Schunnesson H., Lindqvist P.-A., Kumar U. Measurement-while-drilling technique and its scope in design and prediction of rock blasting // International Journal of Mining Science and Technology. 2016. Vol. 26. Iss. 4. P. 711-719. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.05.025
31. Khorzoughi M.B., Hall R., Apel D. Rock fracture density characterization using measurement while drilling (MWD) techniques // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 6. P. 859-864. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.001
32. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1965. Vol. 2. Iss. 1. P. 57-73. DOI: 10.1016/0148-9062(65)90022-7
33. Schunnesson H. RQD predictions based on drill performance parameters // Tunnelling and Underground Space Technology. 1996. Vol. 11. Iss. 3. P. 345-351. DOI: 10.1016/0886-7798(96)00024-7
34. van Eldert J., Schunnesson H., Johansson D. et al. Application of Measurement While Drilling Technology to Predict Rock Mass Quality and Rock Support for Tunnelling // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. Vol. 53. Iss. 3. P. 1349-1358. DOI: 10.1007/s00603-019-01979-2
35. Долгий И.Е., Николаев Н.И. Сопротивление горных пород разрушению при бурении скважин // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 655-660. DOI: 10.18454/PMI.2016.5.655
36. Тангаев И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки. М.: Недра, 1986. 231 с.
37. Игнатьев С.А., Сударииков А.Е., Имашев А.Ж. Современные математические методы прогноза условий поддержания и крепления горных выработок // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 371-375. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.371



38. Котелева Н.И., Вальнев В.В., Королев Н.А. Технология дополненной реальности как средство технического обслуживания оборудования металлургических производств // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 14-23. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.02
39. Klyuchnikov N., Zaytsev A., Gruzdev A. et al. Data-driven model for the identification of the rock type at a drilling bit // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 178. P. 506-516. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.03.041
40. Молдован Д.В., Чернобай В.И., Соколов С.Т., Баженова А.В. Конструктивные решения запираания продуктов взрыва во взрывной полости // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 5-17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_5

Авторы: **Ю.И.Виноградов**, канд. техн. наук, доцент, Vinogradov_YuI@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9468-2214> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), **С.В.Хохлов**, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-1040-8328> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), **Р.Р.Зигангиров**, аспирант, <https://orcid.org/0000-0003-4876-3456> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), **А.А.Мифтахов**, операционный директор, <https://orcid.org/0009-0004-4287-2496> (АО «ПОЛЮС Алдан», пос. Нижний Куранах, Республика Саха (Якутия), Россия), **Ю.И.Суворов**, начальник рудника «Куранах», <https://orcid.org/0009-0008-1256-4387> (АО «ПОЛЮС Алдан», пос. Нижний Куранах, Республика Саха (Якутия), Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Обзорная статья

Направления технологического развития алюминиевых электролизеров

Е.С.Горланов¹✉, Л.И.Леонтьев²¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия² Российская академия наук, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Горланов Е.С., Леонтьев Л.И. Направления технологического развития алюминиевых электролизеров // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 246-259. EDN PYSEVM

Аннотация. Проанализированы направления технического и технологического развития алюминиевой промышленности, действующих и перспективных проектов уменьшения энергопотребления и экологической нагрузки на окружающую среду. Обсуждается активное участие государства в организации финансовых инструментов экологической реконструкции изношенных производственных мощностей. Несмотря на то, что технология алюминиевых электролизеров развивается в направлении увеличения единичной мощности, но с ограниченным потенциалом уменьшения энергопотребления и выброса парниковых газов, возможности повышения удельной производительности практически отсутствуют. Поэтому возникают и развиваются такие проекты как электролизеры с инертным анодом и дренированным катодом, успешное завершение которых маловероятно после многолетних исследований и полупромышленных испытаний. Для продолжения работ по инертному аноду требуется однозначный ответ от компетентных организаций о промышленной безопасности локальных источников массивных выделений кислорода в атмосферу. Проект дренированного катода после обсуждения существующих проблем кажется неосуществимым. В противоположность действующей технологии, проектам с инертным анодом и дренированным катодом большие перспективы открывает развитие технологии электролизеров с вертикальным расположением электродов. В лабораторных условиях получены положительные результаты применения электродов специальной формы, гомогенизации их поверхности и развития способов синтеза композитных катодов непосредственно в процессе электролиза. Ожидается, что объединение этих направлений и последовательное масштабирование позволит на новом уровне использовать вертикальные электроды для кратного увеличения удельной производительности электролизеров, уменьшения энергопотребления и выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: алюминиевый электролизер; наилучшие доступные технологии; энергопотребление; инертный анод; дренированный катод; смачиваемость; вертикальный электрод; удельная производительность

Поступила: 20.07.2023

Принята: 25.10.2023

Онлайн: 11.12.2023

Опубликована: 25.04.2024

Введение. Для развития минерально-сырьевого и топливно-энергетического комплексов необходимо создавать новые технические решения и технологии производства наукоемкой товарной продукции [1-3]. Очевидно, при выборе промышленных технологий и направлений модернизации следует руководствоваться передовыми показателями и понятными механизмами их реализации [4-7]. Кроме того, в рамках глобального энергетического перехода и в стремлении к использованию безуглеродных источников энергии нарастает необходимость адаптации производства к непрерывно ужесточающимся экологическим ограничениям [8-10]. В связи с этим государством и промышленными компаниями предлагается использовать известную с 1960-х годов и признанную во всем мире концепцию наилучших доступных технологий [11].

В России формирование подходов к оценке ресурсной эффективности производства началось с принятием в июле 2014 г. специального Федерального закона № 219-ФЗ от 21.07.2014.¹ Его положениями в нормативное поле было впервые введено понятие «наилучшая доступная технология» (НДТ) с установлением критериев для ее достижения. Полномочия федеральных органов

¹ Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 21.07.2014 № 219-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165823/ (дата обращения 31.10.2023).



исполнительной власти, порядок и правила определения НДТ были зафиксированы постановлением Правительства № 1458 от 23 декабря 2014 г.² Реализацию полномочий в пределах средств бюджетных ассигнований федерального бюджета и курирование по этому постановлению было поручено осуществлять Министерству промышленности и торговли РФ и Федеральному агентству по техническому регулированию и метрологии. Этим же постановлением обозначены участники создания НТД, условия работы Бюро наилучших доступных технологий (Бюро НДТ – ФГАУ «НИИ ЦЭПП»³) и рабочих групп по сбору, анализу и формированию данных для информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям (ИТС НДТ). Правилами заложены условия актуализации этих справочников для обновления устаревших и внесения новых данных. В соответствии с поэтапным графиком, утвержденным распоряжением Правительства РФ № 2178-р от 31.10.2014,⁴ стартовал процесс разработки ИТС НДТ.

В рамках этой работы в 2016 г. для алюминиевой промышленности был подготовлен первый справочник – ИТС НДТ 11-2016 «Производство алюминия». Его актуализация осуществлялась через каждые три года – в 2019 и 2022 годах. Принятая правительством концепция определения НТД и правил составления справочников использует эволюционное развитие техники, технологий и материалов, т.е. реконструкцию базовых производственных и природоохранных технологий. С другой стороны, для обеспечения развития передовых технологий электролитического получения алюминия в научных центрах компаний интенсивно работают над новыми проектами. На стадии планирования новых направлений расставляются акценты на снижение энергопотребления и экологической нагрузки на окружающую среду, на повышение производительности и срока службы алюминиевых электролизеров. При реализации проектов, особенно стратегических, закладываются и расходуются значительные средства. Поэтому очень важно на стадии их планирования и в процессе реализации понимать риски возможных неудовлетворительных результатов и своевременно корректировать.

В 2014 г. в России был запущен механизм экологической и технологической модернизации изношенных производственных мощностей, набирают обороты внутренние проекты промышленных компаний. Достаточно большой срок, чтобы обсуждать и анализировать экологическую реконструкцию, организованную государственными органами, а также перспективные направления совершенствования, инициирование и реализацию которых осуществляют производители алюминия. Уже на этом этапе можно определить горизонты развития алюминиевой промышленности, действующих и перспективных проектов снижения энергопотребления и уменьшения экологической нагрузки на окружающую среду алюминиевыми электролизерами.

Целью представленного аналитического обзора является определение наиболее перспективной технологии производства алюминия электролитическим способом.

Экологическая реконструкция. ИТС НДТ, содержащие описание достигнутых технологий, показателей эффективности производства и максимально допустимых уровней эмиссий вредных веществ, готовятся в Бюро НДТ с участием отраслевых экспертов и являются платформой для принятия решений о реконструкции устаревших технологий. В справочниках 2019⁵ и 2022⁶ годов основное внимание уделено экологическим и природоохранным показателям. Среди технических и технологических параметров в разделах 4 и 5 по наилучшим доступным технологиям фиксируются только расходные коэффициенты по сырью и выход по току. Такой важный показатель как удельный расход электроэнергии на производство алюминия в НДТ не регламентируется. По результатам

² Постановление Правительства РФ от 23.12.2014 № 1458 «О порядке определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_172796/ (дата обращения 31.10.2023).

³ Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленности политики» (ФГАУ «НИИ «ЦЭПП»). С 1 января 2017 г. Правительством Российской Федерации на ФГАУ «НИИ «ЦЭПП» возложены функции Бюро наилучших доступных технологий.

⁴ Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2014 № 2178-р «Об утверждении поэтапного графика создания в 2015-2017 гг. отраслевых справочников наилучших доступных технологий». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_170718/ (дата обращения 31.10.2023).

⁵ Производство алюминия: информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС НДТ 11-2019. М.: Бюро НДТ, 2019. 238 с.

⁶ Производство алюминия: информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС НДТ 11-2022. М.: Бюро НДТ, 2022. 263 с.



рассмотрения экономических аспектов реализации наилучших доступных технологий и уровня капитальных затрат на модернизацию в справочниках констатируется, что «...Конверсия технологии Содерберга на технологию производства алюминия с использованием обожженных анодов потребует не менее 2-4 тыс. \$ капитальных вложений на 1 т алюминия. С учетом текущего уровня цен, рентабельности производства, сроков модернизации и стоимости заемных средств такой проект не будет окупаться». И тем не менее, весной 2021 г. ОК РУСАЛ объявляет о модернизации четырех сибирских заводов, работающих по технологии Содерберга. Утверждается, что проект носит природоохранный характер – половина электролизеров, работающих по старой технологии в Красноярске, Братске, на иркутском заводе и в Новокузнецке, заменяются на самые современные – РА-550⁷. В рамках этого проекта РУСАЛ модернизирует электролизеры, производящие более 1,4 млн т алюминия (35 % мощностей). Объем производства в итоге не изменится, но выброс фторидов на модернизируемой группе электролизеров уменьшится на 73, а бензопирена – на 100 %. В это же время, в апреле 2021 г., компания En+ Group (РУСАЛ) анонсировала производство алюминия по технологии инертного анода и объявила о цели достичь нулевого уровня выбросов парниковых газов к 2050 г., а к 2030 г. – сократить их на 35 %⁸.

В поддержку ИТС НДТ постановлением правительства РФ в 2021 г. утверждены *критерии проектов устойчивого развития РФ*, в том числе для алюминиевой промышленности⁹. Прежде всего, указывается на необходимость соответствия показателей ресурсной и энергетической эффективности параметрам, зафиксированным в справочнике второго поколения ИТС 11-2019 «Производство алюминия». Критериями оговариваются текущие технические и технологические параметры производства первичного алюминия. Предлагается использовать уже достигнутые экологические параметры:

- показатель прямых выбросов парниковых газов не более 1,514 т CO₂-экв/т алюминия (Score 1);

- показатель суммарных выбросов от электролиза и производства электроэнергии 3 т CO₂-экв/т Al (текущие 2,2 т CO₂-экв/т Al для бренда ALLOW¹⁰, Score 2).

Затем в марте 2023 г. постановлением правительства РФ внесены *изменения в критерии проектов устойчивого развития РФ*¹¹. В новой редакции уже отсутствует критерий необходимости соответствия показателей ресурсной и энергетической эффективности параметрам, зафиксированным в справочниках по наилучшим доступным технологиям. Таким образом, из приоритетных целей проектов исключается необходимость достижения лучших показателей энергосбережения и повышения эффективности использования ресурсов, которые обеспечивают экологические параметры производства. Кроме того, устанавливается критерий соответствия «...нижнему уровню индикативного показателя (ИП2) удельных выбросов парниковых газов для производственных процессов электролитического получения первичного алюминия согласно информационно-техническому справочнику по наилучшим доступным технологиям «Производство алюминия» (ИТС 11-2022)». Но, в соответствии с этим справочником, парниковые газы отсутствуют в перечне загрязняющих веществ, подлежащих госрегулированию (распоряжение Правительства РФ № 1316-р от 08.07.2015). И тогда мы вынуждены констатировать, что для модернизации производства действующих технологий электролиза предлагается пользоваться текущими показателями прямых выбросов парниковых газов в пределах 1,5-3,2 т CO₂-экв/т Al (Score 1), а показатель суммарных выбросов от электролиза и производства электроэнергии (Score 2) в критериях проектов устойчивого развития отсутствует.

⁷ «Русал» модернизирует свои заводы в Сибири. URL: <https://www.interfax.ru/russia/761125> (дата обращения 31.10.2023).

⁸ Отчеты и результаты En+ Group: годовой отчет за 2020 год. URL: <https://enplusgroup.com/ru/investors/results-and-disclosure/annual-reports/> (дата обращения 31.10.2023).

⁹ Постановление Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587 «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202109240043> (дата обращения 31.10.2023).

¹⁰ Отчет об устойчивом развитии: РУСАЛ, 2021 год. URL: <https://rusal.ru/sustainability/report/> (дата обращения 31.10.2023).

¹¹ Постановление Правительства РФ от 11.03.2023 № 373 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 21 сентября 2021 г. № 1587». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202303140005> (дата обращения 31.10.2023).



Таким образом, в результате утвержденных изменений критерии проектов устойчивого развития таковыми не являются, т.е. сделан шаг назад относительно первой редакции критериев 2021 г.

Дополнительные критерии для модернизируемых и вновь строящихся производственных объектов, перечисляемые в документах правительства РФ, целиком относятся к экологическим. Предприятия должны удовлетворять, по крайней мере, одному дополнительному критерию, например, перспективным технологиям:

- производство алюминия с использованием инертных анодов;
- использование тепла отходящих газов пирометаллургических процессов для производства тепловой и электроэнергии в котлах-утилизаторах;

- технология улавливания и хранения парниковых газов (CO₂) – CCS Carbon Capture & Storage.

Иными словами, рассматривается технология инертного кислородвыделяющего анода, разрабатываемого в ОК РУСАЛ с 2004 г., но предусмотрительно предлагается перспективная разработка технологии улавливания и хранения диоксида углерода CCS.

Итак, наилучшие доступные технологии производства алюминия зафиксированы в отраслевых информационно-технических справочниках на уровне достигнутых. На этом основании правительством РФ в постановлениях определены критерии экологических проектов алюминиевой отрасли, в том числе электролитического получения алюминия. Документы закладывают основу для привлечения «зеленого финансирования» на реализацию особой категории проектов – зеленых и адаптационных (совместно – проектов устойчивого развития), устанавливают основы ответственной инфраструктуры ответственного инвестирования¹². Фактически между государством и металлургами заключается взаимовыгодная сделка. Алюминиевая компания получает средства на реконструкцию изношенных производств и возможность для технического и технологического развития. Государство обретает уверенность в обеспечении экологических норм и рабочих мест на современном производстве.

Перспективные направления. В электролитическом производстве алюминия за последние 120-125 лет почти вдвое уменьшен уровень выделения парниковых газов – в среднем до 1,4 т CO₂-экв/т Al, достигнут внушительный прогресс в снижении энергопотребления – с 40 до 13,0-13,5 кВт·ч/кг Al [12, 13]. Тем не менее объем выбросов парниковых газов остается высоким, а статья затрат на электроэнергию в себестоимости металла существенной – 30-40 % в зависимости от источника энергии. Кроме того, попытки алюминиевых компаний увеличить удельную производительность электролизеров ограничены допустимыми пределами повышения плотности тока и горизонтальным расположением электродов. Эти обстоятельства стимулируют непрерывные исследования, разработки и испытания новых технологий, направленных на уменьшение удельного расхода электроэнергии и выбросов вредных веществ, повышение производительности алюминиевых электролизеров.

Энергопотребление. В условиях работы современных электролизеров под контролем автоматической системы управления технологического процесса (АСУТП) при максимально достижимом выходе по току и с оптимальной конструкцией ошиновки снижение энергопотребления возможно только за счет минимизации напряжения на электролизере

$$U = E_{\text{ЭДС}} + I \sum_i^n R_i,$$

где I – сила тока на электролизере (в серии); R_i – омические сопротивления электролита в междуполусном зазоре, пузырькового слоя, электродов, контактов и соединительных систем в катодном и анодном устройствах.

При стандартном ведении технологии и использовании обожженных анодов высокого качества на обратную ЭДС $E_{\text{ЭДС}}$ повлиять сложно или невозможно. Некоторое уменьшение омических потерь напряжения $I \sum_i^n R_i$ на практике достигают так называемой стратегией погони за милливольтами, которая включает совершенствование конструкции анодных кронштейнов и ниппельных

¹² Правительство России утвердило критерии зеленых проектов. URL: https://www.economy.gov.ru/material/news/pravitelstvo_rossii_utverdilo_kriterii_zelenyh_proektov.html (дата обращения 31.10.2023).



соединений, контактных узлов в системе ошиновки, анодных стояков и катодных спусков [14, 15]. Учитывая длительное применение этой стратегии на практике, потенциал возможной экономии – около 120 кВт·ч/т Al. Примерно на столько же снижается энергопотребление путем применения щелевых анодных блоков (уменьшением толщины газовой пленки на подошве анода) – всего ~ 240 кВт·ч/т Al. Это существенная экономия с учетом годовых объемов производства алюминия. Однако она может быть полностью компенсирована повышенным содержанием микропримесей в сырье, главным образом в нефтяном коксе. Восстановление на катоде серы, натрия, титана, ванадия и других металлов может существенно снизить выход по току и, соответственно, увеличить расход электроэнергии на электролиз [16-18].

Большое внимание уделяется потерям напряжения в катодных блоках – суммарный перепад напряжения в подине в среднем около 380 мВ, что соответствует расходу электроэнергии около 1200 кВт·ч/т Al. Потери напряжения в этом узле можно снизить до 250 мВ использованием оптимальной технологии сопряжения в контакте блюмс – блок и выбором катодных блоков с повышенным содержанием графита, т.е. сэкономить около 420 кВт·ч/т Al. Но это достижение может быть сохранено в течение всего срока службы электролизера только при удачном выборе проекта катодного устройства и адекватной технологической политике монтажа и ведения электролитического процесса. Слово «удачный» здесь вполне уместно, поскольку невозможно точно спрогнозировать результаты движения катодных блоков и межблочных швов при работе электролизера, фильтрации через углеродную подину расплава, накопления его в объеме в жидкой и твердой фазах, а также состояние контакта блюмс – блок и другие факторы.

Основной резерв уменьшения энергопотребления в алюминиевом электролизере локализован в узком пространстве междуполусного зазора. Потери напряжения происходят в слое электролита с удельным сопротивлением около 0,5 Ом·см. При плотности тока 0,80 А/см² и выходе по току 0,93 % изменение междуполусного расстояния (МПР) на 1 см соответствует напряжению около 400 мВ, т.е. энергетической составляющей примерно 1300 кВт·ч/т Al. Это означает, что для серии современных электролизеров средней и сверхвысокой мощности (300-600 кА) уменьшение МПР с 4 до 3 см теоретически позволяет снизить расход электроэнергии с 13200 до 11900 кВт·ч на 1 т произведенного алюминия. Очевидно, что даже с учетом возможного потенциала АСУТП, ошиновки и материалов футеровки эти значения являются предельными для стандартной действующей технологии электролиза с горизонтальным расположением электродов.

Дальнейшее незначительное уменьшение МПР и расхода электроэнергии возможно только с привлечением катодных материалов, смачиваемых расплавленным алюминием. В этом случае создаются условия для доведения уровня металла на смачиваемой подине с 10-15 до 5-7 см и, тем самым, уменьшения порога МГД-нестабильности. При умеренной циркуляции расплавов, равномерном распределении концентрации глинозема в объеме электролита и удалении анодных газов с подошвы электродов существует вероятность уменьшения МПР еще на 0,5 см (до 2,5 см), т.е. предполагается возможность снижения энергопотребления до 11250 кВт·ч/т Al. Возможно, это предел для стандартной технологии Эру – Холла с элементами инновационных катодных материалов. Однако необходимо соотносить этот вероятно достижимый уровень расхода электроэнергии с затратами на создание специальных композитных материалов.

Инертный анод. Концепция инертных анодов для электролиза расплавов впервые была предложена Ч.М.Холлом в знаменитом патенте 1886 г. [19] и продолжена А.И.Беляевым и Я.В.Студенцовым в 1930-х гг. [20-22]. При этом Ч.Холл пытался использовать медные аноды, а российские исследователи – металлические, оксидные и ферритовые. В дальнейшем инертным анодам было посвящено огромное количество работ [23-25], которые нашли отражение в больших обзорах [26, 27], статьях [28-30] и отчетах¹³.

Поэтому для обсуждения предлагается направление, которое не рассматривалось в указанных публикациях. Сразу заметим, что обсуждаются не результаты наших исследований, но существующие представления специалистов по промышленной безопасности. Речь идет о кислороде,

¹³ Bradford D.R. Inert Anode Metal Life in Low Temperature Reduction Process // Final Technical Report for September 17, 1998 through March 31, 2005. Award Number: DE-FC36-98ID13662. 2005. 106 p. URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/DE2006841153.xhtml> (дата обращения 31.10.2023).



выделяемом на инертном аноде в количестве 0,9 т при производстве 1 т алюминия, что по утверждению компании En+ Group эквивалентно 70 га леса¹⁴. Продолжая эту арифметику, предполагаемая работа алюминиевого завода с годовой производительностью 500 тыс. т алюминия равносильна выделению около 1230 т кислорода в сутки и насаждению 35 млн га лесного массива за год. Кажущиеся перспективы удовлетворяют как потенциальных производителей кислорода, так и местные власти с населением вокруг завода.

С другой стороны, В.Маршалл, известный английский ученый в области промышленной безопасности, утверждает, что при массовом выделении и длительном истечении газов могут образовываться парогазовые облака [31]. Смешение облаков, содержащих избыток кислорода, с воздухом сохраняет избыток кислорода в атмосфере. Например, при смешении 50 % кислорода и 50 % воздуха образуется смесь, содержащая в своем составе более 50 % кислорода. Основная проблема, связанная с избытком кислорода, – это повышенная способность к горению¹⁵ – снижается порог первоначальной энергии вспышки, от которой может начаться горение, увеличивается скорость горения, затрудняется тушение пламени [32].

Изменение состава воздуха и концентрация атмосферных загрязнений зависят от величины и высоты выброса, метеорологических условий, атмосферного давления, направления и скорости ветра. Установлено, что в общем случае наибольшая высота источника выброса определяет его большее рассеивание и меньшую концентрацию примесей. Этому способствуют устойчивость атмосферы, плотная высокая облачность, отрицательный градиент температуры, образование инверсии над трубой или ниже выброса.

Однако в условиях сильной конвективной турбулентности наблюдается волнообразный факел с распространением выброса до уровня земли, где его концентрация может быть значительной (рис.1)¹⁶. Также большая концентрация выброса фиксируется при задымляющем факеле, когда устойчивый слой воздуха находится на небольшом расстоянии, над точкой выброса, а неустойчивый – ниже выброса. При достижении неустойчивым слоем воздуха высоты трубы большие объемы выброса из нее переносятся в направлении ветра к поверхности земли. Это длится не более получаса, но в течение этого времени приземная концентрация выбросов может достигать высоких значений и сохраняться долгое время (рис.2)¹⁷.

Когда с увеличением высоты температура повышается, градиент температуры отрицательный, и атмосферные условия определяются как инверсия. Наличие инверсии уменьшает вертикальное перемешивание выброса (кислородных масс), что приводит к увеличению его концентрации в приземном слое атмосферного воздуха. Повторяемость приземных инверсий и слабого ветра в континентальных районах определяет возможность застоя воздуха в этих областях, концентрации выбросов и их накопления в приземном слое атмосферы.



Рис.1. Стелющийся выброс в Новотроицке



Рис.2. Задымление на главной площади Братска

¹⁴ En+ Group ESG-Report: Pathway to net zero 2021. URL: https://enplusgroup.com/upload/iblock/fe0/EN_-Pathway-to-net-zero.pdf (дата обращения 31.10.2023).

¹⁵ Баратов А.Н. Горение – пожар – взрыв – безопасность. М.: Типография ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. 363 с.

¹⁶ Есть ли предел количеству заводов в Новотроицке? URL: <https://orenburzhie.ru/news/est-li-predel-kolichestvu-zavodov-v-novotroicke/> (дата обращения 31.10.2023).

¹⁷ 15 самых грязных городов России по оценкам экологов. URL: <https://bigpicture.ru/15-samyx-gryaznyx-gorodov-rossii-po-ocenkam-ekologov/?ysclid=ijr5ivnrf0966035699> (дата обращения 31.10.2023).



Максимальные мощности и интенсивность инверсий наблюдаются зимой. Образуется своего рода барьер, препятствующий поднятию загрязненного воздуха в верхний слой атмосферы. На степень загрязнения атмосферного воздуха влияют облачность, туманы, радиационный режим и осадки. Так, низкая облачность препятствует турбулентному обмену в атмосфере и способствует появлению продолжительной инверсии, при которой концентрация выбросов и количество примесей в воздухе увеличивается от 10 до 60 %.

Таким образом, мы обращаем внимание на серьезную проблему – наличие локального источника массивных выделений кислорода в атмосферу. Прежде чем приступать к проектированию таких источников, проблема должна быть тщательно исследована и проанализирована компетентными организациями по промышленной безопасности.

Электролизер с дренированным катодом. Предполагается, что большие экономические дивиденды могут быть получены при запуске в серию электролизеров с дренированным катодом, т.е. с тонким распределенным слоем алюминия на подине и уменьшенным МПР до 1,5-2 см. Для этого необходимо решить проблему создания смачиваемой алюминием катодной поверхности с привлечением специальных материалов на основе карбидов и боридов тугоплавких металлов – титана, циркония, ванадия, тантала, ниобия и гафния.

Концепция применения тугоплавких соединений в 1960-х годах разрабатывалась в British Aluminum Company Ltd (BACO) и Kaiser Aluminum [33, 34]. В это же время компанией Kaiser Aluminum была разработана технология дренированного катода с наклонной подиной и формированием тонкого слоя алюминия на поверхности катода [35]. В научных центрах алюминиевых и огнеупорных компаний в лабораторных и полупромышленных условиях разрабатывались и испытывались:

- компактные изделия из карбидов и боридов тугоплавких металлов в виде пластин, цилиндров и Т-образных элементов [36, 37];
- композитные покрытия на поверхности углеродной подины [38];
- эмульсионные покрытия на основе диборида титана [39].

В последующие годы концепция электролизеров с дренированным катодом, позволяющая снизить расход электроэнергии и уменьшить затраты на ошиновку, развивалась многими научными центрами [40-42], но до сих пор коммерческих материалов для смачиваемых катодных устройств электролизеров не существует. Задача, поставленная в середине 20-го века, до сих пор не нашла своего решения на индустриальном уровне. Однако, эта идея настолько привлекательна, что и в настоящее время научные центры алюминиевых компаний продолжают заниматься проектами электролизеров с дренированным катодом. Поэтому необходимо рассмотреть проблемы, с которыми столкнулись исследователи при испытании смачиваемых катодных материалов.

Компактные изделия из боридов и карбидов тугоплавких металлов, имея приемлемую коррозионную стойкость в расплавленных солях и алюминии, предрасположены к терморастрескиванию и отслаиванию от токопроводящей основы¹⁸. Попытки создания изделий комбинацией индивидуальных соединений, например TiB_2-TiC , не устранили эти недостатки прессованных материалов. Серьезным препятствием для развития технологии смачиваемых катодов была их стоимость. Например, в 70-80-е годы прошлого столетия стоимость порошка диборида титана составляла примерно 55 дол./кг, по сравнению с традиционными углеродистыми композициями около 1,32 дол./кг. В настоящее время стоимость TiB_2 составляет 500-3000 дол./кг в зависимости от чистоты и метода производства [43], в то время как стоимость углеродных материалов почти не изменилась. Поэтому для большинства испытаний в качестве смачивающего агента применялись диборид титана TiB_2 в композиции с углеродом [44, 45] или на связке коллоидного раствора окиси алюминия (Tinor and Thicknor [46, 47]). Смесь TiB_2 , углеродного материала и других составляющих в виде пасты наносилась толстым сантиметровым слоем на углеродную подину, как это делали в компаниях Martin Marietta Aluminum и Comalco, или тонким миллиметровым слоем коллоидного материала – компания Moltech. Однако в обоих случаях покрытия растрескивались и деградировали. Толстый слой пасты растворялся с образованием на поверхности подины слоя суспензии

¹⁸ Bruggeman J.N., Alcorn T.R., Jeltsch R. et al. Wetable Ceramic-Based Drained Cathode Technology for Aluminum Electrolisis Cell. Final Technical Progress Report for the Period 1997 October to 2002 December. DOE/ID/13567. 2002. 46 p. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc740532/> (дата обращения 31.10.2023).



Al/TiB₂ [48], тонкий коллоидный слой растрескивался и шелушился с последующим всплыванием на поверхность расплавов.

Не отрицая перспектив развития дренированных катодов, J.Keniry высказывает критические соображения по их жизнеспособности [24]: «Дренированный катод подвергает углеродный компонент покрытия агрессивному воздействию электролита, что приводит к его разрушению. Степень износа должна быть относительно равномерной по всему электролизеру, а любое локальное разрушение покрытия из-за особенностей конструкции, пуска или методов эксплуатации может неблагоприятно воздействовать на ресурс всего электролизера. Хотя электролизеры с дренируемыми катодами доказали свою жизнеспособность, их промышленное применение вызывает сомнения до тех пор, пока не будет увеличена экономическая прибыль, чтобы компенсировать операционный риск». J.Keniry, сотрудник частной австралийской компании Alumination Consulting Pty Ltd, был хорошо осведомлен о результатах испытаний дренированных катодов в Comalco. Ключевым замечанием в его критическом отношении к смачиваемому покрытию является неравномерная степень износа поверхности композитного покрытия. Этот недостаток трудноустраним, поскольку практически невозможно создать слой композита с равномерными адгезией к основе, плотностью, пористостью, электропроводимостью, прочностью и другими эксплуатационными свойствами по обширной поверхности катода. Это невозможно сделать и на стадии монтажа и уплотнения слоя, и в процессе его обжига и пуска электролизера. К тому же проект электролизера с дренированным катодом не является экологическим, но направлен на возможность уменьшения энергопотребления и увеличения производительности. Для обеспечения энергетического баланса и недостаточного выделения тепла в уменьшенном МПР в проект электролизера необходимо закладывать повышенную плотность тока. Это еще в большей степени усугубит негативные последствия.

Следует признать, что ни в одном из научно-исследовательских центров производителей алюминия обсуждаемые проблемы не решены полностью и окончательно. Это объясняет отсутствие коммерческих электролизеров с дренированным катодом, несмотря на более чем 70-летние попытки их развития. Поэтому проектирование электролизера с дренированным катодом, по всей видимости, является бесперспективным (малоперспективным) направлением по следующим причинам:

- Отсутствуют технологии создания смачиваемых алюминием покрытий с однородными по площади и объему эксплуатационными свойствами. Кроме того, не существует технической и технологической возможности синхронизации движения катодной основы с процессами усадки-расширения поверхностного слоя.
- Отсутствуют рентабельные технологии создания смачиваемых алюминием массивных компактных изделий (катодных блоков) с однородными по площади и объему эксплуатационными свойствами.
- Тонкий слой алюминия на поверхности катода не позволяет равномерно распределить плотность тока по обширной площади подины, что создает условия для неравномерного распределения тока и потенциала, пассивации катода и нестабильного процесса.
- Действующая технология электролиза с обожженными анодами вплотную приблизилась к предполагаемому энергопотреблению электролизеров с дренированным катодом.
- Объективно отсутствуют перспективы изменения (увеличения) удельной производительности относительно действующей технологии.

Электролизеры с вертикальным расположением электродов. С этого направления начиналась история получения алюминия электролитическим способом. В 1854 г. сначала Р.Бунзен и А.Девиль, затем такие известные ученые 19-го века как Ф.Лонтин, Ч.Брэдли и, наконец, П.Эру и Ч.Холл начинали лабораторные эксперименты в ячейках с вертикальным расположением электродов [49, 50]. Более того, по этой схеме начинали работать первые пилотные электролизеры компании Pittsburgh Reduction Co., но затем самопроизвольно перешли на электролиз с горизонтальным расположением катода и анода.

С тех пор попытки развития электролиза криолитоглиноземных расплавов с применением твердых электродов не прекращались [51, 52] и продолжают в настоящее время [53, 54]¹⁹. Эта

¹⁹ Hryn J.N., Tkacheva O.Y., Spangenberg J.S. Ultrahigh-Efficiency Aluminum Production Cell // Report of Energy Systems Division, Argonne National Laboratory. Award Number: DE-AC02-06CH11357. URL: <https://www.energy.gov/eere/amo/downloads/ultrahigh-efficiency-aluminum-production-cells> (дата обращения 31.10.2023).



настойчивость, с одной стороны, объясняется стремлением к минимизации расхода электроэнергии и приближению к теоретически возможным 6,3 и 9,2 кВт·ч/кг Al при использовании углеродных и инертных электродов соответственно. Такая возможность появляется с применением вертикально расположенных электродов с МПР ~ 1,5-2 см. С другой стороны, эта схема расположения электродов позволяет кратно увеличить удельную производительность на ограниченной площади электролизера.

Удельная производительность. Стандартная производительность зависит от мощности алюминиевых электролизеров, т.е. силы тока, и от величины потерь металла на непроизводительные процессы и утечки тока. Для увеличения производительности в проект электролизера закладывается высокая сила тока, конструктивные узлы и технология, позволяющие максимально увеличить выход по току. Таким образом, единичная производительность электролизера или предприятия в целом, выраженная в килограммах Al в сутки или тоннах Al в год, может повышаться алюминиевыми компаниями, накопившими высокий научный и проектный потенциал и имеющими большой опыт в эксплуатации нескольких поколений электролизеров.

По-другому обстоит дело с удельной производительностью P , которую выражают в массовой наработке алюминия за 24 ч с квадратного метра занимаемой площади или площади анодного/катодного массива в горизонтальной плоскости, – кг Al/м²·сут. Удельная производительность практически не изменяется с повышением мощности электролизера, поскольку с увеличением силы тока пропорционально увеличиваются габариты электролизера в плане для размещения электродов и ошиновки, обеспечивающих проектную плотность тока и выход по току. Поэтому удельная производительность является удобным параметром для характеристики применяющейся технологии и ее сравнения с новыми или проектируемыми технологиями производства алюминия электролитическим способом.

Если относить стандартную производительность электролизеров любой мощности к площади анодного массива в горизонтальной плоскости, т.е. к занимаемой площади производственного помещения (корпуса), удельная производительность будет иметь следующие показатели:

- для электролизеров с горизонтальным расположением электродов ~ 60 кг Al/м²·сут;
- для электролизеров с вертикальным расположением электродов ~ 450 кг Al/м²·сут.

Расчет производительности сделан при заглублении вертикальных электродов в электролит на 1 м.

Именно это различие в удельной производительности (почти в восемь раз) и определяет настойчивые попытки разработки и развития электролизеров с твердыми вертикальными электродами (ТВЭ). Уникальная особенность вертикального расположения анодов и катодов означает кратное уменьшение капитальных расходов на строительство новых заводов. Это предполагает снижение расходов не только на строительные конструкции, но и на алюминиевую ошиновку, поскольку отсутствуют жесткие требования на обеспечение МГД-стабильности расплавов в шахте электролизера.

Однако серьезными сдерживающими факторами, ограничивающим развитие ТВЭ, являются отсутствие коммерческих катодов со смачивающими свойствами и неравномерное распределение тока на поликристаллической поверхности электродов.

Смачиваемые алюминием катоды. Направление создания смачиваемой катодной поверхности в виде паст и адгезионных покрытий в настоящее время не развивается, поскольку экспериментально доказана относительно быстрая деструкция сплошного слоя любой толщины на поверхности массивной основы. И дело не только в отсутствии практических технологий создания покрытий (создаваемых на поверхности катода до его пуска в эксплуатацию) с однородными по площади и объему эксплуатационными свойствами. Неконтролируемое движение катодного массива не может быть полностью синхронизировано с процессами усадки-расширения поверхностного слоя. Кроме того, стоимость механически смешанных композиций на основе углерода с порошком TiB₂ для покрытий и, тем более, для катодных блоков, неприемлемо высока в расчете на один электролизер. Поэтому привлекательным выглядит направление синтеза композитных катодных изделий любых конфигураций и габаритов непосредственно в процессе электролитического получения алюминия [55, 56]. Очевидно, что в цитируемых патентах отсутствует информация о ноу-хау технологии.



В научном центре «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II в лабораторных условиях изучалась возможность синтеза композитного катодного материала углерод – диборид/карбид титана (C-TiC/TiB₂) в процессе электролиза. В качестве исходных компонентов для подготовки электродов использовался нефтяной кокс, оксиды титана и бора, углеродсодержащее связующее. После прессования и обжига при 1050 °С электроды устанавливали в графитовую электролизную ячейку с расплавленным электролитом состава NaF/AlF₃ ≈ 2,5 при температуре 960 ± 5 °С. Композитные электроды с оксидами титана и бора подвергали катодной поляризации в течение 24 ч.

а



б



Рис.3. Образцы композита после электролиза:
а – C-TiC; б – C-TiB₂

После извлечения электродов из ячейки и очистки от электролита на поверхности был обнаружен слой алюминия, что свидетельствовало о смачиваемости катодов металлом (рис.3). Рентгенофазовый анализ (РФА) показал в составе электродов карбид титана TiC (рис.4, а), при подготовке дозировался только оксид титана. При создании исходного композита C-TiO₂/B₂O₃ рентгенофазовый анализ конечного продукта после электролиза обнаруживал присутствие TiC и бората титана TiBO₃ (рис.4, б), продукта окисления диборида титана в момент извлечения электрода из электролизной ячейки. Таким образом, была подтверждена возможность создания катодного композитного материала со смачивающими свойствами непосредственно в процессе электролиза. Учитывая примерно одинаковый порядок цен на углеродные материалы, оксиды титана и бора, стоимость производства композитных изделий любых габаритов изменится незначительно.

Неравномерное распределение тока. Эта проблема не очевидна при визуальном наблюдении за процессом электролиза с применением твердых электродов, но она выражается нестабильностью напряжения в системе, повышенным расходом анодов и пассивацией катода компонентами электролита. Именно с этими последствиями, но не с причинами нестабильности процесса, пытались и пытаются справиться исследователи [54, 57]. Дестабилизация электролиза в лабораторных

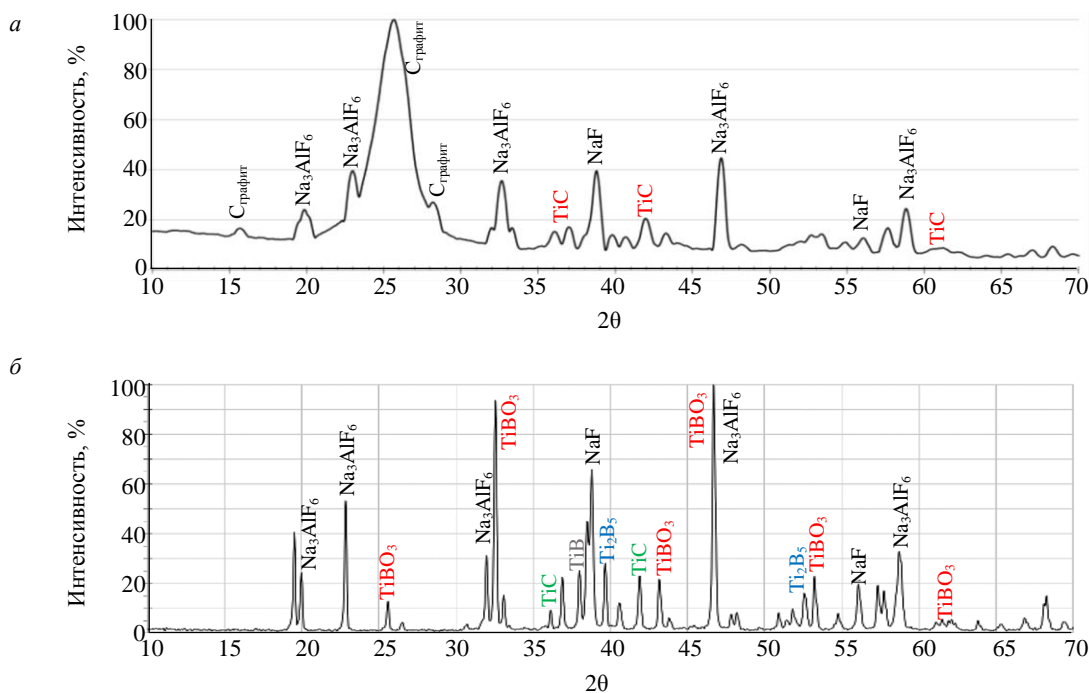


Рис.4. Результаты РФА электродов C-TiC (а) и C-TiB₂ (б)



условиях наступает при увеличении плотности тока выше $0,5 \text{ А/см}^2$ [58-60]. Предлагаемые рекомендации снижения температуры электролиза, корректировки состава электролитов и электродов не решают проблему и не позволяют перейти к развитию на коммерческой основе.

Причиной этих проблем и ограничений на основании экспериментальных данных [61, 62] и численных исследований [63, 64] предлагается принять физическую и химическую неоднородность поверхностной структуры поликристаллических электродов. Химическая неоднородность в процессе эксплуатации постепенно трансформируется в физическую. Это справедливо как для покрытий, так и для компактных электродных изделий любого состава – на основе углерода, боридов/карбидов тугоплавких металлов или их композиций.

Линии тока на микроуровне будут концентрироваться на выступах шероховатой поверхности, пор, трещин, царапин. Этот же эффект реализуется на макроуровне для периферийных участков электродов – ребер или острых краев. На участках с повышенной плотностью тока и потенциалом увеличивается скорость электродных процессов с развитием концентрационной поляризации и неконтролируемого формирования критических электродных потенциалов для присутствующих простых и комплексных ионов. На положительном электроде это будет приводить в той или иной степени к выделению газообразных фторуглеродов на углеродном аноде и фтора на инертном аноде с соответствующими негативными последствиями – повышенным расходом электрода.

На смачиваемом катоде развивается разряд электроотрицательных примесей и разложение составляющих электролита с последующей пассивацией поверхности и прогрессирующей дестабилизацией электролиза (эти негативные последствия характерны и для дренированного катода). Таким образом, различается микрон неоднородность, связанная с шероховатой поверхностью по всей площади, и макрон неоднородность распределения тока на периферийных участках электродов (краевой эффект). Этот подход определяет разработку различных технологий выравнивания токораспределения по электродам.

Компенсировать краевой эффект и существенно снизить макрон неоднородное распределение тока позволяет эллиптическая форма электродов с адекватным увеличением междуполусного расстояния и сопротивления электролита от центра к периферии. В отличие от использования прямоугольных электродов, на протяжении всего эксперимента в электролизной ячейке с металлическими анодом и катодом эллиптической формы процесс электролиза протекал стабильно, пассивации катода не наблюдалось, скорость растворения анодов сокращалась примерно в три раза [62].

Но специальной формы недостаточно для стабильного ведения процесса с применением твердых электродов, поликристаллических и литых, однофазных и многофазных, априори имеющих в своей объемной и поверхностной структуре физическую и химическую неоднородность. Поэтому был предложен и осуществлен один из возможных методов гомогенизации поверхности непосредственно в процессе электролиза – *электрохимическое микроборирование катодов*, имеющих в своем составе тугоплавкие металлы и их оксиды [61]. Метод основан на значительном, почти в два раза, различии стандартных потенциалов разряда алюминия ($E_p^0 = -1,18 \text{ В}$) и бора ($E_p^0 = -0,63 \text{ В}$). При совместном присутствии в расплаве условия для разряда во впадинах благоприятны для более электроположительных ионов. И если бор после восстановления во впадине будет встречать на поверхности, например, титан или его оксид, синтез диборида титана будет выравнивать любую неоднородную поверхность. Этот метод может быть применен к любым реактивным или инертным катодам, поверхностная неоднородность которых нивелируется химическим взаимодействием бора с присутствующими примесями и, тем самым, выравнивается физическое состояние поверхности.

Таким образом, выводится простая формула организации электролитического процесса в электролизере с вертикальным расположением твердых электродов: комплексное применение электродов эллиптической формы и электрохимическое микроборирование композитных катодов. Эта формула в общем виде может быть транслирована для перспективного развития алюминиевой промышленности по следующей дорожной карте масштабирования технологий:

- технология электролиза по схеме вертикальных электродов эллиптической формы;
- технология синтеза композитных смачиваемых алюминием катодов непосредственно в процессе электролиза;
- технология электрохимического микроборирования катодной поверхности.



Объединение этих технологий в одну позволит использовать уникальные преимущества технологии электролиза с вертикально расположенными твердыми электродами (см. таблицу).

Сравнительные характеристики технологий электролиза

Параметры	Расположение электродов	
	Горизонтальное	Вертикальное
Расход электроэнергии, кВт·ч/кг Al	~13,5	~11,0
Выбросы CO ₂ , * кг CO ₂ -экв/кг Al	~ 1,4	→ 1,0** → 0***
Удельная производительность, кг Al/м ² ·сут	~ 60	~ 450

* Прямые выбросы (Score 1).

** Композитные электроды.

*** Инертные электроды.

Заключение. На основании проведенного обзора были сделаны следующие выводы:

- В России на правительственном уровне организован процесс экологической реконструкции изношенных производственных мощностей, который предполагает самофинансирование ужесточающегося государственного экологического нормирования. В то же время частные компании удовлетворяют свои перспективные технологические и экологические амбиции.

- Для действующей технологии электролиза с горизонтальным расположением электродов, обеспеченной современной АСУТП, ошиновкой и материалами футеровки, просматривается реальная возможность энергопотребления около 12000 кВт·ч на 1 т производимого алюминия. Дальнейшее уменьшение удельного расхода электроэнергии до 11250-11500 кВт·ч/т Al возможно с привлечением катодных материалов, смачиваемых расплавленным алюминием. Эти значения энергоэффективности для действующей технологии являются предельными.

- Развитие технологии инертного (кислородвыделяющего) анода требует тщательного исследования компетентными организациями по промышленной безопасности. При определенных климатических и метеорологических условиях в районе интенсивного источника выделения кислорода возможно создание ситуации с повышенной пожароопасностью.

- Проектирование электролизера с дренированным катодом является малоперспективным предприятием.

- Наиболее перспективной технологией электролиза криолитоглиноземных расплавов является технология электролизеров с вертикальными электродами. При использовании композитных анодов и катодов с уменьшенной активностью углерода возможно значительное сокращение выбросов парниковых газов. Удельная производительность таких электролизеров может быть увеличена в 7-8 раз, что означает многократное уменьшение капитальных расходов на строительство новых заводов относительно действующей технологии с горизонтальным расположением электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В. и др. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. DOI: [10.31897/PMI.2022.100](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100)
2. Zhukovskiy Yu.L., Batueva D.E., Buldysko A.D. et al. Fossil Energy in the Framework of Sustainable Development: Analysis of Prospects and Development of Forecast Scenarios // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 17. № 5268. DOI: [10.3390/en14175268](https://doi.org/10.3390/en14175268)
3. Pyagay I.N., Lebedev A.B. Effects of alumina on the stability of ferrite-calcium sinter with dicalcium silicate // CIS Iron and Steel Review. 2023. Vol. 25. P. 10-16. DOI: [10.17580/cisirs.2023.01.02](https://doi.org/10.17580/cisirs.2023.01.02)
4. Kosolapova S.M., Smal M.S., Rudko V.A., Pyagay I.N. A New Approach for Synthesizing Fatty Acid Esters from Linoleic-Type Vegetable Oil // Processes. 2023. Vol. 11. Iss. 5. № 1534. DOI: [10.3390/pr11051534](https://doi.org/10.3390/pr11051534)
5. Зубкова О.С., Алексеев А.И., Сизяков В.М., Полянский А.С. Исследование влияния сернокислых солей на процесс оттаивания глинистой суспензии // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. № 1. С. 44-49. DOI: [10.6060/ivkkt.20226501.6447](https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226501.6447)
6. Kudinova A.A., Poltorackaya M.E., Gabdulkhakov R.R. et al. Parameters influence establishment of the petroleum coke genesis on the structure and properties of a highly porous carbon material obtained by activation of KOH // Journal of Porous Materials. 2022. Vol. 29. Iss. 5. P. 1599-1616. DOI: [10.1007/s10934-022-01287-1](https://doi.org/10.1007/s10934-022-01287-1)
7. Litvinenko V.S., Dvornikov M.V., Trushko V.L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. Vol. 32. Iss. 1. P. 113-119. DOI: [10.1016/j.ijmst.2021.09.010](https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.09.010)



8. Khalifa A.A.E.I.A., Bazhin V.Y., Kuskova Y.V. *et al.* Study the Recycling of Red Mud in Iron Ore Sintering Process // Journal of Ecological Engineering. 2021. Vol. 22. Iss. 6. P. 191-201. DOI: [10.12911/22998993/137966](https://doi.org/10.12911/22998993/137966)
9. Sharikov F.Y., Rudko V.A., Smyshlyaeva K.I. Oxidation thermolysis kinetics of asphaltenes with various chemical prehistory // Thermochimica Acta. 2023. Vol. 726. № 179550. DOI: [10.1016/j.tca.2023.179550](https://doi.org/10.1016/j.tca.2023.179550)
10. Зубкова О.С., Пягай И.Н., Панкратьева К.А., Торопчина М.А. Разработка состава и исследование свойств сорбента на основе сапонита // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 21-29. DOI: [10.31897/PMI.2023.1](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.1)
11. Волосатова А.А., Пятница А.А., Гусева Т.В., Almgren R. Наилучшие доступные технологии как универсальный инструмент совершенствования государственных политик // Экономика устойчивого развития. 2021. № 4 (48). С. 17-23. DOI: [10.37124/20799136_2021_4_48_17](https://doi.org/10.37124/20799136_2021_4_48_17)
12. Haupin W., Frank W. Current and Energy Efficiency of Hall-Heroult Cells // Light Metal Age. 2002. № 5/6. P. 6-13.
13. Choate W.T., Green J.A.S. U.S. Aluminum Production Energy Requirements: Historical Perspective, Theoretical Limits and New Opportunities // ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, 29 July – 1 August 2003, New York, USA. Proceedings from the ACEEE Summer Studies on Energy Efficiency in Industry, 2003. P. 12-24.
14. Bardel A., Droste C., Ovstetun F. *et al.* HAL4e – Hydro’s New Generation Cell Technology // TMS Annual Meeting and Exhibition, 15-19 November 2009, San Francisco, CA, USA. TMS Light Metals 2009: Proceedings of the technical sessions presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS, 2009. P. 371-376.
15. Lange H.P., Holt N.J., Linga H., Solli L.N. Innovative Solutions to Sustainability in Hydro // TMS Annual Meeting and Exhibition, 9-13 March 2008, New Orleans, LA, USA. TMS Light Metals 2008: Proceedings of the technical sessions presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS, 2008. P. 211-216.
16. Thonstad J., Rolseth S., Rodseth J. *et al.* The content of sodium in aluminium in laboratory and industrial cells The Content of Sodium in Aluminum in Laboratory and in Industrial Cells // Light Metals: Proceedings of Sessions, TMS Annual Meeting, Warrendale, Pennsylvania, 2000. P. 441-447.
17. Макушин Д.В. Повышение эффективности электролиза алюминия на основе оптимизации распределения микропримесей в системе «электролит-катодный алюминий»: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный институт, 2007. 22 с.
18. Meirbekova R., Haarberg G.M., Thonstad J. *et al.* Effect of Operational Parameters on the Behavior of Phosphorus and Sulfur in Aluminum Reduction // TMS Light Metals. 2015. P. 559-564. DOI: [10.1007/978-3-319-48248-4_93](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_93)
19. Hall C.M. Patent № 400766 US. Process of Reducing Aluminum by Electrolysis. Publ. 02.04.1889.
20. Беляев А.И., Студенцов Я.Е. Электролиз глинозема с несгораемыми (металлическими) анодами // Легкие металлы. 1936. № 3. С. 15-24.
21. Беляев А.И., Студенцов Я.Е. Электролиз глинозема с несгораемыми анодами из окислов // Легкие металлы. 1937. № 3. С. 17-21.
22. Беляев А.И. Электролиз глинозема с несгораемыми анодами из ферритов // Легкие металлы. 1938. № 1. С. 7-20.
23. Brown G.D. TiB₂ Coated Aluminium Reduction Cells: Status and Future Direction of Coated Cells in Comalco // Proceedings of the 6th Australasian Aluminium Smelter Technology Conference and Workshop, 1998, Queenstown, New Zealand. Kensington, NSW: University of New South Wales, 1998. P. 499-508.
24. Keniry, J. The economics of inert anodes and wettable cathodes for aluminum reduction cells // JOM. 2001. № 53. P. 43-47. DOI: [10.1007/s11837-001-0209-2](https://doi.org/10.1007/s11837-001-0209-2)
25. Kvande H., Haupin W. Inert anodes for Al smelters: Energy balances and environmental impact // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 2001. Vol. 53. Iss. 5. P. 29-33. DOI: [10.1007/s11837-001-0205-6](https://doi.org/10.1007/s11837-001-0205-6)
26. de Nora V. VERONICA and TINOR 2000: New Technologies for Aluminum Production // The Electrochemical Society Interface. 2002. Vol. 11. Iss. 4. P. 20-24. DOI: [10.1149/2.F02024IF](https://doi.org/10.1149/2.F02024IF)
27. Welch B. Inert anodes – The Status of the Materials Science, the Opportunities They Present and the Challenges That Need Resolving before Commercial Implementation // Light Metals 2009: Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2009 Annual Meeting and Exhibition, 15-19 February 2009, San Francisco, California, USA. 2009. P. 971-978.
28. Pawlek R. Inert Anodes: An Update // TMS Light Metals. 2014. P. 1309-1313. DOI: [10.1007/978-3-319-48144-9_219](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_219)
29. Padamata S.K., Yasinskiy A.S., Polyakov P.V. Progress of Inert Anodes in Aluminium Industry: Review // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2018. Vol. 11. № 1. P. 18-30. DOI: [10.17516/1998-2836-0055](https://doi.org/10.17516/1998-2836-0055)
30. Gupta A.K., Basu B. Sustainable Primary Aluminium Production: Technology Status and Future Opportunities // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2019. Vol. 72. Iss. 8. P. 2135-2150. DOI: [10.1007/s12666-019-01699-9](https://doi.org/10.1007/s12666-019-01699-9)
31. Маршалл В. Основные опасности химических производств. М.: Мир, 1989. 671 с.
32. Мальцев В.М., Мальцев В.И., Кашипов Л.Я. Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977. 320 с.
33. Ransley C.E. Patent № 802905 GB. Improvements in or relating to electrolytic cells for the production of aluminium. Publ. 15.10.1958.
34. Lewis R.A. Patent № 2915442 US. Production of aluminum. Publ. 01.12.1959.
35. Lewis R.A., Hildebrandt R.D. Patent № 3400061 US. Electrolytic cell for production of aluminum and method of making the same. Publ. 03.09.1968.
36. McIntyre J., Mitchell D.N., Simpson S. Performance Testing of Cathodic Materials and Designs in a 16 KA Cell and a Test Bed // Light Metals; The Minerals, Metals & Materials Society: Proceedings of the Technical Sessions Sponsored by the TMS Light Metal Committee at the 116th Annual Meeting, 24-26 February 1987, Denver, Colorado, 1987. P. 335-344.
37. Tucker K.W. *et al.* Stable TiB₂ – Graphite Cathode for Aluminium Production // Light Metals; The Minerals, Metals & Materials Society: Proceedings of the Technical Sessions Sponsored by the TMS Light Metal Committee at the 116th Annual Meeting, 24-26 February 1987, Denver, Colorado, 1987. P. 345-349.
38. Joo L.A., Tucker K.W., McCown F.E. Patent № 4376029 US. Titanium diboride-graphite composites. Publ. 08.03.1983.



39. Oye H.A., de Nora V., Duruz J.-J., Johnston G. Properties of a Colloidal Alumina-Bonded TiB₂ Coating on Cathode Carbon Materials // Essential Readings in Light Metals, Electrode Technology for Aluminum Production. 2016. Vol. 4. P. 1171-1178. DOI: [10.1007/978-3-319-48200-2_155](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_155)
40. Hudson T.J. Cathode Technology for Aluminum Electrolysis Cells // Light Metals; The Minerals, Metals & Materials Society: Proceedings of the Technical Sessions Sponsored by the TMS Light Metal Committee at the 116th Annual Meeting, 24-26 February 1987, Denver, Colorado, 1987. P. 321-325
41. Gessing A.J., Wheeler D.J. Screening and Avaluation Methods of Cathode Materials for Use in Aluminum Reduction Cells in Presence of Molten Aluminum and Cryolite up to 1000°C // Light Metals; The Minerals, Metals & Materials Society: Proceedings of the Technical Sessions Sponsored by the TMS Light Metal Committee at the 16th Annual Meeting, 24-26 February 1987, Denver, Colorado, 1987. P. 327-334
42. Alcorn T.R. Pilot Reduction Cell Operation Using TiB₂-G Cathodes // Light Metals; The Minerals, Metals & Materials Society: Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Light Metals Committee at the 119th TMS Annual Meeting, 18-22 February 1990, Anaheim, California, 1990. P. 413-418.
43. Ефимова К.А., Галевский Г.В., Руднева В.В. Современное состояние производства диборида титана: оценка, определение доминирующих тенденций и перспектив // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. Вып. 2. С. 144-158. DOI: [10.18721/JEST.230213](https://doi.org/10.18721/JEST.230213)
44. Boxall L.G., Cooke A.V., Hayden H.W. Use of TiB₂ Cathode Material Application and Benefits in Conventional VSS Cells // Essential Readings in Light Metals, Electrode Technology for Aluminum Production. 2016. P. 1145-1152. DOI: [10.1007/978-3-319-48200-2_152](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_152)
45. Cooke A.V., Buchta W.M. Use of TiB₂ Cathode Material: Demonstrated Energy Conservation in VSS Cells // Essential Readings in Light Metals, Electrode Technology for Aluminum Production. 2016. P. 1153-1163. DOI: [10.1007/978-3-319-48200-2_153](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_153)
46. Sekhar J.A., Vittorio de Nora. Patent № 5364513 US. Electrochemical cell component or other material having oxidation preventive coating. Publ. 15.11.1994.
47. Sekhar J.A., Duruz J.-J., Liu J.J. Patent № 6783655 US. Slurry and method for producing refractory boride bodies and coatings for use in aluminium electrowinning cells. Publ. 31.08.2004.
48. Watson K.D., Juric D.D., Shaw R.W., Houston G.J. Patent № 5658447 US. Electrolysis cell and method for metal production. Publ. 19.08.1997.
49. Richards J.W. Aluminium: Its History, Occurrence, Properties, Metallurgy and Applications, Including Its Alloys. London: Sampston Low, Marston, Searle & Rivington, 1887. 346 p.
50. Minet A. The Production of Aluminium And Its Industrial Uses. London: Chapman & Hall, Limited, 1905. 266 p.
51. Griswold Jr. T. Patent № 1070454 US. Electrolytic cell. Publ. 19.08.1913.
52. Johnson A.F. Patent № 2480474 US. Method of producing aluminum. Publ. 30.08.1949.
53. Zaikov Y., Khramov A., Kovrov V. et al. Electrolysis of aluminum in the low melting electrolytes based on potassium cryolite // TMS Light Metals. 2008. № 1. P. 505-508.
54. Shengzhong Bao, Dengpeng Chai, Zhirong Shi et al. Effects of Current Density on Current Efficiency in Low Temperature Electrolysis with Vertical Electrode Structure // 147th Minerals, Metals & Materials Society Annual Meeting and Exhibition, 11-15 March 2018, Phoniex, AZ, USA. TMS Light Metals, 2018. P. 611-619. DOI: [10.1007/978-3-319-72284-9_79](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_79)
55. Патент № 2232211 РФ. Способные к смачиванию и устойчивые к эрозии/окислению углеродсодержащие композитные материалы / А.А. Миртчи, Д. Бергерон. Оpubл. 10.07.2004.
56. Патент № 2793027 РФ. Способ получения композитного углеродсодержащего материала / А.А.Поляков, Е.С.Горланов, И.Н.Пягай и др. Оpubл. 28.03.2023. Бюл. № 10.
57. Качева О.Ю. Низкотемпературный электролиз глинозема во фторидных расплавах: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. Екатеринбург: Учебно-методический центр Уральского государственного технического университета, 2013. 36 с.
58. Suzdaltsev A.V., Nikolaev A.Y., Zaikov Y.P. Towards the Stability of Low-Temperature Aluminum Electrolysis // Journal of the Electrochemical Society. 2021. Vol. 168. № 4. № 046521. DOI: [10.1149/1945-7111/abf87f](https://doi.org/10.1149/1945-7111/abf87f)
59. Николаев А.Ю., Ясинский А.С., Суздальцев А.В. и др. Электролиз алюминия в расплавах и суспензиях KF-AlF₃-Al₂O₃ // Расплавы. 2017. № 3. С. 205-213.
60. Nikolaev A.Y., Suzdaltsev A.V., Zaikov Y.P. Cathode Process in the KF-AlF₃-Al₂O₃ Melts // Journal of the Electrochemical Society. 2019. Vol. 166. № 15. P. D784-D791. DOI: [10.1149/2.0521915jes](https://doi.org/10.1149/2.0521915jes)
61. Горланов Е.С. Легирование катодов алюминиевых электролизеров методом низкотемпературного синтеза диборида титана: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. 40 с.
62. Поляков А.А. Распределение тока и потенциала по поверхности вертикальных электродов при электролитическом получении алюминия: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. 20 с.
63. Gorlanov E.S., Polyakov A.A. On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 3. Electric field distribution on the electrodes // iPolytech Journal. 2021. Vol. 25. № 2. P. 235-251. DOI: [10.21285/1814-3520-2021-2-235-251](https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-235-251)
64. Polyakov A.A., Gorlanov E.S., Mushihiin E.A. Analytical Modeling of Current and Potential Distribution over Carbon and Low-Consumable Anodes during Aluminum Reduction Process // Journal of the Electrochemical Society. 2022. Vol. 169. № 5. № 053502. DOI: [10.1149/1945-7111/ac6a16](https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac6a16)

Авторы: Е.С.Горланов, д-р техн. наук, заместитель директора научного центра, gorlanov_es@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2990-3601> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Л.И.Леонтьев, д-р техн. наук, академик РАН, <https://orcid.org/0000-0002-4343-914X> (Российская академия наук, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных

С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Данильев С.М., Секерина Д.Д., Данильева Н.А. Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 260-271. EDN IEWVBO

Аннотация. В работе рассматривается подход к локализации интервалов развития геомеханических процессов в подземных сооружениях на основе классификации и трансформации данных сейсморазведочных исследований. Предлагаемый подход позволит при интерпретации результатов сейсморазведочных работ выявить интервалы развития трещиноватости, разуплотнения пород, водопритока и других геомеханических процессов. Методика предусматривает формирование матриц продольных (V_p), поперечных (V_s) скоростей и соотношения скоростей (V_s/V_p) вдоль профиля исследований для выполнения последовательной фильтрации. Результаты фильтрации служат основой для формирования банка информативных материалов для дальнейшего проведения классификации. На базе отечественного программного обеспечения КОСКАД 3D реализованы четыре подхода для объединенной цифровой модели параметров V_p , V_s и V_s/V_p . Одним из ключевых элементов в процессе классификации является объединение гридов для повышения вероятности обнаружения интервалов с разнородными идентификационными признаками. Результатом применения данного методического подхода является построение комплексной интерпретационной модели, на которой отчетливо проявляются потенциальные зоны развития геомеханических рисков.

Ключевые слова: классификация; трансформация; скорости продольных волн; скорости поперечных волн; комплексная интерпретация; интерпретационная модель

Поступила: 06.04.2023

Принята: 27.12.2023

Онлайн: 13.03.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. Современное состояние урбанизированных территорий невозможно представить без интенсивного развития минерально-сырьевого сектора, направленного на освоение и переработку полезных ископаемых. Данный тренд подразумевает наращивание производственных мощностей, разведку и освоение новых месторождений, строительство новых горно-технических сооружений, а также повышение эксплуатационных нагрузок на действующие сооружения. Более интенсивное производство горных работ, проводка новых выработок, формирование отвалов пород и дополнительная пригрузка существующих могут способствовать развитию геомеханических рисков из-за деформирования, перераспределения напряжений и разрушения массивов горных пород. Часто геомеханические процессы, протекающие в массиве пород, носят скрытый характер и визуально не проявляются. Влияние тектонических и эксплуатационных факторов на изменение напряжений в массиве горных пород является весьма актуальной темой исследований последних десятилетий [1]. Поэтому для обеспечения безопасности производства горных работ необходимо своевременно выявлять интервалы формирования зон интенсификации геомеханических процессов, потенциально влияющих на эксплуатационную надежность горно-технических сооружений по причине перераспределения напряжений в массиве пород. Скрытые зоны развития геомеханических явлений, связанные с активизацией тектонических процессов, проявляются в виде развития зон разуплотнения, трещиноватости и выщелачивания. Развитие этих процессов приводит к формированию водопроводящих каналов в массиве пород, увеличивающих водоприток в подземные выработки и выступающих катализатором дальнейшего развития процессов



денудации с более интенсивной скоростью, и, как результат, появлению видимых деформаций и повышению рисков при производстве горных работ.

Для прогноза на рудниках выполняется стандартный комплекс работ по геотехническому мониторингу, включающий маркшейдерские наблюдения на опорных реперах, мониторинг сейсмических событий в пределах сейсмопавильонов рудника, гидрогеологический мониторинг. Однако, до появления визуальных и ощутимых деформаций в массиве пород, которые хорошо локализируются по результатам маркшейдерских и гидрогеологическим работ, в теле массива могут формироваться скрытые интервалы деформаций, несущие потенциальные геомеханические риски, своевременное выявление которых возможно на основе привлечения современных геофизических технологий и алгоритмов [2, 3].

Для решения задачи прогноза зон геомеханического риска в работе предлагается проведение подземной высокоразрешающей сейсморазведки на продольных и поперечных волнах. Обработка и интерпретация результатов исследований подразумевает применение алгоритмов трансформации и классификации скоростных разрезов.

На этапе обработки в качестве перспективного набора инструментов можно выделить трансформации исходных данных посредством фильтрации различными методами и классификацию объединенного блока исходных матриц с восполнением отсутствующих или непригодных для последующего анализа данных [3]. Такой подход хорошо изучен в рамках задач интерпретации потенциальных полей, но для трансформации сейсморазведочных данных он носит специфичный характер. Предлагается применение альтернативных способов фильтрации, которые успешно рекомендовали себя при обработке данных геопотенциальных полей [4]. Данное направление может добавлять новые полезные источники информации, позволит локализовать разуплотненные и ослабленные зоны, формирующие область развития геомеханических рисков в горном массиве, на основе данных профильных сейсморазведочных работ.

Методы. Своевременное выявление нарушенных интервалов в области взаимодействия подземной выработки с вмещающим массивом и в глубину массива, контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) массива возможны на базе развития технологий подземной геофизики. Подземные геофизические исследования на рудниках успешно применяются уже более полувека. Опыт их апробации с учетом современного аппаратно-технологического прогресса позволяет определить наиболее оптимальные методы геофизики для оценки и прогнозирования НДС массива, позволяющие проводить исследования состояния горно-технических сооружений на принципах минимизации инвазивного воздействия с целью снижения рисков развития новых геомеханических процессов [5-7].

В рамках научно-исследовательской работы на рудниках Талнахского и Октябрьского месторождений (Норильск) выполнялись комплексные геофизические исследования подземных горных выработок. Комплекс состоял из методов георадиолокации, сейсмических исследований и регистрации естественных электромагнитных эмиссий (ЕЭМИ). Данные метода ЕЭМИ для задач трансформационно-классификационных построений невозможно представить в виде двумерной модели, поэтому трансформации и классификации в рамках данного исследования к этим данным не применяются. Метод георадиолокации также не подвергается трансформации и классификации из-за ограниченной глубинности исследований (до 8 м).

В условиях рассматриваемых геотехнических задач можно сформулировать общие требования к геофизическим методам, предлагаемым для исследований:

- основной вектор исследований преимущественно ориентирован на обследование строения и прогноз устойчивости (нарушенности) породоносного массива кровли выработок [6];
- обследование кровли выработок, находящихся в сложных НДС, геофизическими методами должно проводиться с минимальным инвазивным воздействием, не оказывающим дополнительного деформационного риска;
- в большинстве случаев обследование кровли выработок затруднено наличием густой сети коммуникаций (водопроводы, бетоноводы, кабели и т.д.), поэтому методы геофизики должны обладать способностью получать полезную информацию в данных условиях [8];
- применяемые методы геофизики должны обладать потенциалом для перспективного прогноза НДС и физико-механических свойств массива пород [9, 10].



С учетом требований, предъявляемых к геофизическим технологиям и возможностям представления данных в виде матриц данных в двумерной области, наиболее оптимальным является сейморазведочный метод преломленных волн (МПВ) с последующей томографической обработкой данных (ПКМПВ-СТ), несмотря на трудозатраты, связанные со спецификой работ [11-13].

При отработке сейсмических профилей в шахтных условиях по кровле выработок использовались следующие параметры регистрации: шаг пунктов приема (ПП) – 2 м; шаг пунктов возбуждения (ПВ) – 2 м; количество ПП на профиле – 76; упругие колебания возбуждались кувалдой весом 6 кг. Данный тип установки выбран на основе проведения опытно-методических работ и размеров исследуемых областей, соотносящихся с размером бина. Методика проведения сейсмических исследований предусматривает работу с выносами пунктов возбуждения за пределы основной расстановки на 10 м, что способствует получению сейсмических записей на глубину до 50 м. Полевые сейсмические работы выполнены с использованием современной телеметрической сейморазведочной станции «ТЕЛСС-3» производства ООО «Геосигнал» (Москва). Станция обладает преимуществом, согласно ее техническим характеристикам, перед аналогами для реализации подземных наблюдений, заключающимся в возможности формирования индивидуальной помехозащищенной линии расстановки за счет сегментированной сейсмической косы, соединенной телеметрическими модулями [14].

Обработка сейсмических данных делится на несколько этапов: первый – оценка полевых данных, выполнение первичной фильтрации и усиление исходного сигнала, второй – присвоение геометрии расстановки в локальной системе координат (X, Y, Z), третий – пикировка годографов преломленных и рефрагированных продольных и поперечных волн с последующим расчетом томографических разрезов (V_p, V_s). Томографическое обращение годографов заключается в решении обратной задачи томографии с использованием преобразования Фурье и метода наименьших квадратов, предполагающим минимизацию невязки, когда трассирование лучей подчиняется основным законам геометрической сейсмики с минимальным временем прохождения упругой волны через систему элементарных ячеек [15].

Дальнейшая обработка сейсмических данных заключается в расчете отношения скоростей поперечных и продольных волн и подготовки исходных матриц ($V_p, V_s, V_s/V_p$) данных (рис.1) для проведения процедуры трансформационно-классификационного анализа сейсмических данных.

Первым этапом трансформации обработанных данных является оценка входных материалов на качество, единство и правдоподобность значений для рассматриваемого объекта исследований. Затем проводится расчет трансформант, включающий такие фильтрации, как осреднение в скользящем окне (Moving Average) с выбранными размерами полуосей эллипса усреднения 5×7 и 15×25 м, при котором наиболее информативные результаты дает минимальный размер осей, принятый за оптимальный; низкочастотная фильтрация свертки (Low-Pass Gaussian) со стандартным размером окна 3×3 , среднее абсолютное отклонение (Mean Absolute Deviation – MAD); стандартное отклонение (Standard Deviation), позволяющее оценить разброс значений относительно стандартного для измеренного параметра V_s или V_p (стандартное отклонение – это квадратный корень из дисперсии); расчет горизонтального градиента, позволяющего выявить зоны деструкции по смене характера поля с положительного на отрицательное значение и др. [16]. Основная задача применения фильтрации заключается в подавлении помех и извлечении полезной информации для корректной интерпретации полученных результатов [17]. Более подробная характеристика применяемых фильтраций приведена в таблице.

После формирования рабочего банка, включающего карты рассчитанных трансформант, проводится оценка качества полученных материалов [18, 19]. Отбираются наиболее информативные трансформанты для вовлечения в процессы комплексной интерпретации и классификации преобразованных материалов [20-22].

На втором этапе выполняется классификация с использованием программного обеспечения КОСКАД 3D [23-26]. Для начала загружаются исходные матрицы для значений скоростей продольных и поперечных волн и их отношения. Следующая процедура заключается в восполнении отсутствующих или некорректных значений, которые могли быть ошибочно записаны и не устранены на этапе первичной обработки данных. После восполнения недостающих значений происходит объединение трех «гридов» для применения операции классификации.

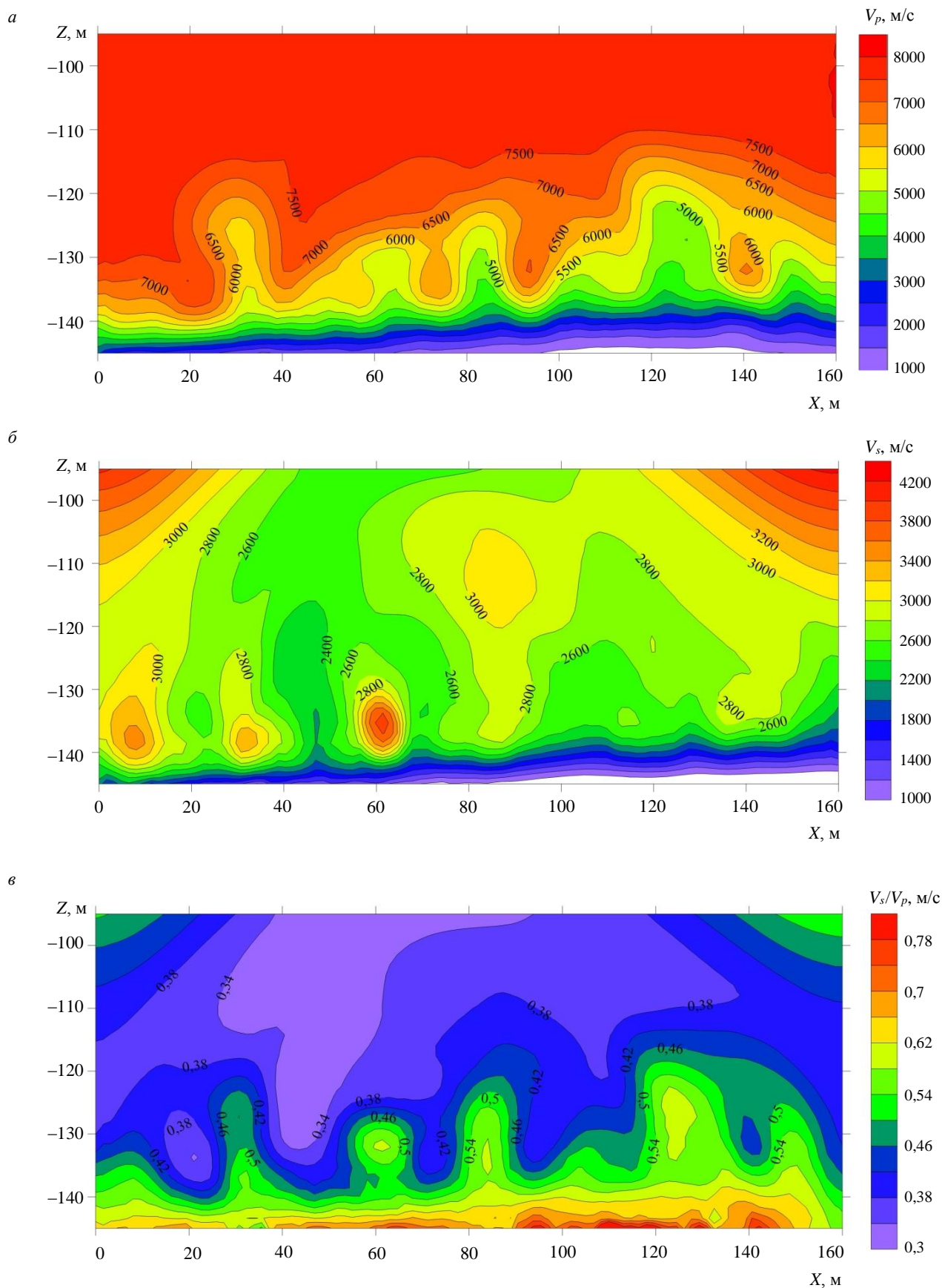


Рис.1. Исходные томографические разрезы продольных (а), поперечных (б) скоростей и соотношения скоростей (в)



Характеристика применяемых фильтров

Название	Описание	Формула
Осреднение в скользящем окне	Метод построения сетки скользящего среднего позволяет присвоить значения узлам сетки путем усреднения данных в пределах эллипса поиска узла сетки. Из-за специфики данного метода не рекомендуется его применение для карт малого и среднего масштаба, однако данный инструмент полезен при работе с крупным банком пространственных данных, поскольку позволяет выделить региональные аномалии, амплитуда которых зависит от размера задаваемого окна осреднения [13]. Минимальное количество данных задает значение точек при интерполяции узла сетки. Для каждого узла сетки соседние данные идентифицируются путем центрирования эллипса поиска на узле. Значение выходного узла сетки устанавливается равным среднему арифметическому идентифицированных соседних данных [16].	Среднеарифметическое осреднение выполняется с использованием радиально-кольцевой или квадратной палетки, либо в пределах некоторого интервала по формуле $\bar{Z} = \frac{1}{N \sum Z_i},$ где \bar{Z} – среднее значение поля в пределах площади осреднения; Z_i – значение поля в i -м узле палетки; N – общее число узлов.
Низкочастотная операция свертки	Фильтр нижних частот удаляет высокочастотный шум, в результате чего на выходе получается более плавная сетка. При работе с одним из четырех низкочастотных фильтров необходимо учитывать, что ширина и высота окрестности фильтра должны быть положительными нечетными числами [15]. С гауссовым фильтром нижних частот вес уменьшается с увеличением расстояния. Эта весовая функция имеет форму половины общей колоколообразной кривой. Параметр α определяет, насколько быстро вес уменьшается с расстоянием. Чем ниже значение α , тем больший вес имеют точки окрестности в значении сетки и тем медленнее снижается вес. Чем выше значение α , тем больший вес имеет центральная точка в значении сетки и тем быстрее уменьшается вес других точек [17].	При высоте окрестности S и ширине T функция взвешивания расстояния $W(i, j) = \exp \left(-\alpha \left(\left(\frac{i}{S} \right)^2 + \left(\frac{j}{T} \right)^2 \right) \right);$ $A_i = -\frac{S}{2}, \dots, \frac{S}{2};$ $A_j = -\frac{T}{2}, \dots, \frac{T}{2},$ где α – положительное значение.
Среднее абсолютное отклонение	Определение характера распределения разницы между абсолютным и средним значениями точек [18, 19] позволяет оценить величину вариации, которая происходит вокруг среднего значения в наборе данных. Эффект этого фильтра заключается в том, чтобы подчеркнуть выбросы в сетке [18]. Недостатком данного метода является ограниченность математической манипуляции по сравнению с дисперсией.	Среднее абсолютное отклонение $\text{MAD} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \bar{X} }{n},$ где \bar{X} – среднее значение выборки; n – количество наблюдений в выборке.
Стандартное отклонение	Фильтры статистики моментов – стандартное отклонение (std). Значение выходного узла сетки равно стандартному отклонению соседних значений [22].	Стандартное отклонение – это квадратный корень из дисперсии $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}},$ где x_i – величина отдельного значения выборки; μ – среднее арифметическое выборки; n – размер выборки.

Процедура классификации является составляющей функционального блока «Комплекс» [25], предназначенного для обработки многопризнаковой геолого-геофизической информации [27, 28]. С помощью классификации выполняется разбиение рассматриваемой площади на однородные по нескольким признакам области [29, 30]. Используемые алгоритмы базируются на самообучении с учетом корреляционных связей всего признакового пространства при возможном отсутствии априорной изученности о положении начальных центров и конечном числе классов с однородными признаками.



Интересной особенностью данного метода является обрабатываемое поле признаков [31, 32], в котором в качестве исходных материалов могут быть заданы преобразованные матрицы [33], полученные на предыдущем этапе. В результате применения алгоритма формируется сеть, содержащая информацию о классовой идентификации каждой точки. Вовлечение преобразованных материалов в качестве второстепенных входных данных позволяет провести дополнительных отбор наиболее показательных результатов.

С учетом того, что на этапе расчета трансформант происходит подавление и устранение помех и повышение качества данных, и использование улучшенных цифровых матриц позволяет получить более достоверную картину на выходе. Такой подход позволяет включить дополнительные компоненты для формирования классового распределения в многопризнаковом пространстве [34, 35].

Классификация реализуется четырьмя основными методами:

- Метод общего расстояния, при котором конечное число классов выбирается автоматически.
- Метод динамических сгущений (K -средних), при котором информация о конечном числе классов задается пользователем, а преобразование выполняется за счет итерационной эмпирической процедуры.
- Метод разделения многомерных нормальных смесей, подразумевающий вариативность задания конечного числа однородных областей с применением многомерного дисперсионного анализа.
- Знаковая классификация, разбивающая исследуемую область на положительные и отрицательные признаки.

Заключительным этапом является интерпретация полученных результатов. Для этого формируется рабочий банк данных, содержащий карты по исходным данным, трансформантам и классификациям в единой привязке [36, 37]. После этого выполняется комплексный анализ априорной и преобразованной информации, по результатам которого выделяются зоны локализации аномальных значений на границах смены характера физических свойств [38-40], которые сопоставляются с физико-механическими параметрами исследуемой среды. На данном этапе отбраковываются аномалии, вызванные краевыми эффектами, и создается обобщенная интерпретационная модель.

Результаты. В результате выполнения сейсморазведочных работ ПКМПВ на рудниках Талнахского и Октябрьского месторождений (Норильск) получены сейсмограммы общего пункта возбуждения по нескольким профилям. Уникальность методики проведения сейсмических исследований заключается в возбуждении и регистрации упругих волн в кровле горных выработок. Полученные сейсмограммы подвергаются процедурам первичной фильтрации и присвоения геометрии расстановки. На сейсмограммах считываются следующие годографы упругих волн: рефрагированной, преломленных продольных, преломленных поперечных и отраженных. Дальнейшая томографическая обработка данных заключается в обращении считанных годографов упругих преломленных и рефрагированных волн в скорости с использованием преобразования Фурье. Качественная интерпретация предусматривает выделение и прослеживание в разрезе аномальных областей или зон, соотносящихся с различными геомеханическими процессами.

Главными критериями проявления процесса разуплотнения горных пород является снижение скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн. На сейсмотомографических разрезах продольных и поперечных волн области повышенных скоростей идентифицируют участки, на которых возникает напряженное состояние вследствие тектонофизического воздействия, находящего отклик в горных породах.

Еще одним неблагоприятным геомеханическим процессом в горных выработках является повышенный водоприток в шахту, возникающий за счет просачивания воды из вышележащих водоносных горизонтов в области геомеханических процессов деструкции. Характеристика областей потенциальных водопроявлений в шахту на сейсмических разрезах проявляется следующим образом: плавное понижение скоростей распространения продольных волн, понижение скоростей распространения поперечных волн, увеличение соотношения скоростей. На полученных разрезах выделяются аномальные области, характеризующиеся пониженными скоростями продольных и поперечных волн, а также пониженными значениями отношения скоростей в районе пикетов 30-40, 60-70, 80-92, 120-135 м (рис.1), что свидетельствует о наличии областей разуплотнения горных пород в локализованных областях. Дальнейшая количественная интерпретация подразумевает расчет трансформант и классификацию полученных скоростных томографических разрезов [37].



Полученные в результате применения процедур, указанных в таблице, преобразованные разрезы подвергаются качественной оценке на информативность, а именно, сохранение аномальных областей на разрезах, минимальное искажение исходного массива данных. Этим требованиям удовлетворяют преобразованные посредством осреднения в скользящем окне сейсмотомографические разрезы (рис.2). На разрезах удается отчетливо проследить области со средними и повышенными значениями скоростей, что соответствует зонам напряженности на исходных материалах, области пониженных значений скоростей, разуплотненным горным породам. Наиболее достоверна картина геофизических свойств, проявленных в случае рассмотрения разреза отношения скоростей поперечных волн к продольным [41]. Необходимость отбора самых информативных результатов фильтрации возникает из-за перехода к следующему этапу классификации [39].

Обсуждение результатов. Примеры визуализации результатов классификации по объединенным матрицам V_s , V_p и V_s/V_p представлены на рис.3: *а* – методом общего сгущения, *б* – методом динамических сгущений (*K*-средних), *в* – методом разделения многомерных нормальных смесей (по А.В.Петрову), *г* – методом знаковой классификации. Очевидно, что наиболее информативными результатами являются классификации, выполненные по методу разделения многомерных нормальных смесей (рис.3, *в*) и динамических сгущений (*K*-средних) (рис.3, *б*) ввиду лучшей локализации аномальных областей и их связи с исходными данными [41]. Однако при восполнении недостающих значений сильное влияние на итоговое представление разрезов оказывают краевые эффекты, которые ошибочно можно принять за аномальные показатели при интерпретации. Именно поэтому важно анализировать априорные и преобразованные материалы для исключения некорректных заключений [42, 43].

Метод динамических сгущений (*K*-средних) является эффективным способом классификации многомерных значений в условиях минимума априорной информации о центрах классов за счет использования *K*-средних (где *K*-число классов) [35]. Для всех обрабатываемых признаков оценивается значение среднеквадратичного отклонения, которое также приводится при фильтрации методом стандартного отклонения с использованием нормировки и создания новых векторных центров классов. Главным преимуществом данного метода является быстрая сходимость, недостатком – неполный учет корреляционных связей признаков пространства [23, 44]. Именно классификация способом динамических сгущений выбрана в качестве основы интерпретационной модели как наиболее информативная, поскольку при сопоставлении с априорными разрезами (см. рис.1) аномальные участки весьма достоверно проявляются именно на рис.3, *б*.

Всего на интерпретационной модели выделено восемь классов: 1-й класс отвечает проявлению краевых эффектов и локализации максимальных значений скоростей; 2-й класс характеризует проявление зон механических нарушений или повышенных напряжений; 3-6-е классы подчеркивают контуры распределения основных блоков, характеризующихся однотипными признаками, разбитыми на подгруппы для более удобной идентификации при последующей интерпретации; 7-й класс аккумулирует признаки с пониженными значениями скоростей; 8-й класс накапливает признаки с наиболее картирующимися показателями. Для непосредственной интерпретации наибольший интерес представляют классы 2 и 8, поскольку именно по ним возможно наиболее достоверно определить зоны локализации напряженных состояний.

Результирующая интерпретационная модель (рис.4) демонстрирует положение аномальных участков по исследуемому профилю, которым соответствуют зоны потенциального превышения нормального деформационного состояния исследуемого массива. Именно эти зоны представляют наибольшую опасность при планировании подземных работ и требуют привлечения дополнительных мер по обеспечению безопасного рабочего процесса с минимизацией экономических и технологических рисков. Сопоставление полученных локализованных зон с материалами первичной изученности, а именно, с визуализированными матрицами продольных и поперечных волн по исследуемому профилю, подтверждает корректность применения методики классификации сейсмических данных по аналогии с геопотенциальными полями [38, 45]. Вовлечение петрофизических характеристик исследуемого массива позволяет выявить закономерности отображения в двумерном пространстве упругих свойств, представленных продольными и поперечными волнами [46, 47].

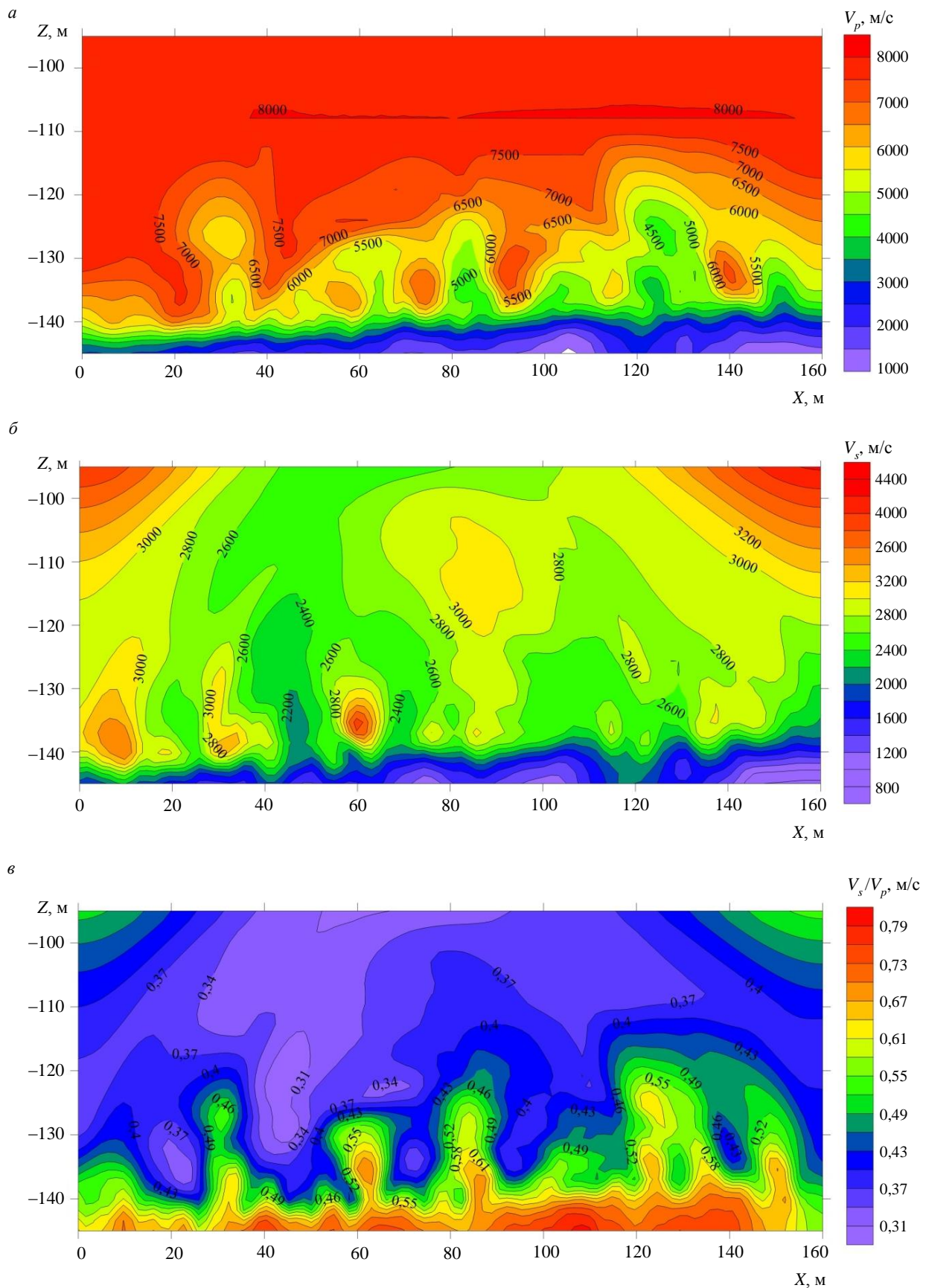


Рис.2. Пример визуализации рассчитанных трансформант методом осреднения в скользящем окне, полученных для матриц продольных (а), поперечных (б) скоростей и соотношения скоростей (в)

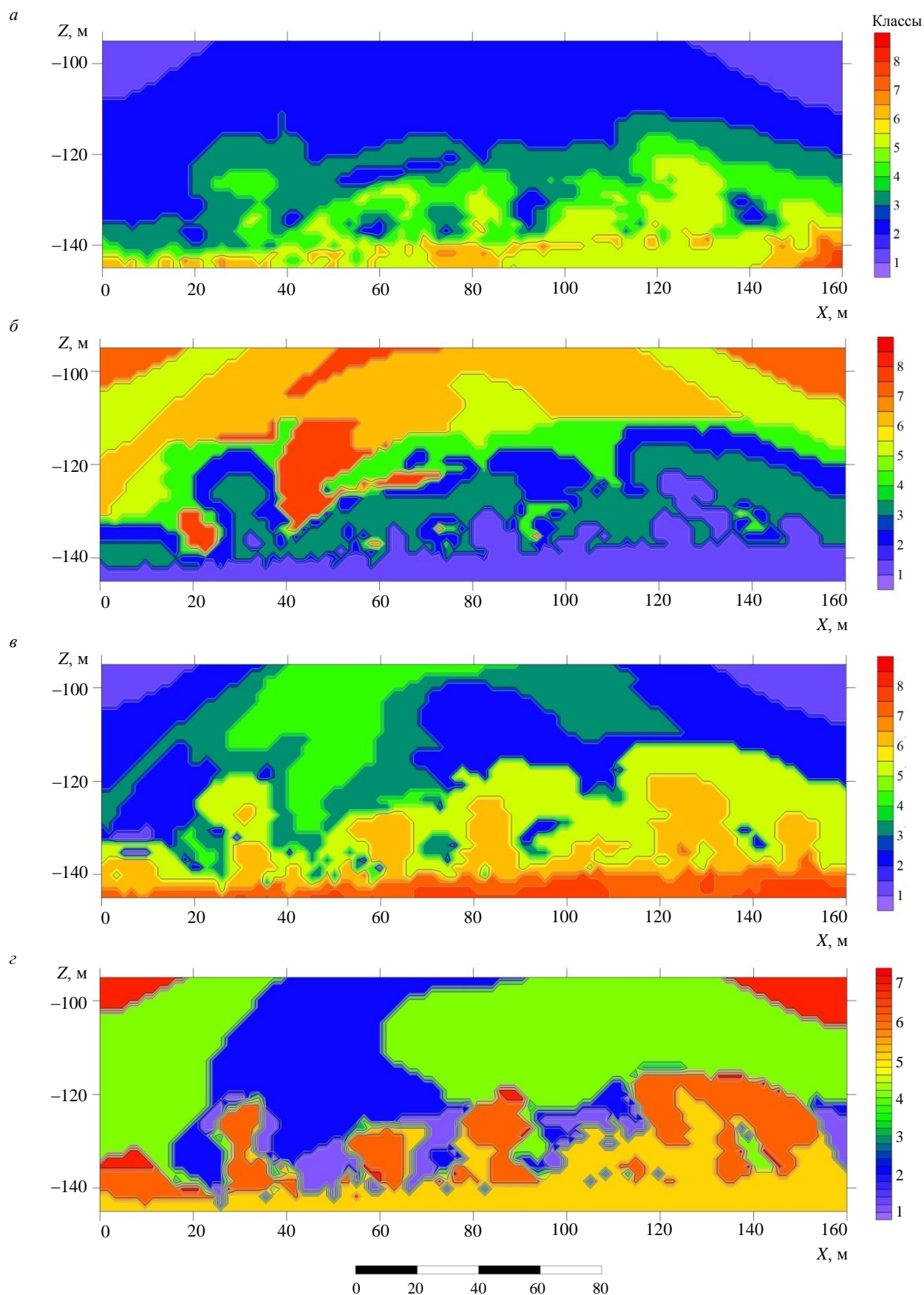


Рис.3. Результаты классификации: *a* – метод общего расстояния; *б* – метод динамических сгущений (*K*-средних); *в* – метод разделения многомерных нормальных сетей; *г* – метод знаковой классификации

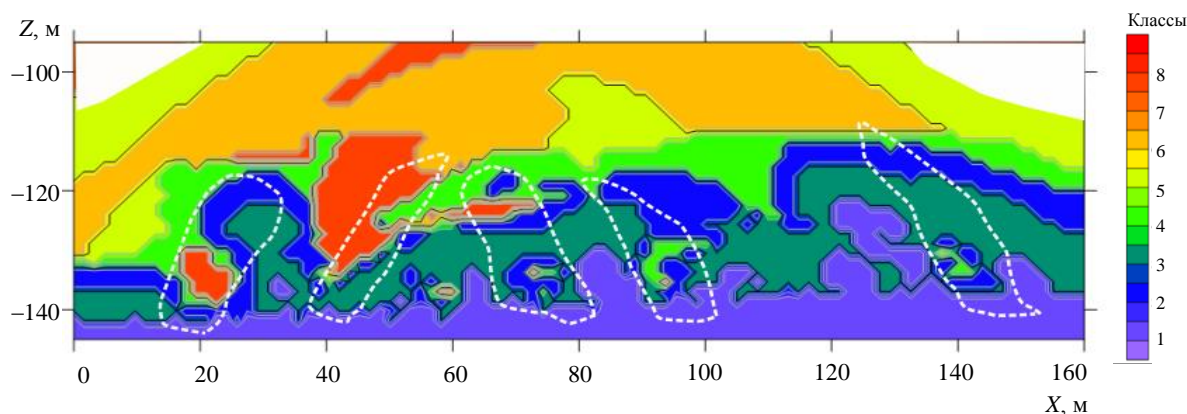


Рис.4. Интерпретационная модель, построенная на основе априорной информации, трансформации и классификации сейсмических данных

Заключение. При прогнозировании напряженно-деформационного состояния массива в рамках планирования горных работ возникает необходимость разработки методологического подхода к исследованию и анализу данных с привлечением дополнительных инструментов. В качестве объекта исследований рассматривались геологические условия рудников Талнахского и Октябрьского месторождений. Исследуемый объект – разрабатываемая подземная горная выработка в осложненных условиях эксплуатации из-за достаточной близости к поверхности и высокой вероятности водопроявлений в шахту по причине развития скрытых геомеханических процессов.

В результате выполнения сейсморазведочных работ опробована технология определения характера распространения упругих волн в кровле горной выработки. Дальнейшая работа заключалась в последовательной выборке качественных данных и апробации методики комплексной обработки и интерпретации сейсморазведочных данных по методике трансформационно-классификационного анализа, применяемого для геопотенциальных полей. Новизна работы заключается в применении эффективных инструментов, которые хорошо себя зарекомендовали при работе с потенциальными геофизическими полями для данных, отражающих упругие характеристики исследуемой среды. Подобная методика является модернизированной и требует дальнейшего тестирования на данных, получаемых в более сложных геолого-технических условиях. Кроме того, полученные результаты демонстрируют потенциальные возможности расширения применения технологий сейсморазведки на этапе обработки и интерпретации по сравнению с привычными подходами к анализу профильных данных в виде сейсмограмм или изображений.

Предлагаемая методика обработки и интерпретации сейсмических данных с последующими трансформациями и классификацией позволяет перейти к составлению интерпретационной модели, отражающей положение контуров наиболее опасных зон (рис.4). Интерпретационная модель может служить основой для планирования безопасного проведения подземных горных работ с учетом выявленных интервалов повышенного геомеханического риска (разуплотненные участки, участки напряженного состояния, обводненные участки).

Таким образом, применение трансформации сейсморазведочных данных в комплексе с методикой классификации при решении задачи локализации аномальных участков, склонным к развитию геомеханических рисков, позволяет оперативно и наиболее достоверно выделить зоны, опасные с точки зрения интенсификации геомеханических процессов. Применение методики трансформации сейсмических данных свидетельствует о перспективности применения современных геофизических технологий при моделировании поведения горного массива с учетом воздействия эксплуатационной и механической нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деменков П.А., Романова Е.Л. Анализ подходов к расчету крепи вертикальных стволов в зонах тектонических нарушений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. Вып. 4. С. 223-236.
2. Абрамкин Н.И., Ефимов В.И., Мансуров П.А. Эмпирические методики оценки состояния массива горных пород // Известия Уральского государственного горного университета. 2021. Вып. 4 (64). С. 109-115. DOI: [10.21440/2307-2091-2021-4-109-115](https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-4-109-115)



3. Ломов М.А., Константинов А.В. Анализ результатов сейсмического мониторинга Кукисвумчоррского месторождения // Проблемы недропользования. 2022. № 1 (32). С. 38-44. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.01.038
4. Чепеленкова В.Д., Лисица В.В. Применение метода дискретных элементов для оценки прочностных свойств упругих сред // XVIII Международный научный конгресс и выставка «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», 18-20 мая 2022, Новосибирск, Россия. Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 2022. Т. 2. № 2. С. 209-214. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-2-209-214
5. Dashko R.E., Romanov I.S. Safety of mining in the Kupol deposit based on the analysis and evaluation of geological processes in underground mine (ЧАО, Anadyr District) // Eurasian Mining. 2022. № 1. P. 85-89. DOI: 10.17580/em.2022.01.18
6. Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И. и др. Геомеханические процессы в геологической среде горно-технических систем и управление геодинамическими рисками. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2019. 431 с. DOI: 10.37614/978.5.91137.391.7
7. Александров П.Н., Кризский В.Н. Прямая и обратная задача геоэлектрики бианизотропных сред на основе объемных интегральных уравнений // Физика Земли. 2022. № 3. С. 92-107. DOI: 10.31857/S0002333722030012
8. Rasskazov I.Ju., Saksin B.G., Potapchuk M.I., Anikin P.A. The Researches of Burst-Hazard on Mines in Russian Far East // ISRM European Rock Mechanics Symposium – EUROCK 2018, 22-26 May 2018, Saint Petersburg, Russia. OnePetro, 2018. № ISRM-EUROCK-2018-014.
9. Ломов М.А., Сидляр А.В. Оценка факторов удароопасности Николаевского месторождения с помощью системы 3D моделирования результатов сейсмоакустического мониторинга // Проблемы недропользования. 2021. № 1 (28). С. 64-72. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.064
10. Протосеня А.Г., Иовлев Г.А. Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в призабойной зоне тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5. С. 128-139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139
11. Kuterova N.A., Moseykin V.V., Kondakova V.N. et al. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12. С. 77-93. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_77
12. Lomov M. 3D modeling system of seismoacoustic monitoring results at the Nikolaevskoye field // VIII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources», 8-10 September 2020, Khabarovsk, Russia. E3S Web of Conferences, 2020. Vol. 192. № 04008. DOI: 10.1051/e3sconf/202019204008
13. Izotova V., Petrov D., Pankratova K., Posphehov G. Research of Acoustic Characteristics and Physical and Mechanical Properties of Quaternary Soils // Engineering and Mining Geophysics. 2020. Vol. 2020. 7 p. DOI: 10.3997/2214-4609.202051130
14. Федотов С.А., Федотов А.С. Оптимизация технологии сейсморазведочных работ при инженерно-геофизических исследованиях // Инженерная, угольная и рудная геофизика-2015. Современное состояние и перспективы развития, 28 сентября – 2 октября 2015, Сочи, Россия. Сочи: Межрегиональная общественная организация Евро-Азиатское геофизическое общество, 2015. С. 22-25.
15. Fengqiao Zhang, Lotfollah Pahlavan, Yuguang Yang. Evaluation of acoustic emission source localization accuracy in concrete structures // Structural Health Monitoring. 2020. Vol. 19. Iss. 6. P. 2063-2074. DOI: 10.1177/1475921720915625
16. Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н., Пугин А.В. Алгоритмы аппроксимации геопотенциальных полей истокобразными функциями // Геофизика. 2016. № 5. С. 4-10.
17. Fuentes J. Unraveling Soft Squeezing Transformations in Time-Variant Elastic Fields // Dynamics. 2023. Vol. 3, Iss. 2. P. 299-314. DOI: 10.3390/dynamics3020018
18. Bharti A.K., Prakash A., Verma A. et al. Mapping of decades-old underground coal mine workings using electrical resistivity tomography // Journal of Earth System Science. 2022. Vol. 131. Iss. 4. № 258. DOI: 10.1007/s12040-022-02008-7
19. Alekseev S.G., Bochkov P.A., Senchina N.P., Shtokalenko M.B. The Indication in the Potential Fields of Structures Controlling Diamondiferous Magmatism // Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar, Kazan, Russia. Springer: Cham, 2019. P. 331-338. DOI: 10.1007/978-3-319-97670-9_38
20. Shabarov A.N., Kuranov A.D., Kiselev V.A. Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores // Eurasian Mining. 2021. Vol. 36. Iss. 2. P. 3-7. DOI: 10.17580/em.2021.02.01
21. Egorov A.S., Prischepa O.M., Nefedov Y.V. et al. Deep Structure, Tectonics and Petroleum Potential of the Western Sector of the Russian Arctic // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. Iss. 3. № 258. DOI: 10.3390/jmse9030258
22. Секерина Д.Д., Дергилева Е.А., Егоров А.С. Закономерности локализации структур каледонского и герцинского орогенеза рудного Алтая // Региональная геология и металлогения. 2023. № 93. С. 52-62. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_93_52-62
23. Schiffer C., Tegner C., Schaeffer A.J. et al. High Arctic geopotential stress field and implications for geodynamic evolution // Circum-Arctic Lithosphere Evolution. London: Geological Society of London, 2018. Vol. 460. P. 441-465. DOI: 10.1144/SP460.6
24. Yakovleva A.A., Movchan I.B., Shaygallyamova Z.I. Dynamic response of multi-scale geophysical systems: waves and practical applications // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2022. Vol. 380. Iss. 2237. № 20210403. DOI: 10.1098/rsta.2021.0403
25. Кризский В.Н., Александров П.Н., Ковальский А.А., Викторов С.В. Математическое моделирование переходного сопротивления катодно-поляризуемого трубопровода по данным магнитометрии // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Т. 12. № 1. С. 68-79. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-1-68-79
26. Рагузин И.И., Быкова Е.Н., Лепихина О.Ю. Метод полигональной метрической сетки для оценки кадастровой стоимости земельных участков // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2023. Т. 78. № 3. С. 92-103. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.8
27. Керимов И.А., Петров А.В., Абубакарова Э.А. Применение программного комплекса «Коскад 3D» для анализа потенциальных полей Терско-Каспийского прогиба // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2018. Т. 12. № 3. С. 88-96. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-3-88-96
28. Богословский В.А., Самохин А.В., Жигалин А.Д. Экологический мониторинг подземных хранилищ газа геофизическими методами // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2011. № 5. С. 465-473.



29. Kholmskii I., Eltsov T., Gulin V. et al. Real Time Monitoring of Seismic Survey Works Using Unmanned Aerial Systems // 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition. 2022. Vol. 2022. 5 p. DOI: [10.3997/2214-4609.202210988](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202210988)
30. Архипова Е.В., Жигалин А.Д., Брянцева Г.В. и др. Особенности долговременных вариаций сейсмичности активных мегаструктур современной Земли // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия: Естественные и инженерные науки. 2019. № 1 (42). С. 3-12.
31. Попов М.Г., Попова О.Г. Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности // Геология и геофизика Юга России. 2021. Т. 11. № 2. С. 152-166. DOI: [10.46698/VNC.2021.29.52.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.29.52.011)
32. Bykowa E., Skachkova M., Raguzin I. et al. Automation of Negative Infrastructural Externalities Assessment Methods to Determine the Cost of Land Resources Based on the Development of a «Thin Client» Model // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 15. № 9383. DOI: [10.3390/su14159383](https://doi.org/10.3390/su14159383)
33. Фан Т.Х., Петров А.В., До М.Ф. и др. Особенности геологического строения центральной части Вьетнама по результатам интерпретационной обработки данных гравиразведки в компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2020. Т. 63. № 5. С. 77-90. DOI: [10.32454/0016-7762-2020-63-5-77-90](https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-5-77-90)
34. Долгаль А.С. Аддитивные технологии локализации источников геопотенциальных полей // Вестник Пермского университета. Геология. 2019. Т. 18. № 4. С. 380-385. DOI: [10.17072/psu.geol.18.4.380](https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.4.380)
35. Попов М.Г., Попова О.Г. Изучение изменений во времени и в пространстве напряженного состояния геологической среды // Геология и геофизика Юга России. 2020. Т. 10. № 3. С. 79-93. DOI: [10.46698/VNC.2020.43.14.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.43.14.005)
36. Попова О.Г., Попов М.Г. Оценка напряженного состояния геологической среды Кавминводского полигона на основе долговременного сейсмо-экологического мониторинга // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 5. С. 15-22. DOI: [10.31857/S0869-78092019515-22](https://doi.org/10.31857/S0869-78092019515-22)
37. Шабаров А.Н., Зубков В.В., Кротов Н.В. и др. Выбор проектных решений по освоению месторождений с учетом результатов геодинамического районирования и геометризации опасных зон // Записки Горного института. 2013. Т. 205. С. 66-69.
38. Балк П.И., Долгаль А.С., Пугин А.В. и др. Эффективные алгоритмы истокообразной аппроксимации геопотенциальных полей // Физика Земли. 2016. № 6. С. 112-128. DOI: [10.7868/S0002333716050021](https://doi.org/10.7868/S0002333716050021)
39. Liu Q., Gu Y.J. Seismic imaging: From classical to adjoint tomography // Tectonophysics. 2012. Vol. 566-567. P. 31-66.
40. Putikov O., Kholmyanski M., Ivanov G., Senchina N. Application of geoelectrochemical method for exploration of petroleum fields on the Arctic shelf // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125498. DOI: [10.1016/j.geoch.2019.02.001](https://doi.org/10.1016/j.geoch.2019.02.001)
41. Мингалева Т., Горелик Г., Егоров А., Гулин В. Коррекция глубинно-скоростных моделей методом гравиметрической разведки для труднодоступных участков шельфовой зоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10-1. С. 77-86. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_101_0_77](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_101_0_77)
42. Черемисина Е.Н., Финкельштейн М.Я., Деев К.В., Большаков Е.М. ГИС INTEGRO. Состояние и перспективы развития в условиях импортозамещения // Геология нефти и газа. 2021. № 3. С. 31-40. DOI: [10.31087/0016-7894-2021-3-31-40](https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-3-31-40)
43. Черемисина Е.Н., Сеннер А.Е. Применение ГИС ИНТЕГРО в задачах поиска месторождений нефти и газа // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т. 7. № 3. С. 439-444. DOI: [10.20537/2076-7633-2015-7-3-439-444](https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-3-439-444)
44. Grigorev G., Islamuratov M., Bondarev E. et al. D-seis: digital field exploration twin // Second EAGE Digitalization Conference and Exhibition. 2022. Vol. 2022. 5 p. DOI: [10.3997/2214-4609.202239010](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202239010)
45. Zaycev S.V., Ahmetsafin R.D., Budennyj S.A. et al. Usage of Machine Learning Algorithms for Structural Boundaries Reconstruction Using The Non-Seismic Methods Data with Feature Selection // Data Science in Oil and Gas. 2021. Vol. 2021. 6 p. DOI: [10.3997/2214-4609.202156005](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202156005)
46. Буддо И.В., Шелохов И.А., Мисюркеева Н.В., Агафонов Ю.А. Электромагнитные исследования методом ЗСБ 2D, 3D, 4D: последовательность постановки геологоразведочных работ // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3S. С. 715-730. DOI: [10.5800/GT-2021-12-3s-0549](https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3s-0549)
47. Пономаренко М.Р., Кутепов Ю.И., Волков М.А., Гринюк А.П. Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 103-113. DOI: [10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113)

Авторы: С.М.Данильев, канд. геол.-минерал. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-3057-8527> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Д.Д.Секерина, аспирант, <https://orcid.org/0000-0003-3892-7947> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Н.А.Данильева, канд. геол.-минерал. наук, доцент, Danileva_na@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7707-6204> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Моделирование эффективности работы сезоннодействующих охлаждающих устройств при изменении статистического распределения погодных условий

О.М.Ермилов¹, А.А.Джалябов², Г.Г.Васильев³, И.А.Леонович³✉¹ ООО «Газпром добыча Надым», Надым, Россия² ООО «Газпром добыча Ноябрьск», Ноябрьск, Россия³ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Ермилов О.М., Джалябов А.А., Васильев Г.Г., Леонович И.А. Моделирование эффективности работы сезоннодействующих охлаждающих устройств при изменении статистического распределения погодных условий // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 272-282. EDN UZQOVK

Аннотация. Климатический фактор потепления, о котором свидетельствует значительное число ученых и исследовательских коллективов в России и мире, оказывает существенное влияние на мерзлотное состояние многолетнемерзлого грунта, сохранение которого – один из наиболее распространенных принципов строительства на Севере. Рассматривается влияние прогнозных климатических изменений при планировании до 2050 г. на эффективность работы сезоннодействующих охлаждающих устройств, принцип работы которых построен на сезонном промораживании грунта. Проведенное моделирование показало, что в ситуации стабильного климата сохранение мерзлотного состояния многолетнемерзлого грунта реализуется без применения дополнительных мер. При потеплении с трендом 0,1 °С в год сезоннодействующие охлаждающие устройства не обеспечивают сохранение текущего уровня мерзлотного состояния грунта и требуются дополнительные меры, которые позволили бы повысить их эффективность работы в летний период. В случае более экстремального потепления с темпом 0,25 °С в год результаты моделирования показывают, что сезоннодействующие охлаждающие устройства не оказывают значительного влияния на темпы растепления грунта и решением проблемы должна стать их полная замена на системы с круглогодичным действием.

Ключевые слова: многолетнемерзлый грунт; термосифон; сезоннодействующее охлаждающее устройство; потепление; климат; повышение эффективности

Поступила: 05.09.2022

Принята: 20.09.2023

Онлайн: 06.12.2023

Опубликована: 25.04.2024

Введение. Перспективные территории развития нефтегазовой отрасли Российской Федерации имеют тенденцию к смещению на север и восток. Освоение Ямальского центра газодобычи, месторождений Гыданского полуострова, Якутии и Дальнего Востока ставит перед нефтегазовыми компаниями важнейшую задачу качественного и надежного функционирования объектов нефтегазового сектора в условиях сплошного распространения многолетнемерзлого грунта (ММГ).

Комплексное освоение месторождений Арктического региона России предполагает поиск новых методов разведки месторождений, которые позволили бы уменьшить техногенное влияние на ММГ за счет сокращения доли полевых этапов работ [1, 2], новых методов освоения месторождений с сокращением теплового воздействия на мерзлый грунт при бурении [3] или при производстве строительных и монтажных работ [4], а также новых методов и технологий обеспечения надежности эксплуатации промысловых объектов в целях сокращения влияния выбросов и утечек добываемых и транспортируемых продуктов [5]. При сооружении объектов добычи и транспорта природного газа на участках сплошного распространения ММГ их использование осуществляется по первому принципу – сохранение мерзлоты как в процессе строительства [6, 7], так и эксплуатации [8, 9]. Нарушение условий эксплуатации грунта в мерзлотном состоянии может привести к катастрофическим последствиям природного и техногенного характера [10, 11], которые наносят значительный вред хрупкой экосистеме северных регионов. Анализ научных работ по методам



освоения Арктики показывает, что на каждом этапе жизненного цикла промышленного объекта решается задача уменьшения теплового воздействия на мерзлый грунт как за счет применения новых конструкций оснований и фундаментов [4, 7], так и оптимизации технологических процессов [1, 3].

Типовым техническим решением для реализации данного принципа является применение различных конструкций сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ). Обзор таких систем выполнен в работе [12], а в статье [13] показано, как системы термостабилизации грунтов при строительстве в криолитозоне позволяют поддерживать нужную отрицательную температуру оснований или восстанавливать деградировавшую мерзлоту. Эффективность работы СОУ напрямую зависит от климатических условий окружающей среды, и при их проектировании обычно используются стационарные климатические модели, опирающиеся на статистические данные климата территории строительства [14].

По оценкам значительного числа ученых [15, 16] и международных климатических организаций [17], в России идут активные процессы потепления климата, особенно сильно выраженные в северных широтах [18, 19] Российского Севера. Показано [16], что за последние 20 лет территория Ямала подверглась аномальному снижению среднегодовых температур, а также количества дней в году с низкими температурами. Отчеты [17] известной климатической группы Intergovernmental Panel on Climate Change фиксируют годовое потепление в диапазоне от 0,03 до 0,1 °С, а данные Росгидромета [18] для Севера России демонстрируют динамику потепления выше 0,1 °С. Такие климатические изменения могут нанести значительный ущерб мерзлотному состоянию грунта и привести к его растеплению, что приведет к значительному снижению несущей способности свайных оснований и фундаментов [20, 21].

В работах [22, 23], посвященных состоянию СОУ, рассматриваются вопросы повреждения и разрушения этих конструкций в процессе строительства и эксплуатации или вопросы эффективности СОУ в зависимости от различных факторов антропогенного и техногенного характера [24]. Исследованы проблематика устойчивости инженерных сооружений при потеплении климата [25, 26], отдельные вопросы моделирования работы СОУ [27, 28] или оценки устойчивости свай при тепловом воздействии [29], но проблема снижения эффективности работы действующих СОУ по причинам глобального потепления климата не рассматривается.

Целью данного исследования являлась оценка поведения СОУ в различных климатических моделях, основанных на текущем понимании климатических изменений в России и мире. Объектом исследования стала система мерзлый грунт – климат – СОУ, а предметом исследования – устойчивость данной системы к климатическим изменениям.

Методы. Выполнено моделирование совместной работы мерзлого грунта и СОУ в различных климатических условиях с применением программного комплекса Борей 3Д. Комплекс Борей 3Д зарегистрирован в Роспатенте, № 2018660189 от 17.08.2018. Сертифицирован и соответствует требованиям СП 25.13330.2012 (СНиП 2.02.04-88), РСН 67-87, СТО Газпром 2-2.1-435-2010, СТО Газпром 2-2.1-390-2009, ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119-2000, ГОСТ Р ИСО 9127-94, ГОСТ Р ИСО 9126-93, ГОСТ 28806-90. Реализует математический аппарат численного моделирования распространения температурных полей в грунтовом массиве с учетом фазового перехода незамерзшей воды в спектре отрицательных температур. Программный комплекс нашел практическое применение и использовался специалистами в рамках расчетов применения СОУ на ММГ [30, 31].

Основная задача исследования – оценка устойчивости ММГ к процессам потепления, оценка скорости деградации мерзлоты при наличии СОУ, отсутствии СОУ, а также применении методик повышения эффективности СОУ на период с 2011 до 2051 год применительно к участку ММГ, параметры которого соответствуют типовой геоэкологической картине п-ова Ямал. Проработка включала варианты стабильного климата, ежегодного потепления на 0,1 и 0,25 °С. При этом рассматривалась возможность изменения геоэкологической картины участков ММГ в естественном состоянии (без применения СОУ), с применением СОУ и вариант с обеспечением работы СОУ в летний период. Расчетная модель участка ММГ принята в виде куба размером 50×50×50 м, с заданными грунтовыми условиями. В качестве грунтов в модели приняты типичные для п-ова Ямал пластичномерзлые суглинки с параметрами: плотность 1750-1840 кг/м³; суммарная



влажность 0,124-0,181 д. ед.; число пластичности 0,114; степень засоленности 0,065-0,081 %; температура начала замерзания $-0,48^{\circ}\text{C}$; без включений торфа. В центре массива грунта установлено СОУ глубиной 10,5 м. В 0,5 м по оси Y моделируется термоскважина 1, в 1 м – термоскважина 2, в 2 м – термоскважина 3. Куб модели отображает область, которая подвергнется дискретизации для выполнения расчета. На верхней грани куба модели принимается граничное условие третьего рода. Значения для расчета представлены в терминах скорости ветра, толщины и плотности снежного покрова. На боковых и нижней гранях куба модели принимаются граничные условия нулевого теплового потока. Для решения дифференциального уравнения распространения тепла в грунте с фазовыми переходами в спектре отрицательных температур применяется метод с динамическим разбиением области на подобласти с явной и неявной вычислительной схемой. В качестве неявной вычислительной схемы применен метод простой итерации. Для улучшения сходимости неявного метода применяется метод регуляризации и динамический подбор шага по времени. На сайте программного комплекса Борей 3D показаны результаты положительной верификации применяемых расчетных моделей на задачах, имеющих аналитическое решение. Моделирование работы СОУ производится путем постановки граничных условий второго рода в виде внутренних источников/стоков теплоты.

Прогнозирование процессов динамики состояния ММГ осуществлялось на основе экстраполяции данных климатической станции Марресаля [32, 33]. Климатические показатели для стабильного климата получены путем обработки статистических данных (средняя температура пятидневки и средняя толщина снегового покрова) за 2011-2021 гг., которые повторялись до 2051 г. Прогнозирование параметров динамики изменения климатических данных для случая потепления на $0,1$ и $0,25^{\circ}\text{C}$ производилось путем увеличения температуры стабильного климата ежегодно на соответствующее значение. Интервал потепления $0,1^{\circ}\text{C}$ принят на основе проведенной авторами аппроксимации реальных климатических данных 1990-2020 гг. [16], а также оценки скорости потепления в северных регионах России по данным Росгидромета за 1976-2016 гг. [34], интервал $0,25^{\circ}\text{C}$ – на основе наихудшего сценария изменения климата северных территорий России на $10-12^{\circ}\text{C}$ в конце 21 в. по данным доклада [18]. Срок моделирования принят на основе методологии расчетов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) [17].

Исходя из характерного для п-ова Ямал диапазона скорости ветра $5-7$ м/с, в расчетах принято среднее значение скорости ветра – 6 м/с. Для моделирования использовались представленные в ПК Борей 3D данные о режиме работы и характеристики СОУ ТК32/12.М5-03 (ФСА) теплоноситель R-744 (углекислота). Для варианта перевода режима работы СОУ в летний период разработана отдельная модель климатических данных для конденсатора СОУ. В этой модели в период с 15 мая по 15 октября конденсатор СОУ находится в температурном поле -5°C , в остальной период года климатические данные конденсатора СОУ соответствуют климатическим параметрам температурного режима того варианта климата, который моделируется. Дополнительно, исходя из анализа динамики климата при тренде потепления $0,25^{\circ}\text{C}$, по причине существенного увеличения летнего периода (температура стабильно выше 0°C) было решено рассмотреть следующий вариант режима работы: с 01.01.2024 режим установлен с 01.05 по 31.10, а начиная с 01.01.2025 – с 01.04 по 31.10.

Результаты. При условии стабильного климата моделирование показало сохранение мерзлотного состояния грунта независимо от использования СОУ. На рис.1 представлены полученные данные по мерзлотному состоянию грунта на 2050 г. при отсутствии СОУ (рис.1, а), наличии СОУ для скважины 1 (рис.1, б), наличии СОУ и варианте перевода его на работу в теплое время года для скважины 1 (рис.1, в). На рис.2 приведены среднегодовые данные о мерзлотном состоянии грунта при стабильном климате. При отсутствии СОУ глубина сезонного растепления грунта к 2050 г. составит $1,6$ м, что соответствует среднему уровню глубины растепления п-ова Ямал на сегодняшний день. При наличии СОУ глубина растепления грунта также составит $1,6$ м. При использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года глубина сезонного растепления снизится до $1,4$ м. При отсутствии СОУ глубина грунта, ниже которой температура не превышает -1°C , составит $3,5$ м, при наличии СОУ – $2,5$ м, а при использовании в варианте перевода

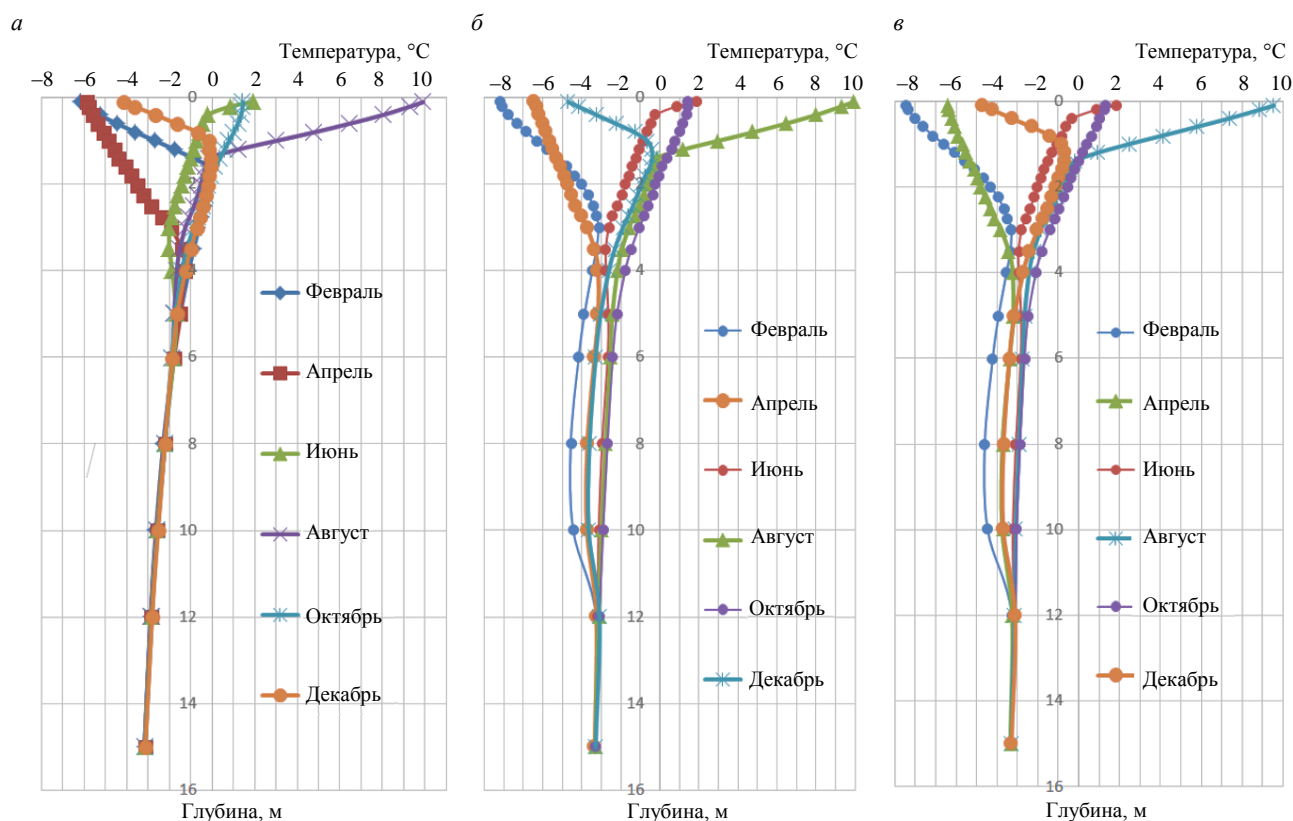


Рис.1. Состояние мерзлого грунта для модели стабильного климата на 2050 г.

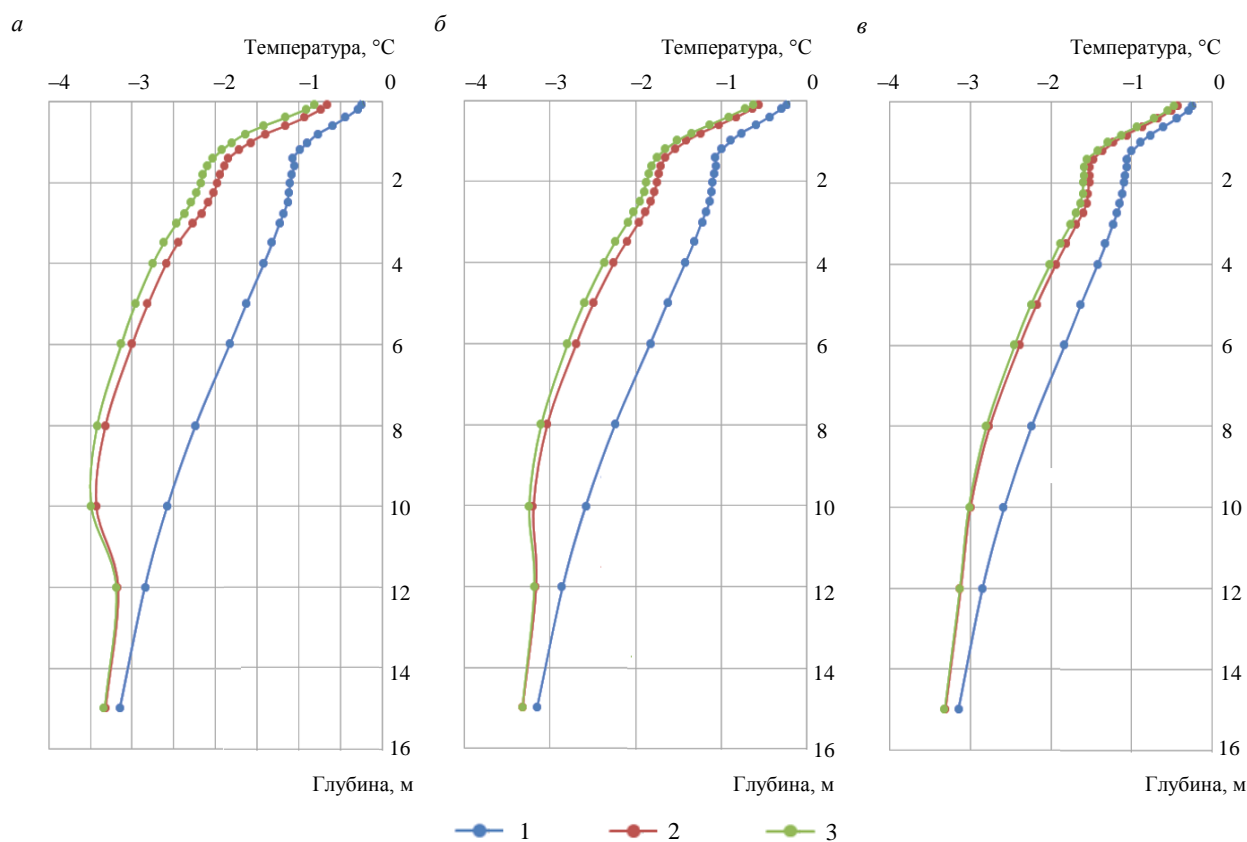


Рис.2. Прогноз среднегодовой температуры грунта на 2050 г. при стабильном климате:
 а – термоскважина 1; б – термоскважина 2; в – термоскважина 3
 1 – без СОУ; 2 – при наличии СОУ; 3 – при наличии СОУ и переводе его на работу в теплое время года

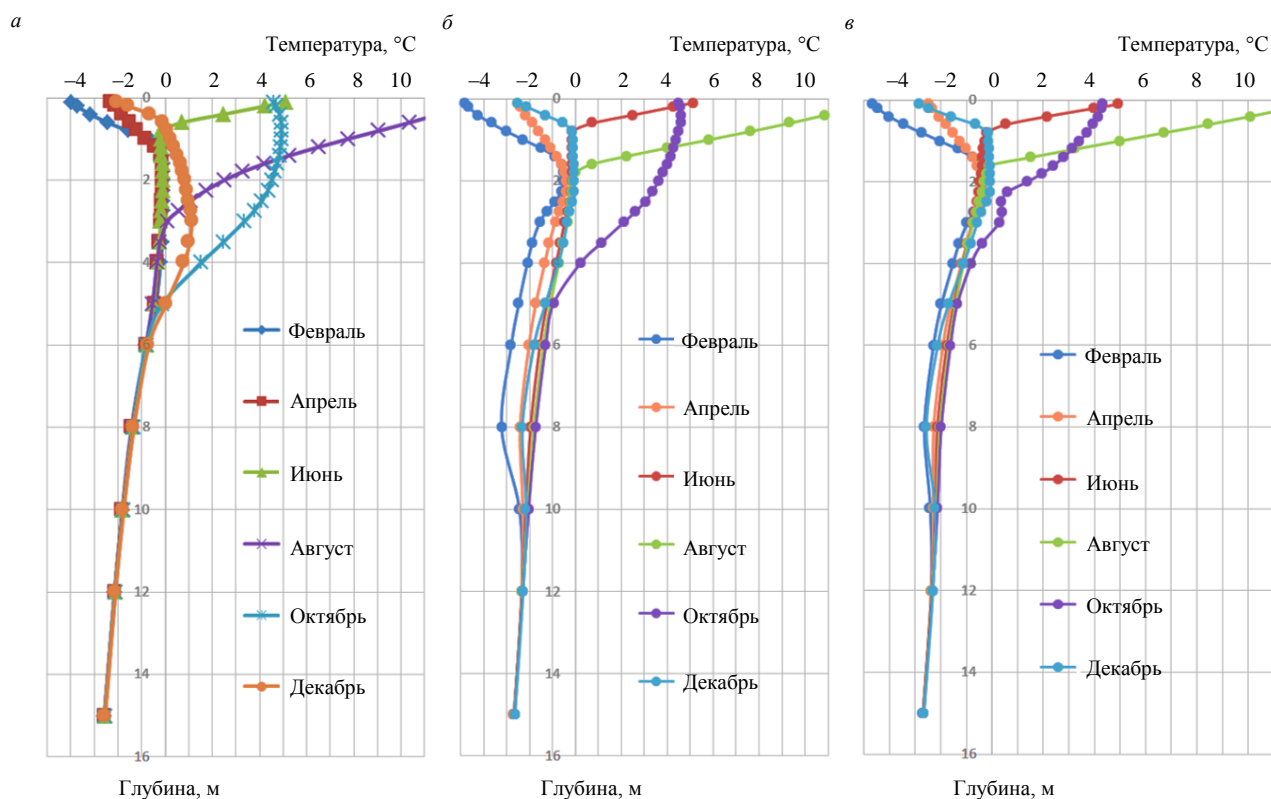


Рис.3. Состояние мерзлого грунта для модели потепления 0,1 °C на 2050 г.

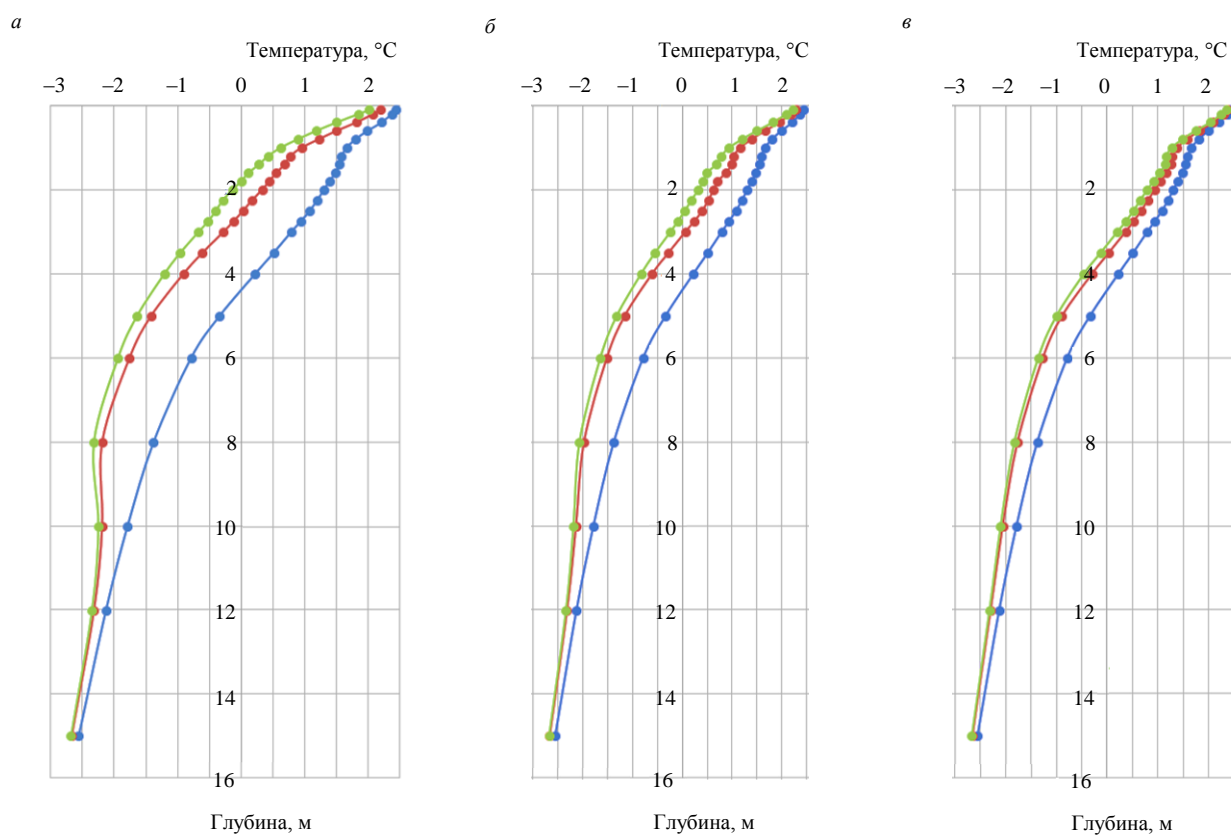


Рис.4. Прогноз среднегодовой температуры грунта на 2050 г. при потеплении 0,1 °C:
а – термоскважина 1; *б* – термоскважина 2; *в* – термоскважина 3
Условные обозначения см. на рис.2



СОУ на работу в теплое время года – 2,25 м. Анализ данных температурных полей показал, что наличие СОУ понижает температуру мерзлого грунта на 1 °C на расстоянии 0,5 м от СОУ, 0,8 °C на расстоянии 1 м и 0,5 °C на расстоянии 2 м. Использование СОУ в варианте перевода на работу в теплое время года понизит среднегодовую температуру мерзлого грунта в диапазоне глубин от 0,8 до 8 м на 0,5 °C на расстоянии 0,5 м от СОУ, 0,1 °C на расстоянии 1 м от СОУ и 0,07 °C на расстоянии 2 м от СОУ. Для стабильного климата эти изменения не носят критический характер, поскольку мерзлотное состояние грунта, достаточное для эффективного функционирования основания, сохраняется при применении только СОУ. Однако даже в этом случае при использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года повышается эффективность его применения на 15-20 % в зависимости от расстояния от оси СОУ.

На рис.3 представлены данные по мерзлотному состоянию грунта на 2050 г. при отсутствии СОУ (рис.3, а), наличии СОУ для скважины 1 (рис.3, б) и переводе СОУ на работу в теплое время года (рис.3, в). На рис.4 приведены среднегодовые данные о мерзлотном состоянии грунта при потеплении климата на 0,1 °C. При отсутствии СОУ глубина сезонного растепления грунта к 2050 г. составит 5 м, что значительно превышает средний уровень глубины растепления п-ова Ямал на текущий момент (1,5-2,0 м). При наличии СОУ глубина растепления грунта составит 4 м, при использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года глубина растепления грунта снизится до 3 м. При отсутствии СОУ глубина грунта, ниже которой температура не превышает –1 °C, к 2050 г. составит 7 м, а при наличии СОУ – 5,5 м. При использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года слой мерзлоты с температурой ниже –1 °C начинается с глубины 4 м, что практически соответствует естественному состоянию мерзлоты (3,5 м).

Анализ данных температурных полей показал, что наличие СОУ понижает температуру мерзлого грунта на 1,5 °C на расстоянии 0,5 м от СОУ, 1 °C на расстоянии 1 м и 0,6 °C на расстоянии 2 м. Использование СОУ в варианте перевода на работу в теплое время года понизит среднегодовую температуру мерзлого грунта в диапазоне глубин от 0,8 до 8 м на 1,4 °C на расстоянии 0,5 м от СОУ, 1 °C на расстоянии 1 м от СОУ и 0,5 °C на расстоянии 2 м от СОУ. В такой модели климата использование в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года существенно сказывается на состоянии мерзлоты, повышая эффективность применения СОУ на 34-40 %. Для оценки скорости растепления грунта были проведены расчеты и анализ среднегодовых температур для 2020-2050 гг. Среднегодовая температура по глубине грунта в модели без СОУ снижается на 1 °C каждые 10 лет и к 2050 г. составит меньше –1 °C, поддерживаясь с глубины порядка 7 м. Наличие СОУ снизило скорость растепления примерно на 1 °C, а при переводе СОУ на работу в теплое время года дополнительно понизило температуру на 0,5 °C.

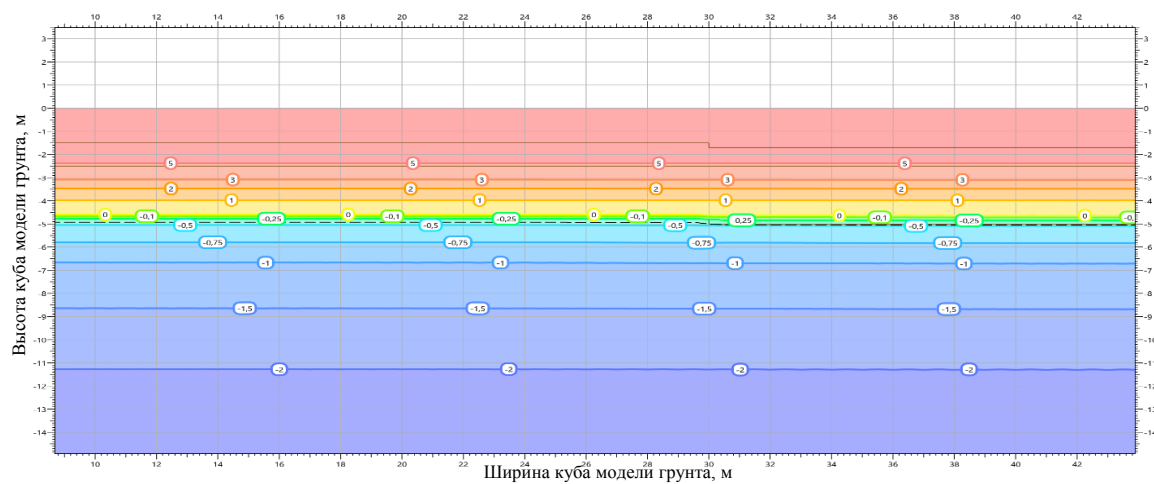
На рис.5 представлены температурные поля мерзлотного состояния грунта модели с потеплением 0,1 °C. В условиях ежегодного потепления на 0,25 °C моделирование показывает деградацию мерзлотного состояния грунта на значительную глубину и масштабное растепление как при отсутствии СОУ, так и его наличии. Вариант перевода СОУ на работу в теплое время года не оказывает значимого положительного эффекта для стабилизации мерзлотного состояния грунта.

Приведены данные по мерзлотному состоянию грунта на 2050 г. при отсутствии СОУ (рис.6, а), наличии СОУ для скважины 1 (рис.6, б) и использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года (рис.6, в). На рис.7 представлены среднегодовые данные о мерзлотном состоянии грунта при потеплении климата на 0,25 °C. При отсутствии СОУ глубина сезонного растепления грунта к 2050 г. составит 9 м, что значительно превышает средний уровень глубины растепления п-ова Ямал на текущий момент (1,5-2,0 м). При наличии СОУ глубина растепления грунта составит 8 м. В варианте перевода СОУ на работу в теплое время года глубина растепления грунта снизится до 6 м. При отсутствии СОУ глубина грунта, ниже которой температура не превышает –1 °C, к 2050 г. составит 11 м, а при наличии СОУ – 10 м. Вариант перевода СОУ на работу в теплое время года не оказал влияние на эту характеристику мерзлотного состояния грунта.

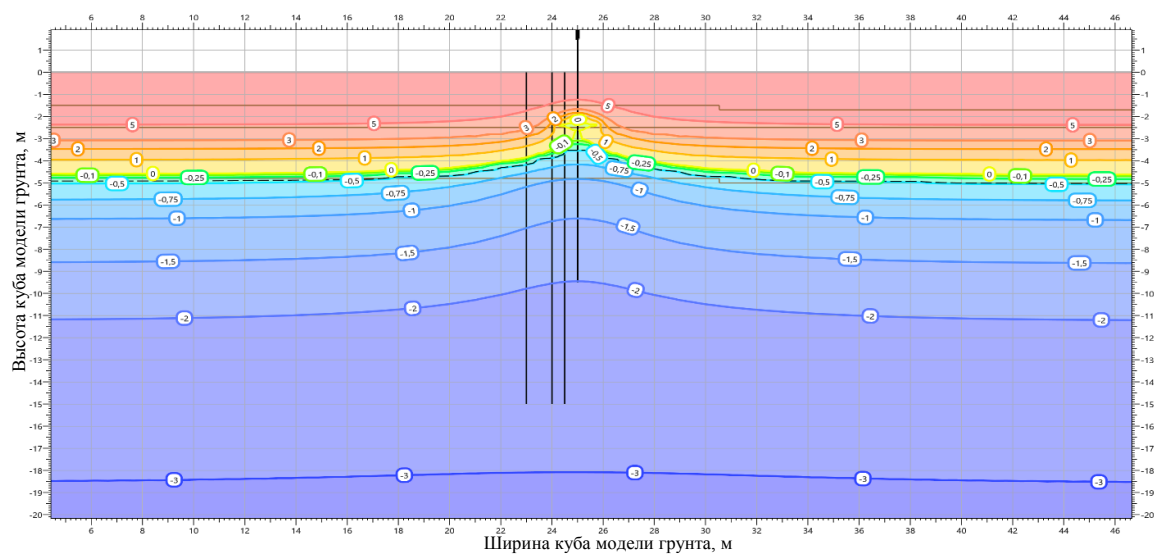
Анализ данных температурных полей показывает, что наличие СОУ снизит температуру грунта на 0,5 °C на расстоянии 0,5 м от СОУ, 0,25 °C на расстоянии 1 м и 0,15 °C на расстоянии 2 м. Вариант перевода СОУ на работу в теплое время года понизит температуру грунта в диапазоне глубин от 0,8 до 8 м на 0,69 °C на расстоянии 0,5 м от СОУ, 0,44 °C на расстоянии 1 м от СОУ



а



б



в

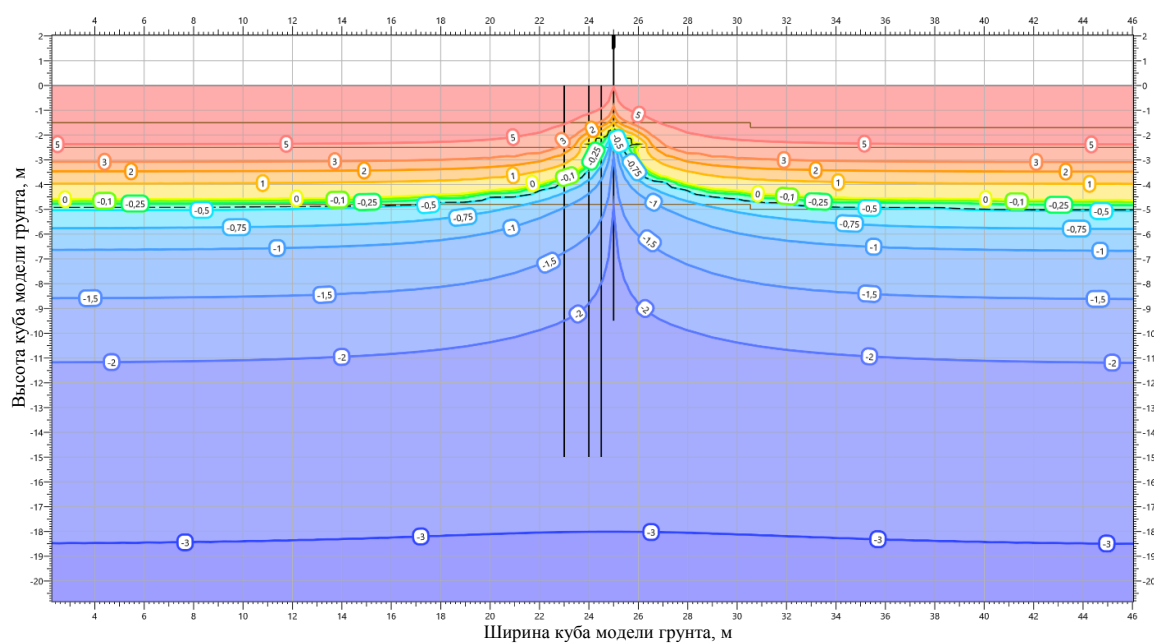


Рис.5. Температурное поле модели на 15.09.2050

По горизонтали указана ось X, по вертикали – ось Z: а – при отсутствии СОУ;

б – при наличии СОУ; в – при использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года

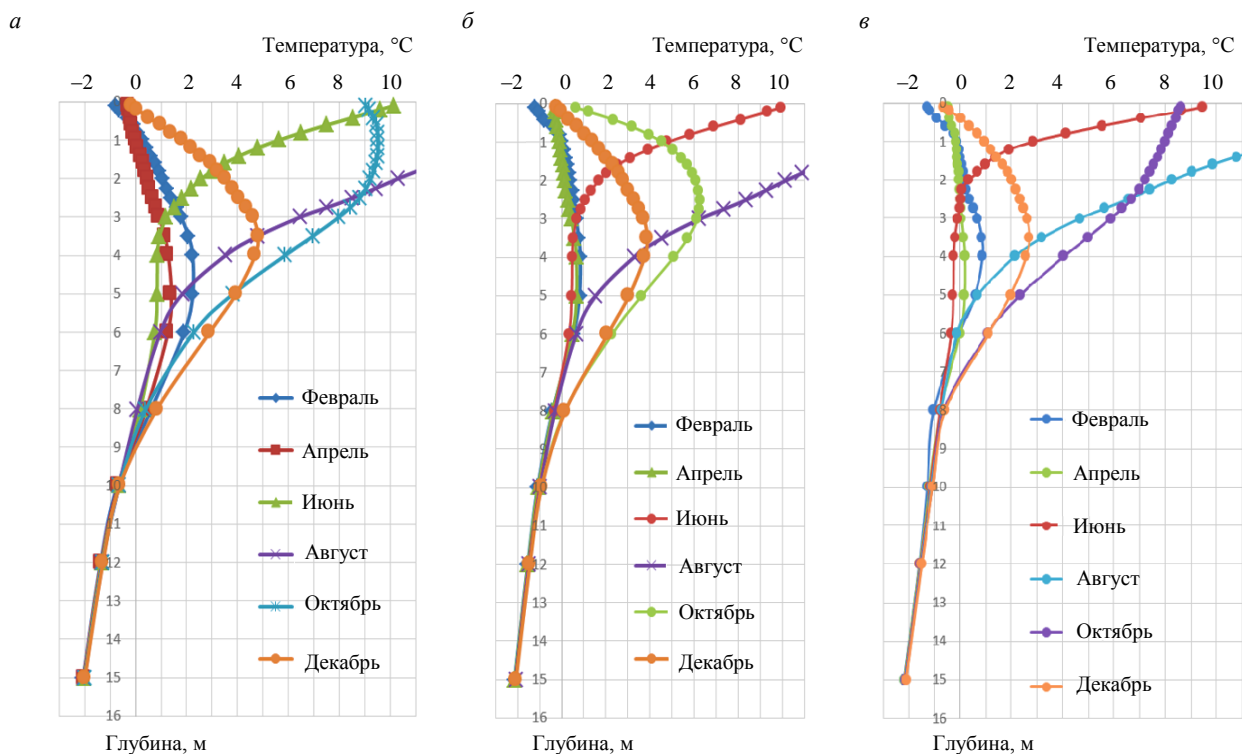
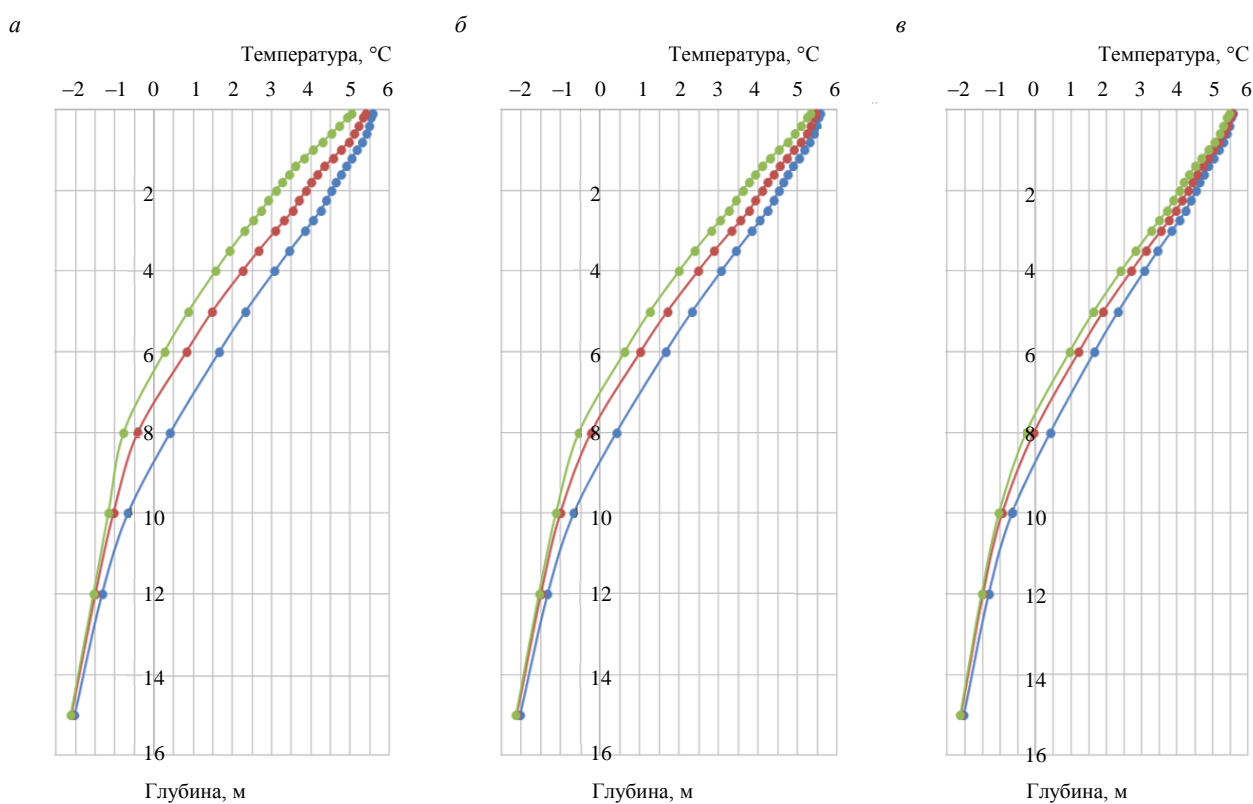


Рис.6. Состояние мерзлого грунта для модели потепления 0,25 °С на 2050 г.

Рис.7. Прогноз среднегодовой температуры грунта на 2050 г. при потеплении 0,25 °С:
а – термоскважина 1; б – термоскважина 2; в – термоскважина 3
Условные обозначения см. на рис.2



и 0,23 °C на расстоянии 2 м от СОУ. При скорости потепления 0,25 °C наличие СОУ фактически не оказало значимого влияния на мерзлотное состояние грунта. В данной модели вариант перевода СОУ на работу в теплое время года почти в два раза повысил эффективность применения СОУ. Тем не менее этого недостаточно для того, чтобы предотвратить масштабное растепление грунта и сохранить мерзлотное состояние грунтов.

Для оценки скорости растепления грунта были проведены расчеты и оценка среднегодовых температур для 2020-2050 гг. Наличие СОУ снизило интенсивность растепления грунта в среднем на 0,5-1 °C, что позволяет на практике дольше эксплуатировать массив грунта в мерзлом состоянии. Скорость потепления 0,25 °C в год уже за 10 лет к 2030 г. приведет к тому, что при наличии СОУ глубина сезонного протаивания увеличится с 1,4 до 2 м, а массив грунта с постоянной температурой ниже -1 °C будет начинаться с глубины 3,5 м вместо 2,75.

Заключение. Расчетные модели, предложенные в работе, позволили провести оценку устойчивости ММГ к процессам потепления и оценить скорость деградации мерзлоты для трех вариантов климата: при наличии СОУ, отсутствии СОУ, а также применении методик повышения эффективности СОУ. Результаты моделирования показали, что эффективность СОУ снижается при любых значениях потепления климата. Модель с трендом потепления 0,1 °C в год демонстрирует масштабное растепление ММГ за 30 лет эксплуатации, что крайне негативно повлияет на несущую способность любых свайных оснований. Наличие СОУ замедляет тенденцию растепления, позволяет почти в два раза сократить масштаб растепления грунта, понизить температуру массива ММГ на 1-1,5 °C, но не останавливает этот процесс. При возможности перевода устройства на работу в летний период удастся сохранить уровень мерзлоты без значимой деградации.

Модель с трендом потепления 0,25 °C в год (для оценки наихудшего сценария) демонстрирует катастрофическое растепление ММГ к 2050 г., СОУ незначительно замедляет такое растепление, позволяя понизить температуру массива ММГ на 0,3-0,8 °C, но не останавливает этот процесс. К 2050 г. в такой катастрофической модели, несмотря на применение СОУ, глубина сезонного растепления грунта увеличится до 8 м при нормальной глубине 1,5 м. Возможность перевода устройства на работу в летний период позволит повысить эффективность СОУ, но не остановить процесс растепления грунта.

Эффективным решением для сохранения ММГ при сценарии с потеплением 0,25 °C в год станут системы принудительного круглогодичного охлаждения, построенные на различных промышленных холодильных машинах. Однако использование их для модернизации существующей инфраструктуры СОУ практически невозможно ввиду значительного количества индивидуально установленных СОУ и большой площади их установки.

В работе выполнено моделирование режима работы СОУ с учетом варианта перевода на работу в теплое время года. Результаты моделирования показали, что такое решение способно повысить эффективность СОУ на 35-40 % и не допустить растепления грунта при наиболее вероятном прогнозе потепления на 0,1 °C в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bondar K.M., Minaev V.A., Faddeev A.O. Cost Estimate for Exploration of Oil and Gas Fields in the Arctic Zone // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1079. № 062069. DOI: [10.1088/1757-899X/1079/6/062069](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/6/062069)
2. Batin E.N., Dedov K.V., Kochegarova N.A. Arctic: the main directions of exploration and development, role in the oil and gas industry, transport system // Science Time. 2015. № 12 (24). P. 47-51.
3. Eppelbaum L.V., Kutasov I.M. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone // Polar Research. 2019. Vol. 38. P. 1-9. DOI: [10.33265/polar.v38.3351](https://doi.org/10.33265/polar.v38.3351)
4. Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V., Trushko V.L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. Vol. 32. Iss. 1. P. 113-119. DOI: [10.1016/j.ijmst.2021.09.010](https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.09.010)
5. Grebnev Y., Moskalev A. Modelling the accidental oil spills at potentially hazardous facilities in the Arctic zone of Krasnoyarsk Krai // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 816. № 012007. DOI: [10.1088/1755-1315/816/1/012007](https://doi.org/10.1088/1755-1315/816/1/012007)
6. Гилев Н.Г., Зенков Е.В., Поверенный Ю.С. и др. Оптимизация капитальных вложений в свайные фундаменты при строительстве объектов нефтегазодобычи на многолетнемерзлых грунтах // Нефтяное хозяйство. 2019. № 11. С. 46-49. DOI: [10.24887/0028-2448-2019-11-46-49](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-11-46-49)



7. Рзаев Ч.Т. Выбор типа конструкций фундаментов на многолетнемерзлых грунтах // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития: Материалы международной научно-практической конференции: в 2 частях, 26 апреля 2017, Вологда, Россия. Вологда: ООО «Маркер», 2017. Ч. 1. С. 25-27.
8. Shepitko T.V., Lutsky S.Y., Nak G.I., Cherkasov A.M. Technological Features of Construction and Reconstruction of Geotechnical Structures in the Arctic Zone // Designs. 2022. Vol. 6. Iss. 2. P. 1-8. DOI: 10.3390/designs6020034
9. Gendler S., Prokhorova E. Risk-Based Methodology for Determining Priority Directions for Improving Occupational Safety in the Mining Industry of the Arctic Zone // Resources. 2021. Vol. 10. Iss. 3. P. 1-14. DOI: 10.3390/resources10030020
10. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 3. С. 362-374. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-362-374
11. Yakushev V.S., Semenov A.P., Bogoyavlensky V.I. et al. Experimental modeling of methane release from intrapermafrost relic gas hydrates when sediment temperature change // Cold Regions Science and Technology. 2018. Vol. 149. P. 46-50. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.02.007
12. Yarmak E. Permafrost Foundations Thermally Stabilized Using Thermosyphons // OTC Arctic Technology Conference, 23-25 March 2015, Copenhagen, Denmark. 2015. № OTC-25500-MS. DOI: 10.4043/25500-MS
13. Колосков Г.В., Ибрагимов Э.В., Гамзаев Р.Г. К вопросу выбора оптимальных систем термостабилизации грунтов при строительстве в криолитозоне // Геотехника. 2015. № 6. С. 4-11.
14. Абросимов А., Залетаев С. Охладители грунтов. Конструкции и методы расчета. London, United Kingdom: Palmarium Academic Publishing, 2012. 392 с.
15. Khrustalev L.N., Emel'yanova L.V. Determination of the Temperature Coefficient for Calculation of the Bearing Capacity of Permafrost Beds in a Changing Climate // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2013. Vol. 50. № 1. P. 19-23. DOI: 10.1007/s11204-013-9204-1
16. Васильев Г.Г., Джалябов А.А., Леонович И.А. Исследование влияния климатического фактора на динамику мерзлотного состояния оснований объектов нефтегазового комплекса // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М.Губкина. 2021. № 3 (304). С. 67-79. DOI: 10.33285/2073-9028-2021-3(304)-67-79
17. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. by H.-O.Pörtner, D.C.Roberts, M.Tignor. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844
18. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Под ред. В.М.Катцова. СПб: Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова, 2017. 106 с.
19. Anisimov O., Kokorev V. Cities of the Russian North in the Context of Climate Change // Sustaining Russia's Arctic Cities: Resource Politics, Migration, and Climate Change. 2016. Vol. 2. P. 141-174. DOI: 10.2307/j.ctvswx6s0.12
20. Никифорова Н.С., Коннов А.В. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата // Construction and Geotechnics. 2021. Т. 12. № 3. С. 14-24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02
21. Nikiforova N.S., Konnov A.B. Influence of permafrost degradation on piles bearing capacity // Journal of Physics: Conference Series. Deep Foundations and geotechnical problems of territories, 26-28 May 2021, Perm, Russian Federation. 2021. Vol. 1928. № 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012046
22. Стрижков С.Н. К вопросу о качестве работы сезонно-действующих охлаждающих устройств // Геоинфо: независимый электронный журнал. 2017. URL: <http://www.geoinfo.ru/product/strizhkov-sergej-nikolaevich/k-voprosu-o-kachestve-raboty-sezonno-dejstvuyushchih-ohlazhdayushchih-ustrojstv-35150.shtml> (дата обращения 15.08.2022).
23. Преснов О.М., Мелихов В.П., Зайцев С.А., Сливина Д.М. Возведение свай в условиях вечной мерзлоты // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 2 (116). Ч. 1. С. 41-43. DOI: 10.23670/IRJ.2022.116.2.006
24. Васильев Г.Г., Джалябов А.А., Леонович И.А. Исследование температурного режима многолетнемерзлых грунтов основания объектов нефтегазового комплекса, оборудованных сезонно действующими охлаждающими устройствами // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2021. № 4 (124). С. 75-80. DOI: 10.33285/1999-6934-2021-4(124)-75-80
25. Чжан А.А., Ашпи Е.С., Хрусталева Л.Н., Шестернев Д.М. Новый способ защиты мерзлых грунтов основания насыпи от оттаивания // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 3. С. 67-71. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-3(67-71)
26. Васильев Г.Г., Джалябов А.А., Леонович И.А. Анализ причин возникновения деформаций инженерных сооружений объектов газового комплекса в криолитозоне // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 377-385. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.6
27. Loli M., Tsatsis A., Kourkoulis R., Anastasopoulos I. A simplified numerical method to simulate the thawing of frozen soil // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 173. P. 1-49. DOI: 10.1680/jgeen.18.00239
28. Weismüller J., Wollschläger U., Boike J. et al. Modeling the thermal dynamics of the active layer at two contrasting permafrost sites on Svalbard and on the Tibetan Plateau // The Cryosphere. 2011. Vol. 5. Iss. 3. P. 741-757. DOI: 10.5194/tc-5-741-2011
29. Buslaev G., Tsvetkov P., Lavrik A. et al. Ensuring the Sustainability of Arctic Industrial Facilities under Conditions of Global Climate Change // Resources. 2021. Vol. 10. № 12. P. 1-15. DOI: 10.3390/resources10120128
30. Рязанов А.В., Усачев А.А. Особенности расчета температурного режима многолетнемерзлых грунтов оснований буронабивных свай мостовых переходов // Фундаменты. 2021. № 4 (6). С. 49-51.
31. Рязанов А.В. Особенности проектирования фундаментов сооружений на многолетнемерзлых грунтах в условиях потепления климата // Фундаменты. 2021. № 1 (3). С. 10-13.
32. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России / О.Н.Булыгина, В.Н.Разуваев, Л.Т.Трофименко, Н.В.Швец. URL: <http://mete.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения 06.09.2022).



33. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621201. Описание массива данных характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР / О.Н.Булыгина, В.Н.Разуваев, Т.М.Александрова. URL: <http://meteo.ru/data/165-snow-cover#описание-массива-данных> (дата обращения 06.09.2022).

34. Груза Г.В., Бардин М.Ю., Платова Т.В. и др. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. М.: Росгидромет, 2017. 70 с.

Авторы: **О.М.Ермилов**, д-р техн. наук, академик РАН, заместитель главного инженера по науке (ООО «Газпром добыча Надым», Надым, Россия), **А.А.Джалябов**, генеральный директор, <https://orcid.org/0000-0002-4269-5555> (ООО «Газпром добыча Ноябрьск», Ноябрьск, Россия), **Г.Г.Васильев**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0002-9503-7337> (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия), **И.А.Леонович**, канд. техн. наук, доцент, ned.flander@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9054-1537> (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Прогнозная оценка разубоживания руды при отработке маломощных крутопадающих залежей системой подэтажных штреков

А.Ж.Имашев, А.М.Суимбаева✉, А.А.Мусин

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

Как цитировать эту статью: Имашев А.Ж., Суимбаева А.М., Мусин А.А. Прогнозная оценка разубоживания руды при отработке маломощных крутопадающих залежей системой подэтажных штреков // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 283-294. EDN GPKBJ

Аннотация. Цель исследования – изучение напряженно-деформированного состояния приконтурного массива горных пород вокруг очистного блока и прогнозная оценка разубоживания руды с учетом изменения мощности рудного тела при отработке маломощных рудных залежей на примере рудника Жолымбет. Изучение особенностей формирования напряженно-деформированного состояния проводилось по методике, основанной на использовании численных методов исследований с учетом геологического индекса прочности (GSI), который позволяет учитывать структурные особенности горных пород, трещиноватость, литологию, обводненность и другие прочностные показатели, за счет чего происходит корректный переход от прочности образца горных пород к прочности массива. Результаты численного анализа напряженно-деформированного состояния приконтурной части массива горных пород методом конечных элементов по критерию прочности Хока – Брона позволили оценить геомеханическое состояние в приконтурном массиве при условии изменения мощности рудного тела и прогнозировать объем разубоживания руды. Установлено, что при отработке рудных залежей малой мощности на прогнозное значение разубоживания руды оказывают влияние мощность рудного тела и GSI. Получена зависимость изменения значений разубоживания руды от GSI с учетом изменения мощности рудного тела от 1 до 3 м. Анализ результатов исследования показал, что прогнозные размеры зоны разрушения пород вокруг очистных блоков имеют достаточно большие значения, за счет чего не достигаются показатели планового разубоживания руды. Возникает необходимость снижения сейсмического воздействия силы взрыва на законтурный массив горных пород и обновления паспорта буровзрывных работ.

Ключевые слова: разубоживание руды; маломощные рудные тела; численное моделирование; напряженно-деформированное состояние; геологический индекс прочности

Благодарность. Исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант AP13268891).

Поступила: 14.03.2023

Принята: 25.10.2023

Онлайн: 22.02.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. В мировой практике горнодобывающего производства разработка месторождений маломощных рудных залежей все чаще производится системой подэтажных штреков [1-3]. Главным преимуществом такой системы разработки является ее высокая производительность, а одним из основных недостатков – высокие показатели потерь и разубоживания руды. Высокий уровень разубоживания руды приводит к увеличению расходов на транспортировку и переработку руды, соответственно увеличивается себестоимость полезного ископаемого [4-6]. Исследования в рамках данной работы направлены на установление зависимости показателя разубоживания руды от значений рейтинговой оценки массива горных пород.

Используются различные комплексы мероприятий и рекомендаций с целью существенного снижения разубоживания руды. Они связаны с выбором системы разработки в соответствии с геологическим строением месторождения и способом его вскрытия, совершенствованием технологии разработки, изменением основных параметров систем разработки, внедрением дополнительных элементов к применяемой технологии, ведением раздельной отработки части запасов и т.д. Существует достаточно большое количество методов определения и учета разубоживания руды. За последние десятилетия в развитие и совершенствование методик расчета разубоживания руды



внесли большой вклад такие исследователи, как S.Korigov [7], H.D.Jang [8], I.Masoumi [9], E.Villaescusa [10], A.Papaioanou [11], М.Маринин [12], С.Н.Фомин [13], В.М.Лизункин [14], И.Н.Савич [15], С.М.Ткач [16], С.А.Батугин [17], И.В.Соколов [18], А.М.Павлов [19], М.Mohseni [20], E.Topal [21], М.А.Hefni [22, 23], D.P.Cordova [24], T.R.Câmara [25] и др.

Проблема разубоживания руды при отработке маломощных месторождений весьма актуальна. Особенностью технологии освоения месторождений маломощных залежей системой подэтажных штреков является сверхплановое разубоживание руды за счет прихвата прилегающей толщи вмещающих горных пород. Например, на руднике Жолымбет при ведении очистных работ происходит сверхплановое разубоживание руды – фактические показатели достигают 70-75 % при утвержденных проектных не более 38 %. Исходя из горно-геологических условий залегания рудных залежей и горнотехнических возможностей рудника принята система разработки подэтажных штреков.

Цель исследования – прогнозная оценка первичного разубоживания руды на основе изучения структурных свойств массива с учетом изменения мощности рудного тела при отработке маломощных рудных залежей рудника Жолымбет.

На месторождении Жолымбет территориально выделены два разобщенных между собой золотосодержащих участка: Центральный и Южный. Центральный участок по запасам является наиболее крупным, продуктивным и перспективным. Выявлены два морфологических типа рудных тел: золотосодержащие кварцевые жилы и штокверковые зоны. Длина жил по простиранию – 100-150 м, падению до 100-150 м, мощность жил колеблется от 0,5 до 3,0 м, угол падения обычно крутой, варьируется от 45 до 80°. Коэффициент крепости по М.М.Протодаконову f для кварцевых жил – 12-15, штокверковых руд – 10-15, вмещающих пород – 10-16. По буримости породы относятся к XVI категории. Объемный вес руд и пород в среднем равен 2,7 т/м³.

Методы. Уровень разубоживания руды определяется морфологическим строением рудных залежей, применяемой системой разработки месторождения, параметрами отбойки руды, структурными и прочностными свойствами массива, воздействием силы взрыва на вмещающие породы, применением искусственного поддержания выработанного пространства, природным полем напряжений массива горных пород, геометрическими характеристиками жилы, мощности и падения рудного тела [26].

Перечисленные показатели классифицированы [8] по характеристике бурения и взрывных работ; конструктивным факторам очистного забоя; горно-геологическим факторам; человеческим факторам (ошибка горнорабочих при буровзрывных работах, неверный прогноз контуров рудного тела геолого-маркшейдерской службой и т.д.).

В мировой практике существует несколько методов определения разубоживания руды. Два из них, согласно исследованиям R.C.Pakalnis [27], являются наиболее распространенными:

- Разубоживание руды = Добытые тонны породы × 100 / Добытые тонны руды.
- Разубоживание руды = Добытые тонны породы × 100 / (Добытые тонны руды + Добытые тонны породы).

Термин «порода» относится к внешнему разубоживанию или незапланированной добытой разубоживающей породе, а термин «руда» – к тому материалу, который по плану будет добыт, т.е. обурен и взорван. L.M.Clark и R.C.Pakalnis на основе объема законтурного обрушения и размеров забоя очистного пространства определили эквивалентный показатель линейного обрушения (Equivalent Linear Overbreak Slough – ELOS), который является косвенным количественным показателем разубоживания руды [24, 28]. Показатели ELOS и разубоживания руды определяются следующим образом:

$$ELOS = \frac{V_{обр}}{S_{оч.з}}, \quad (1)$$

где $V_{обр}$ – объем обрушенной массы горных пород, м³; $S_{оч.з}$ – площадь поверхности очистного забоя, м²;

$$r_p = \frac{ELOS}{m} \cdot 100, \quad (2)$$

r_p – разубоживание руды, %; m – мощность рудного тела, м.



J.G.Henning и H.S.Mitri [24] разработали аналогичный ELOS метод определения разубоживания руды на основе 3D-численной модели, где граница разубоживания представлена изолинией минимального главного напряжения, равной нулю ($\sigma_3 = 0$ МПа). Использовался термин «плотность разубоживания руды» (dilution density, DD), который определяется соотношением незапланированного объема разубоживания к площади очистного забоя,

$$DD = \frac{V_{н.з.р.}}{S_{оч.з.}}, \quad (3)$$

где $V_{н.з.р.}$ – незапланированный объем разубоживания, м^3 .

Важным фактором, который следует учитывать при управлении разубоживанием руды, является надлежащий проект эксплуатации рудника с точки зрения устойчивости массива горных пород. Обрушения вмещающих пород с кровли и боков выработок, связанные с плохими условиями устойчивости массива, не только представляют угрозу для общей безопасности горняков, но и в значительной степени способствуют увеличению объема разубоживания руды. Для снижения разубоживания требуется комплекс исследований структурных и прочностных свойств горных пород, напряженно-деформационного состояния массива, сейсмического воздействия буровзрывных работ и т.д.

Один из традиционных инструментов для оценки и управления состоянием горного массива – эмпирический график устойчивости, разработанный К.Е.Mathews [29], который оказался полезным для ранней оценки состояния устойчивости открытого очистного пространства. Графический метод устойчивости К.Е.Mathews основывается на вычислении и картировании двух величин:

- показатель устойчивости N , характеризующий способность горного массива оставаться неизменным при данных условиях напряженного состояния, структурной организации нарушений массива и ориентации очистного пространства;
- гидравлический радиус, на долю которого приходится геометрическая взаимозависимость размеров обнажения,

$$HR = \frac{S_{оч.з.}}{P_{оч.з.}}, \quad (4)$$

где $P_{оч.з.}$ – периметр обнажения, м.

Показатель устойчивости рассчитывается по формуле

$$N = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} ABC, \quad (5)$$

где RQD – качество породы [30]; J_n – количество систем трещин; J_r – шероховатость поверхности трещин; J_a – измененность (сцепление) трещин; A – отношение прочности к напряженному состоянию пород; B – ориентация трещин; C – угол падения (наклона) обнажения.

С течением времени для повышения надежности график устойчивости К.Е.Mathews обновлен значительными изменениями и модифицирован такими исследователями, как Y.Potvin [31], S.D.Nickson [32], C.Mawdesley, R.Trueman, W.Whiten [33], A.Papaioanou [11]. Благодаря этим модификациям стало возможно по графикам устойчивости определять объем разубоживания руды. Особого внимания заслуживают работы А.Рараіоану и F.Suorineni [11], так как разработанный ими обобщенный график определения разубоживания руды на основе устойчивости массива применим ко всем рудным залежам, независимо от мощности рудного тела.

В работе А.Делентас [34] прогнозные оценки обрушения приконтурного массива и разубоживания руды выполняются методами численного моделирования. Программы численного моделирования позволяют прогнозировать напряженно-деформированное состояние массива горных пород за контурами очистного забоя, которые потенциально могут обрушиться. В условиях, когда руда и порода имеют одинаковый удельный вес, коэффициент разубоживания руды рассчитывается по уравнению



$$K_{\text{обр}} = K_r = \frac{100S_{\text{з.обр}}}{S_{\text{оч.з}}}, \quad (6)$$

где $K_{\text{обр}}$ – коэффициент обрушения; K_r – коэффициент разубоживания; $S_{\text{з.обр}}$ – площадь зоны обрушения, м^2 .

На месторождении Жолымбет принят подземный способ отработки с горизонтами 60 м и использованием наклонных съездов. Оработка кварцевых жил ведется системой подэтажных штреков. При такой системе жила разбивается по простиранию и падению на блоки со следующими параметрами: длина блока по простиранию жилы – 120 м, высота блока по простиранию на всю высоту этажа по падению рудного тела с разбивкой на подэтажи – 15 м. Оработка осуществляется от фланга к центру жилы по восстанию в нисходящем порядке. Принципиальная схема системы разработки приведена на рис.1.

Очистную выемку руды в блоке на подэтажах начинают с проходки в буродоставочных штреках отрезных восстающих с разделкой на них отрезных щелей. Рудный массив отбивают на заранее пройденный отрезной восстающий (компенсационное пространство). Шаг опережения выемки верхних подэтажей по отношению к нижним равен 20-30 м. Схема и параметры отбойки руды приведены на рис.2. Основные показатели скважинной отбойки руды: тип применяемого ВВ – гранулит АС-8; способ инициирования – с помощью ДШЭ; удельный расход ВВ – $1,75 \text{ кг/м}^3$; диаметр скважины – 130 мм; ЛНС – 1,6 м; расстояние между концами скважин – 1,75 м.

Для прогнозной оценки разубоживания руды при отбойке маломощных рудных тел выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Ключевыми исходными данными приняты предел прочности образцов горных пород на одноосное сжатие ($\sigma_{\text{сж}}$),

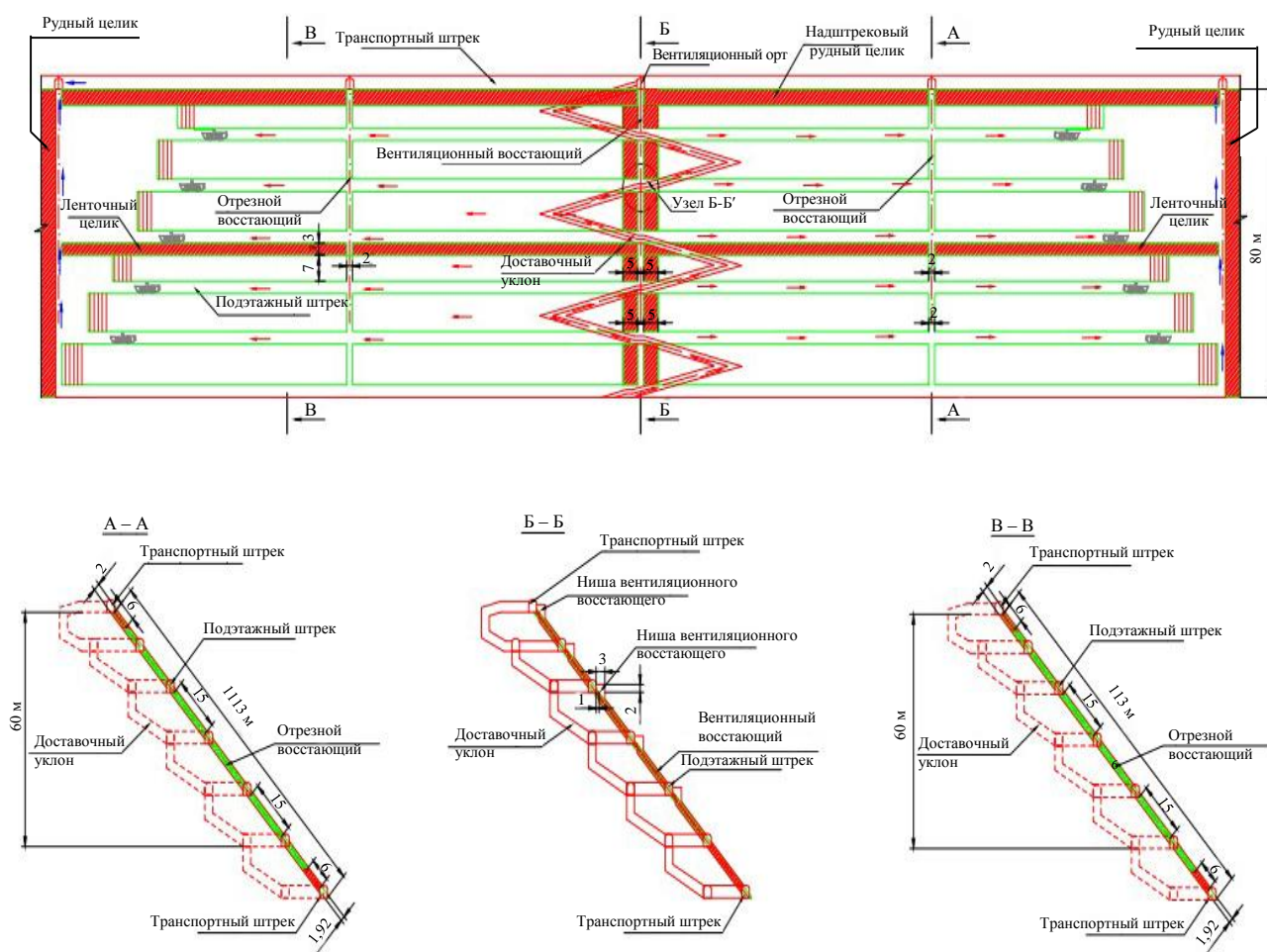


Рис.1. Принципиальная схема системы разработки

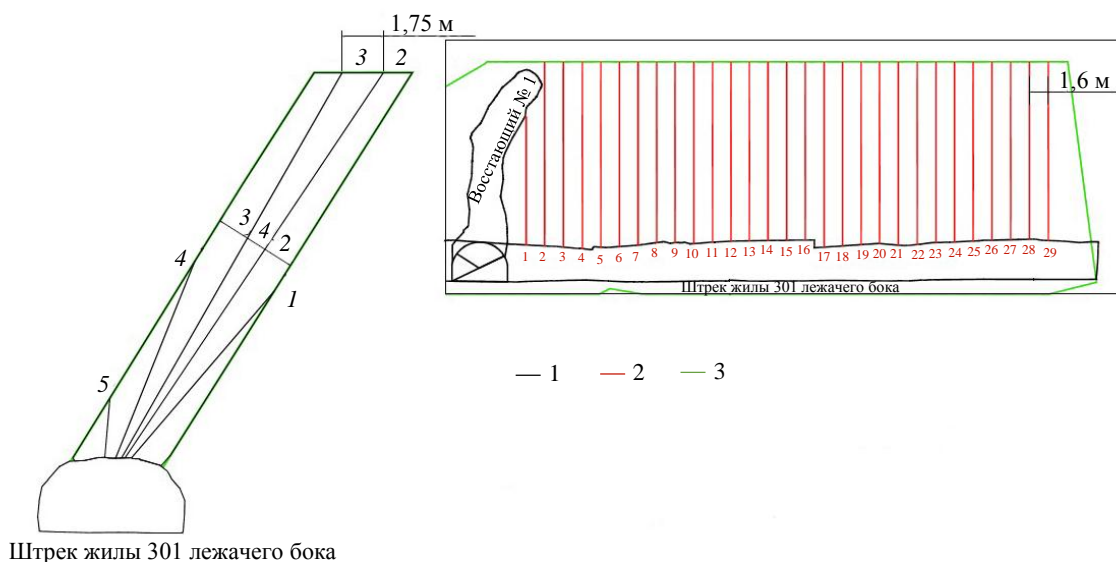


Рис.2. Схема скважинной отбойки руды

1 – существующие горные выработки гор. 800 м; 2 – проектируемые веера; 3 – рудный контур;
1-5 – номера скважин в ряду

мощность рудного тела (m) и геологический индекс прочности горных пород (GSI – Geological Strength Index) [35, 36], который позволяет учесть трещиноватость горных пород, обводненность, литологию и другие прочностные показатели, за счет чего происходит переход от прочности образца горных пород к прочности массива. В качестве критерия разрушения выбран критерий Хоек – Браун [37]. Численное моделирование по определению возможных зон разрушения горных пород выполнено методом конечных элементов [38]. В результате моделирования определяются площади возможных зон разрушений вокруг очистного блока. Площади участков приконтурного массива, которые, как ожидается, могут обрушиться, рассчитываются с использованием ПО «AutoCAD», с помощью данной программы выполняется количественное измерение площадей возможных зон обрушения. Далее по формуле (6) осуществляется расчет разубоживания руды.

Расчет прогнозных значений разубоживания руды по данной методике производится на основе комплекса геотехнических исследований, которые включают натурные исследования по определению GSI и численное моделирование геомеханических процессов, протекающих в приконтурном массиве. Такая методика является наиболее применимой к условиям исследуемого объекта, так как на руднике Жолымбет руда и порода имеют в среднем одинаковый удельный вес. Достоверность результатов численного моделирования в основном зависит от точности вводимых исходных данных. Подготовка исходных данных для численного анализа выполнена с помощью ПО «RSDData», которое дает возможность определить параметры прочности массива горных пород на основе критериев разрушения Хоек – Браун [37] и Mohr – Coulomb [39].

Важная составляющая исходных данных – GSI. Параметр GSI является результатом исследований Е.Хоек и Е.Т.Браун по изучению структурных особенностей и свойств горных пород. Классификация все время совершенствуется в зависимости от запросов, вытекающих из практики проектирования. В одном из последних исследований Е.Хоек и Е.Т.Браун предложено определять индекс GSI следующим образом [40]:

$$GSI = 1,5JCond_{89} + \frac{RQD}{2}, \quad (7)$$

где $JCond_{89}$ – параметр рейтинговой классификации трещиноватости горных пород, которая определяется в соответствии с методикой Международного общества по механике горных пород (ISRM) [41];

$$JCond_{89} = J_{A4} = J_{A41} + J_{A42} + J_{A43} + J_{A44} + J_{A45},$$



J_{A4} – показатель качества контакта по трещинам: J_{A41} – шероховатости, J_{A42} – длины, J_{A43} – раскрытия, J_{A44} – заполнения, J_{A45} – выветрелости стенок трещин.

При оценке геомеханического состояния массива горных пород использованы данные геологической службы рудника Жолымбет [42]. По характеристикам керна данных скважин горные породы разделены на три домена:

- выветрелые породы до глубины 30-40 м, RQD = 12-34 (категория горной породы «слабые»);
- слабыветрелые алевропесчаники, окварцованные массивной текстурой, RQD = 50-72 (категория горной породы «средние»);
- габбродиориты зеленовато-серые, плотные, массивные, RQD = 72-78 (категория горной породы «крепкие») [42].

На руднике Жолымбет рудные жилы малой мощности залегают на глубине от 800 м, поэтому для определения индексов GSI значения RQD приняты от 50 до 80. В результате проведенных шахтных исследований на руднике Жолымбет в ходе съемки трещиноватости определены показатели рейтинга, слагающие показатель качества контакта по трещинам согласно методике ISRM [41]. Значения в баллах приведены в табл.1, где $J_{Cond89} = J_{A4} = J_{A41} + J_{A42} + J_{A43} + J_{A44} + J_{A45} = 5 + 2 + 1 + 2 + 5 = 15$.

Таблица 1

Рейтинговые оценки геологической характеристики трещиноватости
для условий месторождения Жолымбет

Параметр	Интервалы значений				
	Очень шероховатые	Шероховатые	Слегка шероховатые	Гладкие поверхности	Следы скольжения
J_{A41}	6	5	3	1	0
Длина	< 1 м	1-3 м	3-10 м	10-20 м	> 20 м
J_{A42}	6	4	2	1	0
Раскрытие	Нет	< 0,1 мм	0,1-1,0 мм	1-5 мм	> 5 мм
J_{A43}	6	5	4	1	0
Заполнитель	Нет	Твердый заполнитель < 5 мм	Твердый заполнитель > 5 мм	Мягкий заполнитель < 5 мм	Мягкий заполнитель > 5 мм
J_{A44}	6	4	2	2	0
Выветрелость стенок	Нет	Слегка выветрелые	Средневыветрелые	Сильновыветрелые	Раздробленные
J_{A45}	6	5	3	1	0

После комплекса геотехнических исследований установлены геологические индексы прочности согласно формуле (7) для различных значений RQD и подготовлены данные для моделирования (табл.2).

Таблица 2

Исходные данные для численного моделирования

Тип породы	RQD	GSI	Прочность породы σ_{ci} , МПа	Объемный вес породы	Нарушение массива взрывными работами D	Параметр ненарушенной породы m_i	Модуль Юнга
Алевропесчаники	50	48	82	2,65	0,8	17	2800
Алевропесчаники	55	50	82	2,65	0,8	17	2800
Алевропесчаники	60	53	82	2,65	0,8	17	2800
Алевропесчаники	65	55	82	2,65	0,8	17	2800
Габбродиориты	70	58	103	2,76	0,8	25	3000
Габбродиориты	75	60	103	2,76	0,8	25	3000
Габбродиориты	80	63	103	2,76	0,8	25	3000



Для численного анализа напряженно-деформированного состояния приконтурного массива и прогнозной оценки разубоживания руды реализована 21 модель с учетом изменения GSI (48, 50, 53, 55, 58, 60, 63) и мощности рудного тела от 1 до 3 м. Численный анализ напряженно-деформированного состояния массива проведен в соответствии с фактическим горизонтом разработки и следующими параметрами очистного блока: глубина разработки 800 м; высота очистного блока 45 м; высота подэтажа 15 м; ширина 1-3 м; угол залегания рудного тела 75°. Основным прогнозным показателем для оценки устойчивости и анализа напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистного блока является фактор прочности (Strength Factor) – отношение возможной прочности горной породы к вызванному напряжению в рассматриваемой точке.

Обсуждение результатов. Не представляется возможным оценить результаты численного моделирования 21-го варианта моделей, поэтому целесообразно провести анализ напряженно-деформированного состояния массива вокруг очистного блока и дать прогнозную оценку разубоживания руды для минимального и максимального значений GSI. Далее будут представлены результаты численного моделирования при GSI = 48 и 63 для мощности рудного тела от 1 до 3 м.

При отработке маломощных залежей рудника Жолымбет отставание нижележащего подэтажа от вышележащего достигает 20-30 м. Отбойка вышележащего подэтажа производится путем взрывания взрывных вееров и отгрузки отбитой горной массы с помощью самоходной техники. Очистное пространство остается открытым, т.е. погашения очистного пространства не производится. Следовательно, при численном моделировании и прогнозной оценке разубоживания руды нижележащего (неотработанного) подэтажа учитывается влияние очистного пространства вышележащего отработанного подэтажа (рис.3).

Анализ картины распределения изолиний по фактору прочности показал, что при GSI = 48 (алевролиты) наблюдается равномерное распределение запаса прочности по контуру очистного блока, заметны незначительные деформации по кровле, а также перераспределение нагрузки на бока очистного блока, прогнозируется обрушение под собственным весом по причине структурного ослабления массива, слабого сцепления пород между собой из-за влияния взрывных работ и в дальнейшем возможны обрушения горной массы. Площадь возможной зоны обрушения изменяется в зависимости от мощности рудного тела – от 85,2 м² при $m = 1$ м до 77,8 м² при $m = 3$ м соответственно.

При GSI = 63 (габбродииориты) наблюдаются неравномерные распределения изолиний запаса прочности и контуры отличаются от предыдущего варианта, в боках очистных блоков прогнозируются возможные зоны разрушения массива. Площади возможных зон обрушения изменяются в зависимости от мощности рудного тела – от 29,1 м² при $m = 1$ м до 25,1 м² при $m = 3$ м соответственно. По сравнению с предыдущим случаем, площади возможных зон обрушения снижаются почти в три раза. Таким образом, при GSI = 63 наблюдается увеличение запаса прочности и уменьшение объема и площади возможного обрушения вокруг очистного блока. Это связано с изменением прочностных свойств и структурных особенностей массива горных пород.

Опыт ведения горных работ по отработке маломощных залежей на рудниках Жолымбет и Акбакай показывает, что на размеры возможных зон разрушения вокруг очистного блока мощность рудных тел существенного влияния не оказывает [43]. Предположительно, размеры зоны разрушения зависят от параметров буровзрывных работ и сейсмической силы взрыва на законтурный массив горных пород.

В результате моделирования определены площади возможных зон разрушений вокруг очистного блока для всех вариантов моделей (рис.4). С использованием данных из результатов численного моделирования о площади возможной зоны обрушения вокруг очистного блока по формуле (6) определены прогнозные значения разубоживания руды для каждой исследуемой модели с учетом изменения GSI (48, 50, 53, 55, 58, 60, 63) и мощности рудного тела от 1 до 3 м (табл.3).

На рис.5 представлена сводная и сравнительная диаграммы изменения прогнозных значений разубоживания руды в зависимости от GSI при отработке маломощных рудных жил. Согласно прогнозным расчетам, при ведении очистных работ по кварцевым жилам мощностью 1 м прогнозные показатели разубоживания руды составляют в среднем 78-84 %, в то время как фактические показатели разубоживания при отработке рудных тел той же мощности достигают 65-70 %.

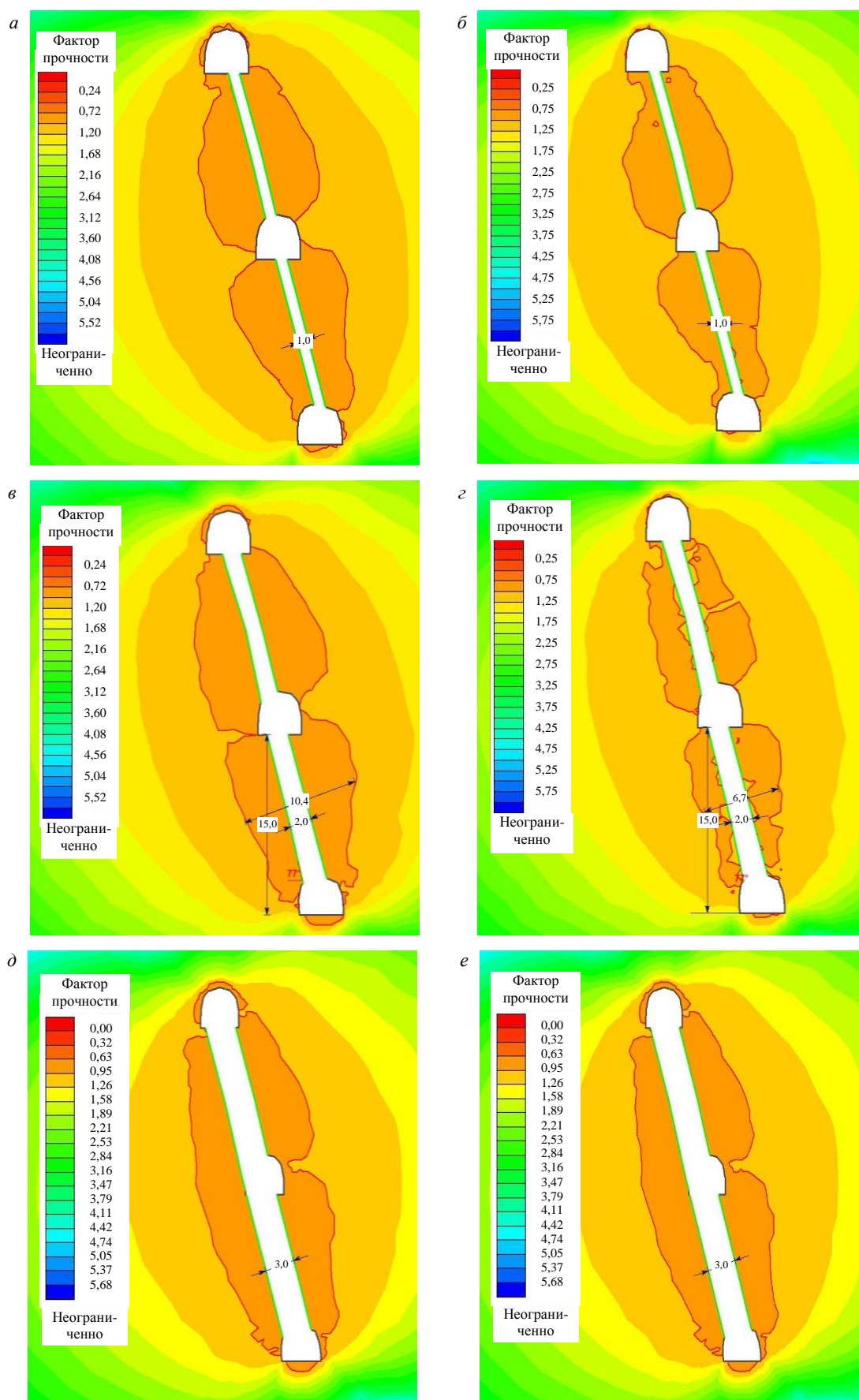


Рис.3. Площади возможных зон разрушений при $GSI = 48$ (а, в, д) и $GSI = 63$ (б, г, е):
а, б – мощность рудного тела 1 м; в, г – 2 м; д, е – 3 м

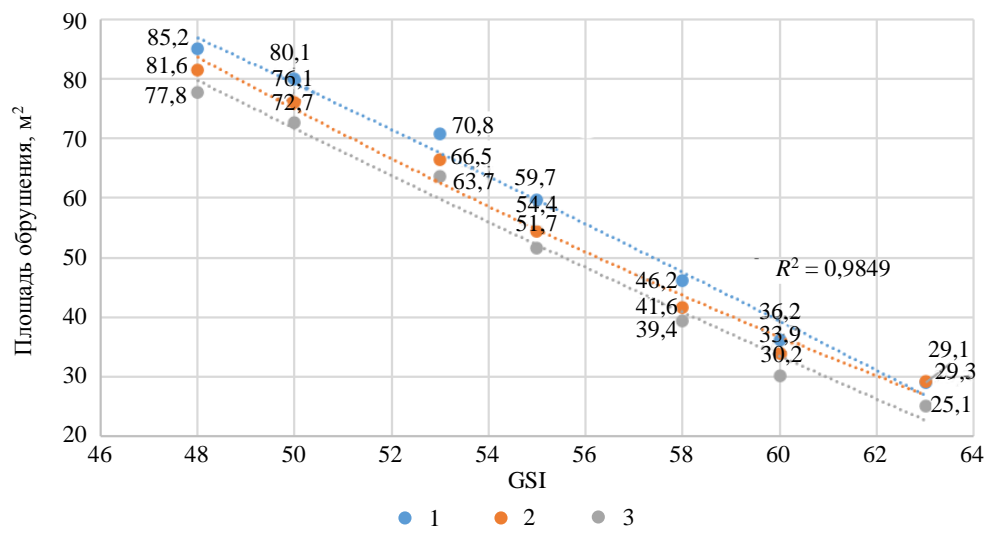


Рис.4. График изменения мощности возможной зоны обрушения в зависимости от GSI
1 – мощность 1 м; 2 – 2 м; 3 – 3 м

Таблица 3

Прогнозные значения разубоживания руды маломощных залежей рудника Жолымбет

GSI	Мощность рудного тела, м					
	1		2		3	
	Площадь возможной зоны обрушения, м²	Разубоживание, %	Площадь возможной зоны обрушения, м²	Разубоживание, %	Площадь возможной зоны обрушения, м²	Разубоживание, %
63	29,1	70,6	29,3	51,7	25,1	40,1
60	36,2	74,3	33,9	55,2	30,2	44,3
58	46,2	78,1	41,6	58,6	39,4	48,4
55	59,7	82,3	54,4	65,4	51,7	56,5
53	70,8	84,5	66,5	70,1	63,7	60,2
50	80,1	86,8	76,1	73,5	72,7	65,8
48	85,2	87,5	81,6	74,9	77,8	67,3

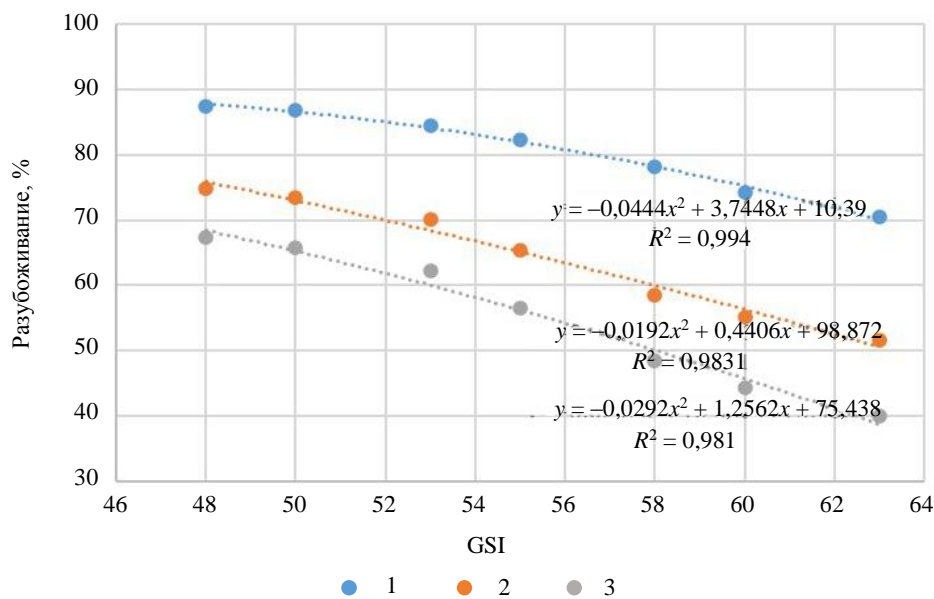


Рис.5. График изменения прогнозных значений разубоживания руды в зависимости от GSI
1 – мощность 1 м; 2 – 2 м; 3 – 3 м



Результаты исследования показывают, что на прогнозные значения разубоживания руды оказывают влияние мощность рудного тела и геологический индекс прочности, который учитывает геологические особенности породного массива, его структуру и трещиноватость. Установлена зависимость показателя разубоживания руды от показателя GSI при различной мощности рудного тела.

Необходимо отметить, что при проведении численного анализа детально не учитывалось сейсмическое влияние силы взрыва на законтурный массив горных пород. Но при выполнении численного моделирования использовался показатель нарушенности горных пород взрывными работами D , значение которого соответствовало хорошему качеству ведения взрывных работ. В дальнейшем планируется проведение исследований по установлению закономерности изменения показателя нарушенности массива взрывными работами в зависимости от категории устойчивости горных пород. Это позволит сделать корректировку геомеханической модели при численном анализе и более корректно оценивать геомеханическое состояние и прогнозировать разубоживание руды при отработке маломощных рудных тел.

Заключение. Обзорный анализ методов определения и учета разубоживания руды показал, что в зарубежной практике расчет разубоживания руды производится на основе исследований напряженно-деформированного состояния массива горных пород и прогнозной оценки обрушения приконтурного массива с использованием рейтинговых классификаций горных пород и методами численного моделирования. Сопоставление прогнозных значений разубоживания руды с фактическими показателями подтверждает хорошую сходимость результатов исследования, которая составила порядка 83 %.

По результатам проведенного численного анализа можно полагать, что при разработке маломощных месторождений на прогнозные значения разубоживания руды оказывают влияние мощность рудного тела и GSI. Анализ результатов исследования показал, что с уменьшением показателя GSI наблюдается снижение запаса прочности и увеличение площади возможного обрушения вокруг очистного блока. Соответственно увеличивается объем разубоживания руды за счет прихвата прилегающей толщи вмещающих горных пород. Дальнейшее направление исследований заключается в совершенствовании методики определения параметров буровзрывных работ с учетом рейтинга GSI для условий отработки маломощных рудных тел системами с обрушением руды и вмещающих пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chilala G.C., de Assuncao J., Harris R., Stephenson R.M. Initial effects of improved drill and blast practices on stope stability at Acacia's Bulyanhulu Mine // *Underground Design Methods 2015: Proceedings of the International Seminar on Design Methods in Underground Mining*, 17-19 November 2015, Perth, Australia. Australian Centre for Geomechanics, 2015. P. 241-254. DOI: [10.36487/ACG_rep/1511_12_Chilala](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1511_12_Chilala)
2. Purwanto, Shimada H., Sasaoka T. et al. Influence of Stope Design on Stability of Hanging Wall Decline in Cibaliung Underground Gold Mine // *International Journal of Geosciences*. 2013. Vol. 4. № 10A. P. 1-8. DOI: [10.4236/ijg.2013.410A001](https://doi.org/10.4236/ijg.2013.410A001)
3. Cai S., Lyu W., Wu D., Yang P. Mining method optimisation of Bayi gold mine based on the value engineering principle // *Underground Mining Technology 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*, 11-13 October 2017, Sudbury, ON, Canada. Australian Centre for Geomechanics, 2017. P. 511-521. DOI: [10.36487/ACG_rep/1710_41_Cai](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1710_41_Cai)
4. Wu-sheng Huang, Si-jing Cai, Di Wu et al. Stability Assessment of Underground Mined-Out Areas in a Gold Mine Based on Complex System Theory // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2015. Vol. 33. Iss. 5. P. 1295-1305. DOI: [10.1007/s10706-015-9901-9](https://doi.org/10.1007/s10706-015-9901-9)
5. Dorval A. Narrow vein mining using sublevel method at Red Lake Gold Mine – Campbell Complex // 36e Session d'étude sur les techniques de sautage, 21-22 November 2013, Québec, QC, Canada. 23 p.
6. An Long, Wang Ri-dong, Hou Peng-yuan, Liang Rui-yu. Caving Mining of Steeply Inclined Narrow Veins and Supporting Mechanism of Caved Rock // *Journal of Northeastern University (Natural Science)*. 2019. Vol. 40. Iss. 2. P. 278-283. DOI: [10.12068/j.issn.1005-3026.2019.02.024](https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2019.02.024)
7. Korigov S., Adoko A.C., Sengani F. Unplanned Dilution Prediction in Open Stope Mining: Developing New Design Charts Using Artificial Neural Network Classifier // *Journal of Sustainable Mining*. 2022. Vol. 21. Iss. 2. P. 157-168. DOI: [10.46873/2300-3960.1356](https://doi.org/10.46873/2300-3960.1356)
8. Hyong Doo Jang. Unplanned Dilution and Ore-Loss Optimisation in Underground Mines via Cooperative Neuro-Fuzzy Network: This thesis is presented for the Degree of Doctor of Philosophy of Curtin University. Perth: Western Australia School of Mines, 2014. 170 p.



9. Masoumi I., Kamali Gh.R., Asghari O. Assessment of an ore body internal dilution based on multivariate geostatistical simulation using exploratory drill hole data // Journal of Mining and Environment. 2019. Vol. 10. Iss. 1. P. 271-286. DOI: 10.22044/jme.2019.7622.1618
10. Villaseca E. Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping. Boca Raton: CRC Press, 2014. 541 p. DOI: 10.1201/b16702
11. Papaioanou A., Suorineni F.T. Development of a generalised dilution-based stability graph for open stope design // Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology. 2016. Vol. 125. Iss. 2. P. 121-128. DOI: 10.1080/14749009.2015.1131940
12. Marinin M., Marinina O., Wolniak R. Assessing of Losses and Dilution Impact on the Cost Chain: Case Study of Gold Ore Deposits // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 7. № 3830. DOI: 10.3390/su13073830
13. Фомин С.И., Кава П.Б., Маринин М.А. Анализ горно-геологических условий: карьера и формирование выемочной единицы при определении нормативных потерь и разубоживания руды // Записки Горного института. 2014. Т. 207. С. 74-77.
14. Лизункин В.М., Лизункин М.В., Рабольт А.Н., Гуров С.Г. Результаты опытно-промышленных испытаний технологии отработки маломощных пологопадающих пластообразных рудных залежей расширенными заходками // Горный журнал. 2019. № 1. С. 37-40. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.08
15. Савич И.Н. Проблемы применения систем с принудительным обрушением при подземной разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S1. С. 366-373.
16. Ткач С.М., Батугин С.А., Баракаева И.Д. Объективная оценка разубоживания руд – перспективный путь повышения ресурсного потенциала недр // Горный журнал. 2016. № 1. С. 37-40. DOI: 10.17580/gzh.2016.01.08
17. Батугин С.А., Ткач С.М., Баракаева И.Д. Развитие методологических основ определения и учета разубоживания руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 9. С. 312-319.
18. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, 2021. 340 с. DOI: 10.25635/b6795-6297-2078-t
19. Павлов А.М., Васильев Д.С. Совершенствование технологии подземной разработки тонких крутопадающих тел золоторудного месторождения Коневинского // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 2. С. 88-94.
20. Mohseni M., Ataei M., Khaloo Kakaie R. A new classification system for evaluation and prediction of unplanned dilution in cut-and-fill stopping method // Journal of Mining and Environment. 2018. Vol. 9. Iss. 4. P. 873-892. DOI: 10.22044/jme.2018.6483.1468
21. Jang H., Topal E., Kawamura Y. Unplanned dilution and ore loss prediction in longhole stopping mines via multiple regression and artificial neural network analyses // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. № 5. P. 449-456. DOI: 10.17159/2411-9717/2015/v115n5a13
22. Abdellah W.R.E., Hefni M.A., Ahmed H.M. Factors Influencing Stope Hanging Wall Stability and Ore Dilution in Narrow-Vein Deposits: Part I // Geotechnical and Geological Engineering. 2020. Vol. 38. P. 1451-1470. DOI: 10.1007/s10706-019-01102-w
23. Abdellah W.R.E., Hefni M.A., Ahmed H.M. Factors Influencing Stope Hanging Wall Stability and Ore Dilution in Narrow-Vein Deposits: Part II // Geotechnical and Geological Engineering. 2020. Vol. 38. P. 3795-3813. DOI: 10.1007/s10706-020-01259-9
24. Cordova D.P., Zingano A.C., Gonçalves Í.G. Unplanned dilution back analysis in an underground mine using numerical models // REM – International Engineering Journal. 2022. Vol. 75. Iss. 4. P. 379-388. DOI: 10.1590/0370-44672021750093
25. Câmara T.R., Leal R.S., Peroni R.L. Accounting for operational dilution by incorporating geological uncertainties in short-term mine planning // DYNA. 2020. Vol. 87. № 213. P. 178-183. DOI: 10.15446/dyna.v87n213.83661
26. Mussin A., Imashev A., Matayev A. et al. Reduction of ore dilution when mining low-thickness ore bodies by means of artificial maintenance of the mined-out area // Mining of Mineral Deposits. 2023. Vol. 17. Iss. 1. P. 35-42. DOI: 10.33271/mining17.01.035
27. Ngoma K., Mutambo V. Factors Influencing Ore Recovery and Unplanned Dilution in Sublevel Open Stopes. Case Study of Shaft No.4 at Konkola Mine, Zambia // Current World Environment. 2020. Vol. 15. Spec. Iss. 1. P. 31-46. DOI: 10.12944/CWE.15.Special-Issue1.03
28. Suorineni F.T. Reflections on Empirical Methods in Geomechanics – The Unmentionables and Hidden Risks // AusRock 2014: Third Australian Ground Control in Mining Conference, 5-6 November 2014, Sydney, NSW, Australia. 2014. P. 143-156.
29. Eero T. Mining method evaluation and dilution control in Kittilä mine: Master's Thesis. Aalto University, 2014. 67 p.
30. Imashev A., Suimbayeva A., Zhunusbekova G. et al. Research into stress-strain state of the mass under open pit with a change in the open-pit bottom width // Mining of Mineral Deposits. 2022. Vol. 16. Iss. 3. P. 61-66. DOI: 10.33271/mining16.03.061
31. Delentas A., Benardos A., Nomikos P. Linking Stability Conditions and Ore Dilution in Open Stope Mining // International Conference on Raw Materials and Circular Economy, 5-9 September 2021, Athens, Greece. Materials Proceedings, 2021. Vol. 5. Iss. 1. № 34. DOI: 10.3390/materproc2021005034
32. Vallejos J., Miranda R., Azorin J. et al. Stability graph using major geological structure // Fluid Mechanics Research International Journal. 2018. Vol. 2. Iss. 5. P. 243-246. DOI: 10.15406/fmrj.2018.02.00044
33. Mortazavi A., Osserbay B. The Consolidated Mathews Stability Graph for Open Stope Design // Geotechnical and Geological Engineering. 2022. Vol. 40. Iss. 5. P. 2409-2424. DOI: 10.1007/s10706-021-02034-0
34. Delentas A., Benardos A., Nomikos P. Analyzing Stability Conditions and Ore Dilution in Open Stope Mining // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 12. № 1404. DOI: 10.3390/min11121404
35. Hoek E., Carter T., Diederichs M. Quantification of the Geological Strength Index Chart // Proceedings of the 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 23-26 June 2013, San Francisco, CA, USA. New York: Red Hook, 2013. P. 1757-1764.
36. Marinos V., Carter T.G. Maintaining geological reality in application of GSI for design of engineering structures in rock // Engineering Geology. 2018. Vol. 239. P. 282-297. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.03.022
37. Hoek E., Brown E.T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 445-463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001
38. Erhunmwun I.D., Ikponmwonsa U.B. Review on finite element method // Journal of Applied Sciences and Environmental Management. 2017. Vol. 21. № 5. P. 999-1002. DOI: 10.4314/jasem.v21i5.30



39. Hackston A., Rutter E. The Mohr–Coulomb criterion for intact rock strength and friction – a re-evaluation and consideration of failure under polyaxial stresses // *Solid Earth*. 2016. Vol. 7. Iss. 2. P. 493-508. DOI: [10.5194/se-7-493-2016](https://doi.org/10.5194/se-7-493-2016)
40. Имашев А.Ж., Суимбаева А.М., Абдибаитов Ш.А. и др. Обоснование оптимальной формы сечения горных выработок в соответствии с рейтинговой классификацией // *Уголь*. 2020. № 6. С. 4-9. DOI: [10.18796/0041-5790-2020-6-4-9](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-6-4-9)
41. Ulusay R. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. Springer, 2015. 293 p. DOI: [10.1007/978-3-319-07713-0](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0)
42. Суханова А.А., Камбетова Г.Т. Определение рейтинга массива горных пород по геомеханической классификации MRMR для условий месторождения Жолымбет // *Молодой ученый*. 2020. № 14 (304). С. 130-133.
43. Imashev A.Z., Sudarikov A.E., Musin A.A. et al. Improving the quality of blasting indicators by studying the natural stress field and the impact of the blast force on the rock mass // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. 2021. Vol. 4. № 448. P. 30-35. DOI: [10.32014/2021.2518-170X.78](https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.78)

Авторы: А.Ж.Имашев, PhD, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0002-9799-8115> (Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан), А.М.Суимбаева, PhD, доцент, suimbayeva.aigerim@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6582-9977> (Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан), А.А.Мусин, PhD, старший преподаватель, <https://orcid.org/0000-0001-6318-9056> (Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Технология ликвидации поглощений сшивающимся тампонажным материалом на основе цемента и сшитого полимера

А.А.Предеин^{1,2}, О.В.Гаршина¹, А.А.Мелехин²✉¹ Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми, Пермь, Россия² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Как цитировать эту статью: Предеин А.А., Гаршина О.В., Мелехин А.А. Технология ликвидации поглощений сшивающимся тампонажным материалом на основе цемента и сшитого полимера // Записки Горного института. 2024. Т.266. С. 295-304. EDN BPUQNV

Аннотация. Особенностью геологического строения карбонатных коллекторов является их сложная фильтрационно-емкостная характеристика, отражающая одновременное присутствие пустот различного типа (трещин, каверн, пор). Потеря циркуляции при вскрытии интервалов трещиноватых пород в значительной мере увеличивает время строительства скважин из-за отсутствия эффективных тампонажных изоляционных составов. Основными недостатками традиционных составов является высокая чувствительность к разбавлению в процессе их закачки в зону поглощения, а также недостаточная структурная прочность, позволяющая предотвратить растекание изоляционного состава в индукционный период. Для эффективной изоляции зон катастрофических поглощений в условиях высокой раскрытости поглощающих каналов разработан новый сшивающийся тампонажный изоляционный состав, позволяющий исключить недостатки традиционных изоляционных составов. Применение состава позволит значительно сократить объемы закачек изоляционного состава, время изоляционных работ за счет устойчивости состава к разбавлению и движению пластовых вод в интервале поглощения.

Ключевые слова: бурение; отсутствие циркуляции; ликвидация поглощений; катастрофическое поглощение; сшивающиеся тампонажные материалы; быстросхватывающиеся тампонажные составы

Благодарность. Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

Поступила: 26.09.2022

Принята: 20.09.2023

Онлайн: 13.12.2023

Опубликована: 25.04.2024

Введение. В настоящее время для обеспечения рентабельной добычи углеводородов необходимо снижать затраты на строительство скважин. Решение поставленной задачи требует качественного строительства скважин при кратном снижении сроков строительства [1]. При современном уровне технологий не удалось полностью исключить затраты на предотвращение [2-4] и ликвидацию осложнений в процессе бурения [5-7]. Так, на ликвидацию осложнений затрачивается в среднем 20-25 % календарного времени строительства скважин. Интенсивность поглощения разделяется на три категории: фильтрация (менее 3 м³/ч), частичное (3-15 м³/ч) и катастрофическое (более 15 м³/ч) поглощения [8]. Особенно актуален вопрос изоляции зон катастрофических поглощений [9], которые характерны для пород с наличием карстовых пустот, каверн, осложненных тектоническими дислокациями [1, 10]. Задача сокращения затрат на ликвидацию осложнений, связанных с поглощением технологических жидкостей, усложняется при вскрытии высокодренированных зон в интервалах поглощающих каналов [11-13]. Как правило, при вскрытии таких зон фиксируется увеличение механической скорости, вплоть до провалов бурового инструмента, с последующей потерей циркуляции. Изоляция трещиноватых зон в карбонатных пластах с применением кольматационных материалов может оказаться неэффективной, для достижения результата затрачивается большой объем изоляционных материалов при проведении большого количества повторных изоляционных работ [14].

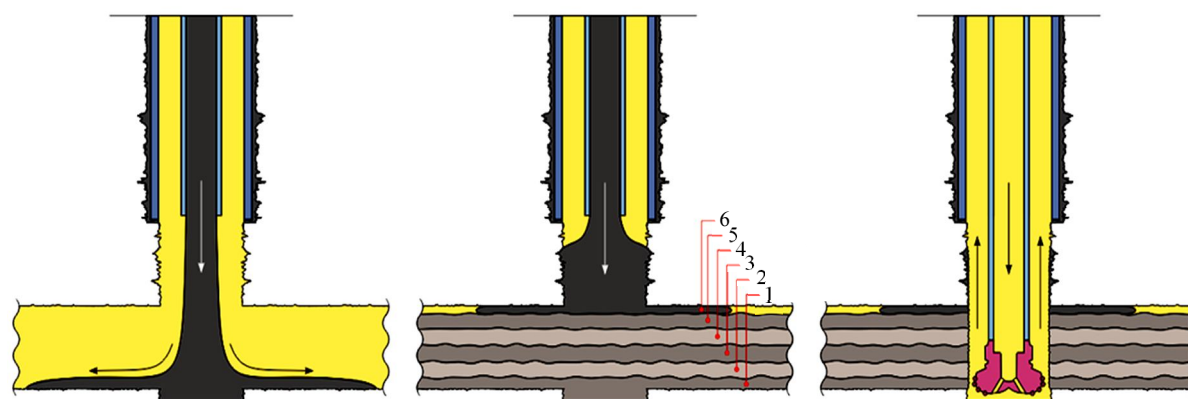


Рис.1. Механизм заполнения пустотного пространства традиционными тампонажными составами

1-6 – номер операции

Практика изоляции зон поглощений показывает, что низкоинтенсивные и среднеинтенсивные поглощения успешно изолируются при стандартных технологиях, принятых в буровых и сервисных компаниях (кольматационные, осадкообразующие составы, составы с мгновенной фильтрацией, тампонажные, пеноцементные материалы) [15]. Изоляция катастрофических зон поглощения достигается за счет постепенного заполнения пустотного пространства с применением традиционных тампонажных материалов либо установки профильного перекрывателя. В ряде случаев по согласованию с заказчиком буровой подрядчик продолжает строительство скважины без выхода циркуляции, проводит мероприятия по снижению расхода промывочной жидкости [16, 17], что позволяет уменьшить эквивалентную циркуляционную плотность на поглощающий интервал [18, 19]. Подобное решение позволяет снизить вероятность раскрытия трещины и потери бурового раствора. Такой подход позволяет достичь проектного забоя со значительным увеличением сроков строительства скважин, при этом бурение обуславливает необходимость контроля давления в затрубном пространстве для предотвращения нефтегазоводопроявления, либо прихвата бурильной колонны [18, 20]. Изоляция зон катастрофического поглощения обязательна в условиях значительного снижения статического уровня жидкости в скважине, который может спровоцировать возникновение нефтегазоводопроявления (при вскрытии продуктивного интервала с высокими пластовыми давлениями).

Низкая эффективность традиционных тампонажных составов обусловлена тем, что в условиях высокой раскрытости поглощающих каналов цементный раствор движется по наиболее дренированным каналам максимальной раскрытости с последующим растеканием и занятием донного положения под действием гравитационных сил (рис.1).

Метод изоляции основан на постепенном заполнении пустотного пространства в канале пласта. Для достижения положительного эффекта требуется проведение большого количества операций, количество изоляционных работ может быть уменьшено за счет корректировки структурных свойств тампонажного состава.

Актуальность проблем ликвидации катастрофических поглощений при строительстве скважины. Проблема эффективного решения ликвидации поглощения бурового раствора актуальна для большинства нефтяных и газовых месторождений. В настоящее время нет единых подходов и технологий для ликвидации поглощений из-за отсутствия единой и общепризнанной классификации поглощений по интенсивности. На каждом месторождении (площади) применяются свои классификации поглощений и технологии борьбы с поглощениями, основанные только на опыте бурения [21].

Эффективность изоляционных работ с применением наполнителей зависит от их правильного выбора (материала, размера и концентрации) [22, 23]. Борьба с высокоинтенсивными поглощениями осуществляется путем закачивания в скважину больших объемов наполнителей, где в качестве жидкости носителя применяется глинистый раствор. Закупоривающая способность изоляционного материала определяется правильно выбранным размером частиц. Считается, что закупоривающий



материал должен содержать определенное число частиц, имеющих размер, примерно равный диаметру отверстий в породе, а также набор частиц меньших размеров [24]. При высокой раскрытости поглощающих каналов создаются условия, когда максимальный размер жесткого колыматанта не соответствует требованиям изоляции пласта. В таких случаях увеличение концентрации и объема изоляционного состава не может гарантировать закупорку каналов.

Наиболее распространенным изоляционным материалом для ликвидации поглощения является тампонажный состав на портландцементе. Традиционно применяемые способы изоляции поглощающих пластов путем закачки в пласт тампонирующих смесей через открытый конец труб или с помощью пакера не всегда приводят к изоляции интервала поглощения [25]. Механизм работы тампонажных составов основан на постепенном заполнении пустотного пространства в канале пласта. Состав движется в раскрытом канале поглощающих интервалов не сплошным и равномерным потоком, а по наиболее дренированным каналам наибольшей раскрытости. Растекаясь далеко вглубь от приствольной зоны, он стремится под действием гравитационных сил занять в пласте донное положение. В результате наиболее раскрытые каналы, будучи на короткое время заполнены тампонирующим материалом, в последующем «оголяются», так как силы сопротивления в канале недостаточны, чтобы зафиксировать в нем раствор. Процесс осложняется тем, что при движении по стволу ниже бурильных труб и в пласте раствор неизбежно смешивается с промывочной жидкостью и утрачивает свои тампонирующие свойства [21].

Для предотвращения растекания изоляционных составов используют тампонажные составы с высокими тиксотропными свойствами, которые состоят из цемента, стабилизатора суспензии и замедлителя [26]. Благодаря высоким тиксотропным свойствам и сопротивлению течению составы должны предотвращать растекание в зоне поглощения с последующим набором прочности после отверждения [27, 28]. Опыт изоляционных работ показал, что структурно реологические свойства тампонажных составов на основе глиноцемента, гель-цемента недостаточны при изоляции зон с раскрытостью каналов более 10 мм, при этом дальнейшее увеличение структуры возможно только при уменьшении водоцементного отношения, что может привести в процессе закачки к быстрому росту структурной прочности, переходящей в начало схватывания.

В ряде случаев применяются быстросхватывающиеся составы на основе портландцемента [29], прочность структуры в которых достигается путем ввода в состав солей серной кислоты. В результате реакции цемента с данными типами солей образуется гипс, вызывающий такое поведение цемента, при котором после 10-12 мин тампонажная смесь резко загустевает. Если такая проба тампонажного раствора будет находиться в движении более 20 мин, сроки начала схватывания могут значительно увеличиться с 30 мин до 10 ч. В связи с этим работы по изоляции зон поглощения с применением компонентов на основе гипсового вяжущего нужно проводить в течение 20 мин с момента их приготовления. Если это условие не соблюдено, то происходит разрушение гипсовой структуры [30].

Высокие тиксотропные свойства, исключая растекание изоляционного материала, характерны для составов на основе сшитых полимеров [31-33]. В лабораторных условиях эти составы образуют упругий гель без водоотдачи со «звонящей» структурой. Достоинством сшитых систем является способность адаптироваться к различному объему канала. При дифференциальном давлении происходит их проникновение в поглощающий интервал с заполнением каналов без ограничений по раскрытости и морфологии. При этом структурно высокие реологические характеристики предотвращают растекание состава после снятия избыточного давления, возникающего в процессе продавки. Это связано с тем, что благодаря наличию пространственных структур предотвращается внутреннее движение слоев в составе. К недостаткам можно отнести возникновение вязкого течения при появлении внешних сил, превышающих значение предельного напряжения текучести, при котором происходит разрушение его структуры [34]. Изоляция катастрофических поглощений предполагает закачку сшитого полимера в объеме, обеспечивающем снижение фильтрационных характеристик зоны поглощения с последующим закреплением твердеющим тампонажным составом на основе портландцемента [35].

В условиях сильнотрещиноватых (раскрытость каналов более 10 мм) и карстовых пород значения предельного напряжения текучести составов значительно снижаются, в результате при закреплении тампонажным составом на гелевый экран создается давление, при котором происходит



вязкое течение изоляционных составов в зону поглощения, что значительно снижает эффективность изоляционных работ. Для исключения вязкого течения сшитых составов требуется увеличение прочности структуры геля и его адгезии к породе [36]. Катастрофические поглощения нередко сопровождаются значительным падением уровня жидкости в скважине (500 м и более). При заполнении скважины буровым раствором после изоляционных работ на изоляционный состав со стороны скважины действует избыточное гидростатическое давление, эквивалентное величине статического уровня. Таким образом, необходимым свойством изоляционных материалов для ликвидации высокоинтенсивных поглощений является способность выдерживать достаточно высокие перепады давлений (5 МПа и более). Поэтому сшитые изоляционные составы не подходят для изоляции зон с высокой раскрытостью каналов.

Высокая эффективность изоляции зон катастрофического поглощения достигается при использовании оборудования локального крепления стенок скважины [37-39]. К недостаткам данной технологии можно отнести ограниченность применения в наклонно-направленных и горизонтальных скважинах, высокую стоимость и значительную продолжительность работ (в среднем 7 сут). В настоящее время отсутствует эффективная технология ликвидации катастрофических поглощений, где зона поглощения осложнена трещиноватыми и кавернозными породами с пониженным пластическим давлением.

Можно сделать вывод, что ни один из изоляционных составов не обеспечивает эффективную изоляцию зон высокоинтенсивных поглощений, где осложнение приурочено к высокой раскрытости поглощающего канала (наличие трещиноватых пород, палеокарст). Существует необходимость разработки изоляционного состава, способного адаптироваться к морфологии трещинного пространства, с объединением свойств сшитого геля и цементного раствора, который позволит предотвратить растекание изоляционного состава в индукционный период и выдержать давления, возникающие при возобновлении процесса строительства скважины после проведения изоляционных работ [30].

Методы. Методика ликвидации катастрофических поглощений при строительстве скважин. Следует обратить внимание на необходимость разработки изоляционного состава, способного адаптироваться к морфологии трещинного пространства с эффектом полного заполнения поглощающих каналов, а также выдерживать достаточно высокие перепады давлений (5 МПа и более) по истечении времени ожидания затвердевания.

Для решения проблем низкой эффективности работ для изоляции зон катастрофических поглощений авторами разработан сшивающийся тампонажный изоляционный материал (СТИМ). Состав представляет комбинацию цемента и сшитого полимера, обладающего поперечными химическими связями. После затворения состав проходит три фазовых перехода от стадии линейного

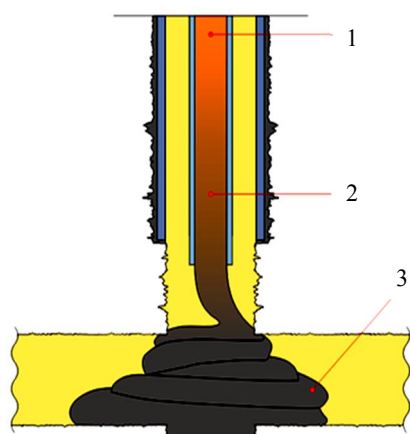


Рис.2. Механизм заполнения пустотного пространства тампонажным составом СТИМ

1 – нет сшивки; 2 – начало сшивки; 3 – конец сшивки

геля к стадии сшитого геля, на завершающей стадии происходит его кристаллизация (твердение). В скважину состав закачивается как линейная жидкость (рис.2), движение состава по буровым трубам в основном происходит в жидком состоянии. Концентрация реагента-сшивателя подбирается таким образом, чтобы сшивка происходила в нижней части колонны буровых труб, при этом в зону поглощения состав попадает уже в сшитом состоянии, что предотвращает его растекание по кавернозной полости поглощающего пласта. После завершения продавки скважина оставляется на ожидание затвердевания цемента для набора прочности изоляционного состава. Достигнутая прочность позволяет составу противостоять гидродинамическим давлениям, возникающим при возобновлении процесса строительства скважины.

Необходимые свойства обеспечиваются за счет использования базового состава (цемент, жидкость затворения, функциональные добавки) и полимера. Состав представляет собой стехиометрическую смесь оксидов, карбонатов, сульфатов магния и кальция, при добавлении в раствор хлористого магния



формирует цементную смесь, которая, вступая в реакцию полимеризации, образует неорганический полигидрат гидроксисульфата/хлорида магния, характеризующийся высокой прочностью на сжатие. Содержащийся в составе полимер из группы гетерополисахаридов выступает как структурообразователь, при взаимодействии с сшивающим агентом образует ковалентные химические связи полимера. В результате полимерные цепи сшиваются с одновременным ростом структурной прочности состава. Комбинация реагентов позволяет получить однородную смесь, плотность и время загустевания может быть подобрана в соответствии с конкретным геолого-технологическими условиями путем добавления обычных добавок к цементу (реагентов-замедлителей).

Лабораторные испытания осуществлялись на лабораторной базе филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми. Определялись параметры изоляционного состава – время загустевания и реологические характеристики.

Время загустевания тампонажного материала определялось методом измерения его вязкости (консистенции) на консистометре в условиях, приближенных к внутрискважинным. Температура, давление, скорость их набора задавались по геолого-техническим условиям скважин. При определении времени загустевания применялся консистометр герметизированный высокого давления и температуры Chandler 7322.

Реологические свойства определялись на модульном реометре MSR-102 производства компании Anton Paar с измерительной системой типа плоскость-плоскость ($d = 50$ мм), размер зазора 1 мм. Эффективную (динамическую) вязкость определяли при скоростях сдвига $1-5 \text{ с}^{-1}$ для минимизации разрыва структуры состава и исключения выдавливания образца из измерительной системы. Для минимизации эффекта проскальзывания образца в измерительной системе, что приводит к занижению результатов, измерения проводили под нагрузкой (нормальная сила 5 Н).

Результаты. На рис.3 показаны профили набора консистенции (времени загустевания) традиционных изоляционных материалов на магниевом вяжущем быстросхватывающего состава (БСС) без эффекта стадии сшитого геля и предлагаемого состава СТИМ с полимером и без него. Традиционно применяемый состав (БСС) предназначен для установки мостов и ликвидации поглощений. Состав инертен к буровым растворам на углеводородной основе, устойчив к воздействию сероводородной агрессии, обладает высокими адгезионными характеристиками, регулируемым временем загустевания, быстрым набором прочности, но имеет ряд недостатков при изоляции зон катастрофических поглощений.

Как видно из графиков на рис.3, технический результат при использовании БСС заключается в резком увеличении времени загустевания по окончании индукционного периода, сжатых сроках схватывания (4-8 ч), высоких тиксотропных свойствах. Такой результат для проведения изоляционных работ в нефтяных и газовых скважинах достигается при придании тампонажному составу коротких сроков схватывания и твердения с обеспечением технологических свойств прокачиваемости, одновременном повышении предела прочности на сжатие за счет использования в составе каустического магнетита, регулятора стабильности и устойчивости, бишофита, воды и регулятора схватывания и твердения (добавки на основе органофосфатов). Время загустевания и профиль набора консистенции определяли на консистометре при давлении 2-5 МПа и температуре 25-32 °С, наиболее характерных для месторождений Пермского края.

В изоляционном составе СТИМ и БСС в качестве вяжущего используется каустический магнетит, в который включены функциональные добавки, обеспечивающие его сшивку. При максимальном количестве добавок сшивка, которая выражается резким ростом консистенции, происходит через 6-8 мин (рис.3, б), время начала загустевания тампонажной части начинается не ранее чем 2,15 ч (рис.3, в).

Тампонажные составы при закачке в кавернозные полости проходят через большой объем воды, при этом происходит их разбавление, что приводит к ухудшению свойств изоляционного состава. Таким образом, существенная часть тампонажных составов расходуется на разбавление. Техническим результатом предлагаемого состава является то, что совокупность компонентов обеспечивает получение укороченного времени потери текучести за счет внутренней сшивки полимера. Состав после начала сшивки становится устойчивым к размыву в процессе его закачки в пласт, не подвержен разбавлению даже в условиях движения пластовых вод. Загрязнение состава

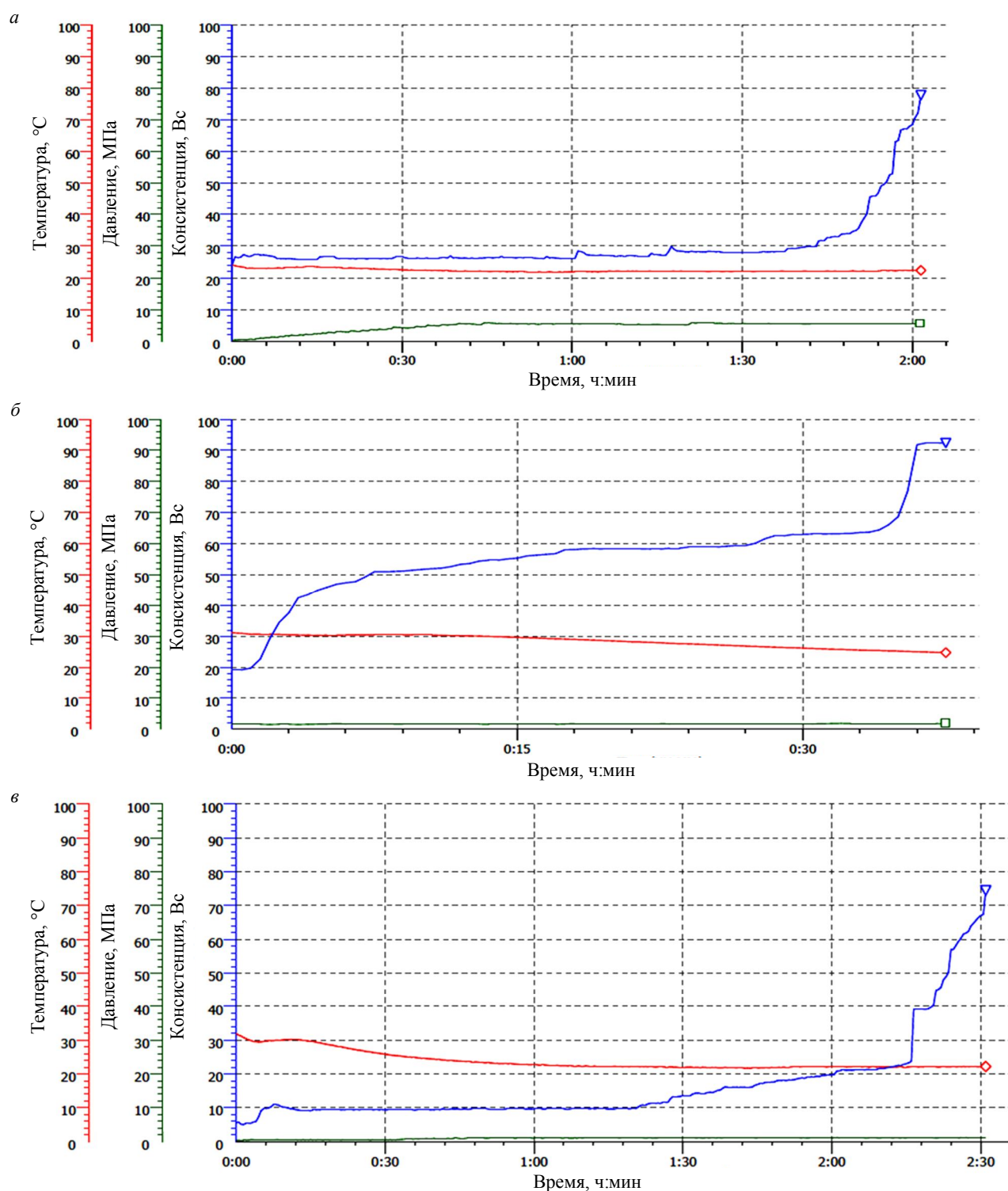


Рис. 3. Профили набора консистенции: *a* – быстрохватывающий состав; *б* – состав СТИМ с максимальным количеством полимера для загустевания; *в* – состав СТИМ без полимера, регулирующего загустевание

скважинными или пластовыми жидкостями не влияет на процесс набора прочности, в том числе в условиях сероводородной агрессии. Устойчивость подтверждена лабораторными исследованиями в различных средах. По результатам исследований сделан вывод, что сшивка полимера внутри тампонажного состава делает состав неразмываемым.

В лабораторных условиях состав после затворения в первые 15 мин не отличается от обычных цементных растворов и находится в жидком, текучем состоянии, что позволяет закачать состав



в скважину при минимальных давлениях. Через 15 мин после затворения происходит внутренняя сшивка, состав переходит в состояние упругого геля, но при этом еще течет. Через 20 мин состав находится в полностью сшитом состоянии, выдерживает значительные растягивающие усилия и восстанавливает форму после их снятия. Нужно подчеркнуть, что предложенная рецептура состава после сшивки обеспечивает низкую растекаемость при соблюдении условий прокачиваемости за счет низкой адгезии по отношению к скважинному оборудованию. Так, в ячейке высокого давления динамического фильтр-пресса состав выдавливается при минимальных перепадах давления через имитирующую модель трещины раскрытостью 10 мм.

Для определения безопасного времени проведения работ с применением тампонажных составов важно знать время их загустевания и сроки схватывания. В предложенном составе одновременно проходят два параллельных процесса – сшивка и гидратация цемента. При определении времени загустевания консистенция 70 Вс (характеризующая вязкость непрокачиваемого цементного теста) будет достигнута в период начала сшивки полимера (через 5 мин). Это связано с тем, что при набухании полимера образуется вязкий линейный гель, который взаимодействует с сшивающим агентом и образует трехмерную упругую структуру. Процесс сшивки состава не оказывает влияния на сроки начала загустевания – это два не зависящих друг от друга процесса. Следовательно, безопасное время проведения работ может быть определено по времени загустевания базового состава без добавления полимера.

В настоящее время разработка готовится к опытно-промышленным испытаниям, в связи с этим были определены риски, связанные с возникающими давлениями в процессе закачки состава в скважину. Безопасность проведения работ при использовании тампонажных составов является приоритетной задачей. Для прогнозирования давлений, исключения рисков, связанных с невозможностью прокачки изоляционного состава в период его сшивки, выполнен математический расчет прогнозирования давления закачки при изменении реологических параметров изоляционного состава. Расчет давления на линии закачки осуществлялся в модуле OptiCem (LandMark) при следующих условиях: статический уровень перед началом работ 500 м, установка открытого конца буровых труб над зоной поглощения 500 м, глубина зоны поглощения 1 500 м, объем закачиваемого состава 20 м³, расход (скорость закачки) 6 л/с, закачка состава в скважину при открытом затрубном пространстве. Для измерения реологических характеристик сшитого изоляционного состава использовался реометр MSR-102, позволяющий получить высокоточные результаты любых вязких жидкостей, в том числе сшитых. На основании полученных данных построен график зависимости давления от объема закачанного состава СТИМ (рис.4).

В условиях высокой раскрытости каналов поглощающего интервала давление при заполнении изоляционным составом трубного пространства и его закачки в пласт не превысит 3,5 МПа (линии 1 и 2). В случае низкой раскрытости поглощающих каналов при появлении предпосылок движения изоляционного состава в затрубное пространство потребуется произвести вымыв изоляционного состава по циркуляции. Движение сшитого изоляционного состава по затрубному пространству будет сопровождаться более высокими значениями устьевого давления 4,5-5,0 МПа (линия 3), в случае увеличения расхода до проектного значения максимальное давление увеличится до 5,8 МПа. Технология закачки подразумевает установку открытого конца буровых труб над зоной поглощения таким образом, чтобы разместить в открытом стволе изоляционный состав объемом 10-20 м³, т.е. подрезка и вымыв изоляционного состава не потребуются. Риск, связанный с возникновением высокого давления с последующей невозможностью прокачать изоляционный состав в расчетном объеме с заданным расходом, исключен.

После закачки изоляционного состава обычной практикой считается промывка инструмента от цементного раствора, происходит рост гидростатического давления на изоляционный состав, при котором

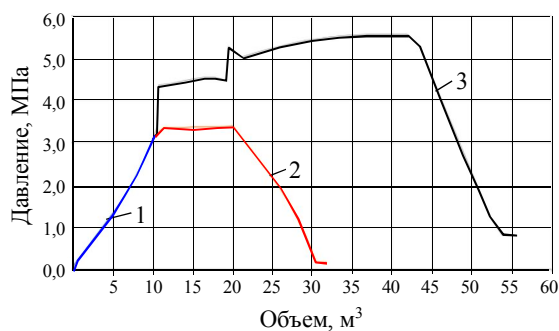


Рис.4. Давление закачки состава в скважину
1 – закачка СТИМ в трубное пространство; 2 – закачка СТИМ в зону поглощения; 3 – прямая промывка



возможно его вязкое течение в зону поглощения. Для увеличения эффективности изоляционных работ программой испытаний на объекте будет рекомендовано исключить пункт промывки инструмента, что может повлечь загрязнение бурового инструмента цементным раствором. Для исключения данных рисков в рецептуру состава добавлены реагенты, способствующие снижению адгезии в паре изоляционный состав – металл, за счет чего минимизируется налипание состава к внутренней поверхности инструмента. Проведенные испытания показывают, что после конденсирования пробы СТИМ в ячейке, регулирующей давление и температуру (НТНР) на 20 мин после начала сшивки, состав был выдавлен через отверстие 10 мм с минимальными давлениями, образование «языков» на внутренней поверхности ячейки не зафиксировано.

Результаты проведенных испытаний указывают на отсутствие рисков при прохождении изоляционного состава СТИМ через компоновку бурильной колонны в период его гелеобразования. В сшитом состоянии состав не оказывает высоких гидравлических сопротивлений, а реагенты, снижающие адгезию, минимизируют налипание состава к внутренней поверхности инструмента.

Заключение. Разработанный состав соответствует требованиям для изоляции зон катастрофических поглощений, осложненных высокой раскрытостью поглощающих каналов: укороченное время потери текучести за счет внутренней сшивки полимера; состав после начала сшивки становится устойчивым к размыву в процессе его закачки в пласт; достигнутая прочность позволяет составу противостоять гидродинамическим давлениям, возникающим при возобновлении процесса строительства скважины.

Использование в рецептуре разработанного состава магнезиального вяжущего позволяет его деструктурировать кислотными составами в период освоения, а также расширяет область применения в условиях сероводородной агрессии. К преимуществам состава относятся короткие сроки схватывания и устойчивость к размыву в условиях движения пластовых вод. Параметры плотности, времени загустевания, а также начала сшивки могут быть подобраны в соответствии с конкретными геолого-техническими условиями путем регулирования водоцементного отношения, а также вводом реагентов замедлителей и сшивателя. На первом этапе область применения ограничена пластовой температурой (35 °С), а также глубиной зоны начала поглощения (1500 м). После проведения опытных испытаний область применения может быть расширена.

Запланированы испытания разработанной технологии с целью оценки эффективности ликвидации катастрофических поглощений, приуроченных к пластам с высокой раскрытостью поглощающих каналов. При положительном результате опытно-промышленных испытаний применение СТИМ позволит значительно сократить объемы закачанных изоляционных составов, а также сроки изоляционных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumar A., Savari S., Whitfill D.L., Jamison D.E. Wellbore Strengthening: The Less-Studied Properties of Lost-Circulation Materials // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 19-22 September 2010, Florence, Italy. OnePetro, 2010. № SPE-133484-MS. DOI: 10.2118/133484-MS
2. Rezaei A., Nooripoor V., Shahbazi K. Applicability of Fe₃O₄ nanoparticles for improving rheological and filtration properties of bentonite-water drilling fluids in the presence of sodium, calcium, and magnesium chlorides // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2020. Vol. 10. Iss. 6. P. 2453-2464. DOI: 10.1007/s13202-020-00920-6
3. Кетова Ю.А., Бай Б., Хижняк Г.П. и др. Тестирование технологии предварительно сшитых частиц полимерного геля для ограничения водопритоков на фильтрационных керновых моделях // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 91-96. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.91
4. Abdollahpour P., Tabatabaee Moradi S.S., Leusheva E., Morenov V. A Numerical Study on the Application of Stress Cage Technology // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 15. № 5439. DOI: 10.3390/en15155439
5. Николаев Н.И., Тяньлэ Л. Современные технологии бурения и крепления скважин при разведке газовых гидратов // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 206-214.
6. Blinov P.A., Dvoynikov M.V. Rheological and Filtration Parameters of the Polymer Salt Drilling Fluids Based on Xanthan Gum // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15. Iss. 2. P. 694-697. DOI: 10.36478/jeasci.2020.694.697
7. Чернышов С.Е., Галкин В.И., Ульянова З.В., Макдоналд Д.И.М. Разработка математических моделей управления технологическими параметрами тампонажных растворов // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 179-190. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.179
8. Alsaba M., Al Dushaishi M.F., Nygaard R. et al. Updated criterion to select particle size distribution of lost circulation materials for an effective fracture sealing // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2017. Vol. 149. P. 641-648. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.10.027



9. Razavi O., Vajargah A.K., Van O.E., Aldin M. Comprehensive analysis of initiation and propagation pressures in drilling induced fractures // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017. Vol. 149. P. 228-243. DOI: [10.1016/j.petrol.2016.10.039](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.10.039)
10. Elkatainy S., Gamal H., Ahmed A. et al. A Novel Solution for Severe Loss Prevention While Drilling Deep Wells // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Iss. 4. № 1339. DOI: [10.3390/su12041339](https://doi.org/10.3390/su12041339)
11. Miller M.L., Scorsone J.T., Whitfill D.L. et al. The Development of a Geopolymer-Based Pill as an Engineered Solution to Lost Circulation // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 30 September – 2 October 2013, New Orleans, LA, USA. OnePetro, 2013. № SPE-166123-MS. DOI: [10.2118/166123-MS](https://doi.org/10.2118/166123-MS)
12. Alsaba M., Nygaard R., Hareland G., Contreras O. Review of Lost Circulation Materials and Treatments with an Updated Classification // *AADE Fluids Technical Conference and Exhibition*, 15-16 April 2014, Houston, TX, USA. 2014. № AADE-14-FTCE-25
13. Matanovic D., Gaurina-Medimurec N., Simon K. Risk Analysis for Prevention of Hazardous Situations in Petroleum and Natural Gas Engineering. Hershey: IGI Global, 2014. P. 433.
14. Savari S., Butcher J., Al-Hulail M. Managing Lost Circulation in Highly Fractured, Vugular Formations: Engineered Usage of High Fluid Loss Squeeze and Reticulated Foam Lost Circulation Materials // *IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition*, 3-5 March 2020, Galveston, TX, USA. OnePetro, 2020. № SPE-199635-MS. DOI: [10.2118/199635-MS](https://doi.org/10.2118/199635-MS)
15. Whitfill D.L. Lost Circulation Material Selection, Particle Size Distribution and Fracture Modeling with Fracture Simulation Software // *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference*, 25-27 August 2008, Jakarta, Indonesia. OnePetro, 2008. № SPE-115039-MS. DOI: [10.2118/115039-MS](https://doi.org/10.2118/115039-MS)
16. Будников В.Ф., Булатов А.И., Петерсон А.Я., Шаманов С.А. Контроль и пути улучшения технического состояния скважин. М.: Недра, 2001. 305 с.
17. Ruzhnikov A. Theoretical Aspects and Practical Implementation of Study of Drilling Fluid Level in the Annulus While Drilling with Total Losses // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, 9-12 November 2020, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, 2020. № SPE-203454-MS. DOI: [10.2118/203454-MS](https://doi.org/10.2118/203454-MS)
18. Almetayev R., Hosani M.A., Ameri S.A. et al. First Nitrified Managed Pressure Drilling Application in United Arab Emirates // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, 12-15 November 2018, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, 2018. № SPE-193025-MS. DOI: [10.2118/193025-MS](https://doi.org/10.2118/193025-MS)
19. Ali A.S., Dosunmu A., Anyanwu C. et al. Optimizing the Drilling HPHT/Deep Offshore Wells Using Managed Pressure Drilling Techniques // *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*, 5-7 August 2014, Lagos, Nigeria. OnePetro, 2014. № SPE-172349-MS. DOI: [10.2118/172349-MS](https://doi.org/10.2118/172349-MS)
20. Nugroho W.A., Hermawan S., Lazuardi B.H., Mirza R. Drilling Problems Mitigation in Geothermal Environment, Case Studies of Stuck Pipe and Lost Circulation // *Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*, 17-19 October 2017, Jakarta, Indonesia. OnePetro, 2017. № SPE-186922-MS. DOI: [10.2118/186922-MS](https://doi.org/10.2118/186922-MS)
21. Каменских С.В. Опыт борьбы с поглощениями буровых и тампонажных растворов при строительстве скважин // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна*. 2016. № 2 (25). С. 36-51.
22. Kang Y., Yu H., Xu C., Tang L. An optimal design for millimeter-wide fracture plugging zone // *Natural Gas Industry B*. 2015. Vol. 2. Iss. 1. P. 113-119. DOI: [10.1016/j.ngib.2015.02.011](https://doi.org/10.1016/j.ngib.2015.02.011)
23. Scott P., Redburn M., Nesheim G., Phillips C. A Pragmatic approach to Lost Circulation Treatments: What every Drilling Engineer Should Know // *AADE Fluids Technical Conference and Exhibition*, 14-15 April 2020, Houston, TX, USA. 2020. № AADE-20-FTCE-062.
24. Liu H. Principles and Applications of Well Logging. Heidelberg: Springer, 2017. 356 p. DOI: [10.1007/978-3-662-54977-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54977-3)
25. Saragi R., Husien M., Sinaga A.L.M. et al. Successful Approach in Curing Lost Circulation in Depleted Aquifer Formations by Utilizing a Combination of Swelling Polymer & a Shear-Rate Rheology-Dependent Cement System; Case Study in UAE Land Operation // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, 15-18 November 2021, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, 2021. № SPE-207416-MS. DOI: [10.2118/207416-MS](https://doi.org/10.2118/207416-MS)
26. Jadhav R., Patil S. Acid-Soluble Thixotropic Cement System for Lost Circulation Challenges // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, 12-15 November 2018, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, 2018. № SPE-193168-MS. DOI: [10.2118/193168-MS](https://doi.org/10.2118/193168-MS)
27. Fomenkov A., Pinigin I., Miklayev M., Fedyanin A. Using Thixotropic Cement Slurry for Lost Circulation Control: Case History, Volga-Urals Region // *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, 22-24 October 2019, Moscow, Russia. OnePetro, 2019. № SPE-196813-MS. DOI: [10.2118/196813-MS](https://doi.org/10.2118/196813-MS)
28. Doutoumi M.H.A., Alvarado R.F.B., Alaleeli A.R. et al. Advanced Light Weight Thixotropic Lost Circulation Cement Solution for Vugular and Natural Fractured Limestone Formations: UAE Offshore Case History // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, 15-18 November 2021, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, 2021. № SPE-207264-MS. DOI: [10.2118/207264-MS](https://doi.org/10.2118/207264-MS)
29. Yuan B., Yang Y., Tang X., Xie Y. A starting pressure prediction of thixotropic cement slurry: Theory, model and example // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015. Vol. 133. P. 108-113. DOI: [10.1016/j.petrol.2015.06.005](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.06.005)
30. Yang J., Sun J. Status and Prospect of Drilling Fluid Loss and Lost Circulation Control Technology in Fractured Formation // *Gels*. 2022. Vol. 8. Iss. 5. № 260. DOI: [10.3390/gels8050260](https://doi.org/10.3390/gels8050260)
31. Mokhtari M., Ozbayoglu E.M. Laboratory Investigation on Gelation Behavior of Xanthan Crosslinked With Borate Intended to Combat Lost Circulation // *SPE Production and Operations Conference and Exhibition*, 8-10 June 2010, Tunis, Tunisia. OnePetro, 2010. SPE-136094-MS. DOI: [10.2118/136094-MS](https://doi.org/10.2118/136094-MS)
32. Jiang G., Deng Z., He Y. et al. Cross-linked polyacrylamide gel as loss circulation materials for combating lost circulation in high temperature well drilling operation // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 181. № 106250. DOI: [10.1016/j.petrol.2019.106250](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106250)
33. Leusheva E., Morenov V. Research of Clayless Drilling Fluid Influence on the Rocks Destruction Efficiency // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. № 6. P. 945-949.
34. Рылцев И.А., Рылцева К.Е., Шрагер Г.Р. Кинематика течения степенной жидкости в трубе переменного сечения // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2020. № 63. С. 125-138. DOI: [10.17223/19988621/63/11](https://doi.org/10.17223/19988621/63/11)



35. Luzardo J., Oliveira E.P., Derks P.W.J., Nascimento R.V. Alternative Lost Circulation Material for Depleted Reservoirs // OTC Brasil, 27-29 October 2015, Rio de Janeiro, Brazil. OnePetro, 2015. № OTC-26188-MS. DOI: [10.4043/26188-MS](https://doi.org/10.4043/26188-MS)
36. Bai Y., Liu C., Sun J. et al. High temperature resistant polymer gel as lost circulation material for fractured formation during drilling // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2022. Vol. 637. № 128244. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2021.128244](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128244)
37. Тимкин Н. Ликвидация катастрофических поглощений с применением оборудования локального крепления скважин (ОЛКС-295С) при строительстве скважины № 71 Ковыктинского месторождения // Бурение и нефть. 2016. № 2. С. 36-37.
38. Park M., Teasdale P., Cowling M. Application of Uncemented Solid Expandable Liner for Combined Openhole Isolation and Casing Repair // SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, 17-19 March 2015, London, UK. OnePetro, 2015. № SPE-173134-MS. DOI: [10.2118/173134-MS](https://doi.org/10.2118/173134-MS)
39. Cameron J.R., Cooper B.S., Gusevik R.T. Expandable Solid-Steel Liner Applications in the Marcellus // SPE Eastern Regional Meeting, 20-22 August 2013, Pittsburgh, PA, USA. OnePetro, 2013. № SPE-165671-MS. DOI: [10.2118/165671-MS](https://doi.org/10.2118/165671-MS)

Авторы: А.А.Преденин, заместитель директора, аспирант, <https://orcid.org/0000-0003-2415-1594> (Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми, Пермь, Россия); Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), О.В.Гаршина, канд. техн. наук, начальник управления, <https://orcid.org/0000-0002-7188-3010> (Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми, Пермь, Россия), А.А.Мелехин, канд. техн. наук, доцент, telehin.sasha@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0737-1360> (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Комплексная оценка деформирования системы жесткой армировки при конвергенции крепи шахтного ствола в неустойчивых породах

В.В.Тарасов¹✉, В.Н.Аптуков^{1,2}, О.В.Иванов¹¹АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Как цитировать эту статью: Тарасов В.В., Аптуков В.Н., Иванов О.В. Комплексная оценка деформирования системы жесткой армировки при конвергенции крепи шахтного ствола в неустойчивых породах // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 305-315. EDN TNNIZP

Аннотация. Эксплуатация вертикальных шахтных стволов в сложных горно-геологических условиях связана с рядом особенностей. Одна из них – радиальные перемещения бетонной крепи ствола, обусловленные влиянием горного давления на напряженно-деформированное состояние горной выработки. Система жесткой армировки, расстрелы которой закреплены в бетонной крепи, испытывает при этом упругопластические деформации, их величина увеличивается с течением времени. Это приводит к отклонению проводников от проектных параметров, ослаблению болтовых соединений, ухудшению динамических свойств геотехнической системы «подъемный сосуд – армировка», увеличению скорости износа элементов системы армировки, повышению рисков создания аварийной ситуации. Предложена комплексная оценка перемещений характерных точек системы расстрелов, основанная на приближенных инженерных соотношениях, численном моделировании процесса деформирования системы расстрелов и лазерных измерениях конвергенции внутренней поверхности бетонной крепи ствола. Методика апробирована на примере системы армировки скипо-клетевого ствола калийного рудника, перемещение характерных точек которой определяется величиной радиальных смещений поверхности бетонной крепи ствола. Их оценка произведена с использованием мониторинговых измерений и данных профилировки. Полученные результаты дают возможность обосновать необходимость и сроки проведения ремонтных работ. Показано, что ухудшение состояния системы армировки на различных ярусах происходит с разной скоростью, определяемой в том числе механическими характеристиками слоев породного массива, расположенного на данной глубине.

Ключевые слова: шахтный ствол; бетонная крепь; жесткая армировка; методика оценки деформаций; профилировка

Поступила: 16.03.2023

Принята: 27.12.2023

Онлайн: 28.02.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. Вертикальные шахтные стволы относят к выработкам первого класса ответственности, так как нарушение их нормальной эксплуатации способно привести к остановке работы всего горно-добывающего предприятия (СП 91.13330.2012). Главным показателем надежной и безаварийной работы шахтного ствола является работоспособность его армировки, состоящая из системы конструкций, обеспечивающих движение подъемных сосудов при заданных режимах работы подъемной установки в течение всего срока эксплуатации ствола [1]. Расчет жесткой армировки выполняется по условиям динамической устойчивости движения подъемных сосудов в проводниках и производится на стадии проектирования шахтных стволов. Кроме того, входящие в армировку элементы рассчитываются на соответствие жесткостным и прочностным характеристикам [1-3]. Остальные нагрузки считаются несущественными, поэтому ими пренебрегают при расчете или учитывают некоторые коэффициенты запаса при определении нагрузок от подъемных сосудов [4]. Упрощение расчетной схемы может привести к неточному определению параметров жесткой армировки стволов калийных рудников, поэтому необходимо учитывать сложное, изменяющееся во времени взаимодействие геотехнической системы «жесткая армировка – крепь ствола» [4].



Из натурных наблюдений известно [5], что в течение эксплуатации шахтных стволов калийных рудников неизбежно происходит коррозионный и механический износ расстрелов и направляющих проводников. Износ элементов армировки приводит к изменению их геометрических характеристик – уменьшению толщины стенок проводников и расстрелов и снижению жесткости всей системы армировки. Если ствол находится в сложных горно-геологических условиях (малоустойчивый породный массив, пригрузка от прохождения дополнительных выработок и т.п.), то возникают деформации некоторых участков крепи и, как следствие, армировки. Деформации в монолите бетона могут достигать такой величины, что в определенный момент возникает ситуация, при которой невозможен свободный проход подъемного сосуда в колее проводников. Это приводит к ухудшению динамических свойств системы «подъемный сосуд – армировка» и снижению эксплуатационных характеристик [5, 6]. Для устранения нарушения выполняют работы по замене деформированного участка расстрела на прямолинейный, предварительно освободив его путем выдавливания заделки конца расстрела из бетонной крепи [6]. Каждая точка заделки расстрела раскрывается до размеров, необходимых для приведения колеи проводников в базовое, проектное положение. При необходимости убирается не только бетонная крепь, но и зачищается соляная порода на достаточную длину и ширину. Подробное описание условий работы жесткой армировки стволов с перечислением основных типов нагрузок и действия их на армировку представлено в работах [7-9].

Постановка проблемы. Исследованиями различных авторов установлено, что при эксплуатации шахтного ствола в сложных горно-геологических условиях наблюдается деформация бетонной крепи в результате изменения вмещающих ствол массива пород [10-12]. Деформация бетонной крепи передается на жесткую армировку, в результате чего происходит нарушение и проектное изменение расстрелов и проводников [13-15]. Различные аспекты влияния подработанного пространства на геометрию ствола и эксплуатационные характеристики обсуждаются в работах [16, 17].

Во время непрерывной эксплуатации крепи и системы армировки шахтных стволов накапливаются и появляются следующие проблемы [18-20]:

- изменение геометрии колеи направляющих проводников, что может привести к выходу из колеи или заклиниванию подъемных сосудов. Это грозит возникновением аварийной ситуации с тяжелыми последствиями;
- в связи с интенсивным истиранием проводников и расстрелов, накоплением усталостных напряжений и коррозионного износа уменьшается время службы элементов армировки;
- стоимость эксплуатации стволов, связанная с большими временными затратами регулярных осмотров и трудоемкостью ремонтов узлов крепления армировки, увеличивается.

Для решения этих проблем необходимо выполнить комплексную оценку технического состояния всех элементов жесткой армировки как единой рамной конструкции с учетом конвергенции бетонной крепи.

Таким образом, задача исследования – изучение особенностей совместного деформирования геотехнической системы «жесткая армировка – крепь ствола» с последующей оценкой определения критических деформаций и их влияния на выбор конструктивных и технологических решений по армированию вертикальных стволов.

Методы. Для решения поставленной задачи применялся как инженерный подход, так и численный – метод конечных элементов (МКЭ) с использованием пакета прикладных программ ANSYS. Необходимо определить зависимости между величиной конвергенции бетонной крепи и величиной деформации (перемещений) жесткой армировки на примере скипо-клетевого шахтного ствола калийного рудника. На практике широко применяются инструментальные методы исследования и контроля систем армировки и подъемных сосудов с использованием современных средств измерений [21-23] и мониторинга [24]. В качестве расчетных методов прежде всего применяется инженерный [25-27], основанный на приближенных подходах теоретической механики и сопротивления материалов [28, 29]. Развиваются также подходы, построенные на численном решении подобных задач методом конечных элементов [30-32]. Некоторые из них рассматривают коробчатые металлоконструкции с учетом коррозии [33-35]. Отметим, что методами численного моделирования рассматриваются пока только отдельные элементы систем армировки, хотя, как представляется авторам, этот метод в сочетании с инструментальными методами мониторинга имеет значительные перспективы.



Предложен комплексный подход к изучению совместного деформирования геотехнической системы «жесткая армировка – крепь ствола», включающий инженерный и численный методы, а также инструментальные измерения деформации крепи. Представлены приближенные соотношения и разработана численная 3D-модель для оценки деформаций системы жесткой армировки с учетом конвергенции бетонной крепи ствола. На примере скипо-клетевого ствола калийного рудника определены напряженно-деформированное состояние и перемещения системы армировки, представлена прогнозная оценка работоспособности армировки при постоянном действии фактора конвергенции бетонной крепи, расположенной в соляных породах.

Инженерная постановка задачи. Основная задача для инженерной оценки работоспособности армировки при действии фактора конвергенции внутреннего диаметра бетонной крепи – анализ перемещений характерных точек для сложной системы расстрелов с течением времени. Сформулировать уравнения для аналитического определения перемещений характерных точек для сложной системы расстрелов с учетом всех сопряжений и точек крепления невозможно. Ограничимся здесь приближенными (инженерными) оценками перемещений в рамках, сделанных ниже допущений. Все точки крепления ярусов армировки в бетонной крепи перемещаются в радиальном направлении на величину ΔR , определяемую конвергенцией крепи при ползучести соляных пород под действием горного давления и зависящую от времени.

Введем систему координат OXY с началом координат, расположенным в центре ствола (рис.1). Здесь буквами A, B, \dots, I, J обозначены точки крепления расстрелов ствола P1-P8 к бетонной крепи, а буквой B_1 новое положение точки B при радиальной конвергенции крепи ствола. Исходя из геометрических размеров системы расстрелов, для каждой точки крепления можно определить угол между радиальным направлением (отрезком, связывающим центр ствола и данную точку, показанным пунктиром) и осью OX . На рис.1 в качестве примера показан угол φ_B для точки крепления B . Через эти углы для каждой точки крепления можно найти перемещения соответствующей точки вдоль осей координат, например

$$\Delta U_{BX} = -\Delta R \cos \varphi_B; \quad \Delta U_{BY} = -\Delta R \sin \varphi_B. \quad (1)$$

Исходя из перемещений всех точек крепления армировки, необходимо оценить новые положения узлов сопряжений продольных и поперечных расстрелов (точки M, N, Q, S, V, W). В общем случае это сложная нелинейная задача, в которой необходимо учитывать как изменение углов в точках крепления и сопряжения расстрелов, так и их возможный изгиб в горизонтальной плоскости из-за потери устойчивости. В случае изгиба центральная часть пролета расстрела получает дополнительное перемещение. Учет всех этих факторов при получении инженерных оценок требует использования дополнительных предположений.

Рассмотрим в качестве примера расстрел P5, имеющий сопряжения с расстрелом P6 в точке M и расстрелом P7 в точке N (рис.1), с возможностью изгиба, приводящего к максимальному перемещению вдоль оси X середины расстрела в месте соединения с проводником ПЗ.

Точка M при конвергенции крепи ствола перейдет в точку M_1 , а точки крепления B и C в точки B_1 и C_1 . Мы предполагаем, что отрезки расстрелов сохраняют свою длину $BM = B_1M_1$ и $CM = C_1M_1$ (при этом угол сопряжения BMC может измениться). Поэтому координаты новых точек крепления

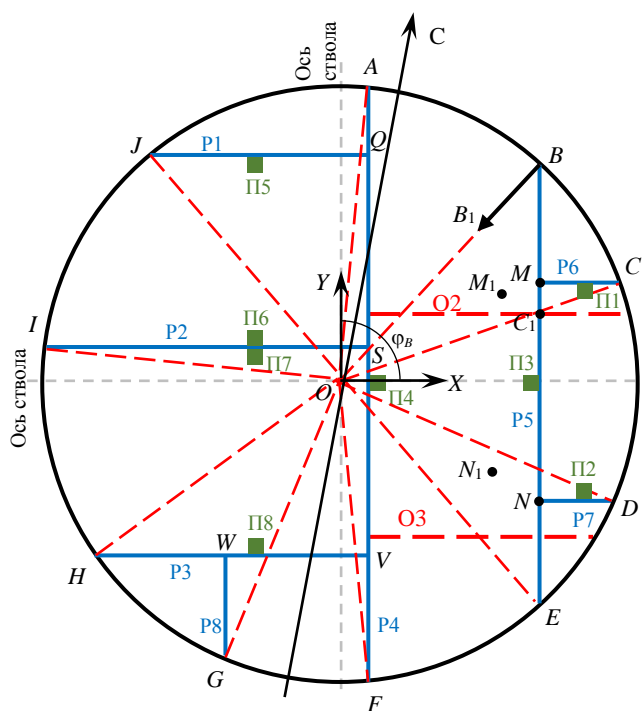


Рис.1. Схема расстрелов и проводников (на примере скипо-клетевого ствола)



$$X_{B_1} = X_B + \Delta U_{BX}; \quad Y_{B_1} = Y_B + \Delta U_{BY};$$

$$X_{C_1} = X_C + \Delta U_{CX}; \quad Y_{C_1} = Y_C + \Delta U_{CY}; \quad (2)$$

$$\Delta U_{CX} = -\Delta R \cos \varphi_C; \quad \Delta U_{CY} = -\Delta R \sin \varphi_C. \quad (3)$$

Примем, что

$$X_{M_1} \approx X_C + \Delta U_{XC}; \quad Y_{M_1} \approx Y_M + \Delta U_{YM}. \quad (4)$$

Нужно отметить, что на положение точки M_1 будут влиять и другие перемещения точек D, E , а также точки сопряжения расстрелов $P5$ и $P7$. Кроме того, большие пролеты расстрелов между точками крепления и/или точками сопряжений могут изгибаться в горизонтальной плоскости.

Оценим стрелу прогиба расстрела $P5$ на участке M_1N_1 , полагая, что происходит потеря устойчивости расстрела при его сжатии в направлении вдоль его оси. Как известно, при достижении критической силы сжатия балка теряет устойчивость и принимает новую (в частном случае плоскую) синусоидальную форму [36]. Количество (или их доля) волн синусоиды зависит от граничных условий закрепления балки. В нашем случае сжимающие силы не действуют строго соосно, поскольку для рассматриваемых случаев расстрелы вмонтированы в бетонную крепь, которая с течением времени деформируется радиально, создавая две проекции перемещений торцов расстрела: вдоль и поперек его оси.

Следуя статье [36], полагаем, что кривая изгиба защемленной балки при потере устойчивости представляет собой полуволну синусоиды, изображенной на рис.2, где показана половина изогнутой кривой балки, пунктиром изображено ее начальное положение.

Первоначальная длина расстрела L , он изгибается со стрелой прогиба C , которую и нужно оценить после смещения одного торца балки вдоль ее оси относительно другого (закрепленного) на величину Δ . Условием для определения стрелы прогиба C является равенство исходной длины половины расстрела $L/2$ и его длины S в изогнутом состоянии. Как известно*, длина кривой определяется интегралом [37]

$$S = \int_0^a \sqrt{1 + (y')^2} dx, \quad (5)$$

где a – длина участка интегрирования; y' – производная по x .

В нашем случае $y = 0,5C \sin(\pi x/a)$; $a = 0,5(L - \Delta)$. Вводя новую переменную $m = -(0,5C\pi/a)^2$, сведем соотношение (1) к полному нормальному эллиптическому интегралу Лежандра 2-го рода $E_2(m)$, не имеющему выражение в квадратурах*,

$$S = \left(\frac{2a}{\pi}\right) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - m(\sin t)^2} dt = \left(\frac{2a}{\pi}\right) E_2(m). \quad (6)$$

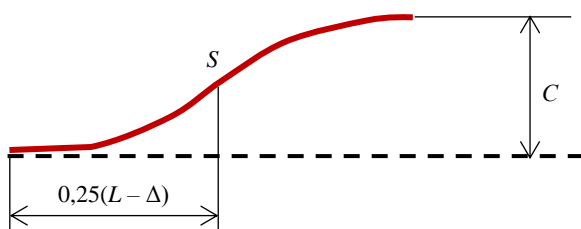


Рис.2. Схема изгиба балки-расстрела

При малых m (стрела прогиба значительно меньше длины расстрела) функция $E_2(m)$ разлагается в виде быстросходящегося степенного ряда

$$E_2(m) \approx \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}m - \frac{3\pi}{128}m^2 + O(m^3), \quad (7)$$

где $O(m^3)$ – величина (остаток степенного ряда), порядок которой не превосходит m^3 .

* Ахиезер Н.И. Элементы теории эллиптических функций. М.: Наука, 1970. 304 с.



В данном случае $m \leq 0,1$, следовательно достаточно использовать в разложении (7) два члена ряда, чтобы получить разумное инженерное приближение.

Таким образом, с учетом требования равенства длин кривых балки-расстрела до и после деформации, выражений для a , m и разложения (7) получим

$$S \approx a \left(1 + \left(\frac{\pi C}{4a} \right)^2 \right) = 0,5L. \quad (8)$$

Соотношение (8) позволяет получить аналитическое выражение для стрелы прогиба

$$C \approx (2/\pi) \sqrt{\Delta(L-\Delta)}. \quad (9)$$

На рис.3 показана сильная нелинейность зависимости от величины смещения торца расстрела вдоль его оси Δ , особенно при малых значениях Δ : так при $\Delta = 5$ мм стрела прогиба $C = 55-72$ мм в представленном диапазоне L . Полученные зависимости рассмотрим при анализе системы расстрелов на примере скипо-клетевого ствола.

Оценка перемещений характерных точек расстрелов. С точки зрения безаварийной эксплуатации армировки и подъемных сосудов прежде всего важно оценить величину перемещений точек расстрелов в направлениях, перпендикулярных расстрелу, в местах крепления проводников, поскольку они могут привести как к заклиниванию подъемного сосуда, так и к его выходу из колеи направляющих проводников. Интересующие нас перемещения можно выразить через соответствующие смещения узлов крепления расстрелов и величину ΔR аналогично формуле (1):

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{П12}} &\approx \frac{1}{2}(\Delta U_{\text{YE}} + \Delta U_{\text{YD}}); \quad \Delta U_{\text{П15}} \approx \frac{1}{2}(\Delta U_{\text{YJ}} + \Delta U_{\text{YA}}); \\ \Delta U_{\text{П16}} &\approx \Delta U_{\text{П17}} \approx 0; \quad \Delta U_{\text{П18}} \approx \Delta U_{\text{YG}}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\Delta U_{\text{П14}} \approx \Delta R + 0,2C(SV); \quad \Delta U_{\text{П13}} \approx \Delta U_{\text{XC}} - C(MN),$$

где $C(SV)$, $C(MN)$ – стрелы прогиба пролетов расстрелов SV и MN , определяемые с помощью графических зависимостей.

Учитывая зависимости перемещения узлов крепления расстрелов от величины ΔR аналогично формуле (1), соотношения (10) приведем к виду:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{П11}} &\approx -0,548\Delta R; \quad \Delta U_{\text{П12}} \approx 0,548\Delta R; \\ \Delta U_{\text{П15}} &\approx 0,906\Delta R; \quad \Delta U_{\text{П16}} \approx \Delta U_{\text{П17}} \approx 0; \quad \Delta U_{\text{П18}} \approx -0,814\Delta R; \\ \Delta U_{\text{П14}} &\approx \Delta R + 0,2C(SV); \quad \Delta U_{\text{П13}} \approx -0,932\Delta R - C(MN). \end{aligned} \quad (11)$$

Формулы (11) представляют собой конечный результат приближенного подхода для оценки перемещений точек расстрелов в местах крепления проводников. Эти формулы справедливы для системы расстрелов (см. рис.1).

Таким образом, максимальные перемещения реализуются на проводнике П4, далее на проводниках П3, П5 и П8. Следовательно, с течением времени проблемы будут возникать прежде всего для этих проводников. Именно они и должны быть предметом пристального внимания при периодическом осмотре состояния армировки ствола.

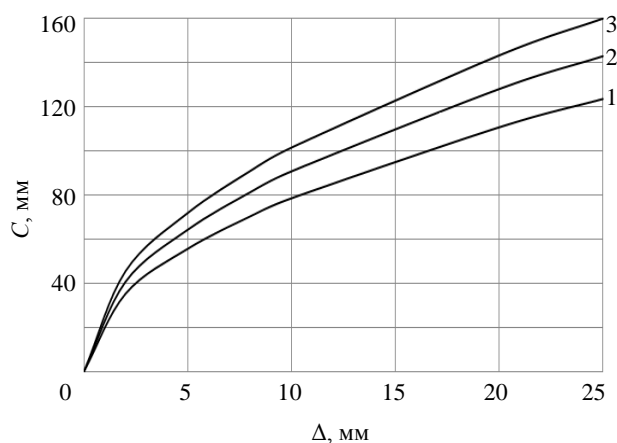


Рис.3. Зависимость стрелы прогиба от величины Δ для различной длины расстрела
1 – 1,5 мм; 2 – 2,0; 3 – 2,5



Численное 3D-моделирование. Достаточно перспективный метод математического моделирования позволяет рассмотреть систему армировки как единую рамную конструкцию в комплексе с бетонной крепью. Применение численных методов учитывает изменение множества различных факторов геометрического и физического состояния армировки, таких как коррозионное уменьшение толщины стенок профиля, механические характеристики применяемой стали (модуль упругости, предел текучести, предел прочности) [33-35, 38], напряжение в системе «армировка – крепь ствола» и др.

Геометрическая модель и фрагмент модели с сеткой КЭ показаны на рис.4. Граничные условия для рассматриваемой геометрической модели армировки состоят в задании проекций перемещений по осям системы координат OXY для всех точек крепления (торцевых сечений) расстрелов Р1-Р8 к бетонной крепи аналогично тому, как это было сделано в инженерном подходе (1). На практике расстрелы заходят в бетонную крепь и закрепляются в ней путем создания дополнительных прокладок (клиньев), а также последующего бетонирования созданной под расстрел «лунки». Такое крепление не может обеспечить «идеальную заделку», в ходе эксплуатации бетон в лунке может растрескаться, а клинья ослабнуть. Все это может привести к созданию вместо «идеальной заделки» упругой шарнирной опоры, а также «проскальзыванию» расстрела при больших осевых нагрузках внутрь бетонной крепи.

Для моделирования этих факторов на торцах расстрела формировались «фиктивные» объемы (рис.4, а), длиной не менее 30 см (на такую величину расстрелы заходят в бетон), на торцах которых и задавались проекции перемещений. Упругий шарнир моделировался заданием пониженных (в 2 раза) по сравнению с самим расстрелом упругих свойств «фиктивных» объемов. Принятая расчетная схема моделирует понижение жесткости бетона в «лунке» крепления расстрела и его частичное «проскальзывание» в сторону породного массива. Таким образом, разработанная численная модель может привести к большим расчетным изгибным перемещениям расстрелов, чем в реальности, т.е. к некоторому «запасу» при прогнозе опасного состояния системы армировки.

Классическая математическая постановка задачи оценки напряженно-деформированного состояния упругопластического тела [39, 40] включает: уравнения равновесия, граничные условия в перемещениях и напряжениях, уравнения Коши, уравнения линейной упругости изотропного тела и уравнения пластичности. В настоящей расчетной схеме не учитываются объемные силы, поверхностные нагрузки отсутствуют. Граничные условия представлены наличием заданных перемещений на торцах расстрелов, их пример приведен в соотношении (1).

Материал армировки – сталь 09Г2с, предел текучести 325 МПа, предел прочности 470 МПа. Поперечное сечение расстрелов представляет собой замкнутый прямоугольный короб размерами 130×212 мм с толщиной стенки 12 мм.

Задачи решались методом конечных элементов в пакете ANSYS [41] в пространственной постановке. Использованы опции Rate Independent, Isotropic Hardening Plasticity, Mises Plasticity, Multilinear для расчетов пластичности.

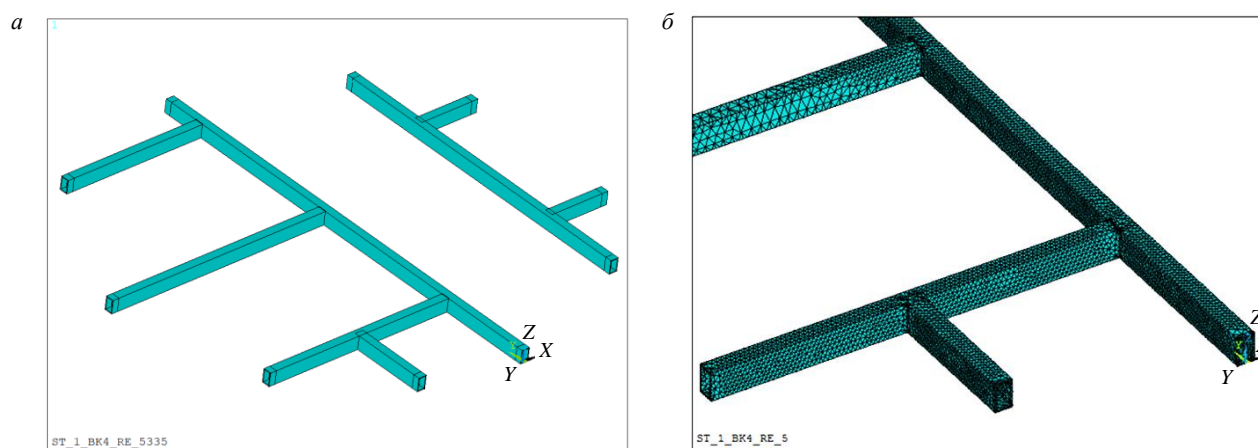


Рис.4. Геометрическая модель системы расстрелов с коробчатым профилем (а) и фрагмент модели с сеткой КЭ (б)



Анализ численных результатов. Проведена серия расчетов деформации армировки при различных величинах конвергенции крепи ствола ΔR . Поле перемещений U_X при величине радиального смещения крепи $\Delta R = 30$ мм представлено на рис.5, где наблюдаются значительные перемещения продольных областей расстрелов Р4 и Р5, расположенных между поперечными расстрелами. Направление осей X на рис.5 и рис.1 совпадают. Величина перемещений U_X достигает 192 мм (расстрел Р4) и -260 мм (расстрел Р5), что значительно превышает величину конвергенции диаметра крепи ствола $2\Delta R = 100$ мм. Этот нелинейный эффект связан с сильным изгибом частей продольных расстрелов.

Известно, что подобные деформации армировки приводят к нарушению безопасной эксплуатации ствола значительно раньше, т.е. при меньших величинах конвергенции крепи. Кроме того, упругопластические деформации (и соответствующий уровень напряжений) могут привести к разрушению сварного коробчатого корпуса балок расстрелов. В областях с развитыми пластическими деформациями может возникнуть так называемый пластический шарнир. На практике больше интересуют перемещения характерных точек армировки (например, в местах расположения проводников) в зависимости от величины радиального смещения крепи ΔR .

На рис.6, а показана зависимость перемещения U_X от ΔR для точек крепления проводников ПЗ и П4. Круглыми маркерами обозначены значения перемещений, вычисленные по инженерным формулам (11), которые дают завышенные по абсолютной величине перемещения по сравнению со значениями, полученными МКЭ. Это объясняется тем, что в численном решении учитывается влияние всей системы расстрелов, а также возможность появления пластических деформаций. Сумма абсолютных величин этих перемещений дает величину уменьшения расстояния между проводниками ПЗ и П4. Очевидно, что уже при смещении крепи ΔR более 15-20 мм перемещения проводников ПЗ и П4 становятся неприемлемыми.

На рис.6, б показаны зависимости уменьшения расстояния вдоль оси OY между проводниками П5 и П6 (кривая 1), П6 и П8 (2), П1 и П2 (3). Максимальные изменения расстояний здесь наблюдаются для проводников П1 и П2. В целом эти величины менее значительные, чем перемещения вдоль оси OX . Это означает, что максимальные перемещения точек расстрелов, определяющие безаварийное функционирование армировки, возникают в горизонтальной плоскости перпендикулярно направлению главных расстрелов (перемещения в точках крепления проводников ПЗ и П4). Была проведена аналогичная серия расчетов для армировки, подверженной коррозии, когда стенка коробчатого профиля уменьшалась на 2,4 мм (до 9,6 мм). Уменьшение стенки приводит к увеличению деформаций системы расстрелов, причем возможны качественные изменения характера

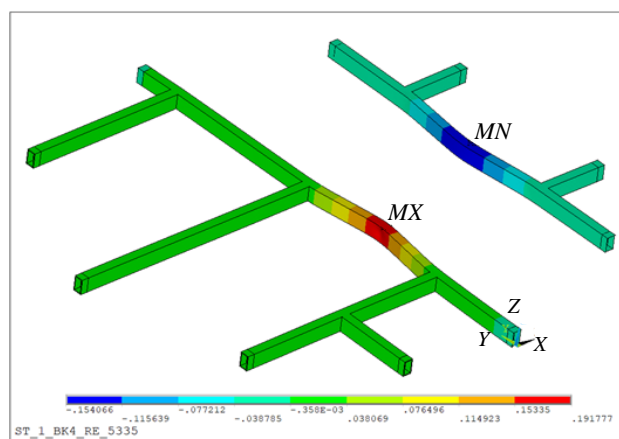


Рис.5. Поле перемещений U_X при $\Delta R = 30$ мм (синий цвет соответствует величине +154 мм, красный +192 мм)

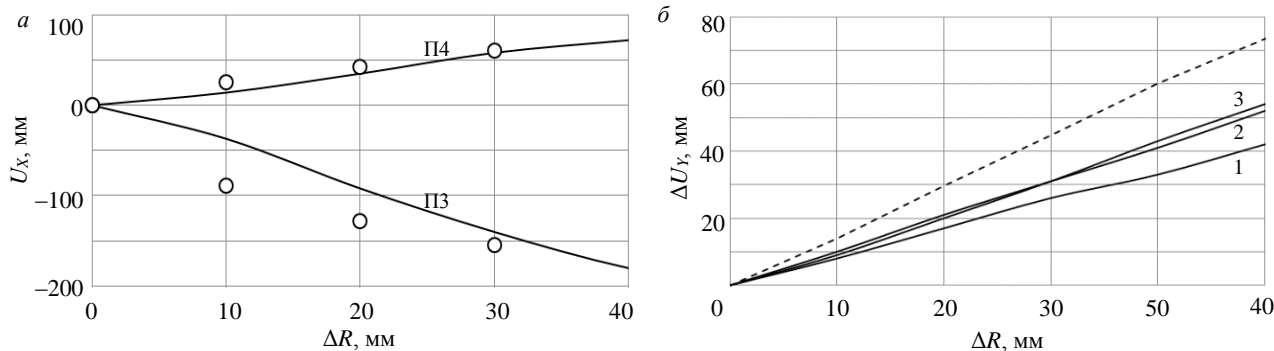


Рис.6. Перемещения характерных точек системы расстрелов



деформирования главного продольного расстрела. На рис.6, б пунктирной линией обозначена зависимость уменьшения расстояния вдоль оси OY между проводниками П6 и П8 при толщине коробчатого профиля 9,6 мм.

Обсуждение результатов. Анализ и сопоставление результатов моделирования, инженерных расчетов и натурных наблюдений проведены по данным многолетних исследований по изменениям расстояний между параллельными расстрелами Р4 и Р5, выполненных в интервале ярусов № 95-140 скипо-клетевого ствола Березниковского рудника. Расстояние между двумя расстрелами измерялось вдоль жирных красных пунктирных линий, построенных через точки отвесов О2 и О3 (см. рис.1).

Величина ΔR принята по данным лазерного сканирования ствола [8], проведенного в 2021 г., причем для каждого яруса выбиралось одно направление запад – восток. Получена оценка средней скорости изменения диаметра при пересечении со слоями карналлита на участке стационарного изменения диаметра 2,0 мм/год. Так как профилировка проводилась в 2013 г., то за 8 лет среднее изменение диаметра могло составить около 16 мм. Эта величина вычиталась из данных лазерного сканирования. После проведения профилировки до конца 2013 г. была выполнена рихтовка проводников. Результаты были учтены при сравнении расчетных и экспериментальных данных.

На рис.7 представлены зависимости расчетных и экспериментальных измерений уменьшения расстояния между расстрелами за 2013 г. Максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными данными с учетом рихтовки – 30 %, среднее расхождение – 10,4 %. Следует отметить качественное совпадение данных расчета по предложенной комплексной методике и профилировочных замеров. Ремонт и замена армировки – процесс крайне трудоемкий, что обуславливает высокие финансовые издержки, связанные с остановкой ствола и соответствующим снижением производительности части или всего калийного рудника. В первые годы эксплуатации армировки шахтного ствола, расположенного в соляном массиве, обходятся локальными ремонтными работами (рихтовкой) по исправлению искривления проводников. Под рихтовкой армировки подразумевается регулирование двух узлов соединения армировки (фланцевых соединений), со смещением продольной оси в каждом узле расстрела на определенную длину, позволяющую вывести колею проводников до базовой величины. В каждом конкретном случае время рихтовки зависит от глубины расположения яруса H и геомеханических характеристик породного массива на этой глубине.

Например, механические свойства карналлитовых пород значительно уступают сильвиниту или каменной соли, поэтому достижение времени T раньше может произойти в сильвинито-карналлитовой зоне, а не в зоне подстилающей каменной соли, расположенной значительно глубже. Кроме того, ослабленной зоной является также область сопряжения ствола с горизонтальными вы-

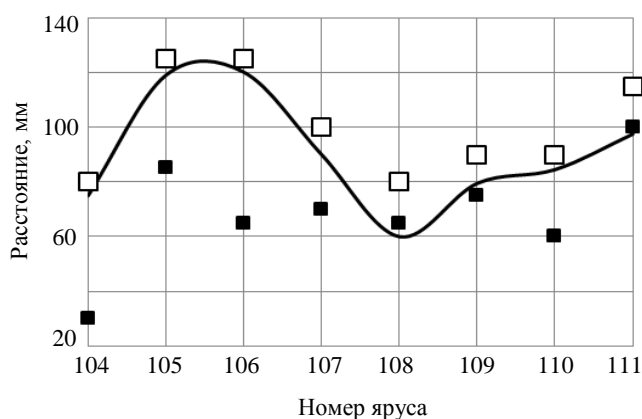


Рис. 7. Изменение расстояния между расстрелами: расчетные (сплошная линия)

и экспериментальные (квадраты) измерения.

Средние значения данных профилировки вдоль линий О2 и О3 без учета рихтовки (черные квадраты);

с учетом проведенной в 2013 г. рихтовки (белые квадраты)

работками. Оценка времени T в такой области затруднительна, поскольку зависит (помимо вышеуказанных факторов) еще и от геометрии (конструктивных особенностей) области сопряжения ствола с горизонтальными выработками [10].

Исходя из характерных скоростей изменения диаметра ствола, полученных с помощью лазерного сканирования [8], результатов данных исследований и численного моделирования процесса деформирования бетонной крепи в результате ползучести соляного массива [10], можно сделать следующие выводы:

- для ярусов армировки, расположенных в карналлитовых породах с большими скоростями изменения диаметра ствола, первую рихтовку необходимо производить уже через



$T = 4-5$ лет после начала эксплуатации, вторую – через 20 лет (примерно 15 лет после первой), третью – через 50 лет (примерно 30 лет после второй);

- первая рихтовка для ярусов с минимальными скоростями изменения диаметра (пересечение с каменной солью, сильвинитом) необходима после $T = 20-25$ лет;
- рихтовка на остальных ярусах необходима во временном диапазоне между этими двумя крайними случаями.

Предложенный комплексный подход для каждой системы расстрелов конкретного ствола необходимо выполнять заново: осуществлять лазерный мониторинг, профилировку, формировать новую расчетную схему и проводить численные исследования. Конечно, погрешность прогнозных расчетов может быть различной для разных стволов. Наиболее сложным моментом является применение предлагаемой методики к оценке деформаций расстрелов после проведенной рихтовки – это требует дополнительных исследований.

Таким образом, практическое применение результатов расчетов и выполненных исследований заключается в прогнозе наступления критических деформаций системы жесткой армировки с дальнейшим обоснованием проведения ремонтных работ.

Заключение. Рассмотрены особенности и проблемы эксплуатации жесткой армировки в шахтных стволах калийных рудников, когда бетонная крепь подвергается значительным деформациям при взаимодействии с породным массивом. Предложена комплексная оценка перемещений характерных точек системы расстрелов, основанная на приближенных инженерных соотношениях, численном моделировании процесса деформирования системы расстрелов и лазерных измерениях конвергенции внутренней поверхности бетонной крепи ствола.

Проведено численное моделирование полной системы расстрелов жесткой армировки в 3D-постановке при конвергенции бетонной крепи ствола, выявлены особенности деформирования расстрелов, максимальные смещения характерных точек. Выполнено сравнение инженерных и численных оценок перемещений системы расстрелов на различных ярусах с данными мониторинга (профилировки) и с лазерными измерениями внутренней поверхности бетонной крепи скипо-клетевого ствола калийного рудника. Исходя из оценок скоростей конвергенции бетонной крепи ствола при пересечении слоев породного массива с различными физико-механическими свойствами получены прогнозные оценки предельного времени эксплуатации армировки, после которого потребуются проведение ремонтных работ.

Таким образом, комплексная оценка деформирования жесткой армировки при конвергенции бетонной крепи ствола позволяет производить корректные расчеты по определению параметров рациональных схем конструкций армировки и крепи стволов, расположенных в соляном массиве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Манец И.Г., Снегирев Ю.Д., Паршинцев В.П. Техническое обслуживание и ремонт шахтных стволов. М.: Недра, 1987. 327 с.
2. Gerdemeli I., Candas A., Unalan M. Design of Mine Shaft Elevator // Scientific Proceedings IX International Congress "Machines, Technologies, Materials", 19-21 September 2012, Varna, Bulgaria. Sofia, 2012. Vol. 2. P. 117-120.
3. Плешкин М.С., Насонов А.А., Ягодкин Ф.И., Привалов А.А. Некоторые вопросы повышения эффективности проектирования, строительства и реконструкции вертикальных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 179-186. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-179-186
4. Страданченко С.Г., Прокопов А.Ю., Ткачева К.Э. Вероятностный подход к определению временных нагрузок на жесткую армировку вертикальных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 8. С. 61-68.
5. Тарасов В.В., Пестрикова В.С., Русаков М.И. Жизненные циклы комплекса сооружений шахтных стволов Верхнекамского месторождения. Новосибирск: Наука, 2021. 230 с.
6. Ягодкин Ф.И., Прокопов А.Ю., Прокопова М.В. Ремонт крепи вертикальных шахтных стволов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. Вып. 3. С. 195-208.
7. Самуся В.И., Ильин С.Р., Ильина И.С., Ильина С.С. Факторы нарушения устойчивости работы системы сосуд-армирование в сложных горно-геологических условиях вертикальных стволов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2015. № 17. С. 72-80. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.17.8
8. Тарасов В.В., Аптуков В.Н. Мониторинг деформации бетонной крепи шахтных стволов с помощью лазерного сканирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 5. С. 188-195. DOI: 10.15372/FTPRPI20220518
9. Трифанов Г.Д., Микрюков А.Ю. Повышение эффективности эксплуатации шахтных подъемных установок на основе мониторинга плавности движения скипов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. 2016. Т. 1. С. 49-54.



10. Tarasov V.V., Aptukov V.N., Pestrikova V.S. Deformation and failure of concrete lining in vertical shaft at intersections with horizontal tunnels // Journal of Mining Science. 2020. Vol. 56. Iss. 5. P. 726-731. DOI: [10.1134/S1062739120057056](https://doi.org/10.1134/S1062739120057056)
11. Константинова С.А., Крамсков Н.П., Соловьев В.А. Некоторые проблемы механики горных пород применительно к отработке алмазных месторождений Якутии. Новосибирск: Наука, 2011. 223 с.
12. Карасев М.А., Буслова М.А., Вильнер М.А., Нгуен Т.Т. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола на участке сопряжения с горизонтальной выработкой в соляных породах // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 628-637. DOI: [10.31897/PMI.2019.6.628](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.6.628)
13. Дубинин М.В., Дворников В.И. Конечноэлементное моделирование напряженно-деформированного состояния жесткой армировки стволов под действием эксплуатационных нагрузок со стороны подъемных сосудов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. 2014. Т. 1. С. 55-60.
14. Балец А.Е., Ефремов Е.Ю. Исследование напряженно-деформированного состояния сопряжения ствола с околоствольными выработками маркшейдерскими методами // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. Вып. 2. С. 267-279. DOI: [10.25635/IM.2019.29.37273](https://doi.org/10.25635/IM.2019.29.37273)
15. Прокопов А.Ю., Прокопова М.В. Проектирование армировки глубоких вертикальных стволов на основе закономерностей функционирования системы «подъемный сосуд – армировка – ствол» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 7. С. 78-82.
16. Kopytov A.I., Pershin V.V., Voitov M.D., Wetti A.A. The Improvement of the Bunton Construction of Mine-shaft Equipment // The 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety, 10-12 October 2016, Kemerovo, Russia. Atlantis Press, 2016. P. 108-110. DOI: [10.2991/coal-16.2016.21](https://doi.org/10.2991/coal-16.2016.21)
17. Сентябов С.В., Селин К.В., Карамнов Д.В. Уточнение и мониторинг параметров вертикальных деформаций оси шахтных стволов на выработанное пространство // Проблемы недропользования. 2020. № 2 (25). С. 108-115. DOI: [10.25635/2313-1586.2020.02.108](https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.02.108)
18. Ilin S.R., Samusia V.I., Ilina I.S., Ilina S.S. Influence of Dynamic Processes in Mine Hoists on Safety of Exploitation of Shafts with Broken Geometry // Науковий вісник Національного гірничого університету. 2016. № 3. С. 48-53.
19. Wolny S., Matachowski F. Analysis of Loads and Stresses in Structural Elements of Hoisting Installations in Mines // Engineering Transaction. 2010. Vol. 58. № 3-4. P. 153-174.
20. Коднянко Е.В. Исследование изнашивания профиля проводников шахтного ствола // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021: Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции, 22-23 апреля 2021 г., Санкт-Петербург, Россия. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. С. 189-191.
21. Xiao Xing-ming, Li Zhan-fang, Zhang Jun. Study on fault mechanism of shaft hoist steelwork // The 6th International Conference on Mining Science & Technology, 18-20 October 2009, Xuzhou, China. Procedia Earth and Planetary Science, 2009. Vol. 1. Iss. 1. P. 1351-1356. DOI: [10.1016/j.proeps.2009.09.208](https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.208)
22. Трифанов Г.Д., Князев А.А., Филатов А.П., Лаук В.В. Опыт эксплуатации шахтных подъемных установок, оснащенных системами непрерывного контроля // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 6. С. 52-58. DOI: [10.24000/0409-2961-2019-6-52-58](https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-6-52-58)
23. Hanna M., Lloyd A., Tikka T. Improving conveyance side slipper plate design to accommodate higher impact bunton force // Building Tomorrow's Society, 13-16 June 2018, Fredericton, Canada. Canadian Society for Civil Engineering, 2018. P. ST49-1 – ST49-10.
24. Зеленко А.В., Горбач А.Н. Непрерывный мониторинг безопасного движения подъемных сосудов шахтных стволов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования: Материалы VI Международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика-2019», 21-24 октября 2019 г., Пермь, Россия. Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2019. Т. 1. С. 37-43.
25. Nikolaitchik M. Determination of skip force effect on guides in mine shaft // Ukrainian School of Mining Engineering, 7-11 September 2020, Berdiansk, Ukraine. E3S Web of Conferences, 2020. Vol. 201. № 01017. DOI: [10.1051/e3sconf/202020101017](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101017)
26. Микрюков А.Ю., Каменских Я.В. Обследование и оценка технического состояния подъемных сосудов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования: Материалы VI Международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика-2019», 21-24 октября 2019 г., Пермь, Россия. Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2019. Т. 1. С. 69-75.
27. Пестрикова В.С. Алгоритм расчета долговечности жестких армировок шахтных стволов, эксплуатируемых в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. Вып. 4. С. 332-339.
28. Jiannan Yao, Xiaojie Deng, Chi Ma, Tong Xu. Investigation of Dynamic Load in Superdeep Mine Hoisting Systems Induced by Drum Winding // Shock and Vibration. 2021. Vol. 2021. № 4756813. DOI: [10.1155/2021/4756813](https://doi.org/10.1155/2021/4756813)
29. Качурин Н.М., Афанасьев И.А., Пестрикова В.С., Стась П.П. Взаимодействия вертикальных стволов с породными массивами при восстановлении крепи и армировки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. Вып. 3. С. 290-303.
30. Журавков М.И., Николайчик М.А. Конечно-элементное моделирование взаимодействия подъемного сосуда с конструктивными элементами шахтного ствола // Горная механика и машиностроение. 2021. № 4. С. 15-21.
31. Николайчик М.А., Журавков М.И. Математическое моделирование состояния ответственных элементов шахтного подъемного комплекса // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию Белорусской железной дороги, 24-25 ноября 2022 г.: в 2 ч. Гомель, Беларусь. Белорусский государственный университет транспорта, 2022. Ч. 2. С. 228-230.
32. Jakubowski J., Fiolek P. Evaluation of Stiffness and Dynamic Properties of a Mine Shaft Steelwork Structure through In Situ Tests and Numerical Simulations // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 3. № 664. DOI: [10.3390/en14030664](https://doi.org/10.3390/en14030664)



33. *Fiolek P., Jakubowski J.* Assessment of the Bending Moment Capacity of Naturally Corroded Box-Section Beams // *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 19. № 5766. DOI: [10.3390/ma14195766](https://doi.org/10.3390/ma14195766)
34. *Fiolek P., Jakubowski J.* Local buckling of highly corroded hot-rolled box-section beams // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 157. P. 359-370. DOI: [10.1016/j.jcsr.2019.03.009](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.03.009)
35. *Jakubowski J., Fiolek P.* Probabilistic structural reliability assessment of underground shaft steelwork // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022. Vol. 130. № 104755. DOI: [10.1016/j.tust.2022.104755](https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104755)
36. *Лалин В.В., Кушова Д.А.* Геометрически нелинейное деформирование и устойчивость плоских упругих стержней с учетом жесткостей на растяжение-сжатие, сдвиг и изгиб // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013. Vol. 9. Iss. 4. P. 178-185.
37. *Прасолов В.В., Соловьев Ю.П.* Эллиптические функции и алгебраические уравнения. М.: Изд-во Московского центра непрерывного математического образования, 2022. 312 с.
38. *Самуся В.И., Ильина И.С., Ильина С.С.* Компьютерное моделирование и исследование динамики систем «сосуд-армировка» в стволах с нарушенной геометрией // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2016. Т. 15. № 20. С. 277-285. DOI: [10.15593/2224-9923/2016.20.8](https://doi.org/10.15593/2224-9923/2016.20.8)
39. *Тутышкин Н.Д., Гвоздев А.Е., Трегубов В.И. и др.* Комплексные задачи теории пластичности. Тула: Изд-во Тульского государственного университета, 2015. 408 с.
40. *Бровко Г.Л.* Подходы к постановкам и методам решения краевых задач механики деформируемого твердого тела // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2013. Т. 7. № 3-1. С. 46-65. DOI: [10.17816/2074-0530-67989](https://doi.org/10.17816/2074-0530-67989)
41. *Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С.* ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. М.: ЛЕНАНД, 2014. 456 с.

Авторы: **В.В.Тарасов**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, Vladislav.Tarasov@uralkali.com, <https://orcid.org/0000-0002-3431-7028> (АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия), **В.Н.Аптуков**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0001-8048-3804> (АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия), **О.В.Иванов**, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0001-6566-4375> (АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Обоснование необходимости улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы на основе анализа данных об отработке сложноструктурных блоков

М.В.Цупкина✉, А.Е.Кирков, Д.А.Клебанов, Д.Н.Радченко

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Цупкина М.В., Кирков А.Е., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н. Обоснование необходимости улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы на основе анализа данных об отработке сложноструктурных блоков // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 316-325. EDN JOLUPJ

Аннотация. Продолжительная деятельность горно-добывающих предприятий вызывает необходимость обоснования стратегий управления функционированием горно-технической системы в части улучшения контроля качества рудопотоков, что определяется его изменением по мере освоения месторождений ввиду первоочередной отработки основных запасов и, как следствие, вынужденным переходом к отработке сложноструктурных блоков со снижением процента извлечения, что характерно при соответствии рудной составляющей требованиям технико-экономического обоснования по содержанию при некондиционной мощности. В этом случае выявить процент извлечения и потенциал его повышения можно путем анализа многолетней деятельности горно-промышленного предприятия, а именно аналитики данных отработки сложноструктурных блоков с последующим установлением взаимосвязи первичных сведений о горно-геологических условиях и сведений о качестве полезного ископаемого, получаемых от технологического оборудования. Поэтому целью исследования являлось обоснование необходимости улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы, которая заключается в том, что на базе аналитики данных отработки сложноструктурных блоков можно определить потери рудной массы и их количество и заложить в основу разработки решений по ее доизвлечению. Для этого собранные данные об отработке сложноструктурных блоков с учетом геолого-промышленного типа добываемых руд учитывали при моделировании условий и исследовании параметров технологических процессов, реализация которых обеспечивает получение дополнительной товарной продукции. Установлено, что в отвалы поступает рудная масса из некондиционных по мощности прослоев, оценены потери рудной массы в 25-40 % в год. Доказано, что определение потерь рудной массы на основе анализа данных об отработке сложноструктурных блоков, а также своевременное решение этого вопроса способны существенно повысить эффективность производства горно-технической системы. С учетом полученных результатов предложены варианты оптимизации производства горно-технической системы.

Ключевые слова: горно-техническая система; управление качеством; рудопотоки; сложноструктурные блоки; большие данные; аналитика данных; оптимизация производства

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00142.

Поступила: 02.08.2023

Принята: 27.12.2023

Онлайн: 29.02.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. Продолжительная деятельность горно-добывающих предприятий с приоритетом добычи богатых руд постепенно приводит к тому, что уже в настоящее время фиксируется рост объемов добычи при одновременном снижении качественных характеристик рудопотоков [1, 2]. Это является одной из актуальных проблем, снижающих эффективность производства горно-технической системы [3, 4]. Поскольку рациональное управление качественными характеристиками добываемой рудной массы лежит в основе обеспечения производственных показателей горно-технической системы [5, 6], решение этой проблемы позволит повысить полноту освоения недр и улучшить производственные показатели горных предприятий в целом.

Управление качественными характеристиками рудопотоков, как правило, проводится во всех технологических процессах по цепочке: вскрытие месторождения или его частей – подготовка



к очистной выемке – погрузка в транспортные средства – транспортирование – отгрузка и складирование на переработку – обогащение. Эффективность управления качественными характеристиками напрямую зависит от анализа данных [7, 8], поступающих от горного массива и технологического оборудования [9].

Согласно источникам [10, 11], традиционные методы и инструменты управления качеством позволяют выявлять проблемы и оптимизировать процесс принятия решений, однако весомым недостатком можно считать задержку в выполнении корректирующих действий. Кроме того, продолжительное освоение месторождений полезных ископаемых приносит новые сложности в технологические процессы, что зачастую связано с истощением запасов или усложнением горно-геологических условий и требует новых подходов в управлении качеством рудной массы. Информационные и коммуникационные технологии позволяют повышать эффективность при управлении качеством за счет интеграции в технологические процессы различного рода закономерностей, получаемых при анализе данных и отражающих эффективность производства [12, 13], а также управлять качеством рудной массы в режиме реального времени, обеспечивая при этом минимизацию потерь [11, 14, 15].

В настоящее время технологии Индустрии 4.0*, такие как Интернет вещей (IoT) [16], большие данные [17], облачные вычисления, 3D-визуализация, обеспечивают цифровую трансформацию горно-промышленных предприятий с рядом преимуществ с точки зрения производственной эффективности, качества продукции и снижения затрат [18-20], а также определения и прогнозирования различных параметров технологических процессов [21-23]. Авторы статьи [24] считают, что ключевыми компонентами для эффективного управления качеством являются обработка больших данных и улучшение предписывающей аналитики.

Основой системы цифрового управления технологическими процессами, способной обеспечить требуемый уровень эффективности на горно-добывающем предприятии [25], является достоверная и своевременная информация на всех уровнях производства [26, 27]. Однако наибольшие показатели эффективности могут быть достигнуты только с учетом понимания целевой задачи, на основе которой должен быть определен перечень источников информации и видов данных, генерируемых при осуществлении технологических процессов. В части управления качеством такими источниками могут быть данные о вещественном составе и технологических свойствах руд, геофизических и геохимических исследованиях [28-30], а также данные из аналитических информационных и автоматизированных систем [31], в числе которых автоматизированная система управления горно-транспортным комплексом (АСУ ГТК), автоматизированная система управления буровзрывными работами (АСУ БВР), система контроля качества и иные системы и типы данных, включающие информацию об изменении качественных характеристик полезного ископаемого на всех этапах освоения месторождения [32].

С точки зрения определения источников цифровых данных и организации их сбора наиболее подходит классификация источников данных горно-технической системы по признаку объекта их получения, предложенная в работе [33], поскольку данная классификация позволяет на этапе проектирования для каждого физического объекта обосновать порядок ввода источника информации в эксплуатацию, определить параметры получаемых сигналов и принципы их трансформации в цифровую форму и при необходимости установить требования к частоте получаемых данных, а также формат, пригодный для обработки, анализа, длительного хранения и условий использования данных.

Постановка проблемы. По мнению авторов работы [34], решением, способствующим повышению однородности качественных характеристик формируемых рудопотоков, является надежное выделение в массиве горных пород рудных залежей с точным их оконтуриванием и выявлением технологических типов и сортов руд, обеспечением их эффективной добычи и транспортирования в соответствующих режимах разделения или усреднения качества. Но надежность такого выделения зависит от горно-геологических условий осваиваемых месторождений, на основании анализа которых определяются промышленная ценность и группа сложности объектов с последующим

* Industrial Development Report 2020: Industrializing in the digital age. Vienna: United Nations: Industrial Development Organization, 2019. 228 p.



обоснованием геотехнологии их разработки [35]. Следует отметить, что качественные показатели добываемой рудной массы в решающей степени зависят от горно-геологических особенностей разрабатываемых месторождений, поэтому необходимо уделять особое внимание повышению достоверности и обработке данных о горном массиве и интерпретировать полученные результаты с учетом анализа других источников данных.

Проблема обеспечения постоянного качества наиболее актуальна для горных предприятий, ведущих разработку сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых [36, 37], где в общих объемах осваиваемого месторождения отмечается значительное долевое участие маломощных крутопадающих рудных тел, эффективная выемка которых весьма затруднительна [38]. Основные сложности обеспечения качественных характеристик в таком случае, как правило, связаны с меньшей мощностью рабочих органов выемочного оборудования в сравнении с мощностью рудных прослоев, что в результате обуславливает разубоживание рудной массы, влекущее снижение качественных характеристик сырья.

Кроме того, при освоении месторождений горные предприятия обязаны осуществлять свою деятельность в соответствии с принятым технико-экономическим обоснованием (ТЭО) кондиций, которое может устанавливать ограничения как по содержаниям ценных компонентов, так и по мощности рудных тел. Так, например, если в пределах разрабатываемого месторождения отмечается наличие рудных прослоев мощностью 4-5 м, а кондиции при этом ориентированы на отработку прослоев мощностью более 6 м, основная блочная модель месторождения, формирующаяся с учетом соблюдения кондиций по мощности, упрощается за счет исключения из нее рудных прослоев, мощность которых не удовлетворяет принятым требованиям. В результате снижается достоверность реальной горно-геологической ситуации, что впоследствии ведет к снижению производительности предприятия за счет планирования горных работ на основании неполного набора данных, приводящих к значительным потерям рудной массы, поступающей в отвальные сооружения. Это позволяет сформулировать гипотезу о необходимости изыскания решений, направленных на выявление возможных потерь рудной массы и обоснование рекомендаций, обеспечивающих повышение эффективности при управлении качеством в ходе освоения месторождения.

Так, из-за возрастающей при отработке сложноструктурных блоков вероятности значительных потерь рудной составляющей, соответствующей по содержанию требованиям ТЭО при некондиционной мощности, предложен вариант улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы, отличающийся тем, что повышение полноты освоения недр может быть обеспечено на базе анализа данных об отработке сложноструктурных блоков, а именно за счет выявления видов возможных потерь и их количественного показателя, что в результате будет способствовать разработке решений, направленных на доизвлечение рудной массы. Обоснование предложенного варианта обусловит возможность пересмотра существующих систем управления качеством либо их дополнения с учетом необходимости увеличения производительности предприятия и получения дополнительной товарной продукции в виде продуктивной фракции, ранее не извлекаемой по объективным причинам.

Обоснование улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы в части управления качеством в рамках горно-промышленных предприятий является серьезной задачей, решение которой может быть осуществлено путем получения их многолетней деятельности. В основе исследования лежит анализ больших массивов данных, генерируемых при функционировании горно-технической системы от каждой единицы горного оборудования, являющейся источником формирования данных о показателях своей работы и состоянии [9, 27, 39]. В данном случае для решения проблемы управления качеством рудопотоков особое внимание следует уделять аналитике данных об отработке сложноструктурных блоков с последующим установлением взаимосвязи первичных данных о горно-геологических условиях месторождения и данных о качестве полезного ископаемого, получаемых от технологического оборудования.

Целью исследования является обоснование необходимости и возможности совершенствования стратегий управления горно-техническими системами на основе более адекватных блочных моделей и механизмов управления рудопотоками с использованием современных методов предиктивной аналитики.



Методология. Поскольку наибольшие показатели эффективности процессов отработки горно-технической системы могут быть достигнуты только с учетом понимания целевой задачи, следует учитывать, что перечень запрашиваемых данных определяется как в зависимости от наличия данных у предприятия, так и с учетом геолого-промышленного типа месторождения. Так, при сборе информации на предприятии, добывающем железные руды^{*}, обязательны данные как химического опробования, так и геофизических методов определения качества полезного ископаемого.

Для проверки предложенного варианта улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы на одном из железорудных горно-промышленных предприятий страны был проведен аудит текущей системы управления качеством, а также запрошены ретроспективные данные за последние три года деятельности, включающие информацию об отработке сложноструктурных блоков, получаемых от горного массива и технологического оборудования.

Моделирование условий и исследование параметров технологических процессов, реализация которых может обеспечить извлечение дополнительной товарной продукции, осуществлялось в несколько этапов:

- сбор и обработка всей полученной от предприятия информации об отработке сложноструктурных блоков, получаемых от горного массива и технологического оборудования;
- выполнение проверки целостности выгрузок из предоставленных баз данных;
- подготовка исходных данных, представленных в виде распределения показателей строения массива, элементов рабочих процессов горно-технической системы, привязанных к конкретным точкам пространства и времени;
- моделирование условий и исследование параметров технологических процессов на базе закономерностей, выявленных на первом этапе;
- подготовка выводов на основе анализа данных о возможных сценариях отработки сложноструктурных блоков для определения видов возможных потерь и их количественных показателей.

С учетом наличия у предприятия данных, а также геолого-промышленного типа добываемых руд, перечень необходимых данных включал:

- карты распределения содержания железа магнитного по обрабатываемым блокам, составленные на этапе годового планирования;
- карты распределения содержания железа магнитного по обрабатываемым блокам, построенные по данным каротажа буровзрывных скважин;
- схема расположения блоков на плане карьера;
- принятые на предприятии инструкции по определению, учету и нормированию потерь при добыче;
- данные статистики работы рудоконтрольных станций;
- отчеты по потерям;
- данные о типах руд и их характеристиках (исследование);
- данные по скважинам этапа геолого-разведочных работ на месторождении, которые являются основой для построения исходной блочной модели;
- текущие требования по качеству руды на обогатительной фабрике;
- список атрибутов (содержание железа магнитного, серы, обогатимость, литология);
- данные по применяемым выемочно-погрузочным и транспортным средствам;
- данные системы диспетчеризации (количество машин, направленных на отвал, на рудный склад, на СМС с привязкой к забоям).

На этапе подготовки исходных данных к моделированию выполнялась проверка целостности выгрузок из баз данных, которая заключалась в определении наличия информации по пространственному положению и параметрам скважин. Кроме того, производилась перекрестная проверка на соответствие одной и той же информации, представленной в различных записях разных таблиц баз данных.

На начальной стадии подготовки ресурсной модели было принято решение использовать данные блочной модели предприятия, однако в ходе проведенного анализа данных каротажа по

^{*} Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Железные руды. М.: Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых, 2007. 40 с.

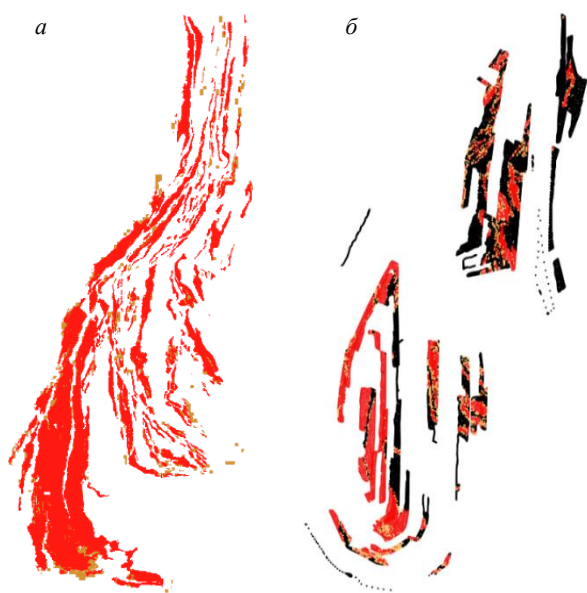


Рис.1. Результаты сопоставления данных каротажа скважин (а) и блочной модели (б)

блокам, включая поиск некондиционных по мощности прослоев с учетом особенностей залегания рудных залежей и годового понижения горных работ, было установлено расхождение данных блочной модели с результатами каротажа скважин (рис.1). В ходе моделирования это может привести к несовпадению объемов добычи, получаемых по факту и по результатам моделирования.

Вторым негативным моментом, влияющим на качество конечного результата, является использование интерполяционных моделей при построении блочной модели, что увеличивает плавность контуров и приводит к увеличению затрат ресурсов на обработку и анализ полученной информации. Поэтому было принято решение использовать в качестве исходной информации о геологическом строении аналог блочной модели, построенной по данным каротажа скважин без использования интерполирования (рис.2).

В основе предлагаемой модели лежит метод под-

счета запасов А.К.Болдырева и понятие ближайшего района (геометрической области влияния скважины)* (рис.2, б).

На этапе обработки информации осуществлялся выбор исходных данных для моделирования. Ввиду отсутствия стандартизации сбора и хранения цифровых данных, а также неструктурированных данных от множества технологических процессов, полученная информация о функционировании горно-технической системы была разноформатной, что затрудняло ее анализ с помощью стандартных методов математического анализа. Поскольку геологические данные генерируются в процессе исследования и доизучения отрабатываемого массива (периодичность поступления и обновления минимум от одного раза в месяц), а данные диспетчеризации (дискретность – 1 с и более) – от работы технологического оборудования, возникает проблема увязки собранной информации в единый взаимодополняющийся комплекс или структуру пространственно-временных наборов данных. Проблема решается путем синхронизации, структурирования, трансформирования и приведения различных наборов данных к единому формату, который позволяет выполнить построение единой пространственно-временной модели, обрабатываемой при помощи единообразных методов и правил.

Анализ исходных данных на этапе их подготовки позволил выделить два ключевых набора факторов, оказывающих основное влияние на эффективность работы горно-технической системы

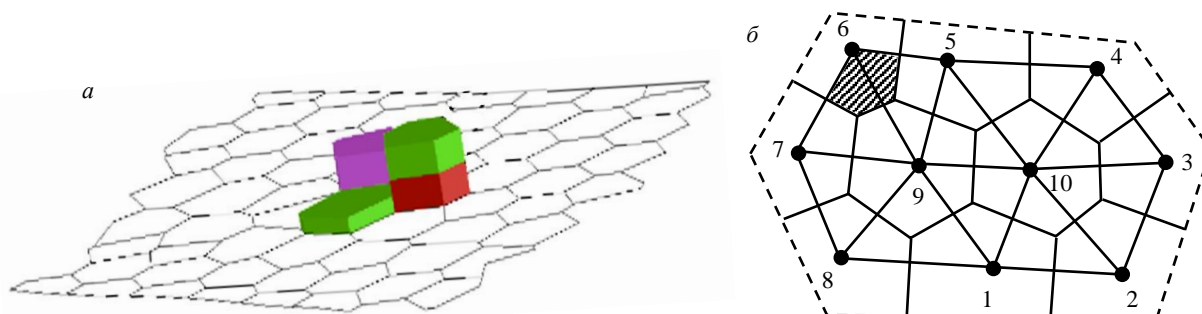


Рис.2. Принцип совмещения данных каротажа с ближайшими районами (а) и принцип построения ближайшего района (б) для скважин

* Замотин В.Б., Кошкина Л.Б., Лысков И.А. Подсчет запасов твердых полезных ископаемых. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2012. 33 с.



данного предприятия: факторы, относящиеся к особенностям геологического строения, и факторы, относящиеся к работе горно-транспортной системы, которая формирует структуру рудопотока и потока вскрышных пород.

Геологическая составляющая набора геопространственных исходных данных в данном случае представлена описанием геологической информации в виде простых текстовых и графических файлов: графическое представление обрабатываемого блока в виде наборов ближайшего района для каждой скважины блока, данными каротажа, данными по скважинам с площадями построенных ближайших районов.

Информация о работе горно-транспортного оборудования, в том числе информация об объемах грузоперевозки, представлена набором базовых показателей автоматизированной системы диспетчеризации: средние скорости движения автосамосвалов, дистанции их движения от блоков до точек разгрузки, модельный ряд автосамосвалов по объемам кузовов, данные по средним интервалам погрузки одного автосамосвала с учетом производительности конкретного экскаватора, данные по объемам ковшей применяемых экскаваторов. Указанный набор данных в качестве констант и параметров представлен в виде электронных таблиц и использовался для получения различных вариантов моделей на одном и том же наборе геологических данных.

Программная часть базы данных на основе указанной информации генерирует выходные данные в виде наборов файлов: карточка блока с запасами, поток автосамосвалов с информацией по каждой машине, статистика по всем сгенерированным автосамосвалам и суммарная статистика по данным о запасах во всех блоках, вошедших в модель. Указанный набор данных позволяет путем простого сопоставления данных разных файлов проверять корректность генерации ресурсов для модели.

Обсуждение результатов. Сравнение результатов анализа двух представленных подходов позволило сделать следующий вывод: качество представляемой информации по двум методикам сопоставимо, но рекомендованный вариант моделирования является менее затратным с точки зрения времени и ресурсов, также при применении различных интерполяционных моделей, сглаживающих фактическое распределение компонентов, не вносится дополнительное искажение в исходную информацию, поэтому он является предпочтительным. На рис.3 представлены примеры графического отображения моделируемых блоков.

Для определения необходимых параметров работы транспортной системы карьера выполнен анализ данных системы диспетчеризации. Всего по данным диспетчеризации было проверено и обработано 3548880 записей. Исправления в координаты были внесены в 391275 записях, что составляет 11 % от общего объема.

Далее для анализа был рассчитан средний интервал погрузки и определены общие данные по производительности работы экскаваторов. При выполнении расчетов анализировались данные о времени загрузки каждого автосамосвала с привязкой к конкретному экскаватору. Анализ производился для различных интервалов накопления статистики от минуты до квартала. На рис.4 представлен пример построения графика интенсивности погрузки автосамосвалов.



Рис.3. Примеры графического представления модели блоков при создании ресурсной базы данных

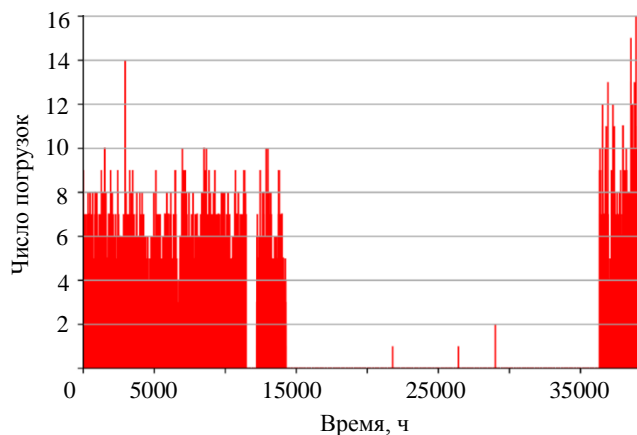


Рис.4. Статистика работы экскаватора 13 (максимум погрузок – 16) в течение часа

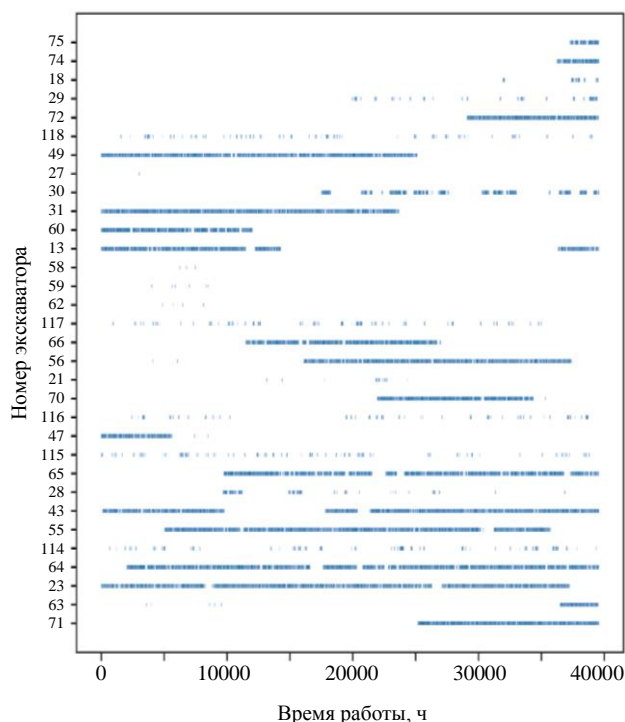


Рис.5. Диаграмма длительности непрерывной работы по всем экскаваторам



Рис.6. Результат моделирования процессов погрузки и транспортирования горной массы из сложноструктурных блоков с учетом кондиции по мощности и без них:

- а – блок без учета кондиций по мощности;
- б – общий вид сложноструктурного блока с учетом балансовых (красный) и забалансовых (желтый) руд;
- в – блок с учетом кондиций по мощности

Анализ графиков позволил определить средние длины интервалов между погрузками автосамосвалов, а также колебания длины интервала в зависимости от интенсивности работы экскаватора. Результаты определения интервалов собраны в файл протокола, в заключении которого представлена суммарная информация по простоям, числу и интервалам погрузок. Вся информация представлена в текстовом виде с разделителями, что способствует упрощению ее загрузки в редакторы электронных таблиц для последующего анализа данных.

Вторым направлением анализа была оценка числа одновременно работающих экскаваторов. Анализ диаграммы длительности непрерывной работы по каждому экскаватору (рис.5) позволил установить, что одновременно на карьере работает до 13 экскаваторов, а среднее число одновременно работающих экскаваторов составляет только семь единиц.

Полученные данные об интервалах работы горно-транспортного оборудования могут быть заложены в основу системы управления рудопотоками в части снижения простоев за счет перенаправления транспортирующей техники. Это позволит улучшить стратегию управления функционированием горно-технической системы за счет анализа массива данных о работе горно-транспортного оборудования при отработке сложноструктурных блоков.

В результате была создана ресурсная база данных, полученная по итогам статистической обработки данных о работе горно-промышленного предприятия за последние несколько лет. Благодаря собранной информации удалось смоделировать процессы погрузки и транспортирования горной массы из сложноструктурных блоков с учетом кондиции по мощности и без них (рис.6). На основании результатов моделирования были рассчитаны объемы рудной массы с учетом кондиции по мощности и без них. Определяемая далее разница объемов позволила установить объемы рудной массы, поступающие в отвалы вскрышных пород, значения которых составляли 25-40 % в зависимости от геологического строения обрабатываемых сложноструктурных блоков.

Далее осуществлялась верификация модели по двум основным фактам – данные обогачительной фабрики о качестве поступающих на нее рудопотоков и данные о качестве



горной массы, направляемой в отвалы вскрышных пород. Сопоставление данных, полученных в ходе моделирования, и данных, используемых для верификации, подтвердили достоверность моделирования.

В результате моделирование позволило оценить потери кондиционной по качеству и некондиционной по мощности рудной массы от 25 до 40 % в год, что подтверждает необходимость улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы на основе анализа данных об отработке сложноструктурных блоков.

Заключение. Полученные в ходе обработки имеющихся на предприятии баз данных результаты оценки их целостности подтвердили необходимость стандартизации подходов к обработке, сбору и анализу информации [34]. Стандартизированный подход к внедрению цифровых решений позволит более эффективно расширять функционал и обеспечивать сопряженность информации со смежными структурными подразделениями при управлении горно-технической системой, что в подтверждение выдвинутой гипотезы будет способствовать рациональной оценке возможных вариантов улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы в части оптимизации технологических процессов конкретного предприятия.

Сопоставление результатов каротажа скважин, которые не учитывают минимальную, заданную ТЭО кондиций, мощность рудных прослоев, и данных блочной модели предприятия, созданной с учетом всех требований, позволило определить один из видов потерь: в отвалы поступает рудная масса из маломощных прослоев необходимого качества по содержанию, но не обеспечивается кондиционная мощность этих прослоев, в соответствии с принятыми требованиями ТЭО кондиций.

Несомненно, ТЭО кондиций разрабатывалось с учетом целесообразности и экономической эффективности разработки определенного месторождения полезных ископаемых, что подразумевает нормативно-правовые сложности при пересмотре и изменении кондиционных требований, а также изменении системы управления качеством в целом. Поэтому определена возможность корректировки системы управления качеством минерально-сырьевых потоков предприятия за счет оптимизации следующих направлений:

- получение более детальной информации о структуре подготавливаемых блоков с выявлением некондиционных в настоящее время по мощности рудных тел за счет внедрения аналитических платформ, которые на основе анализа исторических данных и поиска в них закономерностей позволят обеспечить повышение достоверности при последующих опробованиях;
- совершенствование технологий селективной выемки руд на этапе экскавации в забое для минимизации разубоживания;
- при невозможности совершенствования технологий селективной выемки рассматривается вариант внедрения циклично-поточной технологии для выделения на конвейере ранее не извлекаемой рудной массы; в этом случае циклично-поточная технология обеспечит не только оптимизацию транспортирования рудной массы, но и позволит осуществлять своевременное управление качеством рудопотоков посредством определения рудной составляющей, поступающей на конвейер из сложноструктурных блоков, и ее перенаправлением на рудные склады, а не отвальные сооружения.

Улучшение стратегии управления функционированием горно-технической системы на фоне тенденции неизбежного ухудшения горно-геологических и горно-технических условий разработки месторождений представляет весьма актуальное направление совершенствования технологических процессов освоения недр. Обеспечение стабильных показателей качества добываемых полезных ископаемых в настоящее время становится важной проблемой любого горно-добывающего предприятия и может быть решено за счет анализа данных об отработке сложноструктурных блоков, полученных от горного массива, среды, технологического оборудования, а также автоматизированных систем горно-промышленного предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Юн А.Б., Терентьева И.В. Становление нового технологического уклада комплексного освоения недр при истощении балансовых запасов месторождений // Горный журнал. 2019. № 4. С. 11-14. DOI: 10.17580/gzh.2019.04.02
2. Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых / Под ред. К.Н.Трубецкого. М.: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 2014. 196 с.



3. Яковлев В.Л. Методологические основы стратегии инновационного развития горно-технических систем при освоении глубокозалегающих месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5-1. С. 6-18. DOI: [10.25018/0236_1493_2021_51_0_6](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_6)
4. Cohen M.W., Coelho V.N. Open-Pit Mining Operational Planning using Multi Agent Systems // Procedia Computer Science. 2021. Vol. 192. P. 1677-1686. DOI: [10.1016/j.procs.2021.08.172](https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.172)
5. Ломоносов Г.Г. Улучшение качества продукции горно-добывающего производства как фактор повышения эффективности российского горно-перерабатывающего комплекса // Рациональное освоение недр. 2015. № 2. С. 51-61.
6. Туртыгина Н.А., Охрименко А.В., Цыганкова Д.Н. Систематизация факторов, влияющих на стабильность качества рудопотока // Научный вестник Арктики. 2022. № 13. С. 5-14. DOI: [10.52978/25421220_2022_13_5-14](https://doi.org/10.52978/25421220_2022_13_5-14)
7. Hadjigeorgiou J. Understanding, managing and communicating geomechanical mining risk // Mining Technology. 2020. Vol. 129. Iss. 3. P. 159-173. DOI: [10.1080/25726668.2020.1800909](https://doi.org/10.1080/25726668.2020.1800909)
8. Nimmagadda S.L., Murupindy V.V., Reiners V.T. On Digital Opencast Mining Ecosystems (DOME) and Knowledge Management – a Big Data Perspective // 1st Australasian Exploration Geoscience Conference, 18-21 February 2018, Sydney, Australia. ASEG Extended Abstracts, 2018. Vol. 2018. Iss. 1. P. 1-5. DOI: [10.1071/ASEG2018abP086](https://doi.org/10.1071/ASEG2018abP086)
9. Deryabin S.A., Temkin I.O., Zykov S.V. About some issues of developing Digital Twins for the intelligent process control in quarries // Procedia Computer Science. 2020. Vol. 176. P. 3210-3216. DOI: [10.1016/j.procs.2020.09.128](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.09.128)
10. Ruihan Zhao, Liang Luo, Pengzhong Li, Jinguang Wang. An industrial heterogeneous data based quality management KPI visualization system for product quality control // Assembly Automation. 2022. Vol. 42. Iss. 6. P. 796-808. DOI: [10.1108/AA-05-2022-0139](https://doi.org/10.1108/AA-05-2022-0139)
11. Aleksandrova S.V., Vasiliev V.A., Alexandrov M.N. Integration of Quality Management and Digital Technologies // 2019 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», 23-27 September 2019, Sochi, Russia. IEEE, 2019. P. 20-22. DOI: [10.1109/ITQMIS.2019.8928426](https://doi.org/10.1109/ITQMIS.2019.8928426)
12. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Князькин Е.А. Анализ данных как основа повышения эффективности работы горно-транспортного оборудования при ведении открытых горных работ // Горная промышленность. 2023. № 1. С. 52-56. DOI: [10.30686/1609-9192-2023-1-52-56](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-52-56)
13. Ческидов В.В., Маневич А.И., Липина А.В. Получение и анализ больших данных в практике мониторинга состояния горно-технических сооружений // Горная промышленность. 2019. № 2 (144). С. 86-88. DOI: [10.30686/1609-9192-2019-2-144-86-88](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-2-144-86-88)
14. Рыльникова М.В., Власов А.В., Макеев М.А. Обоснование условий применения автоматизированных систем управления открытыми горными работами строительства комплекса циклично-поточной геотехнологии в карьере с помощью имитационного моделирования // Горная промышленность. 2021. № 4. С. 106-112. DOI: [10.30686/1609-9192-2021-4-106-112](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4-106-112)
15. Barnewold L., Lottermoser B.G. Identification of digital technologies and digitalization trends in the mining industry // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30. Iss. 6. P. 747-757. DOI: [10.1016/j.ijmst.2020.07.003](https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.003)
16. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1333. Iss. 6. № 062033. DOI: [10.1088/1742-6596/1333/6/062033](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/6/062033)
17. Erkayaoglu M., Dessureault S. Improving mine-to-mill by data warehousing and data mining // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2019. Vol. 33. Iss. 6. P. 409-424. DOI: [10.1080/17480930.2018.1496885](https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1496885)
18. Reis M.S. A Systematic Framework for Assessing the Quality of Information in Data-Driven Applications for the Industry 4.0 // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Iss. 18. P. 43-48. DOI: [10.1016/j.ifacol.2018.09.244](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.244)
19. Chong-chong Qi. Big data management in the mining industry // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2020. Vol. 27. Iss. 2. P. 131-139. DOI: [10.1007/s12613-019-1937-z](https://doi.org/10.1007/s12613-019-1937-z)
20. Cicconi P., Raffaelli R. An Industry 4.0 Framework for the Quality Inspection in Gearboxes Production // Computer-Aided Design & Applications. 2020. Vol. 17. Iss. 4. P. 813-824. DOI: [10.14733/cadaps.2020.813-824](https://doi.org/10.14733/cadaps.2020.813-824)
21. Захаров Л.А., Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н. Прогнозирование динамического пластового давления методами искусственного интеллекта // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 23-32. DOI: [10.31897/PMI.2022.11](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11)
22. Трофимов А.В., Киркин А.П., Румянцев А.Е., Яваров А.В. Применение численного моделирования для определения оптимальных параметров метода полной разгрузки керна при оценке напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Цветные металлы. 2020. № 12. С. 22-27. DOI: [10.17580/tsm.2020.12.03](https://doi.org/10.17580/tsm.2020.12.03)
23. Жуковский Ю.Л., Семенюк А.В., Алиева Л.З., Арапова Е.Г. Цифровые платформы на основе блокчейн для снижения углеродного следа горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 361-378. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_61_0_361](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_361)
24. Sony M., Antony J., Douglas J.A. Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0: A narrative review of literature and future directions for research // The TQM Journal. 2020. Vol. 32. Iss. 4. P. 779-793. DOI: [10.1108/TQM-12-2019-0275](https://doi.org/10.1108/TQM-12-2019-0275)
25. Roberts F.S., Sheremet I.A. Resilience in the Digital Age. Cham: Springer, 2021. 199 p. DOI: [10.1007/978-3-030-70370-7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70370-7)
26. Upadhyay S.P., Askari-Nasab H. Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 2. P. 153-166. DOI: [10.1016/j.ijmst.2017.12.003](https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.12.003)
27. 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. С. 89-92. DOI: [10.30686/1609-9192-2022-3-89-92](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-89-92)
28. Luo Jian-ming, Zhang Qi, Song Bing-tian et al. Application of Integrated Geophysical and Geochemical Data Processing to Metallogenic Target Zone Quantitative Prediction and Optimization // Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. 2017. Vol. 36. № 6. P. 886-890. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2802.2017.06.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2802.2017.06.002)
29. Cheskidov V.V., Lipina A.V., Melnichenko I.A. Integrated monitoring of engineering structures in mining // Eurasian Mining. 2018. № 2. P. 18-21. DOI: [10.17580/em.2018.02.05](https://doi.org/10.17580/em.2018.02.05)
30. Zhang Qi, Liu Xuelong. Big data: new methods and ideas in geological scientific research // Big Earth Data. 2019. Vol. 3. Iss. 1. P. 1-7. DOI: [10.1080/20964471.2018.1564478](https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1564478)
31. Трубецкой К.Н., Пыталев И.А., Рыльников А.Г. Автоматизированные системы управления качеством рудопотоков на карьерах // Маркшейдерский вестник. 2013. № 6 (98). С. 9-14.



32. Рыльникова М.В., Цупкина М.В., Кирков А.Е. Технологии сбора и обработки больших данных – основа повышения достоверности первичной информации о массивах горных пород при освоении месторождений полезных ископаемых и техногенных образований // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. Вып. 1. С. 308-327. DOI: 10.46689/2218-5194-2023-1-1-308-327
33. Захаров В.Н., Каплунов Д.Р., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н. Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горно-техническими системами // Горный журнал. 2022. № 12. С. 55-61. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.10
34. Каплунов Д.Р., Рыльников А.Г. Обобщение современных подходов к управлению качеством рудопотоков в условиях действующих рудников на всех этапах освоения месторождения // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. Вып. 4. С. 40-53.
35. Швабенланд Е.Е., Лаптева М.И. Принципы управления качеством минерального сырья при комбинированной разработке сложноструктурных месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. Вып. 3. С. 326-335. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-320-329
36. Туртыгина Н.А., Охрименко А.В., Ковальчук А.А., Калашиников К.А. Планирование горных работ как организационный способ управления качеством минерального сырья в рудничной системе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № S17. С. 3-11. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-17-3-11
37. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., Тимохин А.В. Совершенствование методов рудоподготовки минерального сырья при освоении сложноструктурных месторождений // Горная промышленность. 2022. № 1S. С. 63-70. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-63-70
38. Тезиев Т.М., Джисоева А.К. Оптимальная длина блока при разработке сложноструктурных крутопадающих тонких жил // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2015. № 1 (49). С. 5-9.
39. Changbin Wang, Guangyao Si, Chengguo Zhang et al. Location error based seismic cluster analysis and its application to burst damage assessment in underground coal mines // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 143. № 104784. DOI: 10.1016/j.ijrmm

Авторы: М.В.Цупкина, младший научный сотрудник, tsupkina_m@ipkonran.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6066-3084> (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия), А.Е.Кирков, научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0003-1062-9857> (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия), Д.А.Клебанов, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0002-3289-9212> (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия), Д.Н.Радченко, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0003-1821-3840> (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Изучение механизма тонкослойной сушки и диффузии низкосортного угля Внутренней Монголии и провинции Юньнань

Чхэн Ван¹, Дань Ван¹, Цзэнциен Чхэнь², Чхэньлун Дуань²✉, Чхэньян Чжоу²

¹ Горно-технологический факультет химического машиностроения Китайского университета, Сюйчжоу, Китай

² Лаборатория переработки угля и эффективного чистого использования Министерства образования, Китайский горно-технологический университет, Сюйчжоу, Китай

Как цитировать эту статью: Чхэн Ван, Дань Ван, Цзэнциен Чхэнь, Чхэньлун Дуань, Чхэньян Чжоу. Изучение механизма тонкослойной сушки и диффузии низкосортного угля Внутренней Монголии и провинции Юньнань // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 326-338. EDN XMIQWH

Аннотация. Китай богат угольными ресурсами, на долю которых приходится более 90 % всех установленных запасов ископаемого топлива, при этом доля потребления угольной энергии достигла в 2021 г. 56,5 %. В качестве объекта исследования был выбран низкосортный уголь, поступающий из Внутренней Монголии (образцы NM) и провинции Юньнань (образцы YN). Характеристики потери массы образцов были изучены с использованием термогравиметрического анализа для определения подходящей температуры для экспериментов по сушке, поскольку высокая влажность низкосортного угля может легко вызвать остановку оборудования в процессе сухой сортировки. Эксперименты по тонкослойной сушке проводились при различных температурных условиях. Эффективный коэффициент диффузии влаги подбирался по уравнению Аррениуса, для образцов NM он составил $5,07 \cdot 10^{-11}$ – $9,58 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$; для трех разных размеров частиц образцов YN – $1,89 \cdot 10^{-11}$ – $4,92 \cdot 10^{-11}$ (крупность –1 мм), $1,38 \cdot 10^{-10}$ – $4,13 \cdot 10^{-10}$ (крупность 1-3 мм), $5,26 \cdot 10^{-10}$ – $1,49 \cdot 10^{-9}$ (крупность 3-6 мм). Энергия активации образцов из Внутренней Монголии составила 10,97 кДж/моль (крупность –1 мм); для образцов из провинции Юньнань – 17,97 кДж/моль (крупность –1 мм), 33,52 кДж/моль (крупность 1-3 мм) и 38,64 кДж/моль (крупность 3-6 мм). Процесс сушки был смоделирован по эмпирическим и полумпирическим формулам. Установлено, что оптимальными моделями для образцов Внутренней Монголии является двухкомпонентная модель диффузии, а для образцов из провинции Юньнань – уравнение Нii.

Ключевые слова: уголь низкого качества; тонкослойная сушка; характеристики сушки; кинетический анализ; моделирование примерки

Благодарности. Исследовательская работа финансируется Национальным фондом Китая для выдающихся молодых ученых (№ 52125403), Фондом естественных наук провинции Цзянсу (№ BK20200651), Национальным фондом естественных наук Китая (№ 52104276, № 52261135540, № 52220105008), Международной программой стипендий по обмену сотрудников с ученой степенью (№ PC2021086), Инновационной программой для выпускников Китайского горно-технологического университета (№ 2022WLJCRCZL057), Инновационной программой последипломных исследований и практики провинции Цзянсу (№ SJCX22_1149).

Поступила: 16.01.2023

Принята: 20.06.2023

Онлайн: 05.02.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. Уголь является одним из важнейших энергоносителей в мире и способствует экономическому и социальному развитию [1]. Угольные ресурсы Китая составляют более 90 % установленных запасов всех ископаемых источников энергии, при этом доля низкосортного бурого угля – около 40 % [2, 3]. Низкосортный уголь обладает низкой степенью углефикации, высокой влажностью, большим количеством кислородсодержащих функциональных групп, а легкое выветривание и самовозгорание препятствуют его разработке и использованию [4]. Высокая влажность не только ограничивает теплотворную способность сжигания низкосортного угля, но и увеличивает стоимость транспортировки. Кроме того, низкосортный уголь размером менее 6 мм легко вызывает засорение оборудования в процессе сухой подготовки, что стало серьезной технической проблемой при сухом обогащении [5]. Таким образом, обезвоживание низкосортных углей имеет большое стратегическое значение [6].



Исследование критериев текучести в работе Yong Jin et al. [7] показали, что она снижается с увеличением содержания влаги, при этом отмечено, что текучесть и уплотняющие свойства различаются как выше, так и ниже критической влажности. Эксперименты с низкотемпературной сушкой Xian Wu et al. [8] показали, что существует промежуток времени между усадкой объема и потерей воды, а также имеются различия в их количествах. Rongtang Liu et al. [9] в ходе экспериментов по сушке иминьского бурого угля при различных температурах обнаружили, что при низких температурах образуются только H_2O и CO_2 . Горючие газы, включая CO и химические газы, могут образовываться, когда температура сушки превышает 250 °C. В.А.Фу и М.С.Чен [10] экспериментально исследовали кинетику тонких слоев бурого угля при принудительной конвективной сушке горячим воздухом, результаты показали, что процесс сушки представляет собой комбинацию двух коротких периодов – падения скорости. Н.Зhou et al. [11] исследовали влияние содержания влаги на плотнофазное пневмотранспортирование пылевидного бурого угля под высоким давлением. Установлено, что при сильной межчастичной когезии частицы подвергаются серьезной агломерации, что приводит к увеличению сил сопротивления, плохому псевдооживлению или даже полной дефлюидизации при псевдооживлении. Р.Селен et al. [12] высушивали турецкий бурый уголь с использованием перегретого пара и горячего воздуха при температуре 117 °C. Эксперименты показали, что на нагрев образцов лигнита перегретым паром уходит меньше времени, чем на нагрев горячим воздухом. В.А.Фу et al. [13] изучали теплообмен в тонких слоях бурого угля при конвективной сушке горячим воздухом. В результате были установлены зависимости влияния температуры и скорости горячего воздуха на температуру тонкого слоя.

В исследовательских работах недостаточно изучен механизм сушки и факторной оценки низкосортных углей крупностью менее 6 мм. В данной работе будет исследовано влияние температуры, размера частиц, органического состава и содержания влаги на характеристики сушки низкосортного угля, а также методом кинетического анализа будет проанализирован механизм воздействия различных факторов на процесс сушки. Также в статье представлены данные и практические рекомендации для решения технических проблем сушки трудноклассифицируемого низкосортного угля крупностью менее 6 мм [14].

Методы. Для решения указанных технических проблем в качестве объектов в статье использовался низкосортный уголь из провинций Чжаотун, Юньнань (YN), Шэнли, Внутренняя Монголия (NM). Образцы YN были раздроблены с последующим просевом для отбора образцов до размера частиц –1, 1-3 и 3-6 мм. Образцы NM были раздроблены до крупности –1 мм.

Для понимания основных физических параметров и характеристик экспериментальные образцы были подвергнуты промышленному и элементному анализам с использованием автоматического промышленного анализатора TGA701 производства Deco (США) и элементного анализатора Elementar Vario MACRO cube (Германия).

Перед сушкой образцы подвергались термогравиметрическому анализу для определения подходящей температуры сушки. Анализ проводился с использованием термогравиметрического (термического) дифференциального анализатора TG фирмы NETZSCH (Германия). Масса образца для проведения анализа составляла около 12 мг, материал загружался в пустой тигель и продувался воздухом со скоростью потока 50 мл/мин. Повышение температуры поддерживалось со скоростью 10 °C/мин, а абсолютную температуру регулировали на уровне 800 °C.

Образцы сушились в доменной печи модели 101A-1ET производства Шанхайской фабрики экспериментальных инструментов в специальном алюминиевый лотке размерами 27 × 20 × 2 см. Измерения проводились с помощью электронных весов Sartorius BSA 224S (Германия) с точностью до 0,0001 г. Для минимизации ошибки теста лоток был накрыт оловянной фольгой во избежание экстремальных температур, вызывающих прилипание низкосортного угля и коррозию лотка органическими веществами, а образец распределен тонким слоем. Отслеживалось время сушки и изменение качества образца до тех пор, пока он не высохал до постоянной массы. Образцы просушивались при скорости сушильного агента 0,6 м/с. Для каждого теста отбирался образец массой 10 г и сушился до постоянной массы. В наблюдениях за изменением органического состава образца до и после сушки в данной работе использовалось инфракрасное тестирование для



идентификации функциональных групп образца [15]. Для каждого времени рассчитывались влажность и скорость сушки и строилась кривая сушки [16, 17]:

- влажность сухой основы

$$M_d = \frac{m - n}{m};$$

- скорость сушки

$$v = \frac{dM_d}{dt},$$

где m – масса образца для каждого испытания, г; n – масса образца при высушивании до постоянной массы, г.

Частицы пористых сред в основном находились в тонком слое в процессе изотермической сушки. Кинетическая энергия молекул воды обеспечивалась градиентом температуры. Градиент концентрации был основной движущей силой в процессе миграции молекул воды. Концентрация вещества зависела от продолжительности диффузии. Следовательно, процесс сушки низкосортного угля можно описать вторым законом Фика [18-21]:

$$\frac{\partial M_t}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M_t, \quad (1)$$

где M_t – содержание воды в испытуемом образце в момент времени t , г/г; D_{eff} – эффективный коэффициент диффузии влаги, м²/с.

Для обработки данных использовалось приближение второго порядка второго закона диффузии Фика с аналитическим решением [22, 23]:

$$\ln M_R = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2},$$

где L – толщина тонкого слоя образца в лотке (в данном исследовании $L = 0,002$ м); M_R – содержание воды по массе, %.

Содержание воды по массе рассчитывалось по следующей формуле [24]:

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}, \quad (2)$$

где M_0 – начальная влажность, %; M_e – содержание воды в равновесном состоянии, %.

Поскольку M_e пренебрежимо мало по сравнению с M_0 уравнение (2) можно упростить [25, 26]:

$$M_R = \frac{M_t}{M_0}.$$

Эффективный коэффициент диффузии влаги пористых частиц зависит от состава материала частиц, влаги и природы самого материала. Его связь с температурой подчиняется уравнению Аррениуса [27]:

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \right).$$

Логарифмирование обеих частей уравнения Аррениуса дает следующее равенство [26]:

$$\ln D_{eff} = -\frac{E_a}{R} \frac{1}{T} + \ln D_0,$$

где D_0 определяется материалом, м²/с; E_a – энергия активации, Дж/моль; R – газовая постоянная, Дж/(моль/К); T – температура сушильной среды, К.



Исследователи считают, что сушка представляет собой неустановившийся процесс тепломассообмена и тепломассообмена, поэтому часто используются методы подбора ее адекватной модели [28]. В настоящее время большинство моделей, использующихся в областях сушки пищевых продуктов и материалов, могут быть применены и для сушки низкосортной угля [29, 30]. В данном исследовании для подбора рассматриваются 16 классических моделей сушки, которые широко используются в исследованиях тонкослойной сушки, включая теоретические, эмпирические, полуэмпирические модели и т.д. В качестве показателя оценки используется коэффициент корреляции [31]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2},$$

где y_i – экспериментальное значение; Y_i – теоретически рассчитанное значение подогнанной кривой; n – количество экспериментальных значений.

Чем ближе коэффициент R^2 к 1, тем лучше эффект подгонки.

Отобранные 16 теоретических, эмпирических и полуэмпирических моделей сушки, использованных при моделировании подгонки, показаны в табл.1. Среди них теоретическая модель получена из теории, связанной с сушкой (включая дифференциальное уравнение диффузии влаги, тепловое уравнение электропроводности и др.), тогда как полуэмпирическая модель устанавливается путем объединения кинетических экспериментальных данных с высокой точностью, а эмпирическая модель, построенная на основе экспериментальных данных, может точно описать зависимость между влажностью материала и временем сушки [32].

В настоящее время проведена большая исследовательская работа по моделированию оборудования для сушки угля низкого качества, и результаты показывают, что теоретическая модель дает менее точный прогноз, чем эмпирическая и полуэмпирическая модели. Тем не менее, эмпирическая или полуэмпирическая модели не могут раскрыть теоретические аспекты механизма массо- и теплопереноса в процессе сушки. Следовательно, в данной работе предпочтение отдается теоретической модели как наиболее подходящей, а затем из базовой теории раскрывается механизм сушки.

Таблица 1

Математические модели сушки

Тип	Название	Автор	Формулы
Теоретическая	Одинокная диффузия	Хендерсон и Пабис	$M_R = a \exp(-k\tau)$
	Двухчленная диффузия	Шараф-Элдин	$M_R = a_1 \exp(-k_1\tau) + a_2 \exp(-k_2\tau)$
	Трехчленная диффузия	Каратанос	$M_R = a_1 \exp(-k_1\tau) + a_2 \exp(-k_2\tau) + a_3 \exp(-k_3\tau)$
Полуэмпирическое уравнение	Модель Лемуса	Лемус	$M_R = \exp(a + k\tau)$
	Модель Льюиса	Льюис	$M_R = \exp(-k\tau)$
	Логарифмическая	Тогрул и Пехилван	$M_R = a \exp(-k\tau) + c$
	Модель Пейджа	Пейдж	$M_R = \exp(-k\tau^n)$
	Уточненная модель Пейджа I	Оверхулс	$M_R = \exp[-(k\tau^n)]$
	Уточненная модель Пейджа II	Ван	$M_R = a \exp(-k\tau^n)$
	Модель Нii	Нii	$M_R = a_1 \exp(-k_1\tau^n) + a_2 \exp(-k_2\tau^n)$
	Приблизительная диффузия	Ялдыз	$M_R = a \exp(-ka\tau) + (1-a) \exp(-kb\tau)$
Эмпирические уравнения	Модель Вема	Вема	$M_R = a \exp(-k_1\tau) + (1-a) \exp(-k_2\tau)$
	Модель Чандра	Чандра	$M_R = a\tau^{-n}$
	Модель Мидилли	Мидилли	$M_R = a \exp(-k\tau^n) + b\tau$
	Модель Томпсона	Томпсон	$\tau = a \ln M_R + b(\ln M_R)^2$
	Модель Вана	Ван	$M_R = 1 + a\tau + b\tau^2$



Результаты и обсуждение. В табл.2 представлены результаты испытаний физических свойств образцов из Внутренней Монголии (NM) и провинции Юньнань (YN), влажность образцов составила 41,90 и 21,61 % соответственно. Кроме того, содержание углерода в образце из Внутренней Монголии было значительно выше, чем в образце из Юньнани, в нем содержалось больше органических элементов, и он имел более низкую степень углефикации.

Таблица 2

Промышленный и элементный анализы бурых углей Внутренней Монголии, %

Образец	Промышленный анализ					Элементный анализ				
	M_{ad}	A_d	V_d	A_{ad}	F_{cad}	C_{daf}	H_{daf}	O_{daf}	N_{daf}	S_{daf}
NM	41,90	32,11	37,55	27,27	20,12	56,41	4,56	37,44	0,83	0,76
YN	21,62	11,49	26,74	7,63	32,01	40,13	3,15	57,80	1,35	1,57

Примечание: M_{ad} , A_d , V_d , A_{ad} и F_{cad} относятся к содержанию влаги, летучих веществ, связанного углерода и золы в пересчете на полученную сухую массу; H_{daf} , N_{daf} , O_{daf} и S_{daf} относятся к содержанию элементов в пересчете на сухую беззольную массу.

Дифференциальные термогравиметрические кривые (ДТГ) и термогравиметрические кривые (ТГ) образцов, построенные по данным термогравиметрического эксперимента, представлены на рис.1. Кривые ТГ и ДТГ образцов YN и NM можно разделить на три этапа. Стадия водоотдачи образцов NM находится в интервале температур 75-200 °С. Фаза потери массы с органическим веществом находится в интервале температур 500-750 °С. Стадия потери массы и самовозгорания наступала после 750 °С. Стадия потери массы от влаги образцов YN составляла 85-220 °С. Фаза потери массы с органическим веществом составляла 450-750 °С, а фаза потери массы с самовозгоранием наступала после 750 °С. Это можно объяснить тем, что испарение свободной и связанной воды в угле завершается при 220 °С, а большая часть этой воды испаряется при 100 °С. При продолжающемся повышении температуры улетучивание органического вещества в угле происходит при 250 °С, сам же уголь подвергается самовозгоранию при температуре 750 °С [33].

Результаты экспериментов с образцами NM показали, что время сушки образцов при 180 °С составило 6 мин; при 160 °С – 7 мин; при 140 °С – 9 мин; при температуре ниже 140 °С – более 10 мин (рис.2). Это связано с тем, что чем выше температура горячего воздуха, тем выше температура образца, и тем больше кинетическая энергия молекул воды внутри частиц, что ускоряет процесс диффузии воды. В то же время скорость испарения воды на поверхности частиц увеличивается, что увеличивает градиент концентрации между поверхностью и внутренней влагой частиц, так что жидкая фаза мигрирует к поверхности с большей скоростью.

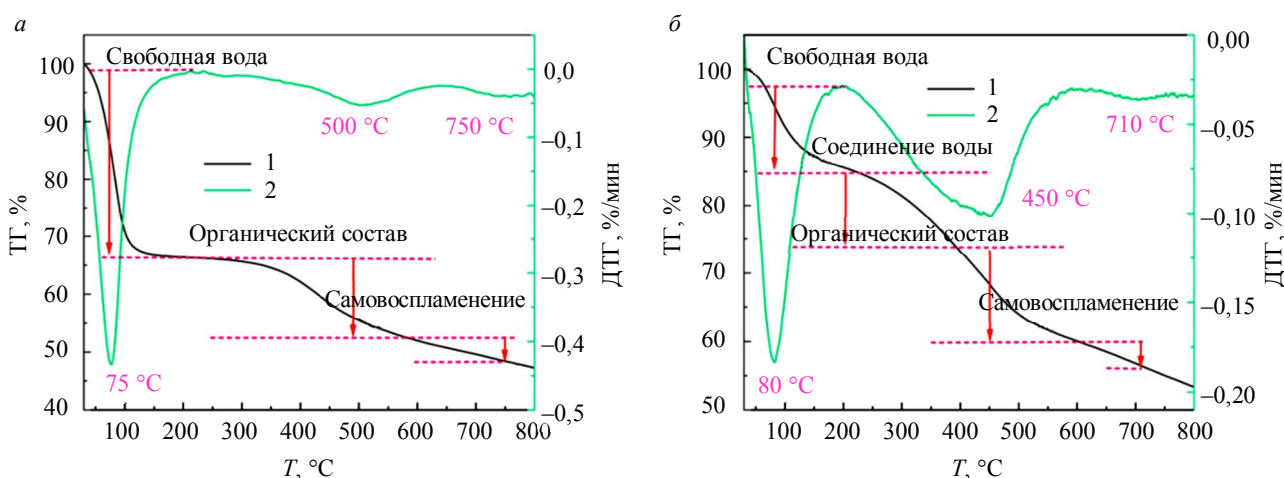


Рис.1. Термогравиметрические кривые образцов – NM (а) и YN (б)

1 – ТГ; 2 – ДТГ

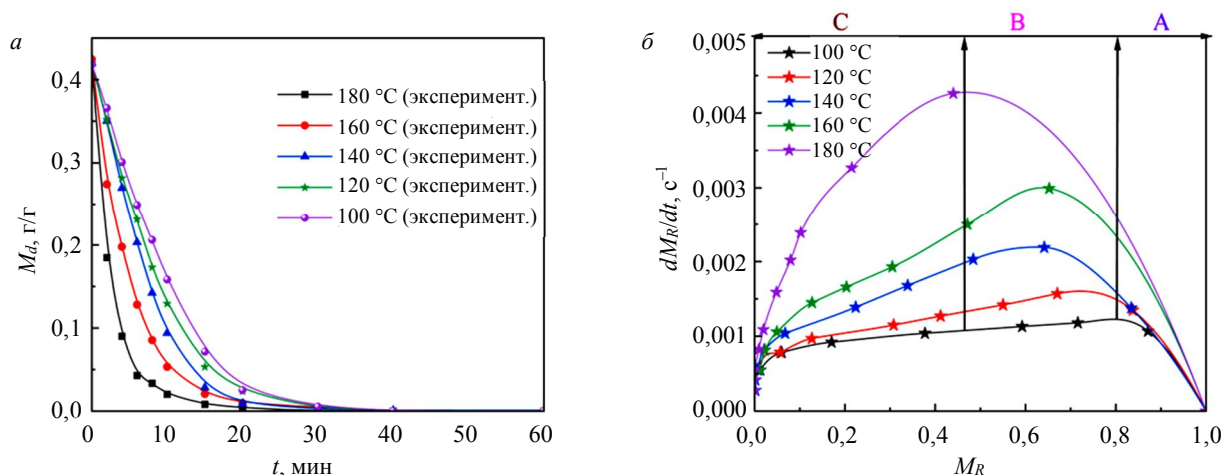


Рис.2. Кривые сушки (а) и скорости сушки (б) образцов NM размером –1 мм при различных температурах

При температуре сушки более 160 °C повышение температуры дает меньший эффект. Кроме того, чем выше температура сушки, тем выше максимальная скорость и больше продолжительность стадии замедленной сушки.

При более низких температурах период сушки с постоянной скоростью был более выраженным. Это объясняется тем, что большее количество тепла, приносимое высокой температурой, заставляет свободную воду быстрее испаряться за меньший срок, а для поглощения тепла при сушке на низких температурах требуется определенное время, поэтому скорость испарения свободной воды находится в более сбалансированном состоянии [34].

Как показано на рис.3, при температуре сушки выше 140 °C время завершения сушки образцов YN (–1 мм) составляет около 15 мин; при температуре сушки ниже 140 °C – около 20 мин. Вместе с тем при высоком содержании органической составляющей эффективность сушки образца снижается. При температуре менее 140 °C разница в процессе сушки образцов YN невелика. При температуре выше 140 °C разрыв в первые десять минут увеличивается. Из этого следует, что органические компоненты начинают существенно влиять на процесс, когда температура сушки превышает 140 °C.

На кривых скорости сушки при разных температурах образцов YN присутствуют только стадии разгона и торможения. Фазу увеличения скорости можно рассматривать как период, в течение которого начальная скорость быстро достигает максимума. Это связано с тем, что изначально существовала большая разница температур между образцом и сухим горячим воздухом, и по мере

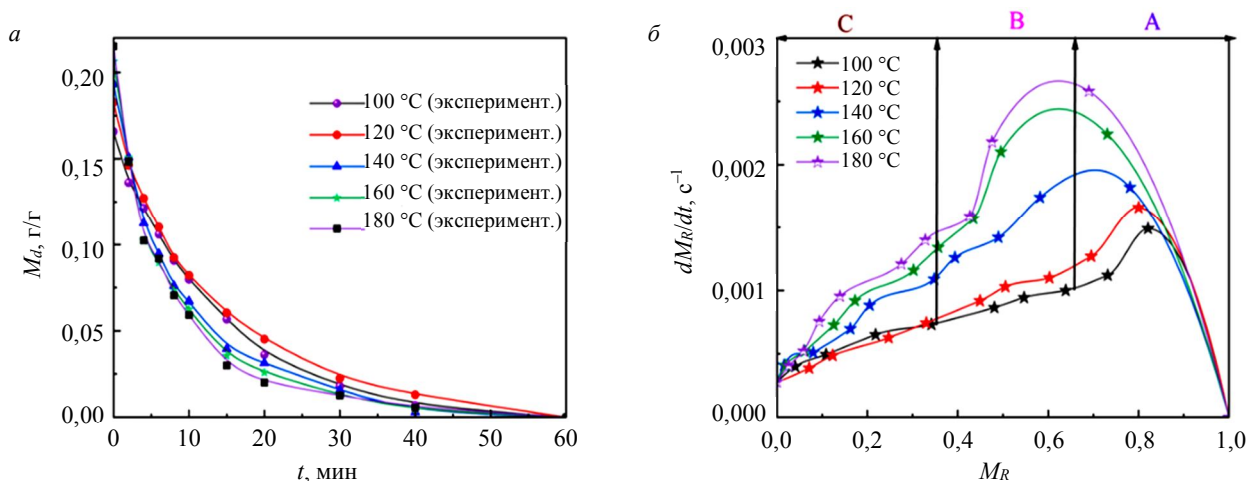


Рис.3. Кривые сушки (а) и скорости сушки (б) образцов YN размером –1 мм при различных температурах

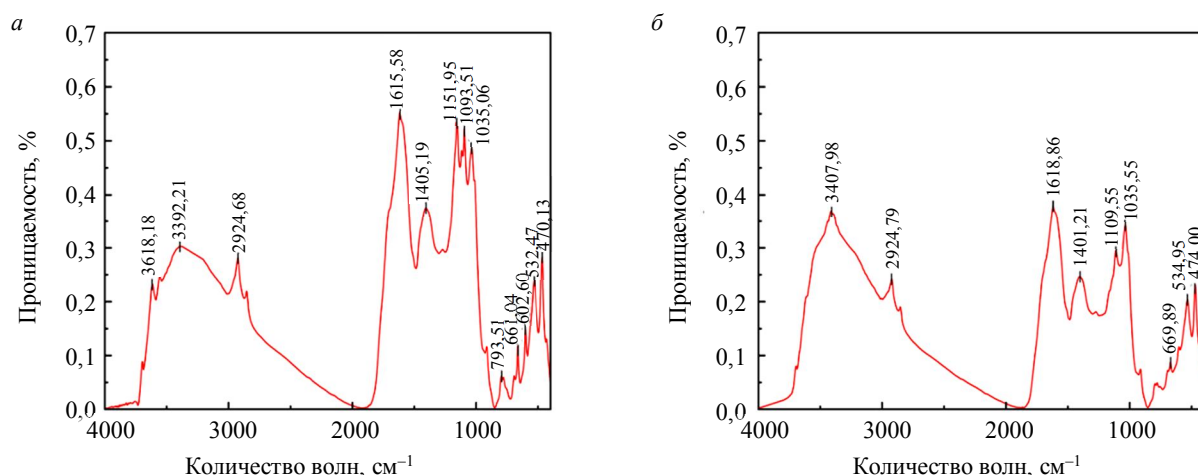


Рис.4. Кривые сушки и скорости сушки образцов YN до (а) и после (б) высыхания

протекания процесса разница температур становится все меньше, а эффективность теплопередачи между горячим воздухом и частицей постепенно снижается. В это время содержание воды в образце также быстро уменьшается из-за быстрого испарения свободной влаги, а оставшаяся влага считалась внутренней влагой частиц образца. Эта влага должна была быть сначала отделена от вещества частиц теплом, а затем перенесена на поверхность частиц. Стадия сушки после достижения максимума на рис.3, б иллюстрирует увеличение сопротивления теплопередаче при испарении внутренней влаги.

В экспериментальных результатах разница равновесной влажности составляла 3-6 % при различных температурах в течение 60 мин. Это происходило потому, что образец YN содержит больше элементов S, N и O и больше органического вещества, поэтому чем выше температура сушки, тем больше улетучиваются компоненты в образце YN, и тем больше теряется масса. Чтобы продемонстрировать это, был проведен инфракрасный анализ образцов YN до и после сушки (рис.4).

Инфракрасный анализ показал, что образец был богат органическими функциональными группами, такими как OH-, -CO-, -CH-, -SO-, -N=O перед сушкой. Однако после сушки органические функциональные группы, такие как OH-, CO, CH, SO, N=O, значительно сократились или даже исчезли. Это показывает, что органические компоненты не только снижают эффективность сушки, но и увеличивают погрешность эксперимента за счет термического разложения и улетучивания.

При температуре сушки ниже 140 °C время завершения сушки образцов крупностью –1 мм было значительно меньше, чем у образцов крупностью 1-3 мм (рис.5) и 3-6 мм (рис.6), разница во

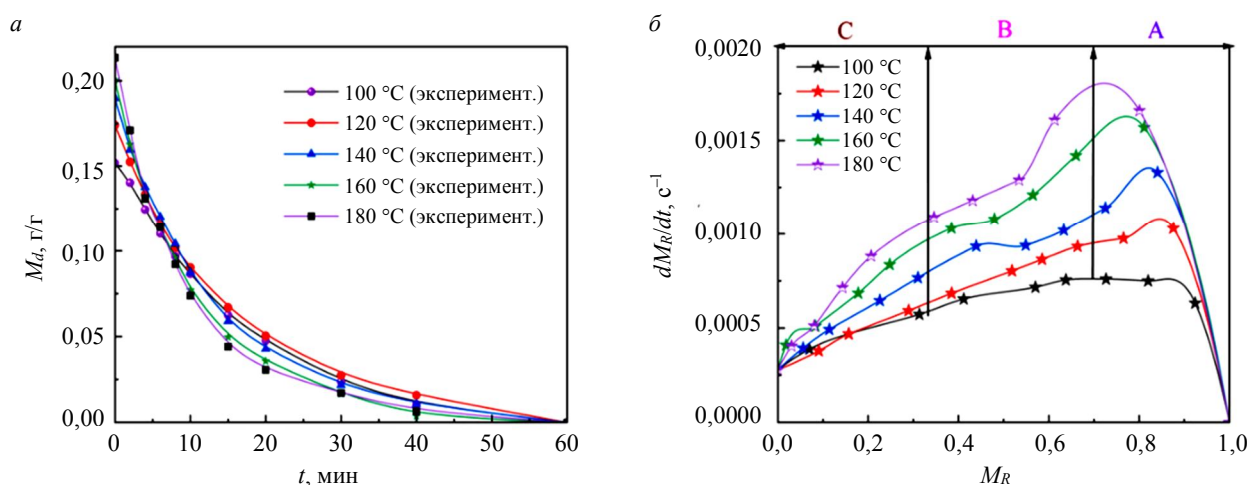


Рис.5. Процесс сушки (а) и кривая скорости сушки (б) образцов YN размером 1-3 мм при различных температурах

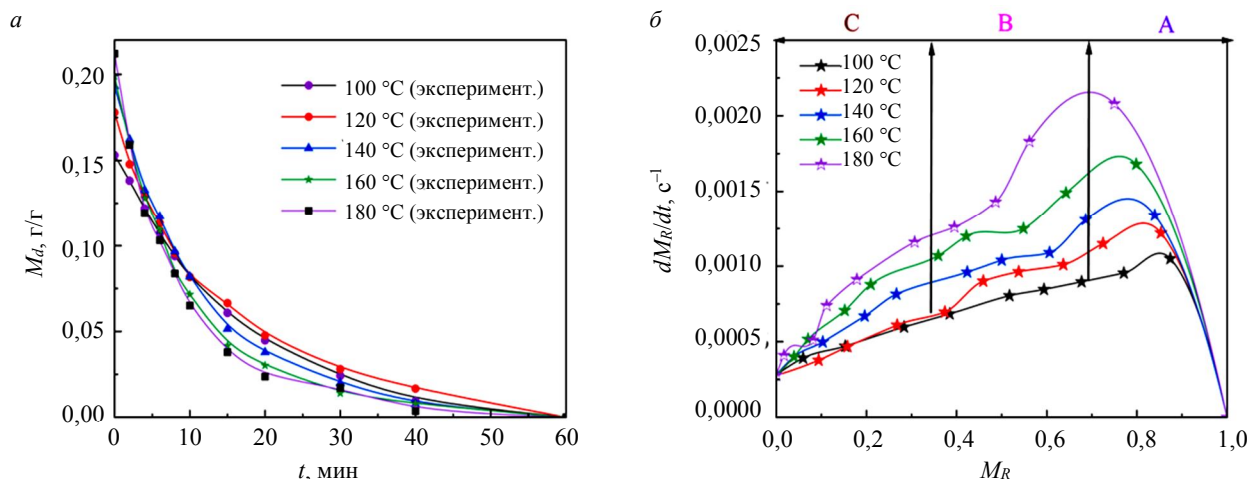


Рис.6. Процесс сушки (а) и кривая скорости сушки (б) образцов YN размером 3-6 мм при различных температурах

времени завершения сушки между образцами 1-3 и 3-6 мм была незначительной. Когда температура сушки превышала 140 °С, время завершения сушки образцов крупностью –1 мм было значительно меньше, чем образцов размером 1-3 мм, а время окончания сушки образцов крупностью 1-3 мм настало значительно быстрее, чем образцов крупностью 3-6 мм. Это происходило потому, что чем меньше частицы, тем легче молекулам воды поглощать тепло и испаряться. В процессе средне- и низкотемпературной сушки движущая сила молекул воды в основном определялась градиентом концентрации, причем ведущую роль играл механизм диффузии. Когда температура сушки была выше, температурное поле могло обеспечивать большую кинетическую энергию для миграции молекул воды.

Для количественной оценки завершения сушки каждого образца результаты экспериментов по сушке были проанализированы кинетически. Результаты экспериментов по изотермической сушке выведены в соответствии с уравнением (1). Была получена кривая зависимости $\ln M_R$ низкосортного угля при соответствующей температуре от времени t . Параметр D_{eff} при соответствующей температуре определялся по наклону кривой (табл.3).

Таблица 3

Эффективный коэффициент диффузии влаги D_{eff} при различных температурах сушки, m^2/s

Образец	Температура сушки, °C				
	100	120	140	160	180
NM –1 мм	$5,07 \cdot 10^{-11}$	$6,19 \cdot 10^{-11}$	$7,56 \cdot 10^{-11}$	$8,14 \cdot 10^{-11}$	$9,58 \cdot 10^{-11}$
R^2	0,98647	0,98741	0,99101	0,99706	0,95812
YN –1 мм	$1,89 \cdot 10^{-11}$	$2,11 \cdot 10^{-11}$	$2,97 \cdot 10^{-11}$	$4,49 \cdot 10^{-11}$	$4,92 \cdot 10^{-11}$
R^2	0,99373	0,97746	0,96129	0,96738	0,98684
YN 1-3 мм	$1,38 \cdot 10^{-10}$	$1,76 \cdot 10^{-10}$	$2,53 \cdot 10^{-10}$	$3,08 \cdot 10^{-10}$	$4,13 \cdot 10^{-10}$
R^2	0,99324	0,97819	0,99200	0,98756	0,99626
YN 3-6 мм	$5,26 \cdot 10^{-10}$	$6,59 \cdot 10^{-10}$	$8,92 \cdot 10^{-10}$	$1,13 \cdot 10^{-9}$	$1,49 \cdot 10^{-9}$
R^2	0,96331	0,98591	0,99429	0,98304	0,98968

При одном и том же размере частиц в миллиметрах эффективный коэффициент диффузии воды для образцов NM составил $5,07 \cdot 10^{-11}$ – $9,58 \cdot 10^{-11}$ m^2/s . Эффективный коэффициент диффузии воды образцов YN был небольшим и составлял $1,89 \cdot 10^{-11}$ – $4,92 \cdot 10^{-11}$ m^2/s . Сравнительный анализ показывает, что эффективный коэффициент диффузии влаги увеличивается с повышением температуры сушки, поскольку чем выше температура, тем больше кинетическая энергия молекул воды и тем сильнее способность к диффузии. При этом чем больше размер частиц,



тем больше эффективный коэффициент диффузии влаги – эффективный коэффициент диффузии воды образца YN (крупность 1-3 мм) составил $1,38 \cdot 10^{-10}$ – $4,13 \cdot 10^{-10}$ м²/с, образца YN (крупность 3-6 мм) $5,26 \cdot 10^{-10}$ – $1,49 \cdot 10^{-9}$ м²/с. Это объясняется тем, что размер частиц является важным параметром положительной корреляции, влияющим на эффективный коэффициент диффузии влаги в эмпирическом уравнении. Кроме того, при диффузии молекул воды чем больше размер частиц, тем больше каналов диффундируют молекулы воды и тем больше влаги испаряется в единицу времени. Однако эффективный коэффициент диффузии воды на единицу размера частиц будет уменьшаться, поскольку чем больше размер частиц, тем длиннее путь диффузии воды, что снижает эффективность диффузии.

Видимая энергия активации является важным параметром кинетики сушки, отражающим ее сложность. В результате исследования были проанализированы характеристики сушки низкосортных углей путем сравнения видимой энергии активации низкосортных углей с различной влажностью и размером частиц. Видимая энергия активации была рассчитана путем подгонки эффективного коэффициента диффузии воды (табл.4). Видимая энергия активации образцов NM составила 10,97 кДж/моль, что ниже, чем у образцов YN (17,97 кДж/моль). Видимая энергия активации образцов YN положительно соотносилась с размером частиц и составляла 18,95 и 20,28 кДж/моль для размеров 1-3 и 3-6 мм соответственно. Результаты подгонки показывают, что чем выше содержимое влаги в образце, тем ниже видимая энергия активации. Это является следствием того, что чем выше содержание влаги в образце, тем сильнее движущая сила, обеспечиваемая градиентом концентрации влаги и тем меньше энергии требуется для диффузии внутренней влаги. Чем больше размер частиц, тем больше видимая энергия активации, так как длиннее путь диффузии влаги наружу [35-39].

Таблица 4

Значения видимой энергии активации образцов угля в испытании

Образец	E_a , кДж/моль	T , К	Размер, мм	M_d , %
NM	10,97	373~453	–1 мм	41,90
YN	17,97	373~453	–1 мм	21,36
YN	18,95	373~453	1-3 мм	21,36
YN	20,28	373~453	3-6 мм	21,36

Экспериментальные данные каждого образца были проанализированы с использованием 16 уравнений (табл.5) для получения оптимальной кинематической модели сушки. Лучшая модель для каждого образца была подобрана для пяти различных условий работы, а данные испытаний для каждого условия работы были получены путем усреднения шести наборов одних и тех же испытаний. Наилучшей моделью для образцов NM размером –1 мм была определена двухкомпонентная модель диффузии, а для образцов YN с различными размерами частиц стало уравнение Nii. Параметры результатов подгонки представлены в табл.5.

Эксперименты показали хороший результат подгонки: параметр R^2 для образцов YN класса –1 мм при 100, 120, 140, 160, 180 °C равен 0,9984, 0,9994, 0,9987, 0,9976, 0,9971 соответственно; для класса 1-3 мм при 100, 120, 140, 160, 180 °C R^2 равен 0,9989, 0,9993, 0,9976, 0,9991, 0,9982 соответственно; для класса 3-6 мм при 100, 120, 140, 160 и 180 °C R^2 равен 0,9989, 0,9993, 0,9976, 0,9991, 0,9982 соответственно (рис.7).

Таким образом было установлено, что двухкомпонентная модель диффузии подходит для моделирования образцов с высоким содержанием влаги, а модель Nii – для моделирования образцов с низким содержанием влаги. Установлено, что механизм диффузии, управляемый градиентом концентрации, играет доминирующую роль в образцах с высоким содержанием влаги. Двухкомпонентная модель диффузии может хорошо предсказать изотермическую картину тонкослойной сушки образцов с высоким содержанием влаги. Для образцов с низким содержанием влаги градиент концентрации также был одной из движущих сил, но не доминирующей, поэтому диффузионная модель не применима к образцам с низким содержанием влаги.



Таблица 5

Подгонка результатов каждого образца

Образцы	Модель	Размер, мм	Температура, °C	R^2	a_1	a_2	k_1	k_2	n
YN	Нii	-1	100	0,9984	-0,2588	0,4186	0,1236	0,1075	00,8932
			120	0,9994	0,0148	0,1699	10,6822	0,0793	0,9502
			140	0,9976	-1,0517	1,2452	0,6375	0,5431	0,5707
			160	0,9987	-0,2042	0,4004	0,3874	0,7343	0,4558
			180	0,9971	-0,1303	0,3414	0,7614	0,3398	0,6853
YN	Нii	1-3	100	0,9989	-0,0061	0,1581	0,1257	0,0688	0,9843
			120	0,9993	0,0078	0,1701	0,3591	0,0661	10,0437
			140	0,9976	-0,1059	0,2992	0,6649	0,2652	0,7599
			160	0,9991	-0,0857	0,2847	10,0299	0,3042	0,6759
			180	0,9982	0,0218	0,1903	20,972	0,1006	10,0741
YN	Нii	3-6	100	0,9992	0,0594	0,0915	0,0949	0,0422	1,1440
			120	0,9977	-3,1667	3,3309	0,3277	0,3126	0,7225
			140	0,9987	-0,0971	0,2748	0,3509	0,1531	0,8548
			160	0,9958	-0,1361	0,3264	0,9158	0,3228	0,6994
			180	0,9989	0,2184	-0,0048	0,1398	329,05	0,8481
NM	Двухкомпонентная модель диффузии	-1	100	0,9986	-5,8756	6,2918	0,1955	0,1855	—
			120	0,9994	-18,929	19,345	0,2087	0,2055	—
			140	0,9976	-3,1762	30,5939	0,2474	0,2253	—
			160	0,9966	-6,9891	7,4073	0,2595	0,2517	—
			180	0,9994	0,3651	0,0582	0,4969	0,1226	—

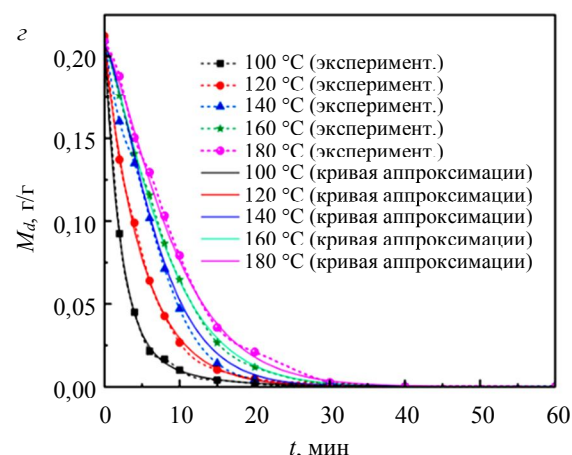
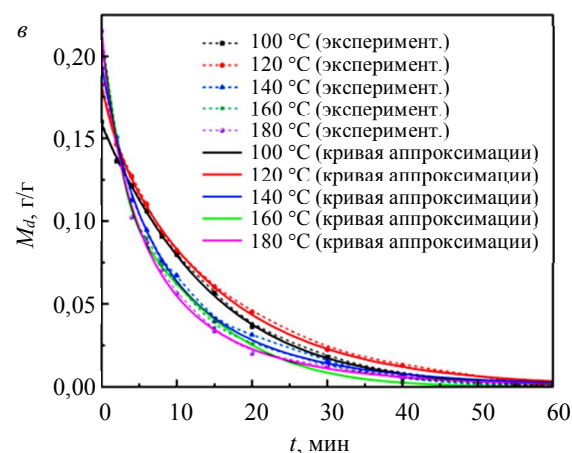
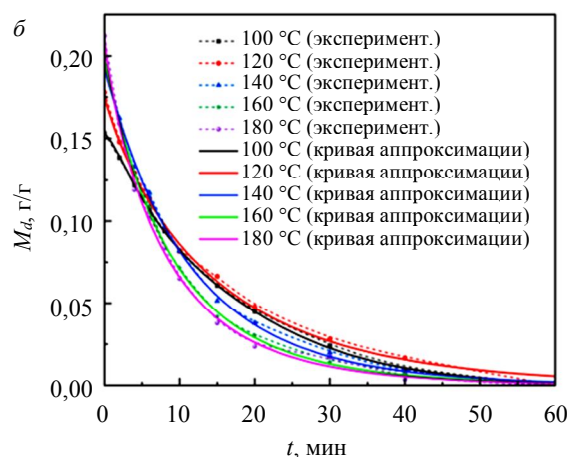
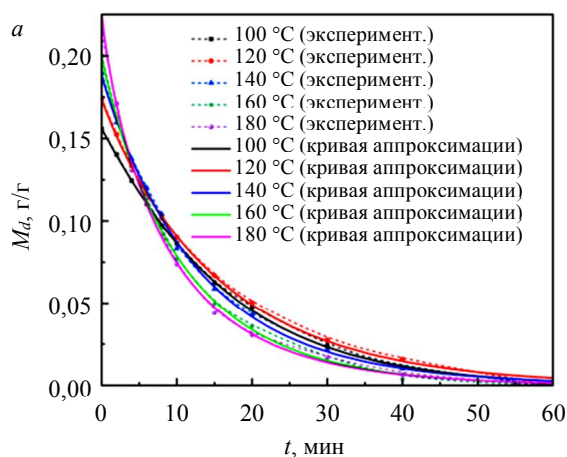


Рис. 7. Анализ подгонки результатов экспериментов на образцах YN класса 3-6 мм (а); YN класса 1-3 мм (б); YN класса -1 мм (в); NM класса -1 мм (г) при различных температурах



Заклучение. В данной статье представлены результаты экспериментов – по тонкослойной изотермической сушке на образцах низкосортных углей и анализ данных, полученных в ходе экспериментов. Были построены кривые скорости сушки, определены эффективный коэффициент диффузии влаги и видимая энергия активации каждого образца. Экспериментальные данные сопоставлялись с 16 математическими моделями сушки, и для каждого образца была выбрана наиболее подходящая модель сушки. Выводы данной работы показывают следующие результаты:

- Влажность и температура являются двумя наиболее важными факторами, влияющими на процесс сушки. Для образцов NM при температуре менее 140 °C кривая скорости сушки имеет три стадии: роста, устойчивости и спада. При температуре выше 140 °C кривая сушки имеет только две стадии: роста и спада. Для образцов YN трех разных размеров отмечено наличие только двух стадий сушки при 100-180 °C: роста и спада. Когда температура превышает 160 °C для образцов YN и 140 °C для образцов NM, повышение температуры больше не оказывает значительного воздействия на эффективность сушки образцов. Кроме того, чем меньше размер частиц, тем выше эффективность сушки, а повышение температуры усиливает влияние размера частиц на эффективность сушки. Органические компоненты также снижают эффективность сушки и улетучиваются при высоких температурах на более поздних стадиях сушки.

- Чем выше влажность образца, тем больше эффективный коэффициент диффузии воды. Чем больше размер частиц, тем выше эффективный коэффициент влажности и тем меньше эффективный коэффициент влажности на единицу диаметра. Чем выше температура, тем больше эффективный коэффициент диффузии влаги. В то же время видимая энергия активации образцов с низким содержанием влаги выше и повышается с увеличением размера частиц. Кроме того, образцы NM адекватно описываются двухпараметрической моделью диффузии, а три образца YN с разными размерами частиц соответствуют уравнению Nii.

- При анализе влияющих факторов было установлено, что влажность оказывает наибольшее влияние на процесс сушки. Вторым по воздействию на процесс фактором является температура. Когда температура достигает определенного значения, ее дальнейшее повышение не оказывает существенного влияния на эффективность сушки. Третьим фактором влияния на процесс сушки был размер частиц. В низкосортных углях эффект сушки образца –1 мм был наилучшим. Четвертый фактор – содержание органических компонентов, которые не только снижают эффективность сушки, но и увеличивают потерю массы при улетучивании.

На следующем этапе исследования планируется дополнительно выявить механизм сушки низкосортного угля с помощью методов численного моделирования и проанализировать механизм массо- и теплопереноса процесса сушки в мезоскопическом масштабе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Kuznetsov V. Thermodynamic and Experimental Substantiation of the Possibility of Formation and Extraction of Organometallic Compounds as Indicators of Deep Naphthogenesis // *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 9. № 3862. DOI: 10.3390/en16093862
2. Capellán-Pérez I., Mediavilla M., de Castro C. et al. Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: An integrated approach // *Energy*. 2014. Vol. 77. P. 641-666. DOI: 10.1016/j.energy.2014.09.063
3. Shunxuan Hu, Junguo Li, Xin Yang et al. Improvement on slurry ability and combustion dynamics of low quality coals with ultra-high ash content // *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. Vol. 156. P. 391-401. DOI: 10.1016/j.cherd.2020.02.011
4. Александрова Т.Н., Кусков В.Б., Афанасова А.В., Кузнецов В.В. Совершенствование технологии флотационного обогащения тонких классов коксующихся углей // *Обогащение руд*. 2021. № 3. С. 9-13. DOI: 10.17580/or.2021.03.02
5. Chenyang Zhou, Xuchen Fan, Chenlong Duan, Yuemin Zhao. A method to improve fluidization quality in gas–solid fluidized bed for fine coal beneficiation // *Particuology*. 2019. Vol. 43. P. 181-192. DOI: 10.1016/j.partic.2017.12.012
6. Daegi Kim, Seyong Park, Ki Young Park. Upgrading the fuel properties of sludge and low rank coal mixed fuel through hydrothermal carbonization // *Energy*. 2017. Vol. 141. P. 598-602. DOI: 10.1016/j.energy.2017.09.113
7. Yong Jin, Haifeng Lu, Xiaolei Guo, Xin Gong. Effect of water addition on flow properties of lignite particles // *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. Vol. 132. P. 1020-1029. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.11.012
8. Wu Xian, Dong Ziwen, Sun Lifeng, Jia Tinggui. Experimental Study of the Volume Drying Shrinkage Characteristics of Lignite under Low Temperatures // *ACS Omega*. 2022. Vol. 7. Iss. 12. P. 10029-10038. DOI: 10.1021/acsomega.1c05575
9. Rongtang Liu, Ming Liu, Xiaoqu Han, Junjie Yan. Drying characteristics and kinetics analyses for Yimin lignite at various temperatures // *Drying Technology*. 2021. Vol. 39. Iss. 7. P. 912-924. DOI: 10.1080/07373937.2020.1729174



10. *Fu B.A., Chen M.Q.* Thin-layer drying kinetics of lignite during hot air forced convection // *Chemical Engineering Research and Design*. 2015. Vol. 102. P. 416-428. DOI: [10.1016/j.cherd.2015.07.019](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.07.019)
11. *Haijun Zhou, Yuanquan Xiong, Yu Pei.* Effect of moisture content on dense-phase pneumatic conveying of pulverized lignite under high pressure // *Powder Technology*. 2016. Vol. 287. P. 355-363. DOI: [10.1016/j.powtec.2015.10.026](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.026)
12. *Celen P., Erdem H.H.* An experimental investigation of single lignite particle dried in superheated steam and hot air // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2018. Vol. 41. Iss. 12. P. 845-854. DOI: [10.1080/19392699.2018.1536047](https://doi.org/10.1080/19392699.2018.1536047)
13. *Fu B.A., Chen M.Q., Huang Y.W.* Heat transfer characteristics on lignite thin-layer during hot air forced convective drying // *Fuel*. 2015. Vol. 154. P. 132-139. DOI: [10.1016/j.fuel.2015.03.075](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.075)
14. *Hosseini T., Zhang L.* Process modeling and techno-economic analysis of a solar thermal aided low-rank coal drying-pyrolysis process // *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 220. № 106896. DOI: [10.1016/j.fuproc.2021.106896](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106896)
15. Цзиньчжань Хуан, Чжицян Ли, Бяо Чэнь и др. Оперативный контроль элементного состава угольной золы на основе машинного обучения и рентгеновской флуоресценции // *Записки Горного института*. 2022. Т. 256. С. 663-676. DOI: [10.31897/PMI.2022.89](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.89)
16. *Bojian Qi, Yong Yan, Wenbiao Zhang, Xueyao Wang.* Measurement of biomass moisture content distribution in a fluidised bed dryer through electrostatic sensing and digital imaging // *Powder Technology*. 2021. Vol. 388. P. 380-392. DOI: [10.1016/j.powtec.2021.04.096](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.096)
17. *Ji Hyeon Park, Jung Hae Park, Soo Chul Kim.* A Study on Application of Enzyme Additives to Improve Drying Speed of Urushi Lacquer // *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2020. Vol. 48. № 3. P. 326-344. DOI: [10.5658/WOOD.2020.48.3.326](https://doi.org/10.5658/WOOD.2020.48.3.326)
18. *Huaigang Cheng, Lixiang Wu, Fangqin Cheng.* Kinetics of static immersed leaching of low-grade sea-type evaporites based on theoretical and experimental investigation of unsteady-state mass transfer // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 256. № 120501. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.120501](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120501)
19. *Yuwei Wei, Xishan Zhu, Chenquan Deng et al.* Study on cracking process of hot pressed tee based on Fick's second law // *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 134. № 106014. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2021.106014](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.106014)
20. *Lingbo Kong, Xing Yang, Zhihao Hou, Jixian Dong.* Mathematical Modeling of Drying Kinetics for Pulp Sheet Based on Fick's Second Law of Diffusion // *Journal of Korea TAPPI*. 2020. Vol. 52. № 2. P. 23-31. DOI: [10.7584/JKTAPPI.2020.04.52.2.23](https://doi.org/10.7584/JKTAPPI.2020.04.52.2.23)
21. *Cheak Theng Ee, Ching Lik Hii, Sze Pheng Ong et al.* Convective Air Drying of *Spondias Dulcis* and Product Quality // *International Journal of Food Engineering*. 2019. Vol. 15. Iss. 3-4. № 20180228. DOI: [10.1515/ijfe-2018-0228](https://doi.org/10.1515/ijfe-2018-0228)
22. *Obradović B.* Guidelines for general adsorption kinetics modeling // *Hemjska industrija*. 2020. Vol. 74. Iss. 1. P. 65-70. DOI: [10.2298/HEMIND200201006O](https://doi.org/10.2298/HEMIND200201006O)
23. *Yousuf M.* A second-order efficient L-stable numerical method for space fractional reaction-diffusion equations // *International Journal of Computer Mathematics*. 2018. Vol. 95. Iss. 6-7. P. 1408-1422. DOI: [10.1080/00207160.2018.1435865](https://doi.org/10.1080/00207160.2018.1435865)
24. *Pengbo Fu, Hao Yu, Qiqi Li et al.* Cyclone rotational drying of lignite based on particle high-speed self-rotation: Lower carrier gas temperature and shorter residence time // *Energy*. 2022. Vol. 244. Part B. № 123005. DOI: [10.1016/j.energy.2021.123005](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123005)
25. *Ying Xu, Jiming Wang, Guojie Zhang et al.* Evaluation of hydrothermal treatment on physicochemical properties and re-adsorption behaviors of lignite // *Energy*. 2022. Vol. 244. Part A. № 122597. DOI: [10.1016/j.energy.2021.122597](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122597)
26. *Crapse J., Pappireddi N., Gupta M. et al.* Evaluating the Arrhenius equation for developmental processes // *Molecular Systems Biology*. 2021. Vol. 17. Iss. 8. № e9895. DOI: [10.1525/msb.20209895](https://doi.org/10.1525/msb.20209895)
27. *Jaeho Cha, Sungho Yoon.* Determination of shift factor for long-term life prediction of carbon/fiber epoxy composites using the time-temperature superposition principle // *Functional Composites and Structures*. 2022. Vol. 4. Iss. 1. № 015003. DOI: [10.1088/2631-6331/ac529e](https://doi.org/10.1088/2631-6331/ac529e)
28. *Selimfendigil F., Coban S.O., Öztup H.F.* An efficient method for optimizing the unsteady heat and mass transport features for convective drying of two porous moist objects in a channel // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 200. № 10644. DOI: [10.1016/j.jmescsci.2021.106444](https://doi.org/10.1016/j.jmescsci.2021.106444)
29. *Joardder M.U.H., Karim M.A.* Development of a porosity prediction model based on shrinkage velocity and glass transition temperature // *Drying Technology*. 2019. Vol. 37. Iss. 15. P. 1988-2004. DOI: [10.1080/07373937.2018.1555540](https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1555540)
30. *Ternes S., Börnhorst T., Schwenzer J.A. et al.* Drying Dynamics of Solution-Processed Perovskite Thin-Film Photovoltaics: In Situ Characterization, Modeling, and Process Control // *Advanced Energy Materials*. 2019. Vol. 9. Iss. 39. № 1901581. DOI: [10.1002/aenm.201901581](https://doi.org/10.1002/aenm.201901581)
31. *Chicco D., Tötsch N., Jurman G.* The Matthews correlation coefficient (MCC) is more reliable than balanced accuracy, bookmaker informedness, and markedness in two-class confusion matrix evaluation // *BioData Mining*. 2021. Vol. 14. № 13. DOI: [10.1186/s13040-021-00244-z](https://doi.org/10.1186/s13040-021-00244-z)
32. *Jia-Qing Zhou, Hong-Bin Liu, Changdong Li.* A semi-empirical model for water inflow into a tunnel in fractured-rock aquifers considering non-Darcian flow // *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 597. № 126149. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.126149](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126149)
33. *Xun Zhang, Bin Zeng, Bing Lu et al.* Experimental research on spontaneous combustion of coal oxidized by ultraviolet photocatalysis // *AIP Advances*. 2022. Vol. 12. Iss. 8. № 085226. DOI: [10.1063/5.0098407](https://doi.org/10.1063/5.0098407)
34. *Pengfei Zhao, Liping Zhong, Yuemin Zhao, Zhenfu Luo.* Comparative studies on the effect of mineral matter on physicochemical properties, inherent moisture and drying kinetics of Chinese lignite // *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 93. P. 197-204. DOI: [10.1016/j.enconman.2015.01.020](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.020)
35. *Jung J., Kobayashi C., Sugita Y.* Optimal Temperature Evaluation in Molecular Dynamics Simulations with a Large Time Step // *Journal of Chemical Theory and Computation*. 2019. Vol. 15. Iss. 1. P. 84-94. DOI: [10.1021/acs.jctc.8b00874](https://doi.org/10.1021/acs.jctc.8b00874)
36. *Meng Liu, Jian Li, Yufeng Duan.* Effects of solvent thermal treatment on the functional groups transformation and pyrolysis kinetics of Indonesian lignite // *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 103. P. 66-72. DOI: [10.1016/j.enconman.2015.06.047](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.047)
37. *Liu Ming Qiang, Jian Zhong Liu, Yu Jie Yu et al.* Investigation of Lignite Combustion Characteristics with Thermal Analysis // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 614-615. P. 25-30. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.614-615.25](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.614-615.25)



38. Yanyan Shi, Shuyuan Li, Haoquan Hu. Studies on pyrolysis characteristic of lignite and properties of its pyrolysates // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2012. Vol. 95. P. 75-78. DOI: [10.1016/j.jaap.2012.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.01.008)

39. Lei Guo, Chenhui Liu, Srinivasakannan C., Gao Jiyun. Microwave upgradation of Yunnan lignite: dielectric properties, drying pattern and kinetics // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. 2021. Vol. 55. Iss. 3. P. 248-269. DOI: [10.1080/08327823.2021.1952834](https://doi.org/10.1080/08327823.2021.1952834)

Авторы: Чхэн Ван, магистр, магистр технологии обогащения полезных ископаемых, <https://orcid.org/0009-0002-6216-6631> (Горно-технологический факультет химического машиностроения Китайского университета, Сюйчжоу, Китай), Дань Ван, д-р наук, канд. техн. наук в области обогащения полезных ископаемых, <https://orcid.org/0009-0002-3220-2152> (Горно-технологический факультет химического машиностроения Китайского университета, Сюйчжоу, Китай), Цзэнцзэн Чхэнь, д-р наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-0679-0993> (Лаборатория переработки угля и эффективного чистого использования Министерства образования, Китайский горно-технологический университет, Сюйчжоу, Китай), Чхэньлун Дуань, д-р наук, профессор, clduan@cumt.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0002-8093-6719> (Лаборатория переработки угля и эффективного чистого использования Министерства образования, Китайский горно-технологический университет, Сюйчжоу, Китай), Чхэньян Чжоу, д-р наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-5393-4240> (Лаборатория переработки угля и эффективного чистого использования Министерства образования, Китайский горно-технологический университет, Сюйчжоу, Китай).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.