

Издается Санкт-Петербургским горным
университетом императрицы Екатерины II

С 1907 ГОДА

ISSN 2411-3336
E-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



ТОМ 276 Выпуск 1

№ 6 • 2025

SCOPUS (Q1, CITESCORE — 8,8)
WEB OF SCIENCE (Q1, JIF — 2,9)
SJR 2024 — 1,351

WWW.PMI.SPMI.RU



Рецензируемый 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, CiteScore – 8,8), Web of Science (JCR – Q1, JIF – 2,9), SJR 2024 – 1,351, DOAJ, RSCI, GeoRef, Islamic World Science Citation Database (ISC), Google Scholar, РИНЦ, входит в Белый список Министерства образования и науки РФ (уровень 1), приравнен к журналам из перечня ВАК (категория 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 – «Каменная картина» с полным скелетом ихтиозавра (*Stenopterygius quadriscissus* Quenstedt, 1858). Нижняя юра (тоарский ярус) Германии. Недостающие части скелета доработаны гипсовыми вставками. Стеноптеригии – среднеразмерные ихтиозавры с размерами тела около 3,5 м, обитали в раннеюрских морях Европы. Приобретен у берлинского торговца минералами Августа Кранца в 1848 г. В сопроводительном письме было сказано: «Ящик за № 2085 вмещает большого ихтиозавра и должен быть откупорен с большою осторожностью».

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

e-ISSN 2541-9404

Том 276

Выпуск 1

№ 6 • 2025

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

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 (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, руководитель проекта «Наука» (Международный центр компетенций в горнотехническом образовании под эгидой ЮНЕСКО, 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)

А.Д.Куранов, канд. техн. наук, директор по проектированию технологических дисциплин (ООО «Институт Гипроникель», 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, профессор, академик РАЕН, проректор по научной деятельности (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 «Кинэф», 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)

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

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-70453 от 20 июля 2017 г.

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.02

Редакция: начальник РИЦ В.Л.Лебедев, редакторы Е.С.Дрибинская, М.Г.Хачирова, Л.В.Набиева, А.И.Яковлева, Е.Д.Бокарева
Библиограф А.А.Белова. Компьютерная верстка Н.Н.Седых, В.И.Каширина, Е.А.Головинская

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2025
Дата выхода в свет 29.12.2025. Формат 60 × 84/8. Уч.-изд.л. 40.
Тираж 100 экз. Заказ 719. Отпечатано в РИЦ Санкт-Петербургского
горного университета императрицы Екатерины II. Свободная цена.

Адрес редакции и издателя: 21-я линия, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106
Тел. +7 (812) 328-8416; +7 (812) 328-8216;
E-mail: pmi@spmi.ru Сайт журнала: pmi.spmi.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Егоров А.С., Большакова Н.В., Калинин Д.Ф. Роль сдвиговых дислокаций в формировании нефтегазоперспективных структур северного фланга Охотской нефтегазоносной провинции.....	3
Волохов Е.М., Кожухарова В.К., Зеленцов С.Н., Мукминова Д.З., Исаев А.А. Оценка эффектов взаимодействия фундамента и основания методами численного моделирования для условий подработки здания Мариинского театра в Санкт-Петербурге	16
Лысакова Е.И., Минаков А.В., Скоробогатова А.Д., Пряжников М.И. Сравнительный анализ влияния различных нанодобавок на характеристики буровых растворов на основе дизельного топлива	30
Бессонова Е.Н., Глушанкова И.С. Теоретическое и экспериментальное обоснование использования редокс-системы Fe^0 -C для очистки карьерных вод от нитрат-ионов	41
Хошро С., Табатабаи Моради С.Ш. Метод оптимизации, основанный на концепции удельной механической энергии, для повышения производительности бурения: пример практического применения	51
Дашко Р.Э., Колосова Д.Л., Мазур А.С., Иевлев А.В. Ядерный магнитный резонанс как метод ревизии теории и практики фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов.....	67
Банникова И.А., Уваров С.В., Ефремов Д.В., Банников М.В. Исследование особенностей разрушения андезита и песчаника в условиях квазистатического и динамического нагружения ..	77
Березин А.В., Салимгареева Л.И., Пучков В.Н. Реконструкция геодинамической истории комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал: мультидисциплинарный подход	91
Куйбида М.Л., Викентьев И.В., Крук Н.Н., Мурзин О.В., Мурзина Н.М., Чугаев А.В., Яковлев В.А., Шелепов Я.Ю., Нарыжнова А.В., Фоминых П.А., Зюков Е.Д., Карманов Г.Ф. Ранне-среднедевонские рудовмещающие вулканогенные формации Змеиногорского рудного района северо-западной части Рудного Алтая.....	101
Шаповало А.А., Аверьянов В.К., Сербин Ю.В. Определение индекса технического состояния энергокомплексов производственных объектов в системе поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры газовой отрасли	115
Мещеряков А.А., Хамисов О.О. Поиск равновесия по Нэшу для системы из двух взаимосвязанных рынков сырья и продукции	129
Казанцева В.В., Ожигин Д.С., Косарев Н.С., Сатбергенова А.К., Ожигина С.Б. Разработка комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных.....	142
Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Целуйко А.С., Ятимов У.А., Лебедева С.М. Минералы группы кричтонита в оолитах оруденелых вулканокластитов Рудногорского железорудного месторождения (Восточная Сибирь).....	157
Даувальтер В.А., Даувальтер М.В., Слуковский З.И. Гидрохимическая эволюция подземных вод в результате десятилетней разработки месторождения апатит-нефелиновых руд в юго-восточной части Хибинского щелочного массива	172



Научная статья

Геология

Роль сдвиговых дислокаций в формировании нефтегазоперспективных структур северного фланга Охотской нефтегазоносной провинции

А.С.Егоров, Н.В.Большакова✉, Д.Ф.Калинин

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

Как цитировать эту статью: Егоров А.С., Большакова Н.В., Калинин Д.Ф. Роль сдвиговых дислокаций в формировании нефтегазоперспективных структур северного фланга Охотской нефтегазоносной провинции // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 3-15. [EDN HDWEBO](#)

Аннотация

Средствами геолого-геофизического моделирования обоснованы особенности глубинного строения и тектоники Примагданского и Западно-Камчатского шельфов Охотского моря, а также прилегающей территории Камчатского п-ова. Исследования, направленные на изучение закономерностей локализации месторождений углеводородов северного фланга Охотской нефтегазоносной провинции, опираются на результаты региональных и среднемасштабных геологосъемочных и прогнозно-поисковых исследований, данные геофизических съемок (поле аномалий силы тяжести Δg в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя $2,67 \text{ г/см}^3$, аномальное магнитное поле ΔT_a , региональные сейсмические профили и результаты их обобщений), материалы петрофизических исследований скважин. При обработке и интерпретации потенциальных геофизических полей использованы различные алгоритмы решения прямой и обратной задачи, а также распознавания образов с обучением и без обучения. Выполненные исследования показали, что особенности глубинного строения и тектоники региона определяются последовательностью и характером проявления мезозойских и кайнозойских орогенных процессов на границах Евразийской и Охотоморской литосферных палеоплит. Изучение региональных сдвиговых зон, развивающихся вдоль Охотско-Чукотской сутурной зоны и Охотско-Западно-Камчатского блока, показало их определяющее влияние на морфологию осадочных бассейнов. Так, тектоническая активность Охотско-Чукотской сдвиговой зоны, заложенной субпараллельно побережью Евразии, привела к формированию обширной сети оперяющих дислокаций и впадин двух типов: крупных присдвиговых продольных депрессий и сдвиго-раздвиговых впадин типа pull-apart, ориентированных под углом к оси главного сдвига. Картирование горстовых поднятий позволяет обосновать положение первоочередных объектов нефтегазопроисков по структурному критерию.

Ключевые слова

региональный сдвиг; осадочный бассейн; pull-apart; нефтегазоперспективные структуры; Северо-Охотский прогиб; Западно-Камчатская нефтегазоносная область

Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания FSRW-2024-0008 «Исследование термодинамических процессов Земли с позиции генезиса углеводородов на больших глубинах».

Поступила: 10.07.2024

Принята: 28.01.2025

Онлайн: 23.07.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Исследования глубинного строения и тектоники Охотоморского региона, выполненные в связи с перспективами обнаружения месторождений углеводородов, свидетельствуют о том, что на особенности формирования Охотской нефтегазоносной провинции (НГП) в целом и отдельных депрессий в ее пределах значимое влияние оказывают региональные сдвиговые дислокации. Исследованиям механизма образования присдвиговых впадин и связанных с ним особенностей седиментации посвящены многочисленные труды отечественных и зарубежных ученых [1-3].

Так, многолетние исследования В.П.Уткина и его соавторов [4, 5] свидетельствуют об активной рифтогенной деструкции континентальной коры Азиатско-Тихоокеанской переходной зоны в позднем мелу-кайнозое. В ареале развития сдвигов формировались рифтогенные структуры, контролирующие осадочные бассейны, в том числе продольные и типа pull-apart [6]. Бохай-Амурская система левых сдвигов контролирует многочисленные осадочные бассейны, в том числе и относительно небольших размеров, включая бассейны сдвиго-раздвигового типа [5].



Большое число крупных рифтогенных бассейнов, а также локальных линейных депрессий и структур типа pull-apart выделено на основе анализа и обобщения структурных и тектонических параметров нефтегазоносных бассейнов, заложение которых обусловлено проявлением региональных сдвиговых дислокаций. К их числу относятся прибрежные и шельфовые бассейны Южной и Центральной Калифорнии, Венесуэлы, Тринидада и Тобаго; бассейны Юго-Восточной Азии и Бохайской впадины на востоке Китая [7].

В присдвиговых депрессиях установлены значительные скопления углеводородов. Так, в бассейнах Сан-Хоакин и Лос-Анджелес в Южной Калифорнии (США) добыты миллиарды баррелей нефти [8]. Одной из наиболее протяженных сдвиговых структур, контролирующей заложение осадочных бассейнов территории Китая, является зона разлома Тан-Лу, шириной около 80 км и протяженностью 3 тыс. км, имеющая большой потенциал для разведки нефти и газа [3, 9]. Отмечено, что заложение бассейнов, последующие тектонические деформации и особенности осадконакопления здесь обусловлены субдукцией Тихоокеанской плиты [10]. Анализируя сейсмостратиграфические разрезы грабена Танюань вдоль одной из ветвей сдвиговой зоны Тан-Лу, авторы статьи [11] пришли к выводу о ее формировании в режиме pull-apart. Нефтегазоносный бассейн Сычуань (Китай), включающий крупные газовые месторождения, также сформирован под воздействием наклонной субдукции океана прото-Тетис. При этом сдвиговые дислокации играют роль в миграции углеводородов от источника к коллектору, стимулировании коллектора, накоплении газа и высоком дебите скважин [2].

Исследования осадочного бассейна Мертвого моря показательны, поскольку это детально изученный продольный бассейн, локализованный вдоль главной сдвиговой зоны. При протяженности 150 км и глубине фундамента более 8 км соотношение размеров по продольному и ортогональному направлению составляет около 9. Результаты лабораторного тектонофизического моделирования показали, что фундамент такого бассейна окаймлен сдвиговыми разломами, которые контролируют его геометрию [12].

В качестве характерного примера бассейнов типа pull-apart часто приводится впадина Долины Смерти (Израиль). Долина обрамляется сдвиговыми разломами, расстояние между которыми составляет около 40 км. Соотношение размеров по продольному и ортогональному направлению у бассейна Долины Смерти составляет 0,3. Лабораторные эксперименты показали развитие продольных крутопадающих сдвиговых разломов, окаймляющих дно бассейна по всей его длине, и поперечных по отношению к главной оси сбросов [12]. К типу впадин pull-apart относится бассейн Хула, расположенный в центральной части Мертвого моря. Формирование бассейна связывается с левосдвиговыми перемещениями Синайской и Аравийской плит. Структура развивалась как асимметричный, раздвигающийся (ромбовидной формы) бассейн, ограниченный по флангам продольными сдвиговыми разломами, а с юга – сбросами, обращенными на север [13, 14].

Сходный рисунок тектонической деструкции наблюдается в пределах бассейна залива Пария, заложенного в результате относительных движений Карибской и Южноамериканской плит вдоль северной границы последней. Бассейн ограничивается зоной правосторонних сдвигов Эль-Пилар и Арима (на севере) и Ворм Спрингс (на юге). В пределах бассейна залива Пария картируются сбросовые дислокации северо-западного простирания, определяющие ступенчатый рисунок чередующихся грабенов и горстов [15].

Отличительной особенностью российского Дальнего Востока от других нефтегазоносных регионов является то, что основные объемы подтвержденных запасов и перспективных ресурсов нефти и газа рассредоточены по отдельным осадочным прогибам. По мнению Л.С.Маргулиса [16], их можно разделить на четыре основных типа: окраинно-материковые, транзитальные краевые, глубоководные и задуговые прогибы. Осадочные бассейны, выполненные палеоген-неогеновыми осадочными толщами, отделяются друг от друга глубинными разломами и поднятиями фундамента. При этом отмечается роль тектонических процессов, сформировавших нефтегазоперспективные структуры региона.

В работах В.А.Игнатовой [17] приводится сравнительная характеристика осадочных бассейнов Дальневосточного региона и Юго-Восточной Азии. Особенности геодинамических обстановок их формирования позволили выделить три основные группы: континентальные палеорифты, пассивные континентальные палеоокраины, активные континентальные окраины. Большинство



осадочных депрессий отнесены к последней группе. Их заложение преимущественно происходит на коре континентального или переходного типов, с широким развитием надвиговых дислокаций и резкой сменой условий осадконакопления, где в разрезе присутствуют как континентальные терригенные угленосные формации, так и глубоководные терригенно-карбонатные толщи.

Наши исследования северного фланга Охотской НГП свидетельствуют об определяющей роли в развитии осадочных бассейнов региональных сдвигов [18, 19]. Анализ закономерностей локализации горстов и грабенов показал возможности выделения в ареалах их развития двух основных типов присдвиговых бассейнов, охарактеризованных выше: линейных продольных прогибов, прослеживаемых вдоль осевой зоны главного сдвига и впадин типа pull-apart, ориентированных под углом к его оси.

Методы

При изучении закономерностей локализации перспективных на углеводороды структур северной части Охотской провинции нами были использованы:

- результаты региональных и среднемасштабных геологосъемочных и специализированных прогнозно-минерагенических исследований;
- данные геофизических съемок (поле аномалий силы тяжести Δg в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя $2,67 \text{ г/см}^3$, аномальное магнитное поле ΔT_a , региональные сейсмические профили и результаты обобщения детальных сейсморазведочных работ);
- данные петрофизических исследований скважин;
- научные публикации, посвященные исследованиям Охотоморского региона и прилегающих структур Евразийского континента и Тихоокеанской окраины [20-22].

Для решения поставленной задачи созданы цифровые модели гравитационного поля в редукции Буге и аномального магнитного поля ΔT_a территории, охватывающей северную часть Охотоморского региона. Шаг матрицы цифровых моделей потенциальных полей составляет 500 м.

При обработке цифровых моделей потенциальных полей использованы алгоритмы разложения полей на региональную и локальную составляющие, расчета градиентов полей, распознавания образов с составлением карты классов на основе программного комплекса КОСКАД 3D [23]. Наряду с вышеперечисленными трансформантами применен классификационный алгоритм Д.С.Зеленецкого (АСОД «Воздух»). Используемые подходы к обработке данных геофизических полей позволяют выделить однотипные по набору признаков области, что предоставляет дополнительные возможности при проведении интерпретации и районирования изучаемых площадей [24-26].

Геологическое истолкование геофизических аномалий. На основе качественной интерпретации комплекса геофизических данных разработана схема тектонического районирования северного фланга Охотоморского региона, особенности глубинного строения которого определяются последовательностью и характером проявления мезозойских и кайнозойских орогенных процессов на границах Евразийской и Охотоморской литосферных палеоплит (рис.1). Для региона характерна высокая концентрация офиолитов [27], осадочно-вулканогенных, вулканических и интрузивных комплексов островных дуг и активных континентальных окраин. Аномалии гравитационного поля в редукции Буге в пределах акватории Охотского моря почти всюду положительны, варьируются в пределах от первых единиц до сотен миллигал.

Экстремально низкие значения гравитационного поля наблюдаются на коллизионной границе Охотоморского мегаблока с Евразийским континентом; максимальные значения, достигающие 150 мГал, фиксируются в пределах Южно-Охотской котловины. Характерной особенностью гравитационного поля региона являются многочисленные узкие локальные гравитационные аномалии, обусловленные неоднородностями фундамента и протяженными разломами.

К западу от Охотоморского региона располагаются Верхояно-Колымская и Колымо-Омолонская складчатые области (СО), которые характеризуются преимущественно отрицательными значениями аномального магнитного поля ΔT_a , изредка осложненного локальными интенсивными положительными аномалиями (до +1500 нТл). Для шовных зон, разделяющих блоки, характерны вытянутые линейные знакопеременные аномалии. В гравитационном поле структуры представлены ареалами отрицательных значений от -160 до -20 мГал.

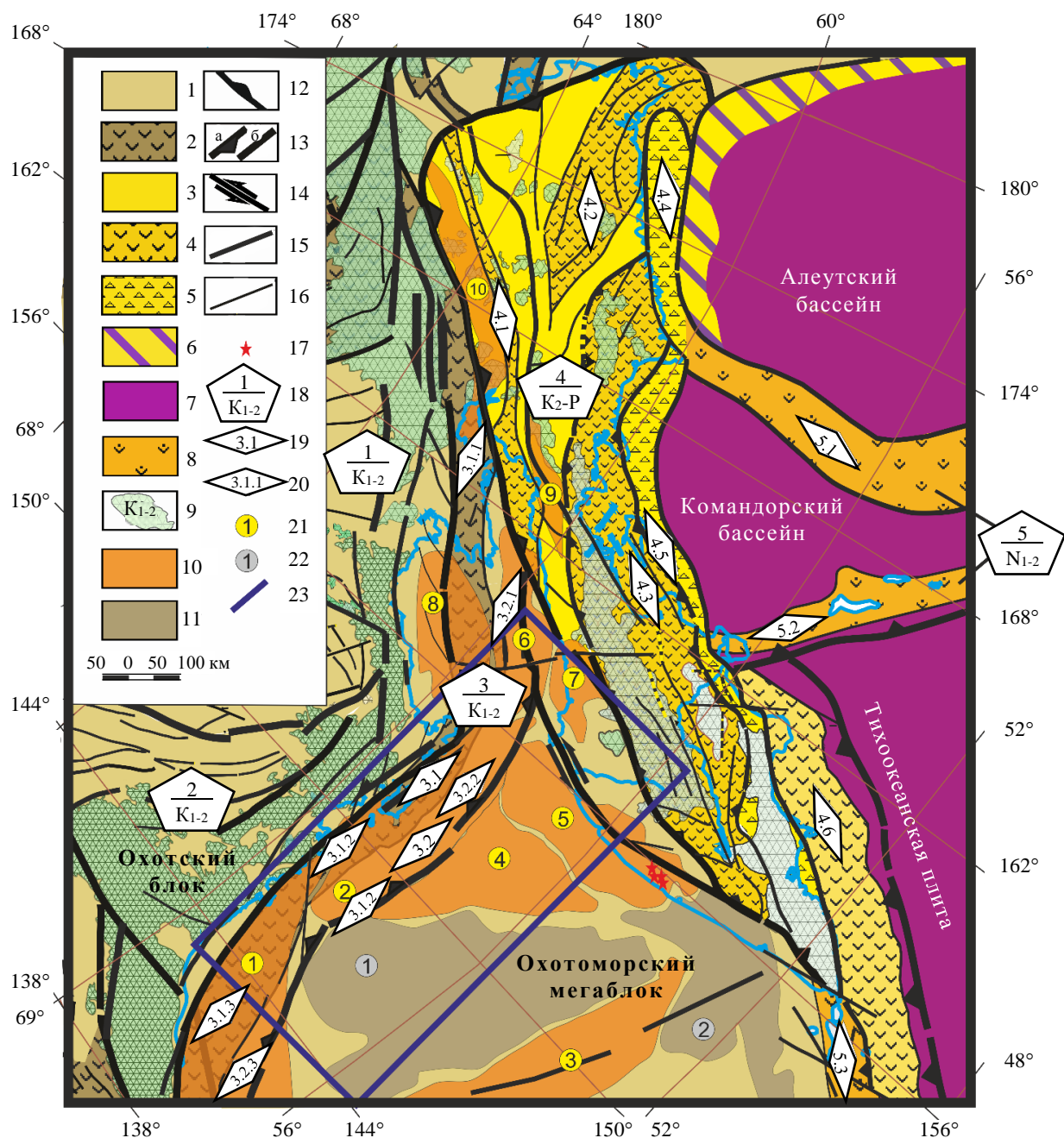


Рис.1. Схема тектонического районирования консолидированного фундамента и платформенного чехла северного фланга Охотоморского региона [19]

1-9 – структурно-вещественные неоднородности консолидированного фундамента: 1, 2 – киммерийских СО (1 – блоки с корой континентального типа, 2 – межблоковые (сутурные) мегазоны), 3-5 – альпийских СО (3 – блоки с корой континентального типа; 4, 5 – межблоковые (сутурные) мегазоны: 4 – выполненные вулканогенно-осадочными островодужными комплексами, 5 – выполненные образованиями аккреционной призм), 6 – кора переходного континентально-океанического типа, 7 – океаническая кора, 8 – комплексы современных островных дуг и подводных океанических хребтов, 9 – комплексы активных континентальных окраин; 10, 11 – структуры платформенного чехла (10 – прогибы, 11 – поднятия); 12 – зоны субдукции; 13-16 – разрывные нарушения (13 – границы СО (а – надвиговые, б – прочие), 14 – региональные левосторонние сдвиги, 15 – границы структурных зон, 16 – второстепенные разломы); 17 – известные газоконденсатные месторождения региона; 18 – главные геоструктуры (в числителе – индекс, в знаменателе – возраст завершающей складчатости); 19, 20 – индексы структур фундамента (19 – структуры, 20 – фрагменты структур); 21, 22 – индексы структур осадочного чехла (21 – прогибы, 22 – поднятия); 23 – контуры площади детальных исследований

Структуры консолидированного фундамента: 1 – Колымо-Омолонская СО; 2 – Верхояно-Колымская СО; 3 – Охотско-Чукотская коллизивно-активноокраинная СО: 3.1 – Охотско-Чукотская сутурная зона (3.1.1 – Мургадьский, 3.1.2 – Южно-Тайгоносский, 3.1.3 – Тауйский фрагменты), 3.2 – краевой складчато-надвиговый пояс (3.2.1 – Шелиховский, 3.2.2 – Примагаданский, 3.2.3 – Билибинский фрагменты); 4 – Корякско-Камчатская аккреционно-коллизивно-активноокраинная СО (4.1 – Западно-Корякская, 4.2 – Центрально-Корякская, 4.3 – Олюторская, 4.4 – Хатырская, 4.5 – Ветловско-Говенская, 4.6 – Кроноцкая зоны); 5 – островные дуги и хребты (5.1 – хребет Ширишова, 5.2 – Алеутско-Командорская, 5.3 – Курильская)

Структуры осадочного чехла: 1-10 – прогибы (1 – Шантаро-Лисянский, 2 – Северо-Охотский, 3 – Центрально-Охотский, 4 – Тинро, 5 – Охотско-Западно-Камчатский, 6 – Шелиховский, 7 – Воямпольский, 8 – Гижигинский, 9 – Пусторецкий, 10 – Пенжинский); 1, 2 – поднятия: 1 – Центрально-Охотское, 2 – Большерецкое



Вдоль западной границы Евразийского палеоконтинента картируется Охотско-Чукотский вулканический пояс (ОЧВП) шириной до 400 км. Наложенный на структуры Новосибирско-Чукотской, Верхояно-Колымской и Колымо-Омолонской складчатых областей ОЧВП протягивается вдоль побережья материка более чем на 3000 км. В аномальном магнитном поле такая структура хорошо проявляется линейными цепочками положительных аномалий, иногда превышающих значения 3000 нТл, связанными с разными по составу вулканитами – от кислых до основных разностей. В гравитационном поле ОЧВП характеризуется сменой знака с минуса на плюс и протяженными аномалиями северо-восточного простирания.

Линейная зональность расположения основных структурно-тектонических элементов Камчатского п-ова контрастно проявляется в аномальном магнитном поле. Характер магнитного поля Западно-Камчатской зоны однотипен с полем Охотоморского мегаблока. Структуры Центральной и Восточной Камчатки проявлены в аномальном магнитном поле вытянутыми в меридиональном направлении аномалиями, достигающими значений в 2000 нТл. Интенсивность и морфология магнитного поля здесь обусловлена особенностями локализации вулканических поясов и комплексов островных дуг, причленявшихся к окраине континента в кайнозой. Аналогичная линейная зональность характерна и для гравитационного поля. Западно-Камчатская зона отмечается пониженным значением гравитационного поля, отвечающего развитию в ее пределах крупного осадочного прогиба. Вытянутые вдоль береговой линии положительные аномалии гравитационного поля Западно-Камчатского бассейна сопряжены с поднятиями поверхности фундамента [28]. Смена знака поля наблюдается при картировании структур Центрально-Камчатского вулканического пояса (по аналогии с ОЧВП); при этом структуры Восточной Камчатки характеризуются знакопеременным полем средней интенсивности.

Алеутский и Командорский бассейны, разделенные хребтом Ширшова, заложены на океаническом основании с характерной для коры этого типа структурой аномального магнитного и высокими значениями гравитационного поля интенсивностью до 360 мГал. От Тихоокеанской океанической плиты их отделяет Алеутско-Командорская островная дуга. Повышенные значения гравитационного поля океанических бассейнов обуславливаются повышенной плотностью океанической коры по сравнению с менее плотной континентальной корой.

Охотоморский окраинный бассейн

Особенности глубинного строения бассейна определяются последовательным развитием восточного фланга Евразийского континента в режиме активной континентальной окраины, заклиниванием субдукционной зоны Охотоморской континентальной плитой и завершающими коллизионными процессами аккреции этих континентальных плит [29, 30]. Аккреционный процесс мела-среднего палеогена привел к заложению складчато-надвиговых деформаций на окраине Евразийского континента, формированию ОЧВП, одноименных сутурной зоны и регионального левостороннего сдвига (рис.1). Перечисленные структуры прослеживаются по геофизическим данным вдоль всего северо-западного побережья Охотского моря [31].

Особое внимание в нашей работе уделено трассированию региональных сдвиговых зон и оперяющих их деформаций, развивающихся вдоль Охотско-Чукотской сутурной зоны и Охотско-Западно-Камчатского блока по особенностям потенциальных геофизических полей и их трансформаций. Выделенные сдвиговые зоны определяют морфологию фундамента и особенности строения структур осадочного чехла, с которыми связываются перспективы нефтегазоносности Примагаданского и Западно-Камчатского шельфа. Главные сдвиги проявляются резким изменением инфраструктуры гравитационного и аномального магнитного полей и особенностями их безэталонной классификации; оперяющие дислокации, как правило, маркируются градиентами геофизических полей (рис.2).

Строение консолидированного фундамента. Охотско-Чукотский региональный сдвиг с обширной сетью оперяющих его деформаций в значительной мере определяет особенности глубинного строения консолидированного фундамента и платформенного чехла северной части Охотоморского региона. Положение и морфология выделяемой нами зоны отличаются от соответствующих параметров Восточно-Азиатской глобальной сдвиговой зоны, обоснованной авторитетным исследователем этого региона В.П.Уткиным [4, 5]. При этом мы солидарны с ним относительно

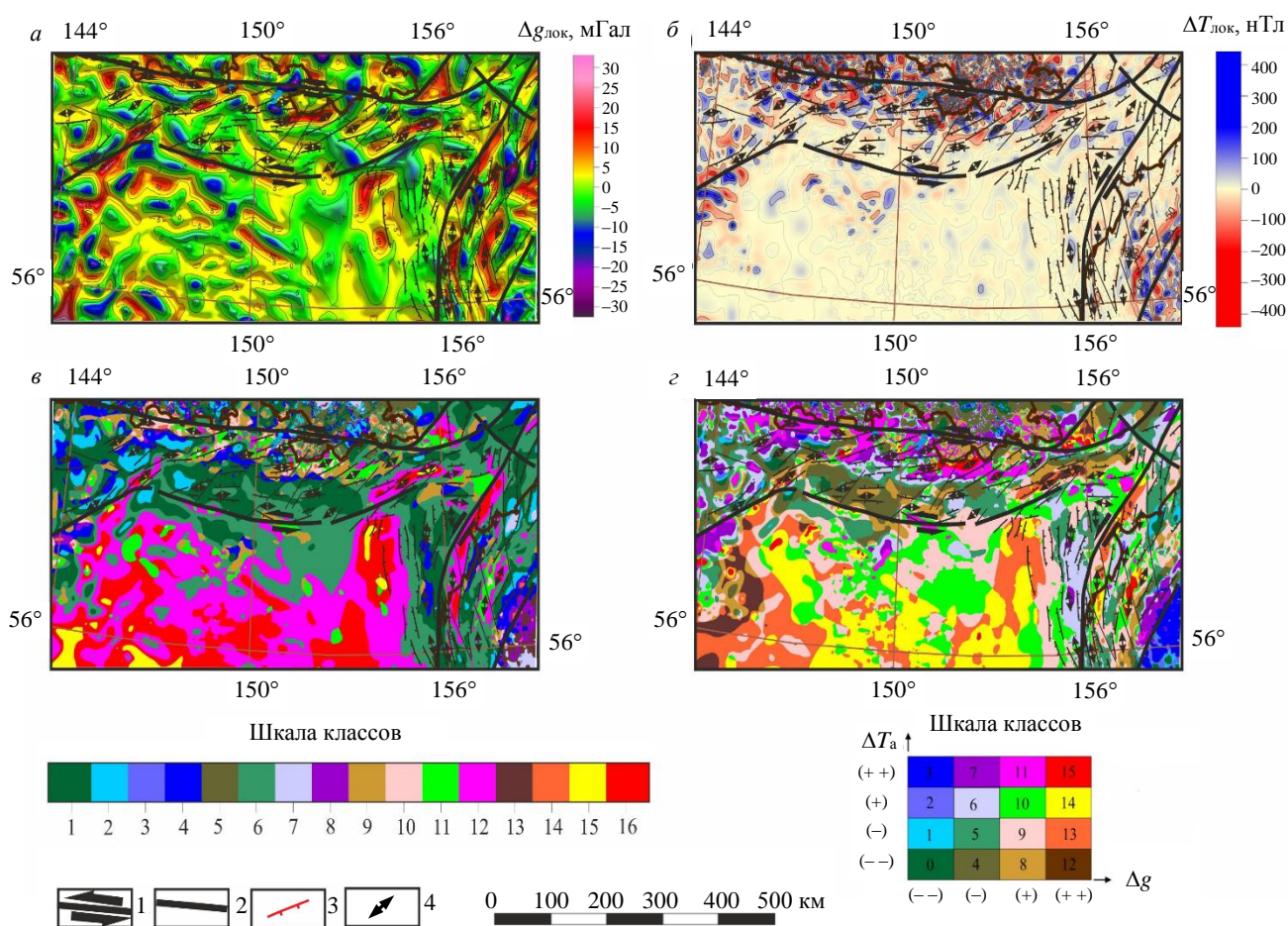


Рис.2. Схемы локальных составляющих и безэталонной классификации гравитационного и аномального магнитного полей северной части Охотоморского региона: локальные составляющие гравитационного (а) и магнитного (б) полей; безэталонная классификация гравитационного и магнитного полей, рассчитанная с использованием алгоритма А.В.Петрова КОСКАД 3D [23] (в) и алгоритма Д.С.Зеленецкого АСОД «Воздух» (г) [19]

1 – главные региональные сдвиги; 2 – разрывные нарушения – границы структурных зон; 3 – разрывные нарушения, опережающие региональные сдвиги (сбросы, сдвиги); 4 – оси сдвиго-раздвиговых (pull-apart) структур осадочного чехла

Контуры площади см. на рис.1

времени заложения сдвиговой зоны (юра – ранний мел – «орогенное сосдвиговое скупивание»; поздний мел – кайнозой – «рифтогенное растяжение блоков коры»). Заложение выделяемой нами сдвиговой зоны относится к позднему мелу и связывается с латеральным смещением Азиатского континента относительно Тихоокеанской океанической плиты [5].

Схожая инфраструктура тектонических деформаций характерна и для Западно-Камчатской сдвиговой зоны. В этом случае направление оси главного сдвига имеет северо-восточное простирание, а горсты и грабены ориентированы субмеридионально, «синтетические» левосторонние сдвиги направлены на север-северо-запад.

Структуры платформенного чехла. Важным источником информации о строении седиментационных бассейнов Северного Приохотья и Западной Камчатки явились результаты сейсморазведочных работ 1980-х годов, выполненных трестом ОАО «Дальморнефтегеофизика». В результате обработки сейсмических данных специалистами ОАО «Дальморнефтегеофизика» построены карты четырех опорных горизонтов, отвечающих основным этапам структурной перестройки бассейнов [6]. Высокое качество и детальность этих схем позволило нам рассматривать их в качестве фактологической основы для оценки характера тектонических деформаций фундамента, определяющих структуру осадочных депрессий региона. С целью изучения опережающих дислокаций главного Охотско-Чукотского левостороннего сдвига на структурной карте поверхности

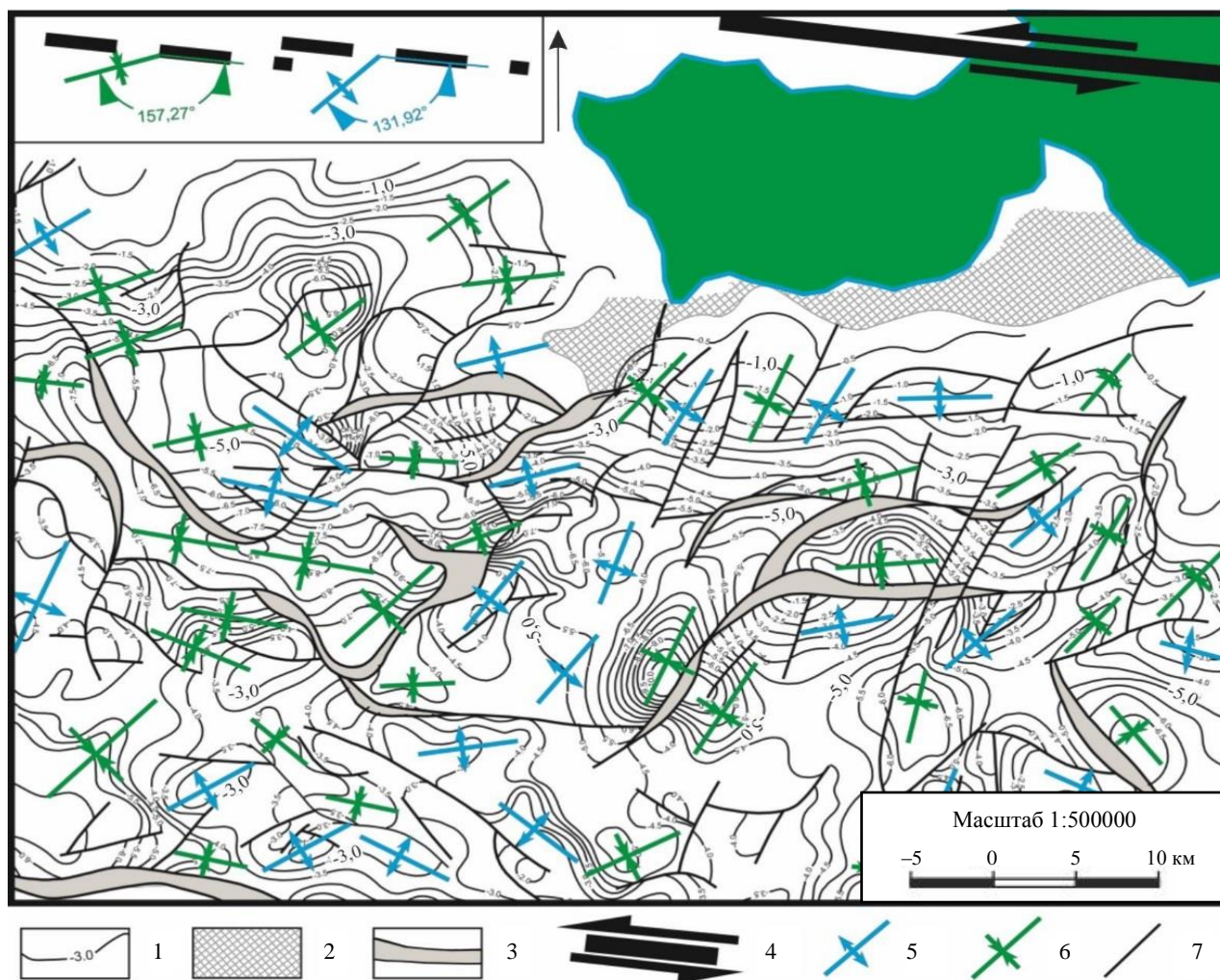


Рис.3. Простирание осей основных блоков относительно Охотско-Чукотского левостороннего сдвига (фрагмент схемы по данным ОАО «Дальморнефтегеофизика» с дополнениями авторов); на врезке – измерение углов между главным сдвигом и осями грабенов и горстов

- 1 – изогипсы поверхности акустического фундамента, км; 2 – выходы акустического фундамента на дно моря;
3 – проекция плоскости сместителя; 4 – фрагмент Охотско-Чукотского левостороннего сдвига; 5 – горсты;
6 – грабены; 7 – сбросы и взбросы

акустического фундамента вручную были отрисованы оси горстовых и грабеновых структур (рис.3), измерены азимуты простирания их осевых зон и выполнен подсчет количества горстов и грабенов, оси которых ориентированы по каждому десятиградусному интервалу полупространства. Результаты анализа отображены в форме розы-диаграммы (рис.4). Построенная роза-диаграмма показывает, что главными направлениями разрывных дислокаций и, соответственно, осадочных депрессий и горстов являются субширотное (азимут $0-10^\circ$) и северо-западное (азимут $160-170^\circ$) направления. Подчиненную роль играют дислокации с азимутом простирания $100-120^\circ$. Если ориентироваться на параметры эллипсоида деформации левостороннего сдвига (рис.5), то субширотное простирание отвечает направлению Охотско-Чукотского сдвига; северо-западное является главной ориентацией локальных горстов и грабенов; дислокации с азимутом простирания $100-120^\circ$, скорее всего, представляют оперяющие сдвиги. Учитывая эти выводы и базируясь на результатах качественной интерпретации геофизических полей, нами была построена геолого-структурная схема, где обозначены горсты и грабены платформенного чехла, границами которых являлись разноориентированные разломы растяжения, сжатия и сдвига, установлен характер изменения мощности кайнозойского чехла и оконтурены крупные осадочные бассейны и локальные структуры (рис.5).

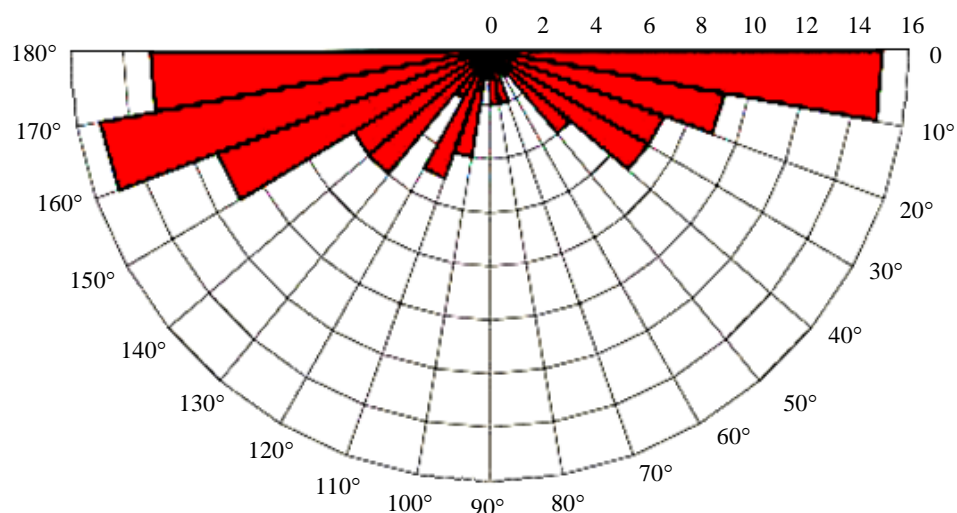


Рис.4. Ориентация осей сбросов и взбросов ареала развития Охотско-Чукотского сдвига [19]

Морфология структур осадочного чехла на рассматриваемой площади в значительной мере определяется тектонической активностью Охотско-Чукотской сдвиговой зоны. Проявление этой региональной дислокации, развивающейся субпараллельно побережью Евразии, привело к заложению крупных продольных впадин и локальных горстов и грабенов, развивающихся в режиме pull-apart.

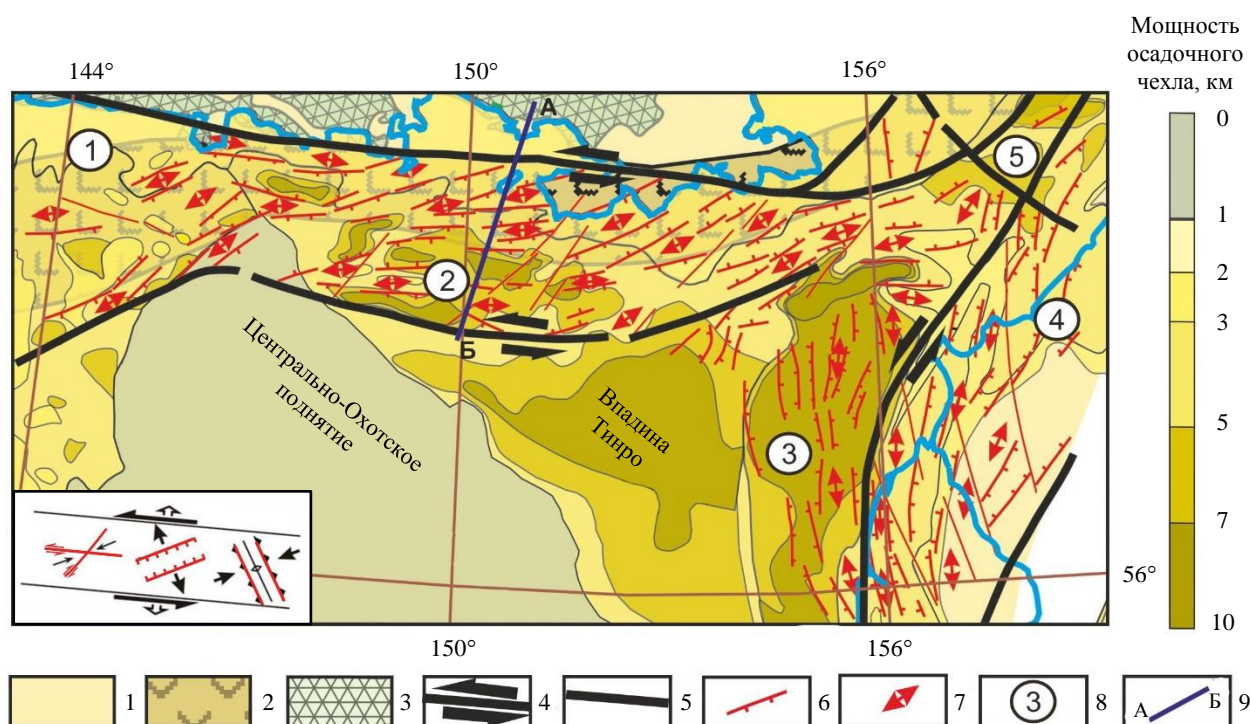


Рис.5. Закономерности пространственного расположения разрывных дислокаций растяжения и сдвига Охотско-Чукотской и Западно-Камчатской региональных сдвиговых зон; на врезке – ориентация разрывных нарушений Охотско-Чукотской зоны в соответствии с моделью эллипсоида деформации левостороннего сдвига [19, 32]

Структурно-вещественные подразделения: 1-3 – структуры киммерийских складчатых областей (1 – блоки с корой континентального типа, 2 – межблоковые сутурные зоны, 3 – вулканно-плутонический пояс); 4 – главные региональные сдвиги; 5 – разрывные нарушения – границы структурных зон; 6 – разрывные нарушения, опережающие региональные сдвиги (сбросы, сдвиги); 7 – оси сдвиго-раздвиговых (pull-apart) структур осадочного чехла; 8 – элементы нефтегазогеологического районирования (1 – Шантарско-Лисянский прогиб; 2 – Северо-Охотский прогиб; 3 – Охотско-Западно-Камчатский прогиб; 4 – Воямпольский прогиб; 5 – Шелиховский прогиб); 9 – положение геолого-геофизического профиля



Продольные присдвиговые бассейны в ареале развития Охотско-Чукотской сдвиговой зоны представляют линейные впадины (грабен-рифты), вытянутые в субширотном направлении. В бассейнах именно этого типа локализована большая часть углеводородных ресурсов Западно-Тихоокеанского региона. При этом синрифтовый комплекс сложен преимущественно

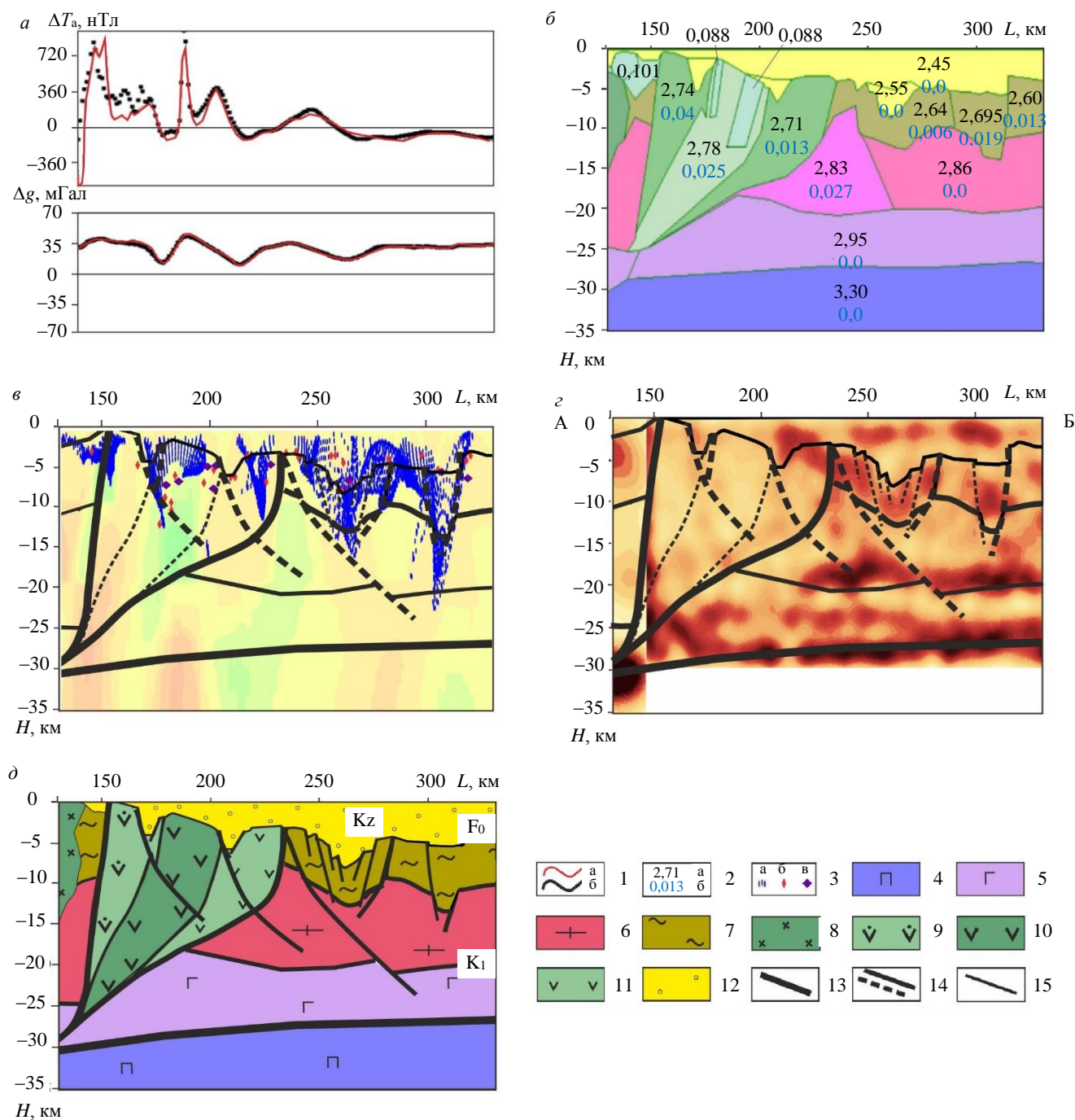


Рис.6. Построение геолого-геофизического разреза по линии профиля А-Б согласно материалам интерпретации комплекса геофизических данных (положение профиля см. на рис.5): а – кривые аномального магнитного ΔT_a и гравитационного Δg полей; б – петрофизическая модель; в – «особые» точки потенциальных полей; з – сейсмический разрез МОВ-ОГТ в показателях рефлексивности; д – интерпретационный геолого-геофизический разрез [19]

1 – кривые аномального магнитного ΔT_a и гравитационного Δg полей: теоретические (а), расчетные (б); 2 – физические свойства горных пород: плотность, г/см³ (а), магнитная восприимчивость (б); 3 – особые точки потенциальных полей: результат деконволюции Эйлера для гравитационного поля (а), результат деконволюции Вернера для магнитного поля (б), результат деконволюции Вернера для гравитационного поля (в); 4 – литосферная мантия; 5 – нижняя и средняя кора; 6 – верхняя кора; 7 – древние докайнозойские осадки; 8 – интрузивные массивы; 9-11 – комплексы сутурной зоны, дифференцированные по плотности (9 – средние, 10 – повышенные, 11 – пониженные значения); 12 – осадочный кайнозойский чехол; 13 – границы сутурной зоны; 14 – основные глубинные разломы (на интерпретационных и результирующем разрезах); 15 – второстепенные разломы



континентальными терригенными угленосными формациями, а надрифтовый – прибрежно-морскими, дельтовыми и глубоководными терригенными и терригенно-карбонатными отложениями мезозойско-кайнозойского возраста [33]. Характерным примером структур этого типа является крупный и относительно хорошо изученный Магаданский прогиб, являющийся частью Северо-Охотской перспективно нефтегазоносной области.

Параметры линейного пояса локальных горстов и грабенов, развивающегося параллельно границам плит в тылу Тихоокеанской субдукционной зоны, и ориентация этих структур соответствует теоретической модели бассейна типа pull-apart. В пределах пояса моделируются структуры растяжения, сжатия и сдвига, расположение которых хорошо согласуется с теоретической моделью эллипсоида деформации левостороннего сдвига [32]. Острый угол заложения горстов и грабенов относительно главной оси сдвига позволяет предполагать, что левосторонняя Охотско-Чукотская тектоническая зона имеет значимую компоненту растяжения.

Глубинный разрез. Глубинное строение консолидированного фундамента изучено в сечении геотраверса 2-ДВ-М и базировалось на материалах сейсморазведочных работ (в том числе данных глубинного МОВ-ОГТ) [22], а также данных грави- и магниторазведки. Интерпретация последних выполнялась с использованием алгоритмов решения обратных задач грави- и магниторазведки, разработанных А.Б.Андреевым и И.И.Приезжевым (КОСКАД 3D) [23], М.Б.Штокаленко [34], А.И.Атаковым [35] и Ю.П.Горячевым (БАЛТИКА) [36]. Расчет особых точек поля выполнен способом деконволюции Эйлера [37, 38]. Совместная интерпретация результатов инверсии потенциальных полей в сочетании с данными сейсморазведки позволила изучить основные черты строения земной коры и особенности морфологии структур фундамента и осадочного чехла. На рис.6, б представлены петроплотностная и петромагнитная модели разреза земной коры, параметры которых в латеральном измерении обоснованы увязкой со схемой тектонического районирования консолидированного фундамента (см. рис.1); в радиальном измерении – результатами решения прямой и обратных задач геофизики. Достоверность моделирования иллюстрируется высоким совпадением кривых наблюдаемых гравитационного и аномального магнитного полей и соответствующих расчетных кривых (рис.6, а). На рис.6, в продемонстрирована приуроченность особых точек к рифтогенным структурам. На трассах особых точек, рассчитанных с использованием алгоритма деконволюции Вернера, проявляются особенности морфологии рифтогенной структуры и положение ее глубинного канала.

Материалы сейсморазведочных работ МОВ-ОГТ на Примагаданском и Западно-Камчатском шельфах, в том числе пересчитанные в показатели «рефлективности» (рис.6, г) [39], характеризуют морфологию границ платформенного чехла и радиальную расслоенность консолидированного фундамента. Комплексный анализ этих разнотипных данных позволяет обосновать морфологию платформенного чехла с выделением рифтогенных структур, выполнить моделирование Охотско-Чукотской сутурной зоны и блоков консолидированного фундамента окраины Евразийского континента и Охотоморского мегаблока.

Дискуссия

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что тектонические деформации, связанные с Охотско-Чукотской сдвиговой зоной, контролируют формирование обширной сети оперяющих дислокаций северного фланга Охотоморского мегабассейна [19]. В кайнозое в этом поясе происходило формирование впадин двух типов: крупных присдвиговых продольных депрессий и сдвига-раздвиговых впадин типа pull-apart, ориентированных под углом к оси главного сдвига. В соответствии с классической моделью левостороннего сдвига [32] здесь моделируется полный набор структур растяжения (рифтовых грабенов, разделяемых горстами), сжатия и сдвига. На разрезе моделируются «структуры цветка», характерные для областей развития сдвиговых деформаций с компонентой растяжения. Широкое распространение горстов и грабенов в пределах Примагаданского шельфа обусловило формирование локальных структур – первоочередных объектов поисковых работ на углеводороды.

Геодинамические обстановки формирования потенциально нефтегазоносных структур. Многолетние геолого-геофизические исследования континентальной части Евразии и акватории Дальнего Востока обеспечили относительно высокий уровень их изученности. Однако накопленный



фактический материал геотектонически интерпретируется крайне многообразно и противоречиво. Одними из наиболее спорных вопросов являются оценки времени и геодинамических обстановок формирования потенциально нефтегазоносных структур Охотоморского региона, что, с нашей точки зрения, является ключом к расшифровке процессов аккумуляции и консервации углеводородов [27, 28]. В рамках настоящей статьи представлены результаты изучения закономерности локализации разрывных нарушений, а также локальных поднятий и прогибов платформенного чехла в ареале влияния Охотско-Чукотского и Западно-Камчатского региональных сдвигов, пространственное расположение которых согласуется с параметрами эллипсоида деформации левостороннего сдвига [28].

Обоснованные заключения имеют принципиальное значение при проведении поисковых исследований на северном фланге Охотской НГП. Именно в этом регионе на лицензионных участках по результатам сейсморазведки выделяется ряд локальных антиклинальных структур. Основные перспективы нефтегазоносности в Северо-Охотском прогибе связываются с нижнекайнозойским комплексом, который находится в главной зоне нефтеобразования (ПК₃-МК₁) и обладает заметным генерационным потенциалом [16]. Закартированные в ходе исследований горстовые поднятия позволяют обосновать положение первоочередных объектов нефтегазопоисков по структурному критерию. Отметим, что в регионе существует проблема обнаружения качественных коллекторов.

Заключение

Изучение закономерностей локализации разрывных нарушений, горстов и грабенов в ареале развития региональных сдвиговых зон Северо-Охотского осадочного бассейна позволило обосновать закономерности пространственного расположения Охотско-Чукотского и Западно-Камчатского региональных сдвигов и оперяющих их локальных структур растяжения, сжатия и сдвига.

Так, в ареале влияния Охотско-Чукотской сдвиговой зоны нашими исследованиями установлено, что осадочные депрессии и горсты имеют северо-западное простирание (азимут 160-170°); субширотные структуры локализуются согласно направлению главной оси сдвиговой зоны; дислокации с азимутом простирания 100-120°, скорее всего, являются оперяющими сдвигами. Аналогичные заключения о структуре деформаций и критериях нефтегазоносности получены для ареала развития Западно-Камчатской сдвиговой зоны.

Выполненные построения расширяют познания о закономерностях размещения структур, перспективных на углеводородное сырье, и новых нестандартных критериях нефтегазоносности региона, что может быть использовано для определения направлений дальнейших поисково-разведочных работ [40, 41]. Эти заключения открывают путь к выделению наиболее перспективных (по структурному критерию) площадей с целью постановки детальных поисковых работ в пределах северного фланга Охотской НГП для определения участков улучшенных коллекторских свойств пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харахинов В.В. Геодинамические условия формирования осадочных (нефтегазоносных и потенциально нефтегазоносных) систем Охотоморского региона // Геология нефти и газа. 2020. № 1. С. 81-99. DOI: [10.31087/0016-7894-2020-1-81-99](https://doi.org/10.31087/0016-7894-2020-1-81-99)
2. Fangzheng Jiao, Yu Yang, Qi Ran et al. Distribution and gas exploration of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin // Natural Gas Industry B. 2022. Vol. 9. Iss. 1. P. 63-72. DOI: [10.1016/j.ngib.2021.08.018](https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.08.018)
3. Guang Zhu, Cheng Liu, Chengchuan Gu et al. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: Constraint from late Mesozoic evolution of the Tan-Lu Fault Zone // Science China Earth Sciences. 2018. Vol. 61. Iss. 4. P. 386-405. DOI: [10.1007/s11430-017-9136-4](https://doi.org/10.1007/s11430-017-9136-4)
4. Уткин В.П., Митрохин А.Н., Неволин П.Л. Сдвиговый континентальный рифтогенез восточной окраины Азии // Литосфера. 2016. № 4. С. 5-29.
5. Уткин В.П. Сдвиговый тектогенез и структурообразующее течение коровых масс Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода // Литосфера. 2019. Т. 19. № 5. С. 780-799. DOI: [10.24930/1681-9004-2019-19-5-780-799](https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-5-780-799)
6. Петровская Н.А., Грецькая Е.В. Перспективы нефтегазоносности Шелиховского осадочного бассейна // Разведка и охрана недр. 2017. № 2. С. 31-37.
7. Setiadi I., Setyanta B., Nainggolan T.B., Widodo J. Delineation of Sedimentary Subbasin and Subsurface Interpretation East Java Basin in the Madura Strait and Surrounding Area Based on Gravity Data Analysis // Bulletin of the Marine Geology. 2019. Vol. 34. № 1. P. 1-16. DOI: [10.32693/bomg.34.1.2019.621](https://doi.org/10.32693/bomg.34.1.2019.621)
8. Mann P. Comparison of Structural Styles and Giant Hydrocarbon Occurrences within Four Active Strike-slip Regions: California, Southern Caribbean, Sumatra, and East China // Tectonics and Sedimentation: Implications for Petroleum Systems. American Association of Petroleum Geologists, 2012. P. 43-93. DOI: [10.1306/13351548M100861](https://doi.org/10.1306/13351548M100861)



9. Caiwei Fan. Tectonic deformation features and petroleum geological significance in Yinggehai large strike-slip basin, South China Sea // Petroleum Exploration and Development. 2018. Vol. 45. Iss. 2. P. 204-214. DOI: [10.1016/S1876-3804\(18\)30024-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(18)30024-7)
10. Zhang Jing, Li Wei, Wu Zhiping et al. Structural Characteristics of Tan-Lu Fault Zone in South Area of Bohai Sea and Its Control on Basin Structure // Earth Science. 2017. Vol. 42. № 9. P. 1549-1564. DOI: [10.3799/dqkx.2017.110](https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.110)
11. Guang Zhu, Guo Sheng Liu, Man Lan Niu et al. Syn-collisional transform faulting of the Tan-Lu fault zone, East China // International Journal of Earth Sciences. 2009. Vol. 98. Iss. 1. P. 135-155. DOI: [10.1007/s00531-007-0225-8](https://doi.org/10.1007/s00531-007-0225-8)
12. Smit J., Brun J.-P., Cloetingh S., Ben-Avraham Z. Pull-apart basin formation and development in narrow transform zones with application to the Dead Sea Basin // Tectonics. 2008. Vol. 27. Iss. 6. № TC6018. DOI: [10.1029/2007TC002119](https://doi.org/10.1029/2007TC002119)
13. Schattner U., Weinberger R. A mid-Pleistocene deformation transition in the Hula basin, northern Israel: Implications for the tectonic evolution of the Dead Sea Fault // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2008. Vol. 9. Iss. 7. № Q07009. DOI: [10.1029/2007GC001937](https://doi.org/10.1029/2007GC001937)
14. Heimann A., Zilberman E., Amit R., Frieslander U. Northward migration of the southern diagonal fault of the Hula pull-apart basin, Dead Sea Transform, northern Israel // Tectonophysics. 2009. Vol. 476. Iss. 3-4. P. 496-511. DOI: [10.1016/j.tecto.2009.07.024](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.07.024)
15. Arkle J.C., Weber J., Enkelmann E. et al. Exhumation of the Coastal Metamorphic Belt Above the Subduction-to-Transform Transition, in the Southeast Caribbean Plate Corner // Tectonics. 2021. Vol. 40. Iss. 8. № e2020TC006414. DOI: [10.1029/2020TC006414](https://doi.org/10.1029/2020TC006414)
16. Маргулис Л.С., Подольский Ю.В., Боровиков И.С., Пылина Л.М. Состояние и проблемы воспроизводства сырьевой базы углеводородов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 5. С. 19-49.
17. Игнатова В.А. Сравнение геодинамических моделей и нефтегазоносности бассейнов Дальнего Востока России и Юго-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 2. С. 27-42.
18. 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](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.259)
19. Большакова Н.В. Глубинное строение северного фланга Охотской нефтегазоносной провинции по данным комплексных геолого-геофизических исследований: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. 20 с.
20. Кашибин С.Н., Петров О.В., Шокальский С.П. и др. Глубинное строение земной коры Северо-Восточной Евразии и ее континентальных окраин // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 2. С. 199-224. DOI: [10.5800/GT-2021-12-2-0521](https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0521)
21. Павленкова Н.И., Кашибин С.Н., Гонтовая Л.И., Павленкова Г.А. Глубинное строение и геодинамика Охотского региона // Региональная геология и металлогения. 2018. № 76. С. 70-82.
22. Сакулина Т.С., Каленич А.П., Атаков А.И. и др. Геологическая модель Охотоморского региона по данным опорных профилей 1-ОМ и 2-ДВ-М // Разведка и охрана недр. 2011. № 10. С. 11-17.
23. Петров А.В., Юдин Д.Б., Хоу Сюели. Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2010. Вып. 16. № 2. С. 126-132.
24. 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.
25. Яковлева А.А., Мовчан И.Б., Мединская Д.К., Садыкова З.И. Количественные интерпретации потенциальных полей: от параметрических пересчетов к геоструктурным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 11. С. 198-215. DOI: [10.18799/24131830/2023/11/4152](https://doi.org/10.18799/24131830/2023/11/4152)
26. Yakovleva A.A., Movchan I.B., Shaygallyatova Z.I. Dynamic response of multi-scale geophysical systems: waves and practical applications // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2022. Vol. 380. Iss. 2237. № 20210403. DOI: [10.1098/rsta.2021.0403](https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0403)
27. Шатино М.Н., Соловьев А.В. Кинематическая модель формирования Олюторско-Камчатской складчатой области // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 8. С. 863-880.
28. Калинин Д.Ф., Егоров А.С., Большакова Н.В. Потенциальная нефтегазоносность Западно-Камчатского побережья и ее связь со структурно-тектоническим строением Охотоморского региона по геофизическим данным // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2022. Вып. 53. № 1. С. 59-75. DOI: [10.31431/1816-5524-2022-1-53-59-75](https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-1-53-59-75)
29. Крикун Н.С., Бабенко И.А., Таловина И.В., Дурыгина А.М. Особенности геологического строения и перспективы нефтегазоносности неогеновых отложений южного сегмента Курильской островодужной системы // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. № 2. № ES2001. DOI: [10.2205/2024es000905](https://doi.org/10.2205/2024es000905)
30. Крикун Н.С., Абдрахманов И., Таловина И. Изучение дизъюнктивной сети о. Кунашир (Курильские острова) с целью реконструкции особенностей его тектонического развития // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. № 2. № ES2012. DOI: [10.2205/2024es000915](https://doi.org/10.2205/2024es000915)
31. Егоров А.С., Большакова Н.В., Калинин Д.Ф., Агеев А.С. Глубинное строение, тектоника и геодинамика Охотоморского региона и структур его складчатого обрамления // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 703-719. DOI: [10.31897/PMI.2022.63](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.63)
32. Park R.G. Geological Structures and Moving Plates. Springer, 1988. 337 p.
33. Белонин М.Д., Григоренко Ю.Н., Маргулис Л.С. и др. Разведочный потенциал Западной Камчатки и сопредельного шельфа (нефть и газ). СПб: Недра, 2003. 120 с.
34. Алексеев С.Г., Сенчина Н.П., Шаткевич С.Ю., Штокаленко М.Б. Достоинства и недостатки томографии потенциальных полей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 43-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского, 26-30 января 2016, Воронеж, Россия. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. С. 10-13.



35. Дмитриева Л.К., Атаков А.И., Матвеев Ю.И., Рослов Ю.В. Создание геофизического обеспечения Госгеолкарты-1000/3 и изучение глубинного строения шельфа Российской Федерации по геотраверсам // Региональная геология и металлогения. 2007. № 33. С. 76-78.
36. Горячев Ю.П., Добрынина М.И. Новые возможности интерпретационной системы БАЛТИКА при поисках трубок взрыва по материалам аэромагнитных съемок // Геофизика. 2003. № 3. С. 64-66.
37. Сенчина Н.П., Асосков А.Е., Горелик Г.Д. Evaluation of Displacements Caused by Strike-Slip Deformations Using Correlation Characteristics Based on Potential Field Data // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Т. 23. № 4. № ES4013 (in English). DOI: [10.2205/2023ES000847](https://doi.org/10.2205/2023ES000847)
38. Сенчина Н.П., Асосков А.Е. Реконструкционный подход к интерпретации сдвиговых структур по геофизическим данным // Недропользование XXI век. 2023. № 5-6 (101). С. 50-57.
39. Сысоев А.П., Зайцев С.А. Отдельные вопросы динамической инверсии волнового поля // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2023. № 3 (55). С. 52-58. DOI: [10.20403/2078-0575-2023-3-52-58](https://doi.org/10.20403/2078-0575-2023-3-52-58)
40. Litvinenko V. The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas // Resources. 2020. Vol. 9. Iss. 5. № 264. DOI: [10.3390/resources9050059](https://doi.org/10.3390/resources9050059)
41. Prischepa O.M., Kireev S.B., Nefedov Yu.V. et al. Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation // Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 11. № 1192051. DOI: [10.3389/feart.2023.1192051](https://doi.org/10.3389/feart.2023.1192051)

Авторы: Алексей Сергеевич Егоров, д-р геол.-минерал. наук, заведующий кафедрой (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-3501-9145>, **Наталья Владимировна Большакова**, канд. геол.-минерал. наук, старший преподаватель (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), bolshakova_nv@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0278-8893>, **Дмитрий Федорович Калинин**, д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-0597-263X>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Оценка эффектов взаимодействия фундамента и основания методами численного моделирования для условий подработки здания Мариинского театра в Санкт-Петербурге

Е.М.Волохов¹, В.К.Кожухарова¹✉, С.Н.Зеленцов¹, Д.З.Мукминова¹, А.А.Исаев²

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

² СПб ГКУ «Дирекция транспортного строительства», Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Волохов Е.М., Кожухарова В.К., Зеленцов С.Н., Мукминова Д.З., Исаев А.А. Оценка эффектов взаимодействия фундамента и основания методами численного моделирования для условий подработки здания Мариинского театра в Санкт-Петербурге // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 16-29. [EDN SCXHFA](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.1.16-29)

Аннотация

В сложившейся маркшейдерской практике при оценке вредного влияния подземного строительства на земную поверхность и подрабатываемые объекты традиционно рассматривают геотехническую систему подземное сооружение – породный массив, которая не включает в себя саму наземную инфраструктуру. Такой подход может приводить к искаженным оценкам уровней нагрузок, воздействий и потенциальных деформаций как для зданий, так и для земной поверхности. С целью определения влияния здания и оценки взаимодействия элементов геотехнической системы тоннель – массив – здание в исследовании рассматривается анализ подработки здания исторической сцены Мариинского театра комплексом выработок станции Санкт-Петербургского метрополитена «Театральная». Применяется численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе PLAXIS 3D, геотехническая модель калибруется в соответствии с данными натурных маркшейдерско-геодезических измерений. На моделях показано, что при подработке зданий их неоднородная структура, вес и пространственная жесткость существенно влияют на распределение деформаций в основании сооружения, что подтверждается локализацией трещин в несущих конструкциях, возникших после начала ведения горных работ. При оценке и прогнозе деформаций численными методами не всегда достаточно моделировать систему массив – тоннель, так как это может привести к завышенным прогнозным значениям деформаций земной поверхности, заниженным значениям оседаний и некорректной оценке вредного влияния на подрабатываемый объект. Сделан вывод, что только комплексный подход с использованием моделирования, натурных измерений и данных обследований способен обеспечить правильный анализ взаимодействия породного массива, подземных сооружений и наземных объектов инфраструктуры сложной пространственной геометрии и позволить надежно оценить вредное влияние на подрабатываемый объект с привязкой к конструктивным повреждениям. Это способствует принятию адекватных и своевременных мер охраны для зданий и сооружений.

Ключевые слова

охрана зданий и сооружений; подземное строительство; муфта сдвижения; осадки зданий; существующая застройка; сдвижение земной поверхности; повреждение зданий и сооружений; критерии повреждения зданий; PLAXIS 3D; Мариинский театр

Поступила: 12.03.2024

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 03.09.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Охрана зданий и сооружений при подземном строительстве в условиях мегаполиса требует комплексного подхода, особенно когда это касается исторических центров городов. Мероприятия по защите сооружений исторической застройки требуют специального маркшейдерско-геодезического обеспечения [1, 2]. Маркшейдерско-геодезический мониторинг позволяет улучшить контроль за деформациями земной поверхности и подрабатываемых объектов [3, 4]. Чтобы воспроизвести всю картину деформирования грунтового массива и наземной инфраструктуры с учетом важных геотехнических факторов необходимо использовать методы физического и численного моделирования [5, 6]. Для оценки возможных повреждений зданий и сооружений современные численные 3D-модели должны включать не только геометрию подземного сооружения, этапность ведения горных работ и геологическое строение породного массива, но и учитывать нелинейное



поведение грунтов и наличие здания на земной поверхности. Такие модели позволяют рассматривать задачу оценки потенциального повреждения зданий в результате подработки комплексно в виде системы тоннель – грунт – здание [7] или тоннель – массив – здание. Условно эти модели можно назвать сопряженными.

Сопряженные модели необходимы для анализа взаимодействия подрабатываемой земной поверхности и здания, при строительстве подземных сооружений, а также при подземной разработке месторождений [8, 9]. Если рассматривать задачу с позиции оценки повреждений подрабатываемой конструкции, то необходимо применять различные структурные модели, учитывающие нелинейное поведение каменной кладки, бетона и других материалов, которыми представлены основные несущие элементы здания [10, 11]. В случае, когда целью является определение деформаций земной поверхности в основании здания, часто в качестве подрабатываемой конструкции используют эквивалентное тело с равномерно распределенной нагрузкой [12, 13], но такой подход не может учесть неравномерность нагрузки от несущих конструкций. Существуют исследования, в которых представлены подробные модели как грунтового массива, так и наземного сооружения [14, 15], но такие исследования все еще не распространены из-за связанных с ними сложностей описания свойств неоднородных конструкций и взаимодействия на контактах сред, а также высоких электронно-вычислительных затрат [15]. Поэтому при решении таких задач необходимо соблюдать баланс между сложностью модели и достоверностью результатов моделирования.

В данной работе была рассмотрена сопряженная расчетная схема для модели породного массива, подземного комплекса выработок станции метро «Театральная» и подрабатываемого здания исторической сцены Мариинского театра в Санкт-Петербурге. Подобный анализ позволяет определить, как наличие здания влияет на развитие деформаций земной поверхности. Данное исследование призвано приблизить решение проблемы взаимодействия породного массива (грунта основания) и здания при его подработке, поможет обосновать использование сопряженных моделей при подземном строительстве, в целях контроля сдвижений и деформаций земной поверхности в основании зданий во время ведения горных работ.

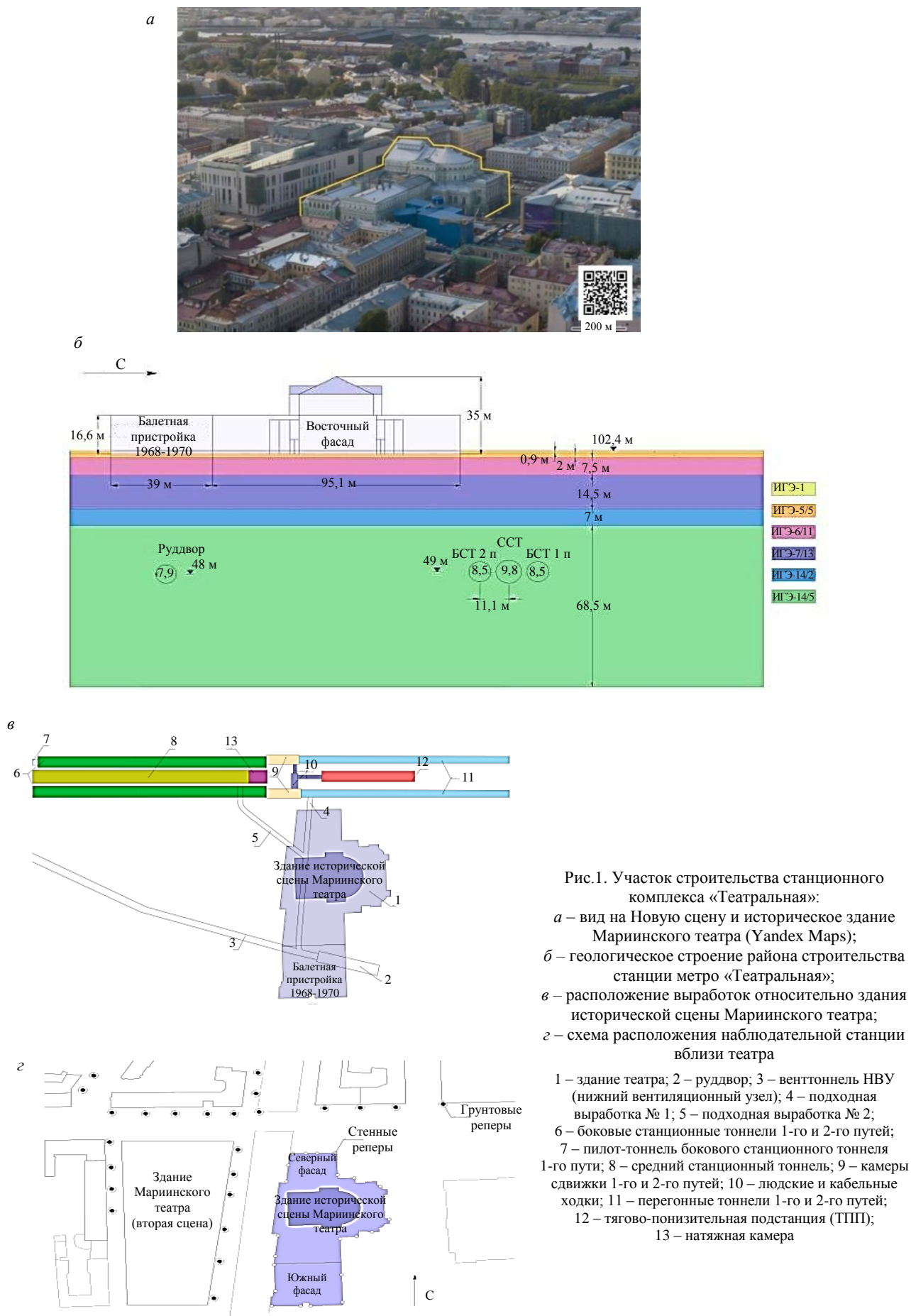
Объект исследования

Строительство станции метро «Театральная» в историческом центре Санкт-Петербурга. Лахтинско-Правобережная линия метро является самым коротким и незагруженным транспортным маршрутом Санкт-Петербурга. В 2016 г. для повышения транспортной доступности к центральной части Василеостровского и Адмиралтейского районов было начато строительство нового участка Лахтинско-Правобережной линии за станцией «Спасская». Организовано строительство двух новых станций глубокого заложения – «Театральная» (объект данного исследования) и «Горный институт» (открыта 27 декабря 2024 г.) [16]. В пусковой участок длиной 3,65 км, помимо двух станций, входят четыре вентиляционных шахты, комплекс перегонных и вспомогательных выработок.

Значительная часть центра Адмиралтейского района представлена объектами исторической застройки [17], поэтому при сооружении станции метро «Театральная» в зону влияния строительства комплекса подземных выработок попало множество зданий и сооружений, включая и объекты культурного наследия. Историческая сцена Мариинского театра имеет статус объекта культурного наследия федерального значения. Здание театра находится в непосредственной близости от горных выработок станции, вследствие чего вредное влияние, оказанное на него подземным строительством, было весьма существенным по сравнению с другими объектами, попавшими в зону подработки.

Здание Государственного академического театра (рис.1, а) построено в 1860 г. по проекту архитектора А.К.Кавоса на месте конного театра-цирка, сгоревшего в 1849 г. [18]. В последующие годы XIX в. здание театра неоднократно достраивалось и реконструировалось под руководством архитекторов В.А.Шретера и Н.Л.Бенуа [19]. В 1968-1970 гг. к исторической части театра была построена балетная пристройка, выполнена реконструкция сцены и смонтирована новая вентиляция.

С геометрической точки зрения здание исторической сцены Мариинского театра представляет собой сложную строительную конструкцию, развитую в плане, в которой можно условно выделить три основных блока – два пятиэтажных флигеля (северный и южный) и центральное девятиэтажное здание со сценической и зрительной частью. Конструктивные схемы блоков различны





и несимметричны, а их пространственная жесткость и устойчивость обеспечиваются за счет системы продольных и поперечных стен, а также деревянных и бетонных перекрытий. Каменная кладка стен, построенных до XX в., выполнена из красного глиняного полнотелого кирпича на известковом растворе, новые стены послевоенной постройки – на цементном растворе. Толщина стен варьируется от 530 до 1150 мм. Фундаменты имеют ленточную конструкцию и выполнены из отесанных блоков известняка, в основании – деревянные лежни, высота фундамента меняется от 1,35 до 1,70 м. Постоянные перестройки и реконструкции театра привели к тому, что здание имеет сложную и нерегулярную внутреннюю структуру и геометрию.

В статье основное внимание уделяется анализу деформаций в центральной и северной частях здания, так как именно они получили наибольшие деформации в процессе ведения горных работ при строительстве станции «Театральная».

Геологическое строение участка строительства и взаимное положение выработок и здания исторической сцены Мариинского театра. Строительство станции метро «Театральная» осуществляется на глубине около 50 м, в толще верхнекотлинских протерозойских глин, характеризующихся высокой степенью литификации [20]. Расстояние от верхнего свода станционного тоннеля до контакта протерозойских глин (ИГЭ-14/5) с дислоцированными плотными глинами составляет примерно 12-13 м. Мощность дислоцированных глин около 7 м (ИГЭ-14/2). Мощность четвертичных отложений примерно 25 м. Снизу вверх четвертичные отложения представлены суглинками с гравием и включениями коренной глины полутвердой консистенции (ИГЭ-7/13) мощностью 14,5 м, суглинками слоистыми текучепластичной консистенции (ИГЭ-6/11) – 7,5 м, водоносными мелкими песками с растительными остатками (ИГЭ-5/5) – 2 м, насыпным слоем из песков и супесей с растительными остатками и строительным мусором (ИГЭ-1) – 0,9 м (рис. 1, б).

На рис.1, в представлена схема основных выработок подземного комплекса станции «Театральная», влияние которых на земную поверхность и здание театра 1 было самым ощутимым. Строительство станции «Театральная» было начато с сооружения вертикального ствола, руддвора 2 и венттоннеля НВУ 3 диаметрами 7,9 и 5,63 м, затем были пройдены подходные выработки 4 и 5. Практически все вспомогательные выработки пройдены непосредственно под зданием театра, что определило первичные условия развития оседаний стен и реперов, заложенных в цоколе здания на южной и западной стороне. Кроме того, на степень подработки и уровень повреждения театра повлияли сооружения, находящиеся вблизи Театральной площади, – камеры сдвижки 9 диаметром 7,9 м, камера ТПП 12, перегонные тоннели 1-го и 2-го путей 11 и другие вспомогательные выработки.

В построенный комплекс станционных выработок входят средний станционный тоннель (ССТ) диаметром 9,8 м, два боковых станционных тоннеля диаметром 8,5 м (БСТ 1-го пути и БСТ 2-го пути) и крупная натяжная камера, являющаяся продолжением ССТ. За счет большого сечения выработок и близкого расположения друг к другу их проходка в зоне восточного торца станции должна была оказывать существенное влияние на земную поверхность и повышать уровень повреждений здания театра.

На сегодняшний день строительство подземного комплекса станции метро «Театральная» завершено, его влияние на земную поверхность оценено, существенного прироста деформаций в дальнейшем не ожидается. Расчетная оценка деформаций и влияния подработки ранее осуществлялась без учета самих подрабатываемых зданий. Поэтому целесообразно оценить влияние таких крупных строений, как здание исторической сцены, на развитие деформаций земной поверхности и самих зданий при ведении горных работ под ними. Это должно расширить представления о механизмах работы системы тоннель – массив – здание, когда необходимо оценить большой вес здания, неравномерность его распределения по поверхности и неоднородную жесткость основных несущих элементов.

Материалы и методы

Система мониторинга вблизи здания Мариинского театра. При анализе деформирования здания Мариинского театра были использованы данные, полученные при маркшейдерско-геодезическом мониторинге грунтовых и стенных реперов наблюдательной станции. Часть наблюдательной станции, с помощью которой контролировался процесс сдвижения и деформирования здания театра, включает в себя 23 стенных репера. Стенные реперы расположены по периметру здания и заложены на уровне фундамента, грунтовые реперы расположены на значительном



расстоянии от Мариинского театра вблизи других зданий, что впоследствии не позволило по натурным данным корректно оценить сдвигения и деформации земной поверхности под зданием театра (рис.1, 2). Измерения производились методами геометрического нивелирования II-III класса.

Численный анализ. Для выполнения анализа взаимодействия земной поверхности и здания Мариинского театра, определения влияния здания на процессы деформирования основания были построены численные модели в программном комплексе PLAXIS 3D, который позволяет моделировать поэтапный процесс строительства подземного комплекса выработок и последовательное деформирование массива с наземной инфраструктурой. Уровень детализации конечно-элементных моделей был снижен до учета основных конструктивных элементов: совокупности колец обделки для тоннеля и основных стен, перекрытий и элементов фундамента для здания.

При моделировании породного массива предполагалось, что слои пород (грунтов) залегают горизонтально, а их мощность выдержана по площади. Наличие грунтовых вод при моделировании участка строительства не учитывалось из-за низкого влияния гидродинамических процессов во вмещающих глинистых породах и ограниченности инженерно-геологических данных.

Обосновано использование модели упрочняющегося грунта Hardening Soil как более точно описывающей поведение протерозойских глин Санкт-Петербурга [21, 22]. Для задания упрочняющейся модели, помимо общеизвестных параметров, характеризующих прочностные свойства (сцепление c), угол внутреннего трения φ , угол дилатансии ψ , использовалось описание жесткости грунта через три модуля деформации: E_{50} – секущий модуль деформации при напряжении, половина от разрушающего, E_{ur} – модуль деформации при разгрузке/повторном нагружении, E_{oed} – одометрический модуль деформации (из компрессионных испытаний), а также коэффициент Пуассона ν [21].

Особенностью применяемой модели грунта является наличие гиперболической зависимости между продольными деформациями ε_1 и девиатором напряжений q [23]. Физико-механические свойства четвертичных грунтов и протерозойских глин, которые были использованы для численного моделирования, представлены в табл.1.

Таблица 1

Параметры инженерно-геологических элементов

Слой ИГЭ	γ_{sat} , кН/м ³	m , м	E_{50} , МПа	E_{oed} , МПа	E_{ur} , МПа	c , кПа	φ , град	ψ , град	ν
1	20	0,9	10	10	30	5	10	0	0,3
5/5	19,5	2	15	15	45	1	32	0	0,36
6/11	19,2	7,5	7,5	7,5	22,5	16	15	0	0,35
7/13	21	14,5	16	16	48	38	23	0	0,35
14/1	21,5	7	50	50	150	50	21	0	0,35
14/2	21,8	68,5	100	100	300	130	23	0	0,35

Процесс строительства комплекса подземных выработок был поэтапно смоделирован с учетом фактического продвижения фронта горных работ. Крепь выработки моделировалась с помощью двумерных элементов (оболочек) с линейно-упругими свойствами, имитирующих поведение тубинговой обделки. Эквивалентная толщина этих элементов задавалась в зависимости от типа и параметров обделки. Наличие пригруза забоя и временной крепи в призабойной части при моделировании не учитывались. Для моделирования поведения массива в приконтурной зоне подземного сооружения применялся режим заданных смещений контура выработки (surface contraction), параметры калибровались по данным натурных наблюдений на участках с установившимся режимом деформаций.

В расчетах приняты механические характеристики материалов обделок подземных сооружений (табл.2). Монолитные обделки подземных сооружений выполняются из бетона класса по прочности на сжатие В15, армированного металлическими арками, сборная обделка подземных сооружений метрополитена – из бетона класса по прочности на сжатие В40.



Таблица 2

Параметры бетона для упругой модели

Параметр модели	Величина параметра модели	
	B15	B40
Коэффициент Пуассона ν	0,2	0,2
Модуль общих деформаций E_{ref} , МПа	4130	9479
Объемный вес γ , кН/м ³	25	25
Толщина, м	0,35	0,35

Для моделирования здания при определении взаимодействия системы тоннель – массив – здание можно использовать два подхода: упрощенный, с созданием эквивалентного объемного/плоского элемента и приложенной распределенной нагрузкой, имитирующей вес здания [24, 25], или детальный, с построением конструктивной модели основных элементов здания [26, 27]. В последнем случае фундамент и надстройка моделируются с высокой геометрической точностью. Моделирование влияния здания по упрощенной схеме не учитывает существенную неравномерность распределения нагрузки от несущих конструкций на основание и неоднородную конструктивную жесткость здания, а повышение сложности модели и трудоемкости расчетов не критичны, поэтому был реализован второй подход. Здание Мариинского театра моделировалось без пристройки 1970 г., поскольку максимальные деформации и повреждения получила основная (старая) часть строения 1860 г., которую и требовалось изучить. Выработки подземного комплекса, сильно удаленные от места анализа (старой части строения), для упрощения были исключены из модели.

При моделировании внешних и внутренних стен, а также перекрытий здания были использованы двухмерные плоские элементы с линейно-упругими свойствами. Из-за особенностей совместной механической работы грунтов основания и фундамента для фундамента было обосновано использование объемных элементов. Отсутствие необходимости детального изучения механизма работы бутового фундамента, демпфирующего действия лежней и других факторов в исследовании макроэффектов от работы здания при его подработке позволили обосновать применение для такого фундамента линейно-упругой модели.

Параметры физико-механических свойств элементов конструкции здания Мариинского театра, установленные в соответствии с данными полевых измерений прочности каменной кладки в основных несущих элементах и требованиями СП 15.13330.2020 «Каменные и армокаменные конструкции», представлены в табл.3.

Таблица 3

Параметры элементов модели здания театра

Параметр модели	Величина параметра упругой модели			
	Внешние стены	Внутренние стены	Перекрытия	Фундамент
Коэффициент Пуассона ν	0,15	0,15	0,2	0,2
Модуль общих деформаций E_{ref} , МПа	1480	1480	1500	1700
Объемный вес γ , кН/м ³	18,5	18,5	19,0	20,0
Толщина, м	0,8	0,8	0,4	1,4

Граничные условия в модели стандартны – по вертикальным границам запрещены горизонтальные смещения, нижняя граница модели закреплена в любом направлении. Расчетная схема модели представлена на рис.2.

Модель позволяла рассматривать поэтапную схему проходки выработок подземного комплекса и влияния на подрабатываемые объекты. Обеспечение общей количественной достоверности сдвижений и деформаций на поверхности

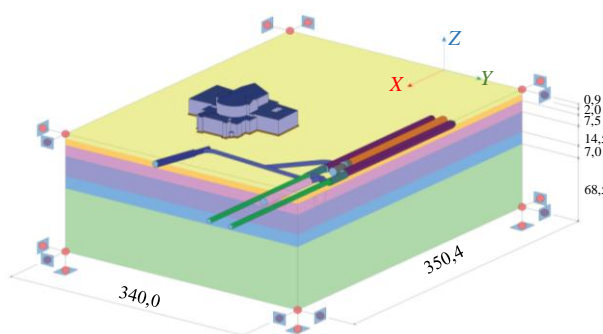


Рис.2. Расчетная схема сопряженной модели



обеспечивалось верификацией на базе реальных данных по оседаниям в районе строительства и калибровкой численных моделей через параметр *surface contraction* условной потери объема при проходке выработок. Детализация механизмов изменения НДС пород при циклической эректорной проходке станционных тоннелей не рассматривалась (в соответствии с принципом Сен-Венана) из-за большого расстояния от забоев выработок до фундамента здания.

Оценка работы системы тоннель – массив – здание с помощью численного моделирования осуществлялась через сравнительный анализ деформаций и сдвижений земной поверхности при наличии и при отсутствии здания в модели, расчеты рассмотрены на этапе завершения строительства подземного комплекса выработок.

Обсуждение результатов

Анализ сдвижений земной поверхности в зоне подработки. Для анализа сдвижений и деформаций земной поверхности были использованы данные оседаний грунтовых реперов в продольных и поперечных профилях мульды сдвижения (рис.3) на момент завершения строительства основных выработок станционного комплекса. На графике (рис.3, а, б) значению $X = 0$ соответствует положение оси среднего станционного тоннеля (оси станции). На рис.3, в изображен продольный профиль мульды, значению $X = 0$ соответствует начальному пикету станционного комплекса. Соответствие численного моделирования натурным данным (разница между натурными данными и численным моделированием не более 15 %) можно видеть в левой части мульды сдвижения со стороны здания Мариинского театра, здесь отклонения в оседаниях связаны, главным образом, с влиянием зданий. В то же время можно наблюдать существенные отклонения по оседаниям грунтовых реперов в правой части мульды. Это обусловлено тем, что для некоторых зданий над станционным комплексом (на противоположной стороне от театра) проектом было предусмотрено компенсационное нагнетание в грунтовый массив под здания по манжетной технологии (рис.3, в). При моделировании станционного комплекса нагнетание под сооружения, попавшие в зону подработки, не учитывалось.

Анализ взаимодействия земной поверхности и подрабатываемого здания. Анализ влияния здания включал сравнение результатов расчета аналогичных моделей со зданием и без него. На рис.4 а, б показаны сдвижения поверхности и смещения реперов в цоколе Мариинского театра, которые были вызваны строительством выработок станционного комплекса на момент окончания строительства основных тоннелей. Представленные профили оседаний фундамента и земной поверхности в месте расположения фундамента, полученные с помощью численного моделирования, соответствуют двум вариантам расчета – со зданием и без здания. По графикам можно видеть, что профиль оседания фундамента (модель со зданием) получается более сглаженным в сравнении с профилем оседаний земной поверхности (модель без здания) за счет влияния жесткости комплекса

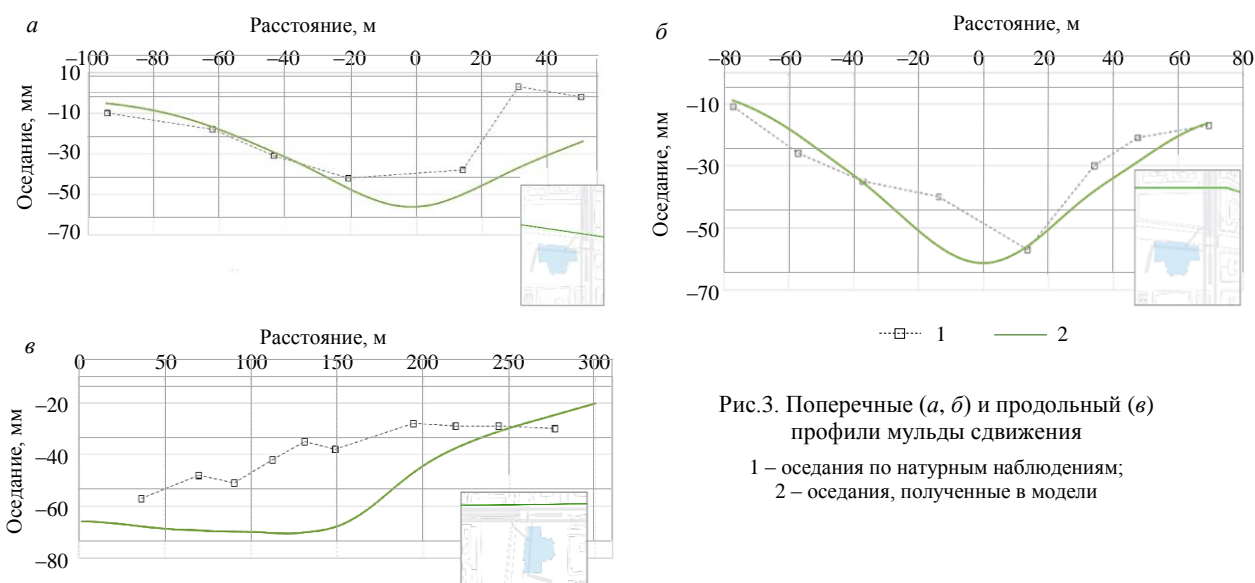


Рис.3. Поперечные (а, б) и продольный (в) профили мульды сдвижения
1 – оседания по натурным наблюдениям;
2 – оседания, полученные в модели



несущих элементов здания и точнее описывает оседания в цоколе театра. Можно отметить ощутимое увеличение максимальных оседаний, что очевидно определяется влиянием веса здания.

Аналогичную ситуацию можно наблюдать на северном фасаде здания (рис.4, б). За счет геометрии по северному фасаду (длина и высота здания здесь соизмеримы), пространственной жесткости и положения здания в мульде, сдвигения в основании театра монотонны и по данным моделирования и по натурным данным, преобладают деформации наклона. Необходимо отметить, что модель со зданием как в первом (рис.4, а), так и во втором (рис.4, б) случаях показывает отчетливое влияние здания на деформации земной поверхности, когда деформации в районе реперов в цоколе театра получаются заниженными. Такое несоответствие данных моделирования натурным данным может быть обусловлено рядом допущений, которые были приняты при моделировании конструкций здания, в результате чего наблюдаются эффекты завышения в расчетах реальной пространственной жесткости здания.

На примере западного фасада (рис.4, в) можно видеть, что при учете здания театра в модели деформации наклона и кривизны в фундаменте на отдельных участках уменьшаются до 40 % (наклон) и 75 % (кривизна) по сравнению с уровнями деформаций в моделях со свободной подрабатываемой земной поверхностью.

В дальнейшем анализе взаимодействия здания и земной поверхности рассмотрены распределения деформаций грунта в основании театра по всей площади. Результаты расчета деформаций земной поверхности представлены в виде изолиний и профилей распределения сдвижений и деформаций (сечений мульд сдвижений). Развитие деформаций было проанализировано на момент завершения строительства комплекса подземных выработок.

На рис.5 представлены распределения оседаний земной поверхности в изолиниях, как с учетом здания, так и без него. Сечения 1-1, 2-2 и 3-3 совпадают с продольными осями здания театра.

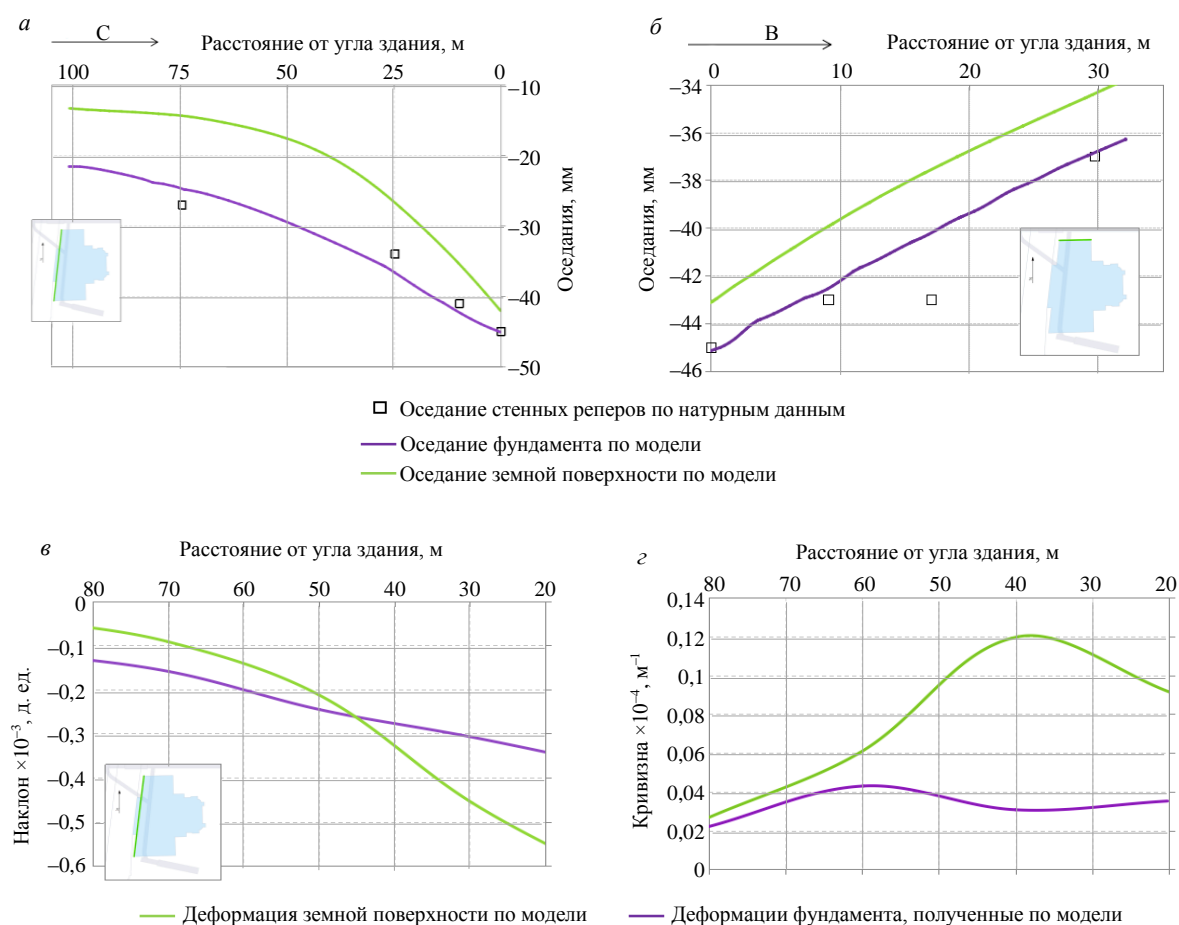


Рис.4. Распределение сдвижений (а, б) и деформаций (в, г) земной поверхности и фундамента театра:
 а – оседания по западному фасаду здания; б – оседания по северному фасаду здания;
 в – деформации наклонов; г – деформация кривизны по западному фасаду здания

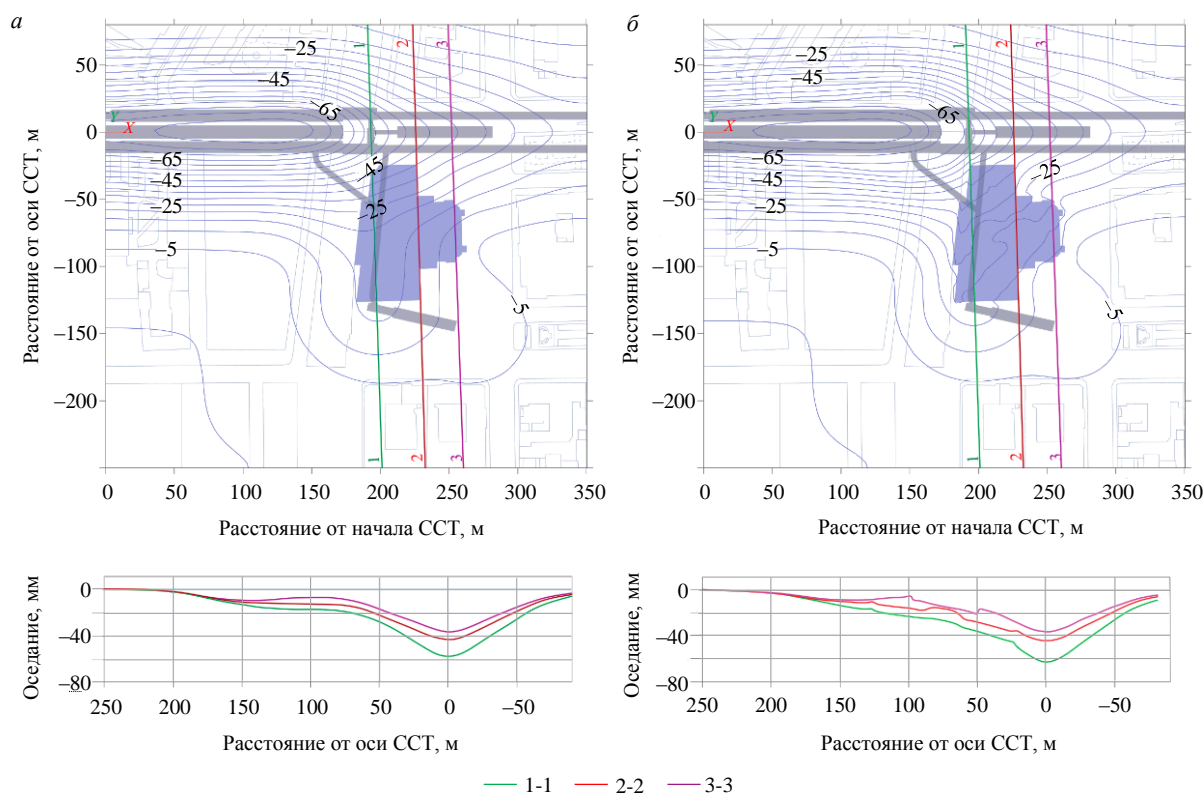


Рис.5. Контуры распределения оседаний и поперечные профили мульды сдвижения без учета здания (а), с учетом здания (б) (июль 2022 г., БСТ 2 п.)

Анализируя рис.5, можно отметить большое различие между профилями мульды сдвижения, построенными без здания и со зданием. Хорошо видно, как вес и жесткость здания приводят к изменению сечения мульды сдвижения. В пределах здания наблюдается увеличение абсолютных величин вертикальных сдвижений (оседаний) на 1-3 мм. Такая разница может рассматриваться в некоторых случаях как существенная. Так, если оперировать значениями предельных осадок в соответствии с СП 22.13330.2016 (для памятников культуры они равны 10 и 5 мм для I и II категории технического состояния соответственно) в прогнозной оценке деформации земной поверхности, такое различие в значениях может повлиять на вывод об опасности деформаций и принятие решений по разработке мер охраны подрабатываемого объекта. Кроме эффекта увеличения оседаний под зданием, отчетливо прослеживается и эффект их выравнивания (мульда в пределах здания выполаживается), деформации кривизны снижаются. Данный эффект объясняется конструктивной пространственной жесткостью здания, влияние которой на процесс сдвижения соизмерим с влиянием деформаций от проходки тоннелей. Напрямую с этим эффектом связан и ожидаемый эффект скачкообразного изменения оседания и резкого возрастания деформаций кривизны в приповерхностной зоне породного массива по контуру здания.

Анализ распределения деформаций наклонов земной поверхности представлен на рис.6, а – без учета влияния здания; рис.6, б – при наличии влияния здания. За счет резкого изменения интенсивности развития оседаний по контуру здания в этом месте увеличиваются и наклоны (неравномерные оседания), а также кривизна земной поверхности, что может негативно сказаться на состоянии подземных коммуникаций и других сооружений на данных участках (рис.6, в, г). Отчетливо прослеживается тенденция к уменьшению наклонов в северном и южном флигеле непосредственно под зданием, это связано с влиянием пространственной жесткости здания. При этом в зрительной части здания, наоборот, фиксируются повышенные значения наклонов.

Для большей наглядности представлены распределения деформации наклонов и кривизны в сечении 2-2 (рис.6, в, г). На рис.6, в видно, что под северным и южным фасадом здания значения деформации наклонов практически стабильны на своих уровнях, что естественно приводит к минимизации значений деформации кривизны в этих зонах.

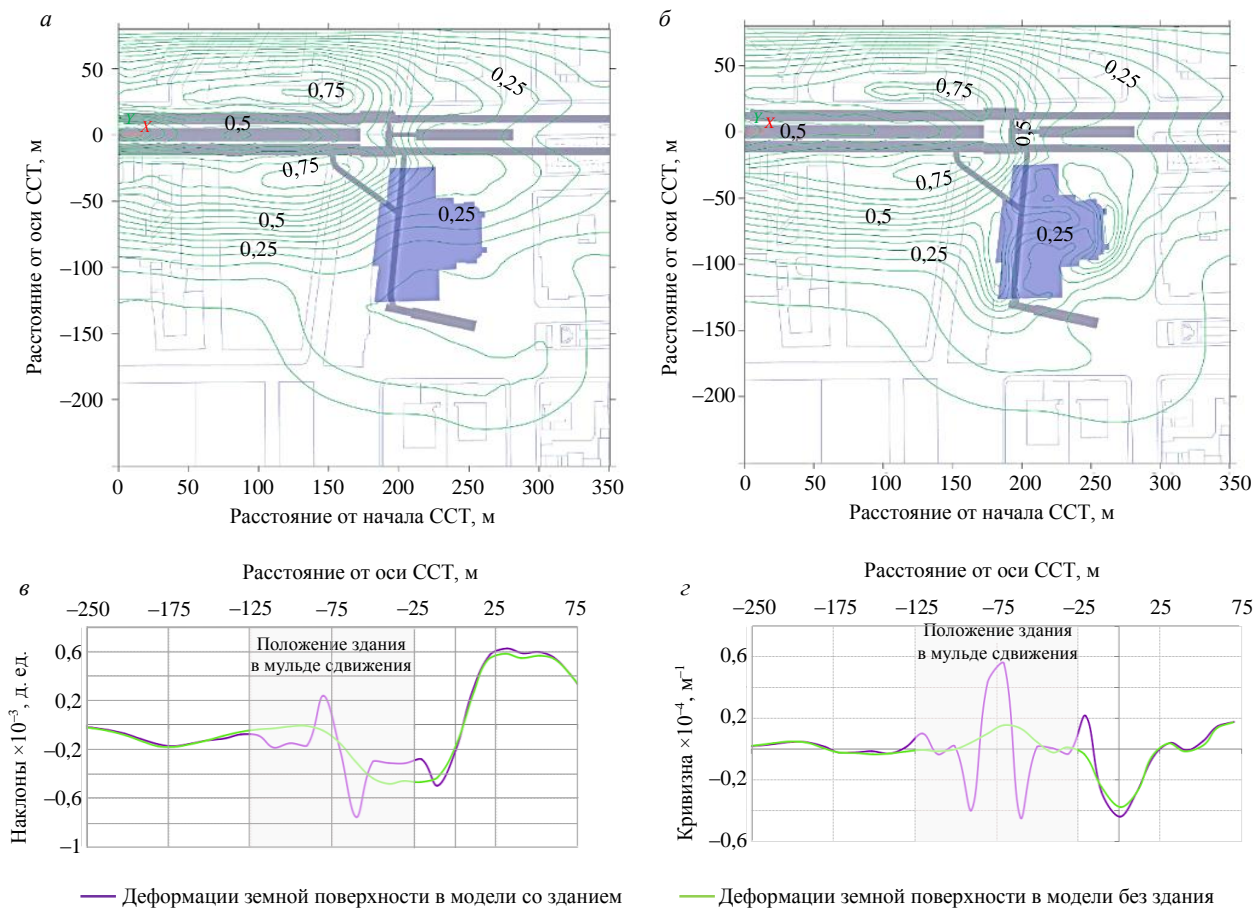


Рис.6. Контуры распределения абсолютных наклонов земной поверхности (10^{-3} д.ед.) над участком строительства станции «Театральная» (июль 2022 г., БСТ 2 п.)

При визуальной оценке деформационного состояния здания замечено, что количество трещин в простенках зрительной (центральной) части заметно уменьшается от 5-го к 1-му ярусу, уменьшается также их раскрытие, высказано предположение, что эта часть здания находится на положительной кривизне мульды сдвижения. Результаты моделирования подтверждают это предположение – вдоль западной (длинной) стороны здания основная (генеральная) кривизна положительна (рис.6, ε), а само здание в связи с этим испытывает соответствующие дополнительные нагрузки и деформации. Это приводит к развитию дополнительных деформаций растяжения (в верхних ярусах строения), к которым каменная кладка малоустойчива, и, как следствие, появлению новых трещин и развитию (раскрытию) старых.

На графиках есть признаки сразу не очевидных, но важных эффектов. На разрезе 2-2 (рис.6, ε) хорошо различима локальная зона повышенных деформаций кривизны земной поверхности, которая находится на расстоянии -75 м от оси среднего станционного тоннеля. Именно в этом месте располагаются зрительный зал и сцена Мариинского театра. Проявление этой зоны можно объяснить наличием существенной и сконцентрированной нагрузки от несущих, самонесущих и ненесущих стен на основание с северной и южной сторон от зрительной и сценической части, а также отсутствием большой нагрузки на фундамент и основание в зрительном зале и в районе сцены (рис.7). При подработке рассматриваемого объекта в этом месте формируется условная зона разгрузки и вторичная зона положительной кривизны, что может расцениваться как неблагоприятный сценарий развития деформаций в нижней части здания, так как наличие положительной кривизны в основании приводит к развитию дополнительных деформаций растяжения в конструктивных элементах под партером и сценой. Резкий перепад нагрузки на фундамент и основание в зонах на краях сцены и партера создает условия для развития касательных напряжений и проявления сдвиговых деформаций в основании, фундаменте и прилегающих к зонам стенам. Так как указанные особенности нагружения основания были заложены в сооружении изначально, можно предположить

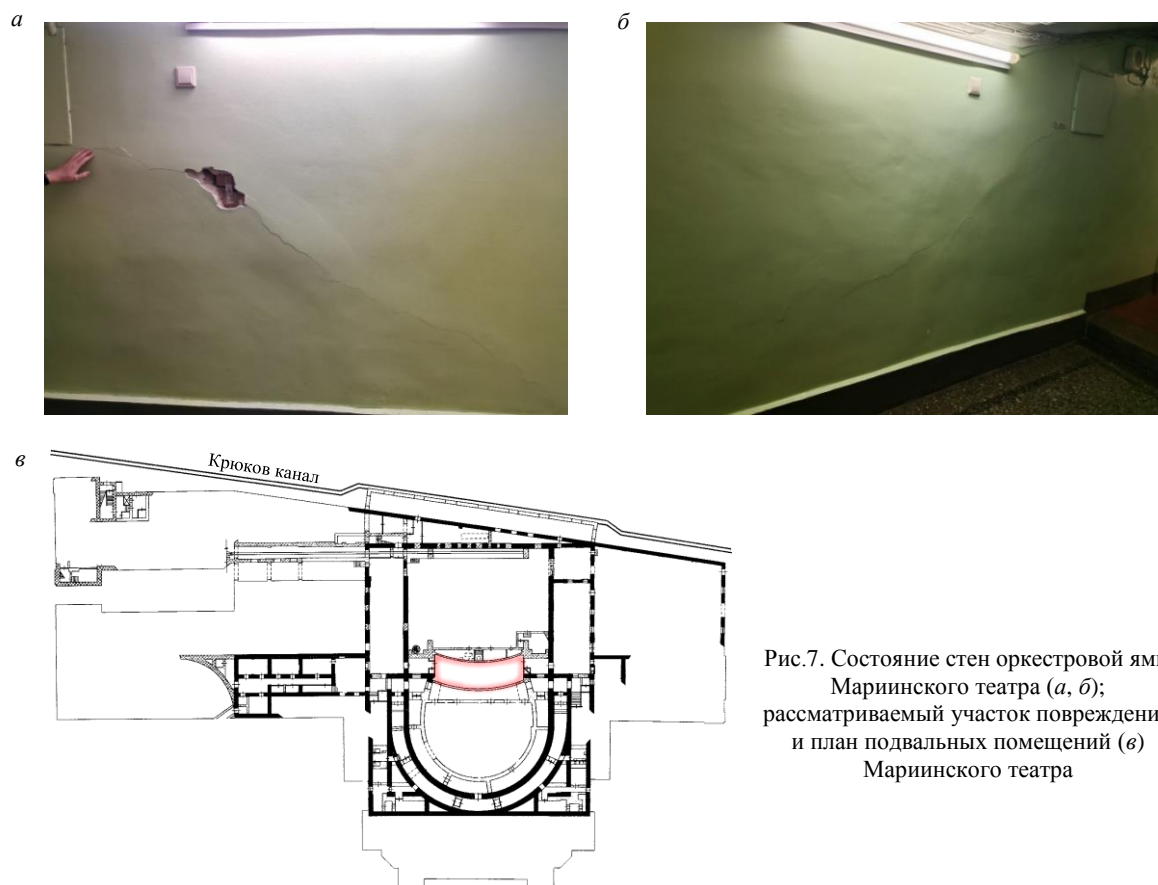


Рис.7. Состояние стен оркестровой ямы Мариинского театра (а, б); рассматриваемый участок повреждений и план подвальных помещений (в) Мариинского театра

влияние таких процессов уже после постройки и реконструкции здания театра, а рассматриваемые здесь деформационные процессы при подработке можно считать фактором активизации деформаций и пробуждения старых систем трещин. Этот эффект может объяснить проявление двух новых систем трещин (классифицированных как опасных), которые локализуются симметрично в стене оркестровой ямы (рис.7).

Эти трещины были обнаружены только в 2020 г., что условно позволяло связать их с ведением горных работ (на тот период под зданием была закончена проходка двух подходных выработок). Теперь, при выявлении указанного эффекта на моделях, можно говорить о высокой вероятности их инициирования именно горными работами.

В подобных исследованиях обычно предполагается, что эффекты взаимодействия пород основания и конструкции в основном уменьшают прогнозируемые классическими методами деформации от подработки, что и подтверждается нашим исследованием. Снижение деформаций (как первых производных от оседаний) прослеживается на фасадных стенах, где проявляются так называемые эффекты зависания и врезания [28]. Внешняя позитивность результатов моделирования и подобных рассуждений о снижении деформаций не должна исключать из рассмотрения и анализа указанные эффекты, которые могут существенно изменять НДС пород основания и конструкций здания. Увеличение оседаний по цоколю здания в зонах врезания (главным образом за счет собственного веса здания) может свидетельствовать о развитии дополнительных нагрузок и перераспределении напряжений в породах основания, в фундаментах и стенах с развитием дополнительных вертикальных деформаций в основании, а снижение оседаний в зонах зависания не может свидетельствовать о благоприятных условиях работы конструкций, так как здесь происходит существенное перераспределение напряжений в фундаментах и стенах. Когда здание деформируется в режиме зацепления с породами основания (см. рис.5, а, б), перераспределение не всегда ощутимо сглаживает неравномерность оседаний и снижает показатели деформаций. Можно отметить, что неправильная интерпретация таких эффектов приводит к ошибочным оценкам возможных повреждений зданий, вызванных их подработкой, и высоким рискам их реального появления, особенно на фоне маскирующего эффекта снижающихся показателей деформаций.



Выводы

В работе была поставлена задача оценки влияния крупного и уникального здания на деформации пород основания в условиях подработки выработками метрополитена. Типизация таких объектов невозможна, так как, помимо своих конструктивных особенностей, исследуемый объект подработки имеет геометрические размеры, соизмеримые с мульдой сдвижения. Поэтому для решения поставленной задачи использовались сопряженные комплексные конечно-элементные модели для систем тоннель – массив и тоннель – массив – здание, сравнительная оценка которых позволила выявить и оценить влияние самого здания на деформации земной поверхности в районе здания и по его фундаменту. Проектные и текущие технологические данные строительства станции метро «Театральная», данные визуальных обследований старого здания исторической сцены Мариинского театра, а также данные маркшейдерско-геодезического мониторинга по наблюдательным станциям позволили построить и откалибровать трехмерные сопряженные комплексные конечно-элементные модели.

Из-за сложной геометрии здания театр был смоделирован с высокой геометрической точностью с помощью двухмерных элементов, свойства которых были заданы на основе данных полевых измерений прочности каменной кладки. При анализе были выявлены эффекты увеличения вертикальных смещений (оседаний) и изменения деформаций по контуру здания и непосредственно под ним, этими явлениями не следует пренебрегать при оценке влияния деформаций земной поверхности на здания и сооружения в условиях подработки. Сопряженная модель помогла интерпретировать развитие новых опасных трещин в стенах оркестровой ямы театра, что подтверждает актуальность применения такого подхода для более эффективной оценки реакции здания на деформации земной поверхности.

При верификации данных моделирования грунтового массива отмечено, что правая часть поперечного сечения мульды сдвижения не может быть соотнесена с натурными наблюдениями, поскольку именно в этой части зоны влияния подземного строительства на земную поверхность проводились мероприятия по охране наземной инфраструктуры, которые включали в себя компенсационное нагнетание в породный массив. Эти эффекты в модели не были учтены. При анализе сдвижений и деформаций фундамента театра отмечено, что модель фундамента характеризуется более жестким поведением, это может указывать на необходимость учета ранее существовавших повреждений и дефектов в фундаменте здания. Следует отметить отсутствие грунтовых реперов вокруг здания театра, что не позволило определить сдвижения и деформации грунта относительно сооружения, все это говорит о неполноценности наблюдательной станции и необходимости применения современного маркшейдерского [29, 30] и геотехнического [31-33] мониторинга, в том числе дистанционными методами [34, 35].

Исследование показало актуальность использования сопряженного численного моделирования в совокупности с данными маркшейдерско-геодезического мониторинга и визуального обследования здания для определения причин наблюдаемых повреждений и деформаций в здании, а также учесть важные геотехнические аспекты (геометрия комплекса подземных выработок, этапность строительства подземного сооружения), которые влияют на результат моделирования.

Можно сделать вывод, что проведение оценки и прогноза потенциальных повреждений зданий и сооружений в условиях подработки только на основе получения сдвижений и деформаций земной поверхности не всегда может дать достоверный результат. Существует необходимость исследования влияния жесткости типовых зданий и их веса на перераспределение деформаций земной поверхности в основании сооружений. При оценке влияния подработки геометрически и структурно неоднородного здания Мариинского театра и определения уровня его деформирования с помощью численного моделирования, необходимо рассматривать геотехническую систему целиком на основе сопряженных моделей. Оценка и прогноз деформаций, основанный на моделировании только породного массива и подземного комплекса выработок, может дать заниженные значения вертикальных перемещений и завышенные значения деформаций земной поверхности в месте нахождения подрабатываемых объектов.



ЛИТЕРАТУРА

1. Хатум Х.М., Мустафин М.Г. Оптимизация места расположения роботизированных станций наблюдений за деформациями зданий и сооружений // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 9. С. 2-13. DOI: [10.22389/0016-7126-2020-963-9-2-13](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-963-9-2-13)
2. Вальков В.А., Виноградов К.П., Валькова Е.О., Мустафин М.Г. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки // Геодезия и картография. 2022. Т. 83. № 11. С. 40-49. DOI: [10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49)
3. Выстрчил М.Г., Гусев В.Н., Сухов А.К. Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 562-570.
4. Pospheh G.B., Savón Y., Delgado R. et al. Inventory Of Landslides Triggered By Hurricane Matthews In Guantánamo, Cuba // Geography, Environment, Sustainability. 2023. Vol. 16. № 1. P. 55-63. DOI: [10.24057/2071-9388-2022-133](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-133)
5. Протосеня А.Г., Алексеев А.В., Вербило П.Э. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 252-260. DOI: [10.31897/PMI.2022.26](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.26)
6. Карасев М.А., Сотников Р.О. Прогноз напряженного состояния набрызг-бетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 626-638. DOI: [10.31897/PMI.2021.5.2](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.2)
7. Волохов Е.М., Кожухарова В.К., Бритвин И.А. и др. Проблема оценки влияния горных работ на объекты наземной инфраструктуры // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 8. С. 72-93. DOI: [10.25018/0236_1493_2023_8_0_72](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_8_0_72)
8. Казанин О.И., Сидоренко А.А., Евсюкова А.А., Лю Цзылу. Обоснование технологий поддержания выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 5-21. DOI: [10.25018/0236_1493_2023_91_0_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_5)
9. Jun-qiang Ma, Xue-hua Li, Qiang-ling Yao et al. Numerical simulation on mechanisms of dense drilling for weakening roofs and its application in roof control // Journal of Central South University. 2023. Vol. 30. Iss. 6. P. 1865-1886. DOI: [10.1007/s11771-023-5345-1](https://doi.org/10.1007/s11771-023-5345-1)
10. Gajjar P.N., Ali M., Sayet T. et al. Numerical study on the nonlinear thermomechanical behaviour of refractory masonry with dry joints // Engineering Structures. 2023. Vol. 291. № 116468. DOI: [10.1016/j.engstruct.2023.116468](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116468)
11. Giordano E., Masciotta M.G., Clementi F., Ghiassi B. Numerical prediction of the mechanical behavior of TRM composites and TRM-strengthened masonry panels // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 397. № 132376. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.132376](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132376)
12. Bilotta E., Paolillo A., Russo G., Aversa S. Displacements induced by tunnelling under a historical building // Tunnelling and Underground Space Technology. 2017. Vol. 61. P. 221-232. DOI: [10.1016/j.tust.2016.10.007](https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.10.007)
13. Namazi E., Mohamad H., Hajihassani M. 3D Behaviour of Buildings due to Tunnel Induced Ground Movement // Transportation Geotechnics. 2021. Vol. 31. № 100661. DOI: [10.1016/j.trgeo.2021.100661](https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100661)
14. Burd H.J., Yiu W.N., Acikgoz S., Martin C.M. Soil-foundation interaction model for the assessment of tunnelling-induced damage to masonry buildings // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022. Vol. 199. № 104208. DOI: [10.1016/j.tust.2021.104208](https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104208)
15. Pascariello M.N., Luciano A., Bilotta E. et al. Numerical modelling of the response of two heritage masonry buildings to nearby tunnelling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2023. Vol. 131. № 104845. DOI: [10.1016/j.tust.2022.104845](https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104845)
16. Алхимова Н.В., Мазеин С.В. Петербургский метрополитен: в ожидании бурного развития // Метро и тоннели. 2023. № 1. С. 18-23.
17. Молоткова Е.Г. Опыт урегулирования застройки на Адмиралтейском острове. 1805-1840-е годы // Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 1. С. 94-103. DOI: [10.22337/2077-9038-2022-1-94-103](https://doi.org/10.22337/2077-9038-2022-1-94-103)
18. Колодников И.В. Дерево в современных проектах оперных театров и концертных залов: основные направления развития архитектуры и дизайна // Terra Artis. Искусство и дизайн. 2021. № 3. С. 6-19. DOI: [10.53273/27128768_2021_3_06](https://doi.org/10.53273/27128768_2021_3_06)
19. Давидич Т.Ф. Анализ развития «кирпичного стиля», его ведущие представители Виктор Шрётер и Иероним Китнер // ScienceRise. 2019. № 4 (57). С. 6-13. DOI: [10.15587/2313-8416.2019.165104](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2019.165104)
20. Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180-190. DOI: [10.31897/PMI.2022.13](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.13)
21. Алексеев А.В., Иовлев Г.А. Адаптация модели упрочняющегося грунта (hardening soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 4. С. 75-87. DOI: [10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87)
22. Иовлев Г.А., Пискунов Н.С., Бахвалов Е.Д., Очкуров В.И. Методы оптимизации параметров нелинейных грунтовых моделей для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 7. С. 148-163. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_7_0_148](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_148)
23. Wu J.T.H., Tung S.C.-Y. Determination of Model Parameters for the Hardening Soil Model // Transportation Infrastructure Geotechnology. 2020. Vol. 7. Iss. 1. P. 55-68. DOI: [10.1007/s40515-019-00085-8](https://doi.org/10.1007/s40515-019-00085-8)
24. Miliziano S., Caponi S., Carlaccini D., de Lillis A. Prediction of tunnelling-induced effects on a historic building in Rome // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022. Vol. 119. № 104212. DOI: [10.1016/j.tust.2021.104212](https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104212)
25. Franza A., Zheng C., Marshall A.M., Jimenez R. Investigation of soil-pile-structure interaction induced by vertical loads and tunnelling // Computers and Geotechnics. 2021. Vol. 139. № 104386. DOI: [10.1016/j.compgeo.2021.104386](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104386)
26. Jinyang Fu, Zhiwu Yu, Shuying Wang, Junsheng Yang. Numerical analysis of framed building response to tunnelling induced ground movements // Engineering Structures. 2018. Vol. 158. P. 43-66. DOI: [10.1016/j.engstruct.2017.11.039](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.039)
27. Amorosi A., Sangirardi M. Coupled three-dimensional analysis of the progressive tunnelling-induced damage to masonry buildings: is it always worth it? // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 118. № 104173. DOI: [10.1016/j.tust.2021.104173](https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104173)
28. Franza A., Acikgoz S., DeJong M.J. Timoshenko beam models for the coupled analysis of building response to tunnelling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 96. № 103160. DOI: [10.1016/j.tust.2019.103160](https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103160)



29. Hao Yang, Xiangyang Xu. Structure monitoring and deformation analysis of tunnel structure // Composite Structures. 2021. Vol. 276. № 114565. DOI: [10.1016/j.compstruct.2021.114565](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114565)
30. Афонин Д.А., Кавказский В.Н., Никитчин А.А. Оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны при инновационных технологиях проходки туннелей // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19. Вып. 3. С. 432-443. DOI: [10.20295/1815-588X-2022-3-432-443](https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-3-432-443)
31. Мамаев Д.С., Бугаков П.Ю. Разработка программного обеспечения для геодинамического и геотехнического ГНСС мониторинга // XVII Международный научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2021»: Материалы Международной научной конференции «Молодежь. Инновации. Технологии», 19-21 мая 2021, Новосибирск, Россия. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2021. Т. 7. № 2. С. 114-119.
32. Колотовичев Ю.А., Шахраманьян А.М. Автоматизированный мониторинг деформации несущих конструкций «Екатеринбург Арены» // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 3. С. 314-330. DOI: [10.22227/1997-0935.2022.3.314-330](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.3.314-330)
33. Лебедев М.О., Егоров Г.Д. Геотехнические исследования при сооружении эскалаторных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 10. С. 146-159. DOI: [10.25018/0236-1493-2019-10-0-146-159](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-0-146-159)
34. Ru Wang, Mengshi Yang, Jie Dong, Mingsheng Liao. Investigating deformation along metro lines in coastal cities considering different structures with InSAR and SBM analyses // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 115. № 103099. DOI: [10.1016/j.jag.2022.103099](https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103099)
35. Васильев Б.Ю., Мустафин М.Г. Анализ и оптимизация цифровых моделей рельефа горнопромышленного объекта с открытым типом разработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9. С. 141-159. DOI: [10.25018/0236-1493-2023-9-0-141](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2023-9-0-141)

Авторы: Евгений Михайлович Волохов, канд. техн. наук, доцент (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-4430-4172>, Василина Константиновна Кожухарова, аспирант (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), te@kozhuharova.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0705-3646>, Сергей Николаевич Зеленцов, канд. техн. наук, заведующий сектором (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0009-0006-6784-8702>, Диана Зинуровна Мукминова, канд. техн. наук, заведующий лабораторией (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-5595-9150>, Александр Александрович Исаев, начальник сектора (СПб ГКУ «Дирекция транспортного строительства», Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0009-0009-6403-8941>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Сравнительный анализ влияния различных нанодобавок на характеристики буровых растворов на основе дизельного топлива

Е.И.Лысакова¹✉, А.В.Минаков^{1,2}, А.Д.Скоробогатова¹, М.И.Пряжников¹¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия² Институт теплофизики имени С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Как цитировать эту статью: Лысакова Е.И., Минаков А.В., Скоробогатова А.Д., Пряжников М.И. Сравнительный анализ влияния различных нанодобавок на характеристики буровых растворов на основе дизельного топлива // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 30-40. [EDN TAJKOC](#)

Аннотация

Представлены результаты экспериментов, направленных на изучение влияния различных наноматериалов на ключевые свойства буровых эмульсий, созданных на основе дизельного топлива. В качестве наноматериалов использовались сферические наночастицы SiO_2 размером 5 и 80 нм, одностенные и многостенные углеродные нанотрубки, а также нановолокна Al_2O_3 . Наноматериалы были добавлены в типовые рецептуры буровых растворов с содержанием углеводородной фазы 65 %, при этом массовая концентрация наноматериалов в эмульсиях достигала 2 %. Были изучены реологические, фильтрационные и антифрикционные свойства, коллоидная устойчивость и ингибирующая способность модифицированных буровых эмульсий. Показано, что наноматериалы даже в малых концентрациях сильно влияют на свойства буровых эмульсий, что демонстрирует перспективу их практического применения. При этом использование нанотрубок показывает эффект при более низких концентрациях (0,1 % по массе) по сравнению со сферическими наночастицами.

Ключевые слова

буровой раствор; сферические наночастицы; углеродные нанотрубки; реология; фильтрация; трение; коллоидная устойчивость; ингибирующая способность

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>.

Поступила: 09.04.2024

Принята: 28.01.2025

Онлайн: 04.09.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Успешность процесса бурения нефтегазовой скважины во многом зависит от правильного выбора бурового раствора, который должен выполнять ряд ключевых функций, таких как вынос выбуренной породы, поддержание гидростатического давления в скважине, охлаждение породоразрушающего инструмента и др. [1-3]. В настоящее время отрасль сталкивается с техническими, экологическими и экономическими проблемами, связанными с используемыми ранее материалами для буровых растворов [4-6]. Оптимальные ранее технологии и реагенты все меньше подходят для существующих условий бурения [7, 8]. Это связано в том числе с активной разработкой месторождений в условиях вечной мерзлоты, с бурением все более глубоких скважин, со значительным увеличением длины горизонтального участка скважины в нефтеносном пласте, с аномальным давлением и температурой на дне скважины, с ужесточением экологических требований и др. [9-12].

Практика бурения в сложных условиях демонстрирует, что применение стандартных добавок часто не позволяет полностью соответствовать всем предъявляемым требованиям [13]. В настоящее время активно проводятся исследования, направленные на поиск новых материалов, которые помогут улучшить свойства буровых растворов [14-18]. Особое внимание уделяется изучению



и применению различных наноматериалов в области бурения скважин. Благодаря своим уникальным характеристикам – высокой удельной поверхности и специфическим физико-химическим свойствам – наноматериалы демонстрируют значительный потенциал в улучшении и регулировании свойств буровых растворов.

Множество исследований, направленных на изучение влияния нанодобавок на различные параметры буровых растворов [19-21] показали, что добавление сферических наночастиц, как на водной, так и на углеводородной основе, может существенно улучшить процесс промывки скважины. Наноматериалы способствуют изменению краевого угла смачивания [22], повышению антикоррозийных свойств [23, 24], возрастанию эффективности удаления выбуренной породы за счет реологии [25-27], снижению фильтрационных потерь [28-30] и улучшению антифрикционных свойств [31, 32]. Все это ведет к улучшению очистки забоя и стенок скважины.

В исследовании [33] показано, что при высокой объемной концентрации наночастиц Al_2O_3 в растворе на углеводородной основе вязкость практически не изменяется. Повышение вязкости при увеличении концентрации наночастиц наблюдалось только для более крупных частиц. В работе [26] представлено влияние наночастиц оксида железа и кремния среднего размера 50 нм на свойства буровых растворов на водной основе. Продemonстрировано двукратное увеличение эффективной вязкости раствора при концентрации наночастиц 2,5 % по массе. Напряжение сдвига при этом увеличилось почти в три раза. Объем фильтрационных потерь снизился при введении наночастиц оксида железа (на 50 % при концентрации 0,5 % по массе). А при введении наночастиц оксида кремния, напротив, зафиксировано увеличение объема фильтрации на 30 % для концентрации 1,5 % по массе.

В литературе имеются и противоположные результаты влияния данных наночастиц. В исследовании [22] выявлено, что увеличение концентрации гидрофобных наночастиц оксида кремния (аэросил R200, средний размер частиц 12 нм) до 1,2 % по массе приводит к снижению фильтрационных потерь раствора в 5-7 раз по сравнению с базовым раствором. Аналогичный эффект наблюдался и в работе [34]. Добавление в буровой раствор наноразмерных глин с частицами 30-50 нм в концентрации до 6 % по массе позволило сократить фильтрационные потери более чем вдвое по сравнению с использованием традиционных кольматантов. В работе [30] исследовалось влияние наночастиц оксида кремния и оксида меди на характеристики буровых растворов на водной основе, средний диаметр частиц ~ 50 нм. Результаты оказались неоднозначными: при добавлении наночастиц оксида меди пластическая вязкость снижалась на 24 % при концентрации 0,8 % по массе, тогда как добавление наночастиц оксида кремния приводило к ее увеличению. Однако в обоих случаях объем фильтрации уменьшался – для оксида кремния максимальное снижение составило 31 %, а для оксида меди – 24 %.

В работе [35] приведено комплексное исследование влияния добавки наночастиц оксида кремния размером 80 нм на свойства буровых растворов на углеводородной основе. Показано, что с увеличением концентрации наночастиц показатель степенной модели реологии бурового раствора снижается, а пластическая вязкость, индекс консистенции и предельное напряжение, напротив, возрастают в несколько раз. Кроме того, на 50-70 % снижаются фильтрационные потери, скорость коалесценции буровой эмульсии при добавлении наночастиц снижается более чем в шесть раз.

Исследований, посвященных улучшению буровых растворов при помощи углеродных нанотрубок, на порядок меньше, чем исследований, посвященных влиянию наночастиц. В статье [36] изучалось поведение бурового раствора при добавке нанотрубок и сферических наночастиц. Результаты показали, что добавление многостенных углеродных нанотрубок (МСУНТ) более эффективно снижает коэффициент трения по сравнению с наночастицами диоксида кремния. Также раствор с нанотрубками продемонстрировал улучшение фильтрационных показателей (снижение потерь и низкая толщина корки). В работе [37] окисленные многослойные углеродные нанотрубки применялись для уменьшения проницаемости глинистой корки бурового раствора на водной основе. В результате удалось снизить проницаемость корки больше чем на 80 %. Кроме того, было продемонстрировано значительное увеличение эффективной вязкости и предельного напряжения сдвига при незначительных концентрациях МСУНТ. В то же время снижение фильтрационных потерь при аналогичной модификации раствора МСУНТ на уровне всего 6 % было установлено в работе [38].



В статье [39] сделана попытка оптимизировать свойства бентонитового бурового раствора на водной основе путем добавления углеродных нанотрубок разных типов. Эксперименты показали, что введение полимера (0,25 % по массе) и такого же количества нанотрубок положительно влияет на реологические характеристики бурового раствора. При повышении температуры наблюдалось снижение пластической вязкости и увеличение предельного напряжения сдвига, что указывало на процесс термодеструкции раствора. В исследовании [40] проанализировано влияние концентрации многостенных углеродных нанотрубок на свойства бурового раствора на водной основе при различных температурах (от 25 до 180 °С). Установлено, что растворы проявляют свойства вязкопластической жидкости. С увеличением концентрации многостенных углеродных нанотрубок вязкость бурового раствора возрастала. Повышение концентрации нанотрубок делало зависимость вязкости от температуры более монотонной.

Обзор литературы показывает, что МСУНТ все чаще используют для улучшения свойств буровых растворов. Исследований, в которых бы для этих целей применяли одностенные нанотрубки (ОСУНТ), практически нет. Между тем использование ОСУНТ представляется более перспективным, что было продемонстрировано в работе авторов [41], в которой приведены результаты комплексного сравнительного анализа буровых растворов на углеводородной основе, модифицированных с помощью МСУНТ и ОСУНТ. Показано, что с помощью очень малых добавок углеродных нанотрубок можно значительно регулировать основные функциональные характеристики буровых растворов. Так, добавка всего 0,025 % по массе одностенных нанотрубок примерно на 45 % повышает эффективную вязкость, в 1,7 раз – предел текучести, на 55 % снижает его фильтрационные потери и на 20 % – коэффициент трения. Также было отмечено, что использование ОСУНТ в несколько раз более эффективно по сравнению с МСУНТ.

В большинстве имеющихся по данной теме исследований изучается влияние наноматериалов на достаточно ограниченное количество отдельных параметров буровых растворов. Как правило, это реология и фильтрационные потери. Между тем, к современным буровым растворам предъявляется большое количество разнообразных требований, которые требуют систематического исследования растворов. Большинство исследований по изучению влияния различных наноматериалов выполнены для буровых растворов на водной основе. Однако на практике наиболее перспективными для бурения в сложных условиях являются растворы на углеводородной основе, представляющие собой обратные эмульсии. В существующих на данный момент научных работах по влиянию наноматериалов на свойства промывочных жидкостей не достаточно информации о том, как добавки наночастиц и углеродных нанотрубок влияют на функциональные свойства буровых растворов именно на углеводородной основе. Особенно это касается одностенных углеродных трубок. Кроме того из-за использования различных наноматериалов и составов базовых растворов исследования разных ученых фрагментарны и разрознены. Поэтому в настоящее время сложно делать выводы об эффективности тех или иных добавок наноматериалов. Данная работа посвящена результатам проведенных систематических экспериментов по исследованию влияния добавок различных наноматериалов на вязкость, реологию, фильтрационные и антифрикционные свойства, а также на коллоидную устойчивость и кинетику набухания глин буровых растворов на углеводородной основе.

Методы

Базовый буровой раствор на углеводородной основе – это обратная эмульсия (вода в масле). Для его приготовления было выбрано стандартное соотношение: 65 % углеводородной основы (дизельное топливо) и 35 % водной фазы. Подробный синтез буровых растворов с использованием наноматериалов представлен в работах [41, 42]. Сначала готовили высококонцентрированный водный раствор KCl с плотностью 1100 кг/см³. Затем в него добавляли наноматериал, и полученную суспензию обрабатывали ультразвуком на диспергаторе «Волна-М» (22 кГц, 400 Вт). Далее суспензию смешивали с дизтопливом при непрерывном перемешивании в высокоскоростной мешалке OFITE 152-18 – Prindle Castle. В подготовленную дисперсионную среду постепенно вводили компоненты в соответствии с рецептурой (табл.1). После ввода каждого компонента раствор перемешивался. Вначале в дисперсную среду вводили органophilную глину, чтобы повысить структурно-механические свойства и способствовать образованию корки. Затем для стабилизации



Таблица 1

Рецептура буровых растворов с нанодобавками

Компонент	Количество	Концентрация по массе
УВ дисперсная среда, мл	195	55,6
Рассол CaCl_2 , мл	88,3-94,1	38,5-40,4
Эмульгатор, мл	6,6	2,16
Структурообразователь, г	2,7	1,4
Гидрофобизатор, мл	1,3	0,375
SiO_2 , г	6,12	2
ОСУНТ, г	0,3	0,1
МСУНТ, г	0,75	0,25
ANF, г	0,75; 3,03	0,25; 1

эмульсии добавляли неионогенный эмульгатор и гидрофобизатор, что обеспечивало равномерное смачивание твердой фазы. При проведении лабораторных исследований и приготовлении буровых растворов авторы руководствовались принятыми международными стандартами для определения параметров буровых растворов API.

Для модификации бурового раствора использовались гидрофобные наноразмерные частицы пирогенного оксида кремния, обработанные полидиметилсилоксаном, средний размер составлял 5 и 80 нм (S149, S24 соответственно). Рассмотрены МСУНТ с внутренним диаметром 5-15 нм и внешним 8-30 нм, длина превышала 5 мкм; количество слоев – 30-40; удельная поверхность – выше $270 \text{ м}^2/\text{г}$. Помимо этого применялись ОСУНТ со средним диаметром $1,6 \pm 0,4$ нм и длиной более 4 мкм. Удельная поверхность по данным БЭТ (метод Брунауэра – Эммета – Теллера) – $510 \text{ м}^2/\text{г}$. Также использовались нановолокна оксида алюминия ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), полученные технологией, основанной на окислении расплава алюминия в контролируемой газовой среде (ANF).

Были исследованы следующие функциональные характеристики полученного бурового раствора на углеводородной основе, модифицированного наноматериалами: реология и микрореология, водоотдача и коэффициент трения фильтрационной корки, коллоидная устойчивость, а также способности бурового раствора препятствовать гидратации глин.

Реология изучалась при нормальных условиях ($T = 25^\circ\text{C}$, $P = 1$ атм) на ротационном вискозиметре Ofite 900. Доверительный интервал погрешности результата измерений не превышал 2 %. Фильтрационные потери оценивались после прохождения бурового раствора через бумажный фильтр фильтр-пресса Ofite 12BL-6 при $T = 25^\circ\text{C}$, $P = 7$ атм в течение 30 мин. По линейному коэффициенту трения полученной фильтрационной корки была определена смазывающая способность бурового раствора. Коллоидная устойчивость образцов контролировалась с помощью анализатора Turbiscan, который позволяет проводить анализ устойчивости подвижных образцов на основе оптического метода многократного рассеяния света. Ингибирующая способность бурового раствора измерена на тестере линейного набухания Ofite 150-80, который может выполнять исследования взаимодействия между флюидами, находящимися в движении, и пробами неорганических пород, содержащих химически активные глины.

Обсуждение результатов

Вязкость буровых растворов, модифицированных нанодобавками. Вначале были проведены систематические исследования вязкости и реологии модифицированных наноматериалами буровых эмульсий. Контроль вязкости является очень важным этапом в процессе разработки новых рецептур буровых растворов, так как она определяет режимы течения бурового раствора, вынос выбуренной породы на поверхность, гидравлические сопротивления в циркуляционной системе и многое другое. Результаты измерений приведены на рис.1.

Буровые растворы являются неньютоновскими жидкостями, и их вязкость зависит от скорости сдвига. Все исследованные буровые эмульсии демонстрируют характеристики вязкопластических неньютоновских жидкостей и обладают пределом текучести, как видно на кривых течения (рис.1).

Результаты анализа демонстрируют, что применяемые наноматериалы способствуют увеличению эффективной вязкости буровых растворов даже при небольших концентрациях. Например, добавление 2 % по массе наночастиц SiO_2 повышает вязкость на 20 %. Для подобного изменения вязкости бурового раствора с помощью нановолокон необходимо на один порядок меньше (0,25 % по массе), чем сферических наночастиц, а нанотрубок – почти на два порядка (0,1 % по массе). В случае модификации сферическими частицами важно учитывать их размер – чем он меньше, тем сильнее их влияние на свойства раствора. В частности, на низких скоростях сдвига вязкость буровой эмульсии, модифицированной наночастицами 18 нм, на 47 % выше эффективной вязкости промывочной жидкости с добавкой 80 нм наночастиц. Это можно рассматривать как очень хороший

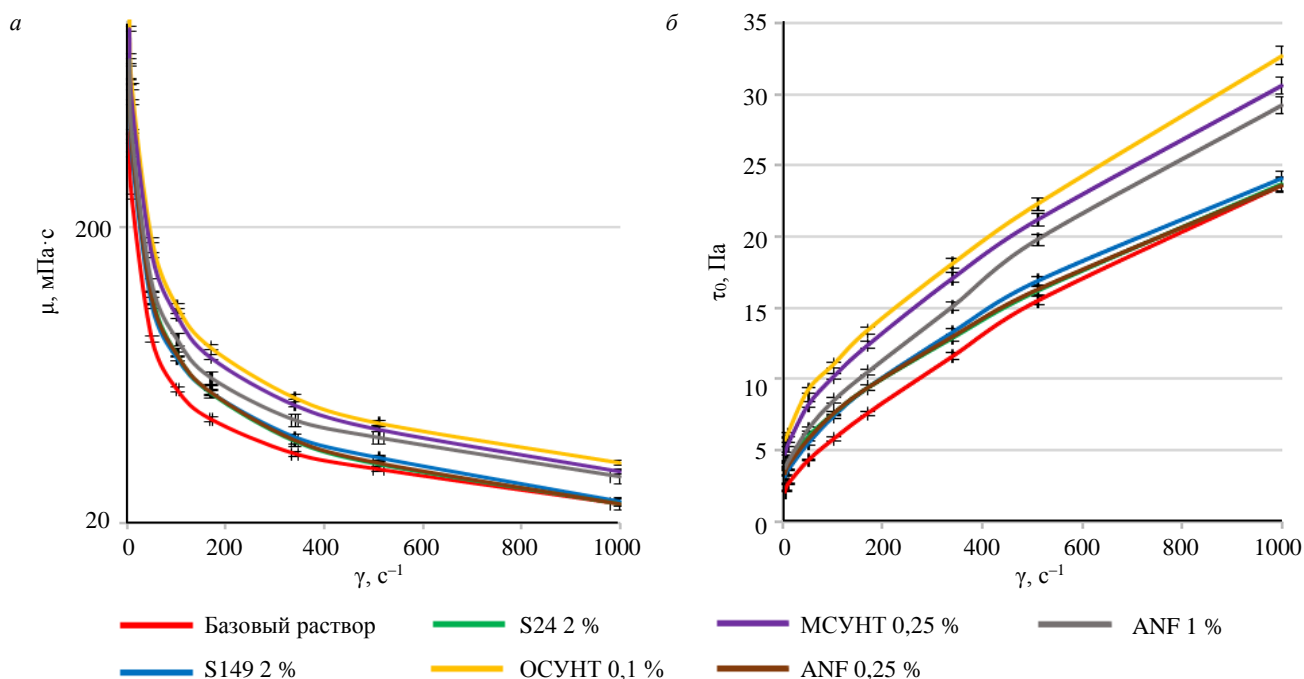


Рис.1. Зависимость вязкости (а) и напряжения сдвига (б) от скорости сдвига для модифицированных буровых растворов S149 2 %, S24 2 % – добавка 2 % по массе наночастиц к базовому раствору со средним размером 5 и 80 нм соответственно; МСУНТ 0,25 % – добавка 0,25 % по массе многостенных углеродных нанотрубок; ОСУНТ 0,1 % – добавка 0,1 % по массе одностенных углеродных нанотрубок; ANF 0,25 % и ANF 1 % – добавка 0,25 и 1 % по массе нановолокон оксида алюминия

результат, поскольку позволяет говорить о существенной модификации свойств промывочной жидкости в широких диапазонах концентраций и материалов нанодобавок. При этом раствор полностью сохранил свою коллоидную устойчивость.

Для анализа зависимости вязкости от скорости сдвига были использованы три распространенные реологические модели:

- Степенная модель

$$\mu = K\gamma^{n-1},$$

где K – консистенции, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$; n – показатель нелинейности;

- Модель Бингама

$$\mu = (\tau_0 + k_v \gamma) / \gamma,$$

где τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па ; k_v – пластическая вязкость, $\text{мПа} \cdot \text{с}$;

- Модель Гершеля – Балкли

$$\mu = (\tau_0 + K\gamma^n) / \gamma.$$

Сравнение реологических параметров, полученных с использованием этих моделей, представлено в табл.2.

Таблица 2

Параметры моделей, описывающих реологию обратных эмульсий с нанодобавками

Массовая концентрация нанодобавок w , % по массе	Степенная модель			Модель Бингама			Модель Гершеля – Балкли			
	K , $\text{Па} \cdot \text{с}^n$	n	R^2	τ_0 , Па	k_v , $\text{мПа} \cdot \text{с}$	R^2	τ_0 , Па	K , $\text{Па} \cdot \text{с}^n$	n	R^2
Базовый раствор	1,6969	0,3516	0,9605	4,913	19,49	0,9735	2,93	0,452	0,519	0,9998
S149 2 %	1,4072	0,3851	0,967	4,617	20,514	0,966	2,69	0,393	0,549	0,9999
S24 2 %	0,8572	0,4487	0,9669	3,238	21,062	0,9817	1,849	0,255	0,614	0,9997
ОСУНТ 0,1 %	2,6642	0,3337	0,9615	7,349	26,324	0,9712	4,421	0,696	0,501	0,9998
МСУНТ 0,25 %	2,2776	0,348	0,9655	6,61	25,017	0,9692	3,936	0,608	0,514	0,9998
ANF 0,25 %	1,5667	0,3649	0,9662	4,787	19,674	0,9701	2,284	0,426	0,53	0,9996
ANF 1 %	1,6362	0,3856	0,9583	5,165	24,94	0,9779	3,036	0,45	0,555	0,9997



Значения коэффициента корреляции R^2 при аппроксимации кривых течения соответствующей реологической моделью приведены с помощью метода наименьших квадратов. Анализ показал, что модель Гершеля – Балкли лучше всего описывает реологию буровых растворов. У растворов с углеводородными нанотрубками пластическая вязкость, мера консистенции и предельное напряжение сдвига существенно выше. Показатель нелинейности сопоставим для всех рассмотренных растворов.

Коллоидная устойчивость буровых растворов, модифицированных нанодобавками. Буровые растворы представляют собой сложные многокомпонентные жидкости с высоким содержанием углеводородной и твердой фазы с широким распределением частиц по размерам. При этом в процессе бурения раствор должен оставаться стабильной коллоидной системой. Однако буровые эмульсии с высоким содержанием углеводородной фазы часто подвержены процессам коалесценции. Особенно скорость процессов дестабилизации увеличивается при нагревании бурового раствора. В процессе эксплуатации буровых растворов часто приходится работать при высоких температурах, поэтому вопросу стабильности уделяется повышенное внимание. Анализ литературы показывает, что сравнения применения различных наноматериалов для стабилизации обратных буровых эмульсий в настоящий момент нет.

В данной работе изучено влияние нанодобавок на коллоидную устойчивость буровых эмульсий при нормальных условиях. Это исследование выполнено с помощью анализатора Turbiscan LAB. Изучено поведение коэффициента пропускания и обратного рассеяния света для образцов буровых эмульсий с нанодобавками. Для количественного анализа скорости этих процессов используется индекс дестабилизации TSI. Этот параметр рассчитывается как интегрированная по высоте образца разность профилей обратного рассеяния света в разные моменты времени. Чем меньше значение индекса TSI, тем устойчивее образец бурового раствора. На рис.2 показано поведение индекса дестабилизации буровой эмульсии с нанодобавками во времени, после этого образец оставили в состоянии покоя. Здесь хорошо видна зависимость стабильности эмульсий от аспектного соотношения наноматериалов, у ОСУНТ оно на порядок больше, чем у МСУНТ. Такая существенная разница в аспектном соотношении вызывает большие различия в степени воздействия нанотрубок на свойства буровых растворов. Например, на рис.2 показано, что с увеличением аспектного соотношения и концентрации нанодобавок индекс TSI монотонно снижается. Это говорит о том, что нанодобавка значительно стабилизирует буровую эмульсию. Также было установлено, что при концентрации добавки сферических 5 нм наночастиц оксида кремния 2 % по массе скорость дестабилизации эмульсии снижается примерно в два раза. Кинетика дестабилизации буровых растворов с одностенными нанотрубками концентрацией 0,1 % по массе, снижает этот показатель уже в 3,5 раза. Анализ данных показал, что базовая модель раствора на углеводородной основе была подобрана хорошо. В сравнении с водными растворами показатель его коллоидной устойчивости находится на достаточно высоком уровне (индекс TSI ≈ 4 против 15 для водных растворов), и добавление наноматериалов дополнительно способствует его стабилизации. Таким образом, было показано, что добавление наноматериалов уменьшает кинетику дестабилизации бурового раствора тем больше, чем выше концентрация нанодобавок и их аспектное соотношение.

Фильтрационные и антифрикционные свойства буровых растворов, модифицированных нанодобавками. Фильтрационные потери – известная проблема при бурении нефтяных и газовых скважин. Сведение к минимуму потерь

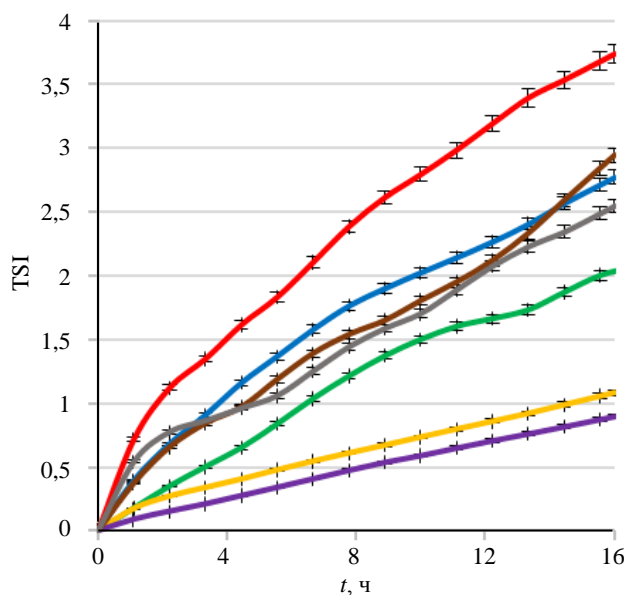


Рис.2. Кинетика дестабилизации буровых растворов с добавками различных наноматериалов
Условные обозначения см. на рис.1



жидкости и формирование тонкой фильтрационной корки с низкой проницаемостью за счет использования подходящей добавки для контроля фильтрации в качестве регулирования систем буровых растворов имеет решающее значение для предотвращения нестабильности ствола скважины. В частности, проникновение флюида в нефтегазоносные горизонты может привести к повреждению пласта и снижению его продуктивности за счет блокирования путей выхода углеводородов или вызвать обрушение пласта. Поглощение бурового раствора в вышележащих горизонтах может приводить к дифференциальным прихватам бурового инструмента за счет резкого перепада давления или полной потере устойчивости стенок скважины. Это вызывает серьезные осложнения в процессе бурения скважины и влечет существенное удорожание ее строительства.

Для определения фильтрационных свойств по методике API объем прошедшей через фильтр жидкости измеряется через 30 мин после начала фильтрации. Испытания бурового раствора проводились при низком давлении и температуре (LTLP). Фильтрационные потери определялись на бумажном фильтре при давлении 7 атм. Зависимость водоотдачи углеводородного бурового раствора на основе дизельного топлива от концентрации наноматериалов приведена на рис.3, а. Все рассмотренные наноматериалы приводят к снижению фильтрационных потерь базового бурового раствора. При этом максимальное снижение (в 10 раз) вызывает добавка нановолокон оксида алюминия концентрацией 1 % по массе. Остальные наноматериалы приводят к снижению в среднем в 1,5-2 раза, что тоже существенно влияет на водоотдачу промывочной жидкости и будет способствовать сохранению устойчивости крепи скважины.

На эффективность процесса бурения также оказывает влияние смазывающая способность промывочной жидкости. Буровой раствор с высокими смазывающими свойствами способен повысить скорость бурения, что может существенно сократить расходы при строительстве скважины. В то же время недостаточная смазка может вызвать износ бурового долота и обсадной колонны, увеличить тяговые усилия и сопротивление при спуске инструмента, создать проблемы с крутящим моментом и привести к заклиниванию. Кроме того, установлено, что главными причинами прихвата бурового инструмента, который входит в число сложных аварий при бурении, являются плохая смазывающая способность бурового раствора и толстая фильтрационная корка. Для эффективного и безаварийного процесса бурения очень важно, чтобы фильтрационная корка бурового раствора имела как можно меньший коэффициент трения при контакте бурильной трубы со стенкой скважины.

Для имитации эффекта трения бурильной трубы о стенку скважины при стандартных испытаниях бурового раствора проводятся измерения коэффициента трения фильтрационной корки. Зависимость коэффициента трения фильтрационной корки бурового раствора на углеводородной основе от концентрации добавок нанотрубок приведена на рис.3, б. Добавка нановолокон оксида алюминия не приводит к изменению коэффициента трения бурового раствора, тогда как сферические наночастицы малого диаметра и углеродные нанотрубки существенно влияют на этот параметр.

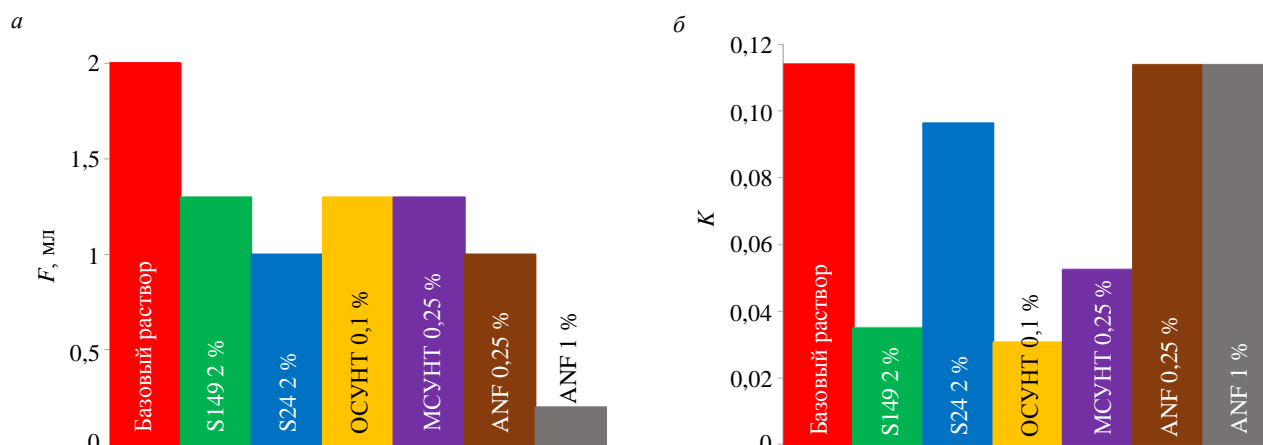


Рис.3. Зависимости водоотдачи (а) и коэффициента трения (б) буровых растворов с добавками различных наноматериалов



Так, одностенные нанотрубки при минимальной концентрации нанодобавок 0,1 % по массе снижают коэффициент трения промывочной жидкости в 3,7 раза. В случае добавок в буровой раствор сферических наночастиц основным механизмом уменьшения трения считается так называемый шарикоподшипниковый механизм, при котором наночастицы заполняют пространство в фильтрационной корке между грубодисперсными частицами раствора. Это приводит к лучшему качению поверхности металла по металлу. В случае с нанотрубками очевидно, что механизм уменьшения трения отличается. Показано, что углеродные нанотрубки позволяют значительно уменьшить значение коэффициента трения фильтрационной корки, что способствует существенной оптимизации процесса бурения благодаря уменьшению вероятности прихвата бурового инструмента, увеличению скорости проходки и сохранению ресурса работы породоразрушающего инструмента.

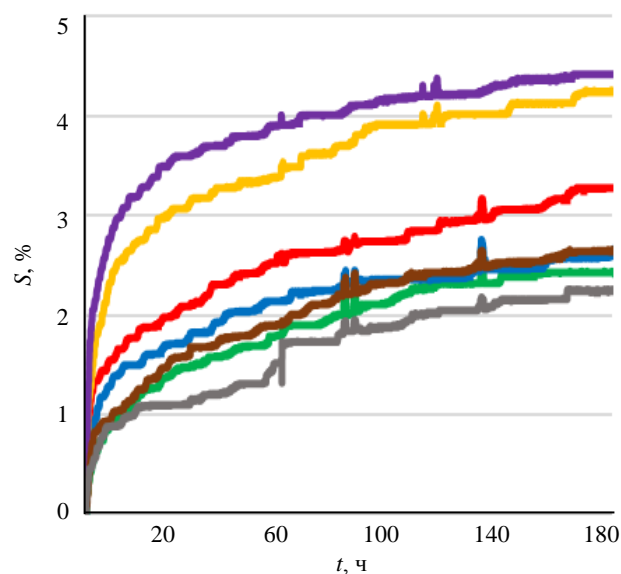


Рис.4. Зависимости линейного набухания образцов глинистой породы в буровых растворах, модифицированных различными наноматериалами
Условные обозначения см. на рис.1

Ингибирование глины буровыми растворами, модифицированными нанодобавками. Еще одним важным свойством буровых растворов является их способность сопротивляться набуханию глинистых минералов. Буровой раствор в процессе бурения взаимодействует со стенками скважины, сложенными глинами и другими минералами. В результате водная фаза, находящаяся в растворе, способствует набуханию глины, что приводит к разрыхлению и обрушению стенок скважины. Поэтому буровой раствор должен помогать ингибированию набухания глины. В данной работе впервые выполнено сравнение влияния различных нанодобавок на скорость набухания глинистых цилиндров в буровых растворах на основе дизельного топлива. Кинетика набухания глины была изучена с помощью прибора Ofite 150-80. Для проведения исследований из монтмориллонитовой глины были спрессованы цилиндры размерами 28×12 мм с высокой степенью гидратации, измерялось изменение линейных размеров цилиндров в процессе гидратации глины.

Анализ результатов показал, что добавление углеродных нанотрубок примерно на 25 % увеличивает скорость гидратации глины по сравнению с базовым раствором (рис.4). Это в целом является негативным моментом с точки зрения сохранения стенок скважины в стабильном состоянии. Однако для исследований был выбран базовый буровой раствор, обладающий очень высокой ингибирующей способностью (около 70 %). Углеродные нанотрубки несущественно ухудшают ингибирующую способность данного раствора. Вместе с тем сферические наночастицы оксида кремния и нановолокна оксида алюминия приводят к дополнительному ингибированию глины буровыми растворами на углеводородной основе. Так, максимальная из рассмотренных концентраций нановолокон 1 % по массе приводит к уменьшению гидратации глины в 1,5 раза, что делает возможным использование данного материала в качестве ингибитора при бурении глиносодержащих пород.

Количественно сравнить полученные в работе результаты с результатами других авторов не представляется возможным, поскольку разные авторы используют различные рецептуры и химические реагенты для приготовления даже базовых буровых растворов, не говоря уже о наномодифицированных. Разброс применяемых материалов, их концентраций, размеров и морфологии наночастиц очень большой, поэтому понятие количественного сопоставления тут вряд ли применимо. При качественном анализе полученных результатов можно отметить, что они в целом согласуются с данными других исследователей, работавших в аналогичных условиях. Это касается основных тенденций в изменении свойств буровых растворов при их модификации с использованием наноматериалов.



Заключение

Впервые было всесторонне исследовано влияние различных наноматериалов на ключевые функциональные свойства буровых растворов на углеводородной основе, содержащих 65 % углеводородной фазы. В качестве модификаторов рассмотрены частицы различной формы, материала и размера.

Основные выводы:

- Наноматериалы оказывают значительное воздействие на свойства буровых эмульсий на углеводородной основе, при этом нанотрубки демонстрируют эффективность при более низких концентрациях по сравнению со сферическими наночастицами. Разница становится заметной уже при концентрации нанотрубок 0,1 % по массе.

- С увеличением аспектного соотношения и концентрации нанодобавок дестабилизация буровых растворов монотонно снижается. Также наблюдается более существенное влияние на стабилизацию эмульсии нанотрубок в сравнении со сферическими наночастицами. Так, при концентрации добавки сферических наночастиц 5 нм оксида кремния 2 % по массе скорость дестабилизации эмульсии снижается примерно в два раза. Кинетика дестабилизации буровых растворов с одностенными нанотрубками концентрацией 0,1 % по массе снижает этот показатель уже в 3,5 раза. Было показано, что добавление наноматериалов существенно уменьшает кинетику дестабилизации бурового раствора тем больше, чем выше концентрация нанодобавок и их аспектное соотношение.

- Все рассмотренные наноматериалы приводят к снижению фильтрационных потерь базового бурового раствора. При этом максимальное снижение (в 10 раз) вызывает добавка нановолокон оксида алюминия концентрацией 1 % по массе. Использование остальных наноматериалов приводит к снижению фильтрационных потерь в среднем в 1,5-2 раза, что тоже очень существенно влияет на водоотдачу промывочной жидкости.

- Добавление нановолокон оксида алюминия не приводит к изменению коэффициента трения бурового раствора, тогда как сферические наночастицы малого диаметра и углеродные нанотрубки существенно влияют на этот параметр. Так, одностенные нанотрубки при минимальной концентрации нанодобавок 0,1 % по массе снижают коэффициент трения промывочной жидкости в 3,7 раза.

- Добавление сферических наночастиц оксида кремния и нановолокон оксида алюминия влечет дополнительное ингибирование глины буровыми растворами на углеводородной основе, модифицированными данными наноматериалами. Так, максимальная из рассмотренных концентраций нановолокон 1 % по массе вызывает уменьшение гидратации глины в 1,5 раза, что позволяет использовать данный материал в качестве ингибитора при бурении глиносодержащих пород. Введение нанотрубок в буровой раствор приводит к увеличению скорости набухания глины, но это увеличение несущественно даже в сравнении со степенью гидратации глинистых пород при взаимодействии с буровыми растворами на водной основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Apaleke A.S., Al-Majed A., Hossain M.E.* Drilling Fluid: State of The Art and Future Trend // North Africa Technical Conference and Exhibition, 20-22 February 2012, Cairo, Egypt. OnePetro, 2012. № SPE-149555-MS. DOI: [10.2118/149555-MS](https://doi.org/10.2118/149555-MS)
2. *Guancheng Jiang, Tengfei Dong, Kaixiao Cui et al.* Research status and development directions of intelligent drilling fluid technologies // Petroleum Exploration and Development. 2022. Vol. 49. Iss. 3. P. 660-670. DOI: [10.1016/S1876-3804\(22\)60055-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60055-7)
3. *Табатабаи Моради С.Ш.* Вероятностное исследование оптимизации промывки скважины // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 956-963. DOI: [10.31897/PMI.2022.67](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.67)
4. *Уляшева Н.М., Леушева Е.Л., Галишин Р.Н.* Разработка композиции бурового раствора для проводки наклонно направленного ствола скважины с учетом реологических параметров жидкости // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 454-461. DOI: [10.31897/PMI.2020.4.8](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.8)
5. *Леушева Е.Л., Морозов А.О., Морозов Д.О.* Экологические биоразлагаемые добавки для улучшения реологических и фильтрационных характеристик бурового раствора на водной основе // Недропользование. 2024. Т. 24. № 3. С. 120-130. DOI: [10.15593/2712-8008/2024.3.3](https://doi.org/10.15593/2712-8008/2024.3.3)
6. *Лаврентиади Ю.С., Леушева Е.Л.* Повышение экологичности технологических жидкостей, применяемых для бурения скважин // Недропользование. 2023. Т. 23. № 1. С. 32-43. DOI: [10.15593/2712-8008/2023.2.5](https://doi.org/10.15593/2712-8008/2023.2.5)



7. Леушева Е.Л., Алиханов Н.Т., Бровкина Н.Н. Исследование реологических свойств безбаритного бурового раствора повышенной плотности // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 976-985. DOI: [10.31897/PMI.2022.38](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.38)
8. 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. 2018. Vol. 13. № 14. P. 5661-5664. DOI: [10.36478/jeasci.2020.694.697](https://doi.org/10.36478/jeasci.2020.694.697)
9. Siddig O., Mahmoud A.A., Elkatatny S. A review of the various treatments of oil-based drilling fluids filter cakes // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2022. Vol. 12. Iss. 2. P. 365-381. DOI: [10.1007/s13202-021-01427-4](https://doi.org/10.1007/s13202-021-01427-4)
10. Jiancheng Li, Peng Yang, Jian Guan et al. A new type of whole oil-based drilling fluid // Petroleum Exploration and Development. 2014. Vol. 41. Iss. 4. P. 538-544. DOI: [10.1016/S1876-3804\(14\)60064-1](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(14)60064-1)
11. Guanzheng Zhuang, Zepeng Zhang, Jaber M. Organoclays used as colloidal and rheological additives in oil-based drilling fluids: An overview // Applied Clay Science. 2019. Vol. 177. P. 63-81. DOI: [10.1016/j.clay.2019.05.006](https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.05.006)
12. Leusheva E., Morenov V., Liu T. Dependence of the Equivalent Circulation Density of Formate Drilling Fluids on the Molecular Mass of the Polymer Reagent // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 22. № 7639. DOI: [10.3390/en14227639](https://doi.org/10.3390/en14227639)
13. Никитин В.И. Анализ решения задачи о нахождении распределения скоростей при ламинарном движении нелинейно-вязкой промывочной жидкости в кольцевом пространстве скважины // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 964-975. DOI: [10.31897/PMI.2022.93](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.93)
14. Al-Hameedi A.T.T., Alkinani H.H., Dunn-Norman S. et al. Insights into the application of new eco-friendly drilling fluid additive to improve the fluid properties in water-based drilling fluid systems // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 183. № 106424. DOI: [10.1016/j.petrol.2019.106424](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106424)
15. Ali M., Jarni H.H., Aftab A. et al. Nanomaterial-Based Drilling Fluids for Exploitation of Unconventional Reservoirs: A Review // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 13. № 3417. DOI: [10.3390/en13133417](https://doi.org/10.3390/en13133417)
16. Zheng-Qiang Xiong, Xiao-Dong Li, Fan Fu, Yan-Ning Li. Performance evaluation of laponite as a mud-making material for drilling fluids // Petroleum Science. 2019. Vol. 16. Iss. 4. P. 890-900. DOI: [10.1007/s12182-018-0298-17](https://doi.org/10.1007/s12182-018-0298-17)
17. Leusheva E.L. Evaluation of Possible Application of Powder Made from Fallen Tree Leaves as a Drilling Mud Additive // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2024. Vol. 37. Iss. 8. P. 1592-1599. DOI: [10.5829/IJE.2024.37.08B.12](https://doi.org/10.5829/IJE.2024.37.08B.12)
18. Zubkova O.S., Kuchin V.N., Toropchina M.A., Ivkin A.S. Potential Application of Saponite Clay for Production of Drilling Fluids // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2024. Vol. 37. Iss. 11. P. 2142-2149. DOI: [10.5829/IJE.2024.37.11B.01](https://doi.org/10.5829/IJE.2024.37.11B.01)
19. Adil A., Baig T., Jamil F. et al. Nanoparticle-based cutting fluids in drilling: a recent review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. Vol. 131. Iss. 5-6. P. 2247-2264. DOI: [10.1007/s00170-023-11048-2](https://doi.org/10.1007/s00170-023-11048-2)
20. Seetharaman G.R., Sangwai J.S. Effect of Nanoparticles on the Performance of Drilling Fluids // Nanotechnology for Energy and Environmental Engineering. Springer, 2020. P. 279-297. DOI: [10.1007/978-3-030-33774-2_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33774-2_12)
21. Irfran Y., Sui D, Agista M.N., Zhixin Yu. The Potential of Nanotechnology in Petroleum Industry with Focus on Drilling Fluids // Petroleum & Petrochemical Engineering Journal. 2017. Vol. 1. Iss. 1. № 000106.
22. Hui Mao, Zhengsong Qiu, Zhonghou Shen, Weian Huang. Hydrophobic associated polymer based silica nanoparticles composite with core-shell structure as a filtrate reducer for drilling fluid at ultra-high temperature // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2015. Vol. 129. P. 1-14. DOI: [10.1016/j.petrol.2015.03.003](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.03.003)
23. Cheraghian G. Nanoparticles in drilling fluid: A review of the state-of-the-art // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 13. P. 737-753. DOI: [10.1016/j.jmrt.2021.04.089](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.089)
24. Al-Shargabi M., Davoodi S., Wood D.A. et al. Nanoparticle applications as beneficial oil and gas drilling fluid additives: A review // Journal of Molecular Liquids. 2022. Vol. 352. № 118725. DOI: [10.1016/j.molliq.2022.118725](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118725)
25. Elkatatny S. Enhancing the Stability of Invert Emulsion Drilling Fluid for Drilling in High-Pressure High-Temperature Conditions // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 9. № 2393. DOI: [10.3390/en11092393](https://doi.org/10.3390/en11092393)
26. Mahmoud O., Nasr-El-Din H.A., Vryzas Z., Kelessidis V.C. Using Ferric Oxide and Silica Nanoparticles To Develop Modified Calcium Bentonite Drilling Fluids // SPE Drilling & Completion. 2018. Vol. 33. Iss. 1. P. 12-26. DOI: [10.2118/178949-PA](https://doi.org/10.2118/178949-PA)
27. Mohamadian N., Ghorbani H., Wood D.A., Hormozi H.K. Rheological and filtration characteristics of drilling fluids enhanced by nanoparticles with selected additives: an experimental study // Advances in Geo-Energy Research. 2018. Vol. 2. № 3. P. 228-236. DOI: [10.26804/ager.2018.03.01](https://doi.org/10.26804/ager.2018.03.01)
28. Minakov A.V., Mikhienkova E.I., Voronenkova Y.O. et al. Systematic experimental investigation of filtration losses of drilling fluids containing silicon oxide nanoparticles // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2019. Vol. 71. № 102984. DOI: [10.1016/j.jngse.2019.102984](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102984)
29. Parizad A.P., Shahbazi K. Experimental investigation of the effects of SnO2 nanoparticles and KCl salt on a water base drilling fluid properties // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2016. Vol. 94. Iss. 10. P. 1924-1938. DOI: [10.1002/cjce.22575](https://doi.org/10.1002/cjce.22575)
30. Medh S., Chowdhury S., Gupta D.K., Mazumdar A. An investigation on the effects of silica and copper oxide nanoparticles on rheological and fluid loss property of drilling fluids // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2019. Vol. 10. Iss. 1. P. 91-101. DOI: [10.1007/s13202-019-0721-y](https://doi.org/10.1007/s13202-019-0721-y)
31. Majid S. Al Ruqeishi, Younis Al Salmi, Mohiuddin T. Nanoparticles as Drilling Fluids Rheological Properties Modifiers // Progress in Petrochemical Science. 2018. Vol. 1. Iss. 5. № PPS.000521.2018. DOI: [10.31031/PPS.2018.01.000521](https://doi.org/10.31031/PPS.2018.01.000521)
32. Żyła G. Viscosity and thermal conductivity of MgO-EG nanofluids // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2017. Vol. 129. Iss. 1. P. 171-180. DOI: [10.1007/s10973-017-6130-x](https://doi.org/10.1007/s10973-017-6130-x)
33. Nguyen C.T., Desgranges F., Roy G. et al. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – Hysteresis phenomenon // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2007. Vol. 28. Iss. 6. P. 1492-1506. DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.02.004](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.02.004)
34. Shakib J.T., Kanani V., Pourafshary P. Nano-clays as additives for controlling filtration properties of water-bentonite suspensions // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2016. Vol. 138. P. 257-264. DOI: [10.1016/j.petrol.2015.11.018](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.11.018)



35. Mikhienkova E.I., Lysakov S.V., Neverov A.L. *et al.* Experimental study on the influence of nanoparticles on oil-based drilling fluid properties // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 208. Part B. № 109452. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.109452](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109452)
36. Ismail A.R., Aftab A., Ibupoto Z.H., Zolkifile N. The novel approach for the enhancement of rheological properties of water-based drilling fluids by using multi-walled carbon nanotube, nanosilica and glass beads // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2016. Vol. 139. P. 264-275. DOI: [10.1016/j.petrol.2016.01.036](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.01.036)
37. Kazemi-Beydokhti A., Hajiabadi S.H. Rheological investigation of smart polymer/carbon nanotube complex on properties of water-based drilling fluids // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2018. Vol. 556. P. 23-29. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2018.07.058](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.07.058)
38. Ozkan A. Effect of gold nanoparticle functionalized multi-walled carbon nanotubes on the properties of Na-bentonite water based drilling fluid // Fresenius Environmental Bulletin. 2020. Vol. 29. № 1. P. 143-151.
39. Ahmad H.M., Kamal M.S., Murtaza M., Al-Harhi M.A. Improving the Drilling Fluid Properties Using Nanoparticles and Water-Soluble Polymers // SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, 24-27 April 2017, Dammam, Saudi Arabia. OnePetro, 2017. № SPE-188140-MS. DOI: [10.2118/188140-MS](https://doi.org/10.2118/188140-MS)
40. Anoop K., Sadr R., Yrac R., Amani M. Rheology of a colloidal suspension of carbon nanotube particles in a water-based drilling fluid // Powder Technology. 2019. Vol. 342. P. 585-593. DOI: [10.1016/j.powtec.2018.10.016](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.016)
41. Lysakova E., Skorobogatova A., Neverov A. *et al.* Comparative analysis of the effect of single-walled and multi-walled carbon nanotube additives on the properties of hydrocarbon-based drilling fluids // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 678. № 132434. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2023.132434](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132434)
42. Minakov A.V., Lysakova E.I., Skorobogatova A.D. *et al.* Experimental study of the effect of crystalline aluminum oxide nanofibers on the properties of oil-based drilling fluids // Journal of Molecular Liquids. 2023. Vol. 388. № 122676. DOI: [10.1016/j.molliq.2023.122676](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122676)

Авторы: **Евгения Игоревна Лысакова**, канд. физ.-мат. наук, доцент (Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия), etikhienkova@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8296-4262>, **Андрей Викторович Минаков**, д-р физ.-мат. наук, профессор (Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия), старший преподаватель (Институт теплофизики имени С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-1956-5506>, **Ангелика Дмитриевна Скоробогатова**, старший преподаватель (Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия), <https://orcid.org/0009-0001-6222-868X>, **Максим Иванович Пряжников**, научный сотрудник (Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-9143-7950>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Теоретическое и экспериментальное обоснование использования редокс-системы $\text{Fe}^0\text{-C}$ для очистки карьерных вод от нитрат-ионов

Е.Н.Бессонова✉, И.С.Глушанкова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Как цитировать эту статью: Бессонова Е.Н., Глушанкова И.С. Теоретическое и экспериментальное обоснование использования редокс-системы $\text{Fe}^0\text{-C}$ для очистки карьерных вод от нитрат-ионов // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 41-50. [EDN GPENQG](#)

Аннотация

Карьерные сточные воды предприятий горнодобывающей промышленности при открытой добыче железной руды являются источником загрязнения поверхностных водоемов и подземных вод химическими соединениями, используемыми при ведении разработки, в том числе продуктами распада и неполного расходования нитрата аммония при взрывных работах на рудниках – нитратным, нитритным и аммонийным азотом. Такие особенности сточных вод горнодобывающих предприятий, как многотоннажность, дефицит органического вещества и скудность микробиома, необходимо учитывать при выборе способов обезвреживания. Для очистки сточных вод, загрязненных соединениями азота, используют биологические и физико-химические методы. Ряд методов экономически нецелесообразен в связи со значительными объемами образующихся стоков. Важной задачей является поиск экономически обоснованного и высокоэффективного способа очистки карьерных вод от соединений азота. В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований возможности применения проницаемого геохимического барьера на основе редокс-системы, состоящей из железного скрапа и углеродсодержащего материала (отсева производства активного угля марки БАУ) для очистки карьерных вод от нитрат-ионов. Термодинамический анализ позволил определить химизм процесса восстановления нитрат-ионов редокс-системой $\text{Fe}^0\text{-C}$ в нейтральной и слабощелочной среде, характерной для карьерных вод. Изучение кинетических закономерностей восстановления нитрат-ионов позволило установить, что скорость процесса описывается уравнением первого порядка. Установлено, что константа скорости восстановления нитрат-ионов возрастает с повышением температуры реакционной смеси: при 278 К – $0,0365 \text{ мин}^{-1}$, 283 К – $0,0416 \text{ мин}^{-1}$, 288 К – $0,0809 \text{ мин}^{-1}$, 293 К – $0,0901 \text{ мин}^{-1}$. Полученные данные позволяют обосновать выбор конструкции реактивного барьера или реактора для проведения процесса очистки. Экспериментальные исследования по очистке реальных и модельных карьерных вод на лабораторной установке, имитирующей геохимический барьер, доказали высокую эффективность редукции нитрат-ионов (более 97 %). Очищенная вода отвечает требованиям к сбросу воды в водоемы рыбохозяйственного назначения.

Ключевые слова

нитрат-ионы; карьерные воды; нульвалентное железо; гальванопара; редокс-система; денитрификация; термодинамический анализ

Поступила: 08.05.2024

Принята: 10.04.2025

Онлайн: 04.09.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Низкое качество водных ресурсов районов, примыкающих к местам разработок месторождений полезных ископаемых, является глобальной экологической проблемой [1, 2]. Неорганические соединения азота входят в перечень загрязняющих веществ, содержание которых в карьерных водах горнодобывающих предприятий превышает санитарные нормы [3], а выщелачивание их из эмульсий и суспензий, используемых в буровзрывных операциях, считается основной причиной поступления в стоки [4-6].

Высокое содержание неорганического азота в водоемах вызывает эвтрофикацию, быстрое накопление токсичных веществ, гибель гидробионтов [7]. Источники водоснабжения в зонах воздействия горнодобывающих предприятий, в частности грунтовые воды, могут быть ограниченно пригодны или непригодны для ирригационных и бытовых целей [8, 9]. Исследования оценки риска для здоровья людей показывают, что употребление воды, не соответствующей по содержанию нитрат-ионов санитарным нормам, создает высокие риски заболеваний [10], таких как метгемоглобинемия и



нарушение выработки гормонов щитовидной железы [11]. Особенно подвержены опасному негативному воздействию нитрат-ионов дети [12, 13].

Негативное воздействие рудников на гидрологические объекты предлагается снижать биологическими и физико-химическими методами. К биологическим методам удаления неорганических соединений азота относятся методы микробной денитрификации [14], а также использование сконструированных водно-болотных угодий [15]. Безусловным преимуществом методов фиторемедиации карьерных вод являются низкие эксплуатационные затраты и функционирование на основе биотических механизмов, сочетающих ассимиляцию неорганического азота высшей водной растительностью [16] и механизмы нитрификации-денитрификации микроорганизмами [17]. Однако на эффективность очистки азотсодержащих сточных вод оказывают влияние сезонные колебания температур [18-20], а в экстремальных климатических условиях использование фиторемедиации может потребовать дополнительных мер по сохранению производительности очистных сооружений [21, 22], в связи с чем исследователи относят технологию очистки сточных вод с использованием сконструированных водно-болотных угодий к экстенсивным технологиям [23]. Исследования указывают на существенное влияние дефицита углерода как донора электронов на эффективность денитрификации стоков [24, 25].

Физико-химические методы, например мембранные технологии очистки сточных вод горнодобывающих предприятий от соединений азота, демонстрируют высокую эффективность [26, 27], однако применение данного метода к многотоннажным карьерным сточным водам горнорудных предприятий требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат [28].

В настоящее время для очистки сточных вод, содержащих ионы-окислители, используется технология проницаемого реактивного барьера [29]. Технология реализуется в виде подповерхностно размещаемого материала, способного вступать в химические реакции с загрязняющими веществами, трансформируя их в менее токсичные формы [30]. Нульвалентное железо, проявляя свойства восстановителя, в настоящее время выступает основным материалом для обустройства проницаемых реактивных барьеров [31]. Его использование позволяет достигать высоких результатов по очистке территорий от широкого спектра загрязняющих веществ окислительного характера [32, 33], однако информация о механизмах трансформации нитрат-ионов при использовании реактивных материалов противоречива. Анализ научно-технической информации показал, что реакцию восстановления нитрат-ионов нульвалентным железом предлагается проводить в кислой среде [34], при этом основным продуктом восстановления нитрат-ионов в указанных условиях являются ионы аммония [35], содержание которых также строго регламентировано. Значение показателя рН карьерных вод составляет 6-8, и проведение процесса в кислой среде потребует значительных затрат на реагенты.

Ряд исследователей указывает на возможность образования газообразного азота в результате взаимодействия нитрат-ионов с материалом, содержащим Fe^0 и Fe^{2+} [36].

Исследования, проведенные ранее [37], показали высокую эффективность реактивной системы, состоящей из нульвалентного железа и отходов производства активных углей, для очистки карьерных сточных вод от нитрат-ионов. При протекании электрохимических процессов образуется ряд восстановителей, взаимодействующих с нитрат-ионами. Анализ состава очищенных карьерных вод показал незначительное содержание ионов аммония и нитрит-ионов и позволил полагать, что основным продуктом восстановления нитрат-ионов является азот.

Установлено, что процессы, протекающие в редокс-системе Fe^0 -С при очистке нейтральных и слабощелочных карьерных вод от нитрат-ионов, а также их скорость значительно отличаются от данных, представленных в исследованиях по применению проницаемого реактивного барьера, содержащего нульвалентное железо, при очистке загрязненных стоков с низкими значениями рН. В связи с этим для установления механизма восстановления нитрат-ионов гальванопарой Fe^0 -С в растворах, близких к нейтральным и слабощелочным, возникла необходимость более подробного изучения процессов, протекающих в реакционной среде.

Целью представленной работы являлось теоретическое и экспериментальное обоснование использования редокс-системы, состоящей из смеси железной стружки и углеродсодержащего материала, для очистки карьерных вод от нитрат-ионов.



Методы

Исследования проводили как на реальных карьерных стоках, так и на растворах, которые готовили в лаборатории, моделируя химический состав карьерной воды. Химический состав карьерных вод горно-рудного предприятия представлен в табл. 1 (по данным многолетних мониторинговых исследований).

Таблица 1

Химический состав карьерной воды горно-рудного предприятия

Компонент	ПДК _{рх} *, мг/дм ³	Концентрация, мг/дм ³	
		Максимальные значения	Средние значения
pH	Фоновые значения	8,1	7,6
Ион аммония	0,5 (0,4 мгN/дм ³)	79,8	26,8
Марганец	0,01	1,02	0,46
Нитрит-ион	0,08 (0,02 мгN/дм ³)	4,38	1,71
Нитрат-ион	40 (9 мгN/дм ³)	599,4	230,8
Сульфат-ион	100	643,0	378,1
Хлорид-ион	300,0	188,2	66,4
Железо общее	0,1	1,8	0,5
Сухой остаток	1000	1998	1919

*ПДК_{рх} – нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного назначения, утвержденные Приказом Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552.

Для получения модельных растворов использовали реактивы квалификации «ЧДА» и водопроводную воду.

В исследовании процессов очистки карьерных вод от нитрат-ионов с использованием редокс-системы Fe⁰-С применялись железосодержащие отходы металлообрабатывающего производства – железный скрап (стружка) с размером частиц 3,5-4 мм и отходы производства активных углей марки БАУ (фракция 3-4 мм). Железная стружка очищалась от загрязнений и промывалась дистиллированной водой. Для активации процессов коррозии железа гальванопара предварительно обрабатывалась 0,1 н раствором соляной кислоты.

Эксперименты проводились в статическом и динамическом режимах.

В статическом режиме в реакционных сосудах исследовались кинетические закономерности процесса редукции нитрат-ионов. Модельные растворы карьерных вод объемом 1 дм³ с pH 7,0 при постоянном перемешивании обрабатывались гальванопарой Fe⁰-С при температурах 278, 283, 288 и 293 К. Масса гальванопары составляла 5 г, массовое соотношение Fe⁰-С 2:1. Для построения кинетической кривой определяли содержание нитрат-ионов в пробах через заданные промежутки времени – от 10 до 90 мин. Концентрация нитрат-ионов в растворах составляла 88,1±18,0 мгN/дм³.

В динамическом режиме на лабораторной установке, имитирующей работу геохимического барьера, исследовалась эффективность очистки карьерных вод. Установка состояла из модельного фильтра объемом 0,5 дм³, содержащего смесь железного скрапа, отсева активного угля и песка (объем загрузки Fe⁰-С составлял 0,43 дм³), высота слоя – 14 см. Массовое соотношение Fe⁰-С составляло 2:1. Через фильтр с постоянной скоростью пропускалась карьерная или модельная вода с исходной концентрацией нитрат-ионов от 81,8±16,0 до 137,2±27,0 мгN/дм³, pH 7,0-7,6, температурой T = 293 К. Фильтрат отбирался порциями по 1,5-2 дм³, в которых определяли нитрат-, нитрит-ионы и ионы аммония.

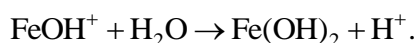
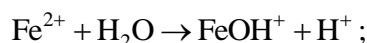
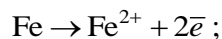
Массовая концентрация нитрат-ионов в исходных и очищенных пробах определялась фотометрическим методом с салициловой кислотой (ПНД Ф 14.1:2:4.4-95). Содержание ионов аммония определялось согласно методике выполнения количественного химического анализа с реактивом Несслера (ПНД Ф 14.1:2:3.1-95). Содержание нитрит-ионов контролировалось фотометрическим методом с реактивом Грисса (ПНД Ф 14.1:2:3:4.3-95). Фотометрические определения выполнялись с использованием спектрофотометра Ecoview-1200.



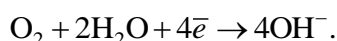
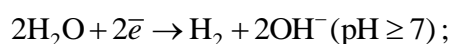
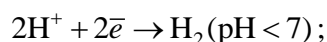
Работа лабораторной установки сопровождалась образованием мелкокристаллического осадка, состав которого был проанализирован методом рентгенофазового анализа с использованием рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-7000. Обработка рентгенограмм производилась с использованием программного обеспечения XRD 5.21.

Обсуждение результатов

Электрохимический метод очистки карьерных вод от соединений азота (нитрат- и нитрит-ионов) основан на взаимодействии компонентов гальванической пары (редокс-системы) – материалов, обладающих разным электрохимическим потенциалом. Нульвалентное железо, величина стандартного электродного потенциала E^0 которого равна $-0,44$ В, в системе выполняет роль анода, окисляется и подвергается гидролизу согласно уравнениям реакций:



Углерод, величина стандартного электродного потенциала которого равна $+0,475$ В, в исследуемой системе выполняет функции катодных участков. На катодных участках протекают процессы восстановления водорода из воды или кислорода, растворенного в воде, в соответствии с реакциями:



Для теоретического обоснования наиболее вероятных реакций восстановления нитрат-ионов в редокс-системе Fe^0 -С был выполнен термодинамический анализ процессов и определены величины стандартной свободной энергии Гиббса ΔG_{298} и константы равновесия K_p окислительно-восстановительных реакций, являющиеся критериями направленности и глубины протекания самопроизвольных процессов.

Изменение стандартной энергии Гиббса окислительно-восстановительной реакции определяется согласно формуле:

$$\Delta G^0 = -nFE^0,$$

где n – число электронов, принимающих участие в окислительно-восстановительной реакции; F – постоянная Фарадея; E^0 – значение электродвижущей силы (ЭДС) реакции, определяемой как разница стандартных электродных потенциалов окислителя и восстановителя.

Стандартная энергия Гиббса лежит в основе расчета констант равновесия реакции при любой температуре согласно формуле $\Delta G_T^0 = -RT \ln K_p$:

$$K_p = 10^{-\frac{\Delta G^0}{2,3RT}}.$$

Результаты термодинамического анализа возможных реакций восстановления нитрат-ионов гальванопарой Fe^0 -С представлены в табл.2.

Анализ полученных данных показал, что в редокс-системе Fe^0 -С восстановление нитрат-ионов возможно с образованием ряда продуктов, формирование которых зависит от pH среды и природы восстановителя (Fe^0 , Fe^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, H_2). Возможно протекание процессов восстановления:

- нитрат-ионов до нитрит-ионов в диапазоне pH среды от нейтральной (реакции 1-6) до щелочной (реакция 8);
- нитрат-ионов до ионов аммония в нейтральной среде (реакции 9, 11);
- нитрат-ионов до оксида азота (II) в нейтральной (реакции 7, 10) и кислой (реакция 13) среде;
- нитрат-ионов до газообразного азота в кислой (реакции 12, 15, 16, 18) и в нейтральной (реакции 14, 17, 19) среде.



Таблица 2

Термодинамический анализ реакций восстановления нитрат-ионов гальванопарой Fe⁰-С (стандартные условия)

№ п/п	Уравнение реакции	ΔG_{298} , Дж	K_p
1	$\text{NO}_3^- + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	-81832	10^{14}
2	$\text{NO}_3^- + \text{Fe}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	-86850	10^{15}
3	$\text{NO}_3^- + \text{Fe}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$	-90845	10^{16}
4	$\text{NO}_3^- + 2\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}$	-91038	10^{16}
5	$\text{NO}_3^- + 2\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$	-110010	10^{19}
6	$\text{NO}_3^- + 3\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}$	-118058	10^{21}
7	$2\text{NO}_3^- + 3\text{H}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NO}(\text{g}) + 6\text{H}_2\text{O} + 2\text{OH}^-$	-158646	10^{28}
8	$\text{NO}_3^- + 2\text{Fe}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$	-171191	10^{30}
9	$\text{NO}_3^- + 4\text{Fe}(\text{s}) + 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4^+ + 4\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) + 2\text{OH}^-$	-263020	10^{46}
10	$\text{NO}_3^- + 3\text{Fe}^{2+} + 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}(\text{g}) + 3\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 5\text{H}^+$	-331217	10^{58}
11	$\text{NO}_3^- + 8\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) + 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4^+ + 8\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 2\text{OH}^-$	-339680	10^{60}
12	$2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + 6\text{H}_2\text{O} + 10\text{Fe}^{3+}$	-458375	10^{80}
13	$2\text{NO}_3^- + 3\text{Fe}(\text{s}) + 8\text{H}^+ \rightarrow 2\text{NO}(\text{g}) + 3\text{Fe}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	-810600	10^{142}
14	$2\text{NO}_3^- + 10\text{Fe}^{2+} + 24\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + 10\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 18\text{H}^+$	-1380046	10^{242}
15	$2\text{NO}_3^- + 5\text{H}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + 6\text{H}_2\text{O}$	-1596110	10^{280}
16	$2\text{NO}_3^- + 5\text{Fe}(\text{s}) + 12\text{H}^+ \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + 5\text{Fe}^{2+} + 6\text{H}_2\text{O}$	-1621200	10^{285}
17	$2\text{NO}_3^- + 10\text{Fe}^{2+} + 9\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + 5\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 18\text{H}^+$	-1697531	10^{298}
18	$2\text{NO}_3^- + 15\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + 5\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 16\text{H}_2\text{O}$	-1777240	10^{312}
19	$2\text{NO}_3^- + 15\text{Fe}^{2+} + 14\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + 5\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 28\text{H}^+$	-1853572	10^{326}

Как видно из представленных данных, продукты восстановления нитрат-ионов зависят от pH среды. При этом в широком диапазоне pH реакции, протекающие с образованием газообразных продуктов, включая азот, термодинамически наиболее вероятны.

Формирование устойчивых форм соединений железа и азота может быть графически отображено в виде диаграммы зависимости pH среды и величины окислительно-восстановительного потенциала системы Eh (диаграммы Пурбе). На рис.1 представлена диаграмма Eh-pH для системы Fe-N-H₂O, построенная на основании справочных данных о величинах электродных потенциалов и pH гидратообразования (серым прямоугольником выделен изучаемый диапазон pH).

Процессы окисления железа в интервале pH 6-9 приводят к образованию ионов Fe²⁺, Fe(OH)₂⁺, а также гидроксидов железа (II) и (III). При этом продуктами восстановления нитрат-ионов являются азот и ионы аммония, что подтверждается результатами термодинамических расчетов (табл.2).

Авторами [38] изучено совместное извлечение нитрат-ионов и ионов железа (III) материалом, полученным на основе сталеплавильного шлака. Со ссылками на исследования Д.Льюиса, О.Е.Звягинцева и Ю.С.Лопатто, Т.Спино, С.Ал-лертон и Дж.Реннера показана возможность образования ряда полигидроксокомплексов железа (III), имеющих цепочечную и сферическую структуры, а также указано, что процесс поликонденсации биядерных гидроксоаквакомплексов Fe³⁺ сопровождается связыванием нитрат-ионов в структуры типа [Fe₄O₃(OH)₅]NO₃.

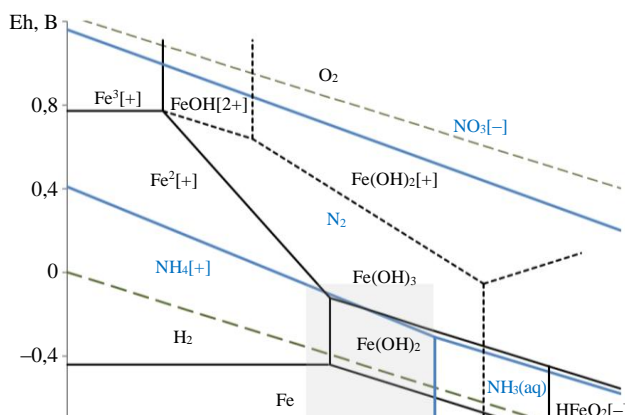


Рис.1. Диаграмма Eh-pH для системы Fe-N-H₂O, стандартные условия (гидратированная форма окислов)



Экономическая целесообразность использования редокс-системы $\text{Fe}^0\text{-C}$ для очистки много-тоннажных карьерных сточных вод от нитрат-ионов определяется скоростью протекания электрохимической реакции.

В этой связи были изучены кинетические закономерности процесса восстановления нитрат-ионов гальванопарой $\text{Fe}^0\text{-C}$. В исследовании использованы модельные растворы карьерных вод с концентрацией нитрат-ионов $88,1 \pm 18,0 \text{ мгN/дм}^3$. Зависимость изменения концентрации нитрат-ионов от времени контакта определялась при температурах 278, 283, 288 и 293 К (5-20 °С).

Для определения порядка реакции кинетические кривые построены в координатах $\ln C_0/C$ нитрат-ионов от времени, и установлено, что они с высокой степенью аппроксимации могут быть описаны уравнением первого порядка:

$$v = \frac{dC}{dt} = -kC,$$

где v – скорость реакции; t – время контакта; k – константа скорости химической реакции.

На основании полученных зависимостей определены величины констант скорости электрохимического восстановления нитрат-ионов гальванопарой $\text{Fe}^0\text{-C}$ при температурах 278, 283, 288 и 293 К. Результаты представлены на рис.2.

Константа скорости электрохимического восстановления нитрат-ионов при повышении температуры проведения процесса возрастает: $k = 0,0365 \text{ мин}^{-1}$ при $T = 278 \text{ К}$, $k = 0,0416 \text{ мин}^{-1}$ при 283 К, $k = 0,0809 \text{ мин}^{-1}$ при 288 К, $k = 0,0901 \text{ мин}^{-1}$ при 293 К.

Сравнение полученных данных с известной научно-технической информацией показало, что скорость восстановления ионов NO_3^- редокс-системой $\text{Fe}^0\text{-C}$ выше, чем в исследованиях по использованию макроразмерных частиц нульвалентного железа, где при исходной концентрации нитрат-ионов 50 мг/дм^3 и дозе железа 100 г/дм^3 при pH 2,5 константа скорости $k = 0,0052 \text{ мин}^{-1}$ [39]. Константа скорости в исследуемой системе $\text{Fe}^0\text{-C}$ выше в сравнении с данными редукции нитрат-ионов с использованием порошкообразного железа, где при pH 2,5 и 6,7 и дозе Fe^0 10 г/дм^3 k равна 0,016 и 0,0043 мин^{-1} соответственно.

На основании результатов кинетического анализа по уравнению Аррениуса рассчитано значение энергии активации E_A реакции восстановления нитрат-ионов редокс-системой $\text{Fe}^0\text{-C}$:

$$\frac{d \ln k}{dT} = \frac{E_A}{RT^2},$$

$$E_A = \frac{RT_1T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{k_2}{k_1},$$

где R – универсальная газовая постоянная; k_1 – константа скорости реакции при температуре T_1 ; k_2 – константа скорости реакции при температуре T_2 ,

$$E_A = \frac{8,3145 \cdot 278 \cdot 288}{10} \ln \frac{0,0809}{0,0365} = 53 \text{ кДж/моль}.$$

Установлено, что значение энергии активации E_A реакции восстановления нитрат-ионов редокс-системой $\text{Fe}^0\text{-C}$ равно 53 кДж/моль и находится в кинетической области; химическая реакция является лимитирующей стадией в процессе восстановления нитрат-ионов изучаемой редокс-системой.

Результаты кинетического анализа могут быть использованы для расчета времени контакта сточной воды с гальванопарой $\text{Fe}^0\text{-C}$, необходимого для изменения концентрации

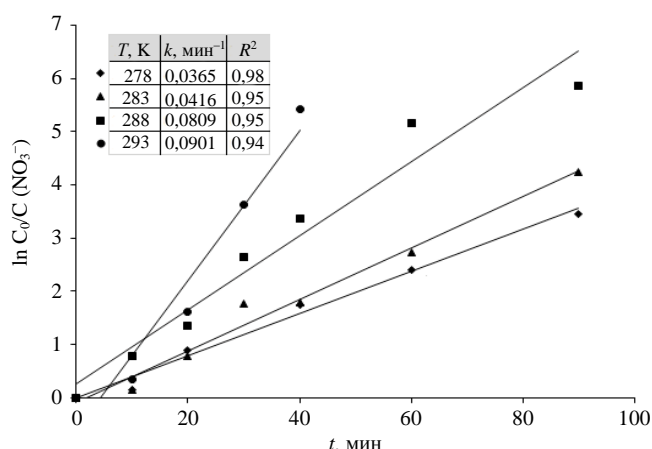


Рис.2. Кривые зависимости $\ln C_0/C$ нитрат-ионов от времени реакции
 $C_0(\text{NO}_3^-) = 88,1 \pm 18,0 \text{ мгN/дм}^3$; $C_{\text{Fe-C}} = 5 \text{ г/дм}^3$; pH 7,0;
 частота перемешиваний 250 об/мин; R^2 – величина достоверности аппроксимации



нитрат-ионов в карьерной воде до ПДК и в дальнейшем позволят обосновать выбор конструкции реактивного барьера или реактора для проведения процесса очистки.

В практике очистки многотоннажных сточных вод наиболее целесообразно проводить процесс в динамическом режиме.

Для экспериментального обоснования использования редокс-системы $\text{Fe}^0\text{-C}$ для очистки карьерных вод от нитрат-ионов в проницаемом редокс-барьере были проведены исследования на модельной установке с использованием реальной и модельной сточных вод с pH 7,0-7,6 и концентрацией нитрат-ионов от $81,8 \pm 16,0$ до $137,2 \pm 27,0$ мгN/дм³. Скорость подачи воды в установку соответствовала времени контакта, необходимому для протекания электрохимической реакции в соответствии с результатами кинетического анализа. Результаты исследований представлены в табл.3.

Таблица 3

Результаты исследований редукции нитрат-ионов гальванопарой $\text{Fe}^0\text{-C}$ в динамическом режиме ($T = 293$ К)

Объем пропущенного раствора в серии, колоночные объемы	Суммарный объем пропущенного раствора, колоночные объемы	Концентрация нитрат-ионов до очистки, мгN/дм ³	Концентрация загрязняющих веществ после редокс-системы, мгN/дм ³			Степень очистки от нитрат-ионов, %
			NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	
77	77	$81,8 \pm 16,0$	$0,4 \pm 0,1$	$0,12 \pm 0,02$	$8,9 \pm 1,9$	99,5
25	102	$125,9 \pm 25,0$	$2,7 \pm 0,5$	$0,19 \pm 0,03$	$13,2 \pm 2,8$	97,9
127	229	$105,4 \pm 21,0$	$1,2 \pm 0,2$	н.п.о*	$8,4 \pm 1,8$	98,9
95	324	$95,4 \pm 19,0$	$2,6 \pm 0,5$	$0,24 \pm 0,03$	$2,8 \pm 0,6$	97,3
53	377	$137,2 \pm 27,0$	$2,9 \pm 0,6$	$0,50 \pm 0,07$	$1,8 \pm 0,4$	97,9

*н.п.о – ниже предела обнаружения.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при прохождении через систему более 377 колоночных объемов, что соответствует более 160 дм³, эффективность очистки по нитрат-иону составляла не менее 97 % и содержание NO_3^- в фильтрате было значительно ниже ПДК_{рх} (40 мг/дм³ или 9 мгN/дм³). Визуальная оценка состояния редокс-системы показала, что железная стружка была окислена менее чем на треть.

После прохождения растворов через установку наблюдалось повышение значения pH до 7,9-8,2, что обусловлено процессами кислородной и водородной деполяризации, протекающими на катодных участках гальванопары, сопровождающимися накоплением гидроксо-групп в прикатодном пространстве.

Расчет материального баланса процесса очистки карьерных вод по азоту показывает, что основная часть нитрат-ионов восстанавливается до газообразных соединений, что согласуется с термодинамическими расчетами, а также данными, представленными в литературе [36, 40].

Для обоснования механизма процессов, протекающих в исследуемой редокс-системе, был проведен анализ образующихся при окислении железа твердых фаз. Результаты рентгенофазового анализа образца формирующейся твердой фазы представлены на рис.3.

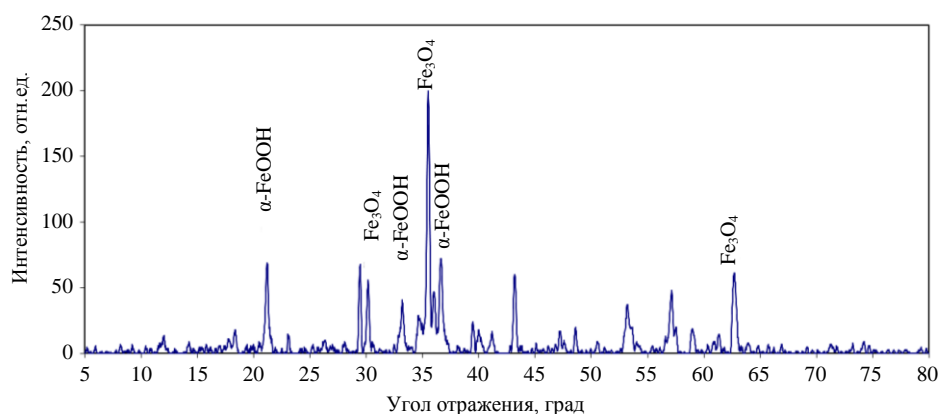


Рис.3. Дифрактограмма образца твердой фазы, образующейся при восстановлении нитрат-ионов гальванопарой $\text{Fe}^0\text{-C}$



В образце идентифицированы гетит $\alpha\text{-FeOOH}$ (межплоскостные расстояния, Å: 4,18095 (21,2°); 2,69207 (33,23°); 2,44935 (36,7°) и магнетит Fe_3O_4 (межплоскостные расстояния, Å: 2,95759 (30,2°); 2,5239 (35,5°); 2,09152 (43,2°); 1,47991 (62,7°).

Полученные данные согласуются с результатами термодинамического анализа процессов, протекающих в рассматриваемой системе, и указывают на протекание реакций в слабощелочной среде. Также на дифрактограмме (рис.3) присутствуют пики кальцита CaCO_3 (межплоскостные расстояния, Å: 3,02751 (29,5°); 1,90917 (47,6°); 1,87149 (48,6°), который может образовываться при очистке карьерных вод, содержащих гидрокарбонат-ионы.

Полученные данные в целом согласуются с исследованиями в области геохимического моделирования проницаемых реактивных барьеров [41, 42].

Заключение

Обзор практики очистки сточных вод горно-рудных предприятий показал, что поиск эффективной и экономически целесообразной технологии очистки многотоннажных карьерных стоков от соединений азота является в настоящее время актуальной задачей.

В представленном исследовании показана возможность очистки нейтральных и слабощелочных карьерных вод от нитрат-ионов гальванопарой $\text{Fe}^0\text{-C}$. На основании проведенного термодинамического анализа процессов восстановления нитрат-ионов редокс-системой $\text{Fe}^0\text{-C}$ установлены наиболее вероятные реакции и основные продукты восстановления. Показано, что в нейтральной среде возможно протекание реакций с образованием ионов аммония и газообразного азота, при этом реакции, протекающие с образованием газообразного азота, термодинамически наиболее вероятны.

Экспериментальные данные показывают высокую эффективность применения редокс-системы, состоящей из железного скрапа и углеродного материала, для снижения содержания нитрат-ионов в карьерных сточных водах. Эффективность обеспечивается наличием в редокс-системе ряда сильных восстановителей – нульвалентного железа, ионов железа (II), водорода, образующегося на катодных участках гальванопары, а также гидроксида железа (II).

Осадок, образующийся при работе редокс-системы, представляет смесь термодинамически устойчивых фаз кислородсодержащих соединений железа – гетита и магнетита.

Изучение кинетических закономерностей восстановления нитрат-ионов редокс-системой $\text{Fe}^0\text{-C}$ позволило определить порядок и константу скорости электрохимической реакции при температурах 278, 283, 288 и 293 К. Скорость процесса описывается уравнением первого порядка, константа скорости k возрастает при повышении температуры реакционной смеси: $k = 0,0365 \text{ мин}^{-1}$ при $T = 278 \text{ К}$, $k = 0,0416 \text{ мин}^{-1}$ при 283 К, $k = 0,0809 \text{ мин}^{-1}$ при 288 К, $k = 0,0901 \text{ мин}^{-1}$ при 293 К. Значение энергии активации E_a процесса восстановления нитрат-ионов редокс-системой $\text{Fe}^0\text{-C}$ находится в кинетической области и равно 53 кДж/моль.

Полученные в представленной работе результаты могут быть использованы при разработке технических решений для очистки карьерных сточных вод горно-рудных предприятий.

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику лаборатории инженерно-экологических исследований ПГНИУ канд. геол.-минерал. наук П.А.Белкину за предоставленные пробы карьерных сточных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abascal E., Gómez-Coma L., Ortiz I., Ortiz A. Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 810. № 152233. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.152233](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152233)
2. Garcia-Zavala C., Ordens C.M., Pagliero L. et al. An approach for prioritising environmental, social and governance (ESG) water-related risks for the mining industry: The case of Chile // The Extractive Industries and Society. 2023. Vol. 14. № 101259. DOI: [10.1016/j.exis.2023.101259](https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101259)
3. Jie Hu, Xing Chen, Yeyu Chen et al. Nitrate sources and transformations in surface water of a mining area due to intensive mining activities: Emphasis on effects on distinct subsidence waters // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 298. № 113451. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.113451](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113451)
4. Lai F., Beylot A., Navarro R. et al. The environmental performance of mining operations: Comparison of alternative mining solutions in a life cycle perspective // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 315. № 128030. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.128030](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128030)



5. Oluwoye I., Dlugogorski B.Z., Gore J. et al. Atmospheric emission of NO_x from mining explosives: A critical review // *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 167. P. 81-96. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2017.08.006](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.006)
6. Ferreira H., Mariangela Garcia Praça Leite. A Life Cycle Assessment study of iron ore mining // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 108. Part A. P. 1081-1091. DOI: [10.1016/j.jclepro.2015.05.140](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.140)
7. Akinawo S.O. Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies // *Environmental Challenges*. 2023. Vol. 12. № 100733. DOI: [10.1016/j.envc.2023.100733](https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733)
8. Kazapoe R.W., Addai M.O., Amuah E.E.Y., Dankwa P. Characterization of groundwater in southwest Ghana: Implications for sustainable agriculture and safe water supply in a mining-dominated zone // *Environmental and Sustainability Indicators*. 2024. Vol. 22. № 100341. DOI: [10.1016/j.indic.2024.100341](https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100341)
9. Gbedzi D.D., Ofosu E.A., Mortey E.M. et al. Impact of mining on land use land cover change and water quality in the Asutifi North District of Ghana, West Africa // *Environmental Challenges*. 2022. Vol. 6. № 100441. DOI: [10.1016/j.envc.2022.100441](https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100441)
10. Sunitha V., Sudharshan Reddy Y., Suvarna B., Muralidhara Reddy B. Human health risk assessment (HHRA) of fluoride and nitrate using pollution index of groundwater (PIG) in and around hard rock terrain of Cuddapah, A.P. South India // *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*. 2022. Vol. 4. P. 113-123. DOI: [10.1016/j.enccoco.2021.12.002](https://doi.org/10.1016/j.enccoco.2021.12.002)
11. Lei King, Qiang Wang, Lili Xia et al. Environmental exposure to perchlorate, nitrate and thiocyanate, and thyroid function in Chinese adults: A community-based cross-sectional study // *Environment International*. 2023. Vol. 171. № 107713. DOI: [10.1016/j.envint.2022.107713](https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107713)
12. Kom K.P., Gurugnanam B., Bairavi S. Non-carcinogenic health risk assessment of nitrate and fluoride contamination in the groundwater of Noyyal basin, India // *Geodesy and Geodynamics*. 2022. Vol. 13. Iss. 6. P. 619-631. DOI: [10.1016/j.geog.2022.04.003](https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.04.003)
13. Stayner L.T., Almberg K., Jones R. et al. Atrazine and nitrate in drinking water and the risk of preterm delivery and low birth weight in four Midwestern states // *Environmental Research*. 2017. Vol. 152. P. 294-303. DOI: [10.1016/j.envres.2016.10.022](https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.10.022)
14. Hao Su, Yukun Deng, Jiejun Zhao et al. Excellent, steady and economical nitrogen removal in highly variable mining wastewater via three-stage partial-denitrification/partial-nitrification/anammox system: A pilot-scale demonstration // *Journal of Water Process Engineering*. 2023. Vol. 54. № 103896. DOI: [10.1016/j.jwpe.2023.103896](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103896)
15. Паишевич М.А., Коротаева А.Э. Оценка эффективности процесса фитоэкстракции при очистке карьерных сточных вод // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022. № 6-1. С. 349-360. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_61_0_349](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_349)
16. Ting W.H.T., Tan I.A.W., Salleh S.F., Wahab N.A. Ammoniacal nitrogen removal by *Eichhornia crassipes*-based phytoremediation: process optimization using response surface methodology // *Applied Water Science*. 2020. Vol. 10. Iss. 3. № 80. DOI: [10.1007/s13201-020-1163-x](https://doi.org/10.1007/s13201-020-1163-x)
17. Rampuria A., Gupta A.B., Brighu U. Nitrogen transformation processes and mass balance in deep constructed wetlands treating sewage, exploring the anammox contribution // *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 314. № 123737. DOI: [10.1016/j.biortech.2020.123737](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123737)
18. Mietto A., Politeo M., Breschigliaro S., Borin M. Temperature influence on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system in Northern Italy // *Ecological Engineering*. 2015. Vol. 75. P. 291-302. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2014.11.027](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.027)
19. Hube S., Zaout T., Ögmundarson Ó. et al. Constructed wetlands with recycled concrete for wastewater treatment in cold climate: Performance and life cycle assessment // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 904. № 166778. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.166778](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166778)
20. Ying-hua Li, Hai-bo Li, Xin-yang Xu et al. Fate of nitrogen in subsurface infiltration system for treating secondary effluent // *Water Science and Engineering*. 2017. Vol. 10. Iss. 3. P. 217-224. DOI: [10.1016/j.wse.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.10.002)
21. Xuli Zhu, Liang Jiao, Xuan Wu et al. Ecosystem health assessment and comparison of natural and constructed wetlands in the arid zone of northwest China // *Ecological Indicators*. 2023. Vol. 154. № 110576. DOI: [10.1016/j.ecolind.2023.110576](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110576)
22. Mo Wang, Dong Qing Zhang, Jian Wen Dong, Soon Keat Tan. Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate – A review // *Journal of Environmental Sciences*. 2017. Vol. 57. P. 293-311. DOI: [10.1016/j.jes.2016.12.019](https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.019)
23. de la Varga D., Soto M., Arias C.A. et al. Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment and Removal of Nutrients // *Technologies for the Treatment and Recovery of Nutrients from Industrial Wastewater*. IGI Global, 2017. P. 202-230. DOI: [10.4018/978-1-5225-1037-6.ch008](https://doi.org/10.4018/978-1-5225-1037-6.ch008)
24. Guerrero-Brotons M., Álvarez-Rogel J., Arce M.I., Gómez R. Addressing the C/N imbalance in the treatment of irrigated agricultural water by using a hybrid constructed wetland at field-scale // *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 348. № 119329. DOI: [10.1016/j.jenvman.2023.119329](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119329)
25. Hellman M., Hubalek V., Juhanson J. et al. Substrate type determines microbial activity and community composition in bioreactors for nitrate removal by denitrification at low temperature // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 755. Part 1. № 143023. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143023](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143023)
26. Goyburo-Chávez C., Mendez-Ruiz J.I., Jiménez-Oyola S. et al. Pilot-scale reverse osmosis treatment of gold cyanidation effluent for the removal of cyanide, heavy metal(loid)s, and ionic species // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024. Vol. 9. № 100688. DOI: [10.1016/j.cscee.2024.100688](https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100688)
27. Samaei S.M., Gato-Trinidad S., Altaee A. Performance evaluation of reverse osmosis process in the post-treatment of mining wastewaters: Case study of Costerfield mining operations, Victoria, Australia // *Journal of Water Process Engineering*. 2020. Vol. 34. № 101116. DOI: [10.1016/j.jwpe.2019.101116](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101116)
28. Grossi L.B., Magalhães N.C., Araújo B.M. et al. Water conservation in mining industry by integrating pressure-oriented membrane processes for nitrogen-contaminated wastewater treatment: Bench and pilot-scale studies // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9. Iss. 1. № 104779. DOI: [10.1016/j.jece.2020.104779](https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104779)
29. Bing Wang, Chunyang Gao, Xingchun Li et al. Remediation of groundwater pollution by in situ reactive zone: A review // *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 168. P. 858-871. DOI: [10.1016/j.psep.2022.10.046](https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.046)
30. Sakr M., El Agamawi H., Klammler H., Mohamed M.M. A review on the use of permeable reactive barriers as an effective technique for groundwater remediation // *Groundwater for Sustainable Development*. 2023. Vol. 21. № 100914. DOI: [10.1016/j.gsd.2023.100914](https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100914)
31. Yangmin Ren, Mingcan Cui, Yongyue Zhou et al. Zero-valent iron based materials selection for permeable reactive barrier using machine learning // *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Vol. 453. № 131349. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2023.131349](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131349)
32. Singh R., Chakma S., Birke V. Performance of field-scale permeable reactive barriers: An overview on potentials and possible implications for in-situ groundwater remediation applications // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 858. Part 1. № 158838. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.158838](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158838)



33. Kumarasinghe U., Kawamoto K., Saito T. *et al.* Evaluation of applicability of filling materials in permeable reactive barrier (PRB) system to remediate groundwater contaminated with Cd and Pb at open solid waste dump sites // *Process Safety and Environmental Protection*. 2018. Vol. 120. P. 118-127. DOI: [10.1016/j.psep.2018.09.003](https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.003)
34. Suzuki T., Moribe M., Oyama Y., Niinae M. Mechanism of nitrate reduction by zero-valent iron: Equilibrium and kinetics studies // *Chemical Engineering Journal*. 2012. Vol. 183. P. 271-277. DOI: [10.1016/j.cej.2011.12.074](https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.074)
35. Yiping Zhang, Douglas G.B., Long Pu *et al.* Zero-valent iron-facilitated reduction of nitrate: Chemical kinetics and reaction pathways // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 598. P. 1140-1150. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.04.071](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.071)
36. Marcos-Hernández M., Cerrón-Calle G.A., Ge Y. *et al.* Effect of surface functionalization of Fe₃O₄ nano-enabled electrodes on the electrochemical reduction of nitrate // *Separation and Purification Technology*. 2022. Vol. 282. Part A. № 119771. DOI: [10.1016/j.seppur.2021.119771](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119771)
37. Глушанкова И.С., Бессонова Е.Н., Блинов С.М. и др. Очистка карьерных вод горнорудных предприятий от азотсодержащих соединений с использованием редокс-барьеров // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021. № 10. С. 58-68. DOI: [10.25018/0236-1493-2021-10-0-58](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-10-0-58)
38. Панасюгин А.С., Теран А.И., Григорьев С.В. и др. Совместное извлечение нитрат-ионов и ионов железа фильтрующим материалом, полученным на основе сталеплавильного шлака // *Литье и металлургия*. 2018. № 4 (93). С. 32-37. DOI: [10.21122/1683-6065-2018-4-32-37](https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-32-37)
39. Jinghui Zhang, Zhiwei Hao, Zhen Zhang *et al.* Kinetics of nitrate reductive denitrification by nanoscale zero-valent iron // *Process Safety and Environmental Protection*. 2010. Vol. 88. Iss. 6. P. 439-445. DOI: [10.1016/j.psep.2010.06.002](https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.06.002)
40. Fang Zhao, Jia Xin, Mengjiao Yuan *et al.* A critical review of existing mechanisms and strategies to enhance N₂ selectivity in groundwater nitrate reduction // *Water Research*. 2022. Vol. 209. № 117889. DOI: [10.1016/j.watres.2021.117889](https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117889)
41. Zhenwei Liu, Shangshang Dong, Di Zou *et al.* Electrochemically mediated nitrate reduction on nanoconfined zerovalent iron: Properties and mechanism // *Water Research*. 2020. Vol. 173. № 115596. DOI: [10.1016/j.watres.2020.115596](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115596)
42. Bartzas G., Komnitsas K. Solid phase studies and geochemical modelling of low-cost permeable reactive barriers // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 183. Iss. 1-3. P. 301-308. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2010.07.024](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.024)

Авторы: Елена Николаевна Бессонова, аспирант, ассистент (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), el-81@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7909-2013>, Ирина Самуиловна Глушанкова, д-р техн. наук, профессор (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-3376-8000>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Метод оптимизации, основанный на концепции удельной механической энергии, для повышения производительности бурения: пример практического применения

С.Хошро, С.Ш.Табатабаи Моради✉

Технологический университет Саханд, Тебриз, Иран

Как цитировать эту статью: Хошро С., Табатабаи Моради С.Ш. Метод оптимизации, основанный на концепции удельной механической энергии, для повышения производительности бурения: пример практического применения // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 51-66. [EDN YBYKWI](#)

Аннотация

В течение многих лет в буровой промышленности предпринимались попытки повысить производительность бурения и снизить затраты. Производительность бурения можно оценить, сравнив приложенную энергию, т.е. удельную механическую энергию, с прочностью горной породы. Удельная механическая энергия определяется как энергия, необходимая для разрушения единицы объема горной породы. С годами эта концепция совершенствовалась, и исследователи предлагали различные модели. Удельная механическая энергия напрямую влияет на производительность бурения, поскольку избыточная энергия может привести к вибрации бурильной колонны и износу долота. В исследовании создана база данных путем сбора информации о бурении и материалах каротажа свиты Асмари на одном из нефтяных месторождений Ирана. Рассмотрены различные формы удельной энергии для разработки соответствующей модели на основе условий эксплуатации и буримого пласта. Кроме того, рассчитана ограниченная прочность породы на сжатие в изучаемой скважине. Исследования показали, что разработанная модель удельной энергии выдает реалистичные значения энергии, поскольку включает все соответствующие параметры, с результативным значением, близким к прочности горной породы. На основе сравнения удельной механической энергии с ограниченной прочностью на сжатие были определены оптимальные буровые параметры: диапазон нагрузки на долото от 22,24 до 44,48 кН, диапазон расхода бурового раствора от 0,027 до 0,029 м³/с, диапазон крутящего момента от 2522 до 3091 Н·м и диапазон скорости вращения от 160 до 180 об/мин. Также в исследуемой скважине была обнаружена зона неэффективного бурения, где приложенная энергия, избыточная по сравнению с прочностью породы, привела к повреждению бурового долота и значительному снижению скорости проходки. Результаты подчеркнули важность оценки производительности бурения в процессе работы, когда экономически и технически осуществимое решение можно принять путем сравнения поверхностной энергии на входе с прочностью породы.

Ключевые слова

механическая удельная энергия; оптимизация бурения; производительность бурения; предел прочности на сжатие; нагрузка на долото; долото

Поступила: 02.11.2024

Принята: 02.07.2025

Онлайн: 22.10.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Целью оптимизации бурения является достижение баланса между приложенной поверхностной энергией и энергией, требуемой для разрушения горных пород, поскольку часть приложенной энергии с поверхности обычно теряется из-за вибраций и колебаний в бурильной колонне и не вносит вклад в процесс разрушения горных пород. Поэтому были проведены различные исследования и эксперименты для минимизации нежелательных форм приложенной энергии и установления баланса между приложенной и требуемой энергиями [1, 2].

Впервые анализ применяемой в процессе бурения поверхностной энергии провел Р.Тил в 1965 г. В исследовании была введена механическая удельная энергия (МУЭ) как энергия, необходимая для разрушения и бурения единицы объема породы. Эта первоначальная модель включала два компонента – осевую силу, связанную с нагрузкой бурильной колонны на долото, и крутящий момент, создаваемый вращением бурильной колонны [3]. В последующих исследованиях



первоначальная модель была оптимизирована и изменена с учетом различных эксплуатационных и геологических условий в процессе бурения [4]. В современных работах, посвященных МУЭ, в первоначальную модель Р.Тила включают влияние различных параметров, таких как механические свойства породы, эксплуатационные параметры и характеристики бурового раствора [5-7].

В 1960-2000 гг. в ранних моделях МУЭ, таких как модели Тила и Рабии, учитывались только влияние поверхностных параметров и факторы, связанные с буровой установкой. В этот период, как правило, не принималось во внимание влияние гидравлических параметров бурового раствора и характеристик пласта. Эти модели были в первую очередь направлены на упрощение анализа движения бурильной колонны и игнорировали износ долота или реологические свойства бурового раствора. Современные исследования показали значимость реологических свойств бурового раствора для производительности бурения [8, 9].

Все изменило влияние технологического прогресса и усложнение буровых работ после 2000-х гг. [5, 10, 11]. В начале 2000-х гг. исследователи пытались улучшить модели МУЭ и изучить влияние дополнительных факторов. Например, модели, предложенные Дюпри и Кедерицем, применяли концепции механической производительности и предела прочности породы на сжатие (ППС), что является значительным достижением в развитии моделей МУЭ. Однако последующие исследования показали, что ППС породы не может полностью отражать влияние ее свойств на удельную энергию. На величину МУЭ влияют и другие параметры, такие как литологический состав, прочность на сдвиг, твердость и пористость [5, 12, 13].

С конца 2000-х гг. исследователи сосредоточились на интеграции в модели МУЭ гидравлических буровых параметров. Например, гидравлические параметры считались значимым фактором в моделях, предложенных М.Арментой и К.Моханом. Интеграция гидравлических параметров позволила получить более подробную информацию о характеристиках бурового раствора и их влиянии на МУЭ. Это не только повысило точность моделей, но и улучшило их прогностическую способность и адаптивность к различным буровым условиям [14-16]. В более современных моделях [17-19] учитывалось влияние почти всех поверхностных параметров, связанных с гидравликой буровой установки и бурового раствора. Кроме того, эти модели учитывали влияние наклона скважины и, в случае применения забойных двигателей, влияние параметров двигателя. Забойные двигатели показали оптимальную производительность бурения в вертикальных и наклонно-направленных скважинах [20, 21].

Если МУЭ чрезмерно высока, это может привести к вибрации бурильной колонны, разрушению долота, снижению скорости проходки и в конечном итоге к износу и усталости оборудования [22]. Согласно предыдущим исследованиям, минимальная прилагаемая МУЭ должна быть равна ППС породы [3, 23, 24]. В некоторых исследованиях оптимизации бурения использовалась концепция МУЭ. Ф.Е.Дюпри и др. [11] обнаружили, что если отношение МУЭ к объему породы остается постоянным или относительно постоянным, буровое долото работает с максимальной производительностью. Авторы также продемонстрировали, что если МУЭ остается стабильной при увеличении нагрузки на долото, производительность долота эффективна. Однако если МУЭ непостоянна и увеличивается, это указывает на то, что долото неэффективно и бурение отклонилось от эффективной зоны.

М.Армента [12] продемонстрировал, что бурение неэффективно, когда удельная энергия увеличивается, а скорость проходки уменьшается. Согласно его выводам, удельная энергия увеличивается, когда нагрузка на долото превышает определенный порог. Он также определил границу между эффективными и неэффективными буровыми работами.

Н.Рафатян и др. [13] экспериментально исследовали изменение МУЭ во время бурения долотами с синтетическими алмазами. Результаты показали, что даже небольшой рост ограничивающего давления значительно увеличивает энергию, необходимую для разрушения как проницаемых, так и непроницаемых пород, что потенциально снижает производительность бурения. Исследование показало, что рост МУЭ гораздо более выражен в диапазоне ограничивающего давления 0-1,034 МПа по сравнению с диапазоном 1,034-6,55 МПа.

И.Д.Томсон и Р.Матур [14] улучшили производительность в проекте глубоководного бурения, отслеживая и анализируя данные МУЭ поверхности и скважины и объединяя их с параметрами



бурения с применением забойного двигателя. Поскольку бурильная колонна часто испытывает вибрации, когда долото перемещается из мягкого пласта в пласт более сложного строения, для прогнозирования этих переходных зон авторы использовали буровые данные в реальном времени и мониторинг МУЭ. Таким образом буровая бригада могла быстро ввести данные для корректировки параметров и эффективного бурения.

С.Хаммоутен [15] оптимизировал буровые операции, сравнив МУЭ и прочность на одноосное сжатие (ПОС). Он вычислил, что коэффициент механической производительности для долот с синтетическими алмазами составляет от 0,26 до 0,64. Этот коэффициент производительности использовался для оптимизации конструкции долота и улучшения процесса разрушения горных пород, гарантируя, что такие факторы, как внезапные подземные изменения пласта, неоднородность пласта и вибрации, не будут угрожать производительности бурения.

Б.М.Мохаммади и др. [19] исследовали влияние геомеханических параметров на изменения удельной энергии на одном из нефтяных месторождений на юго-западе Ирана. Сначала они собрали геологические, каротажные, буровые, керновые и поровые данные из разных скважин для построения одномерной геомеханической модели. Затем с помощью многомерной регрессионной модели для установления связи между удельной энергией и влияющими на нее параметрами исследователи обнаружили, что такие параметры, как ПОС, угол внутреннего трения и скорость потока, входят в число наиболее значимых факторов, влияющих на удельную энергию.

С.Менанд и К.Миллс [25] обнаружили, что по МУЭ нельзя оценить эффективность бурения. Они представили новый метод, объединяющий МУЭ с показателем энергии бурения, чтобы лучше определить причины неэффективности бурения. Предметные исследования показали, что отношение МУЭ к энергии бурения может помочь обнаружить конкретные проблемы и неэффективное бурение, например скачкообразную подачу и износ долота.

В.Рамба и др. [26] провели исследование оптимизации буровых параметров и увеличения скорости проходки в разведочной скважине. Контролируя построенные графики МУЭ и скорости проходки, они определили зоны эффективного и неэффективного бурения. Аналогичным образом, изучая графики удельной энергии и скорости проходки, ученые рассчитали оптимальный требуемый расход бурового раствора. Внедрив оптимизированные буровые параметры, они добились снижения приложенной энергии на 75 %.

Фактором, влияющим на изменение значения МУЭ, является конструкция долота. К.Сюн и др. [16] исследовали влияние глубины, угла и скорости резания жала поликристаллического алмазного долота на изменения МУЭ. Результаты показали, что МУЭ значительно уменьшается с увеличением глубины резания, а скорость резания оказывает незначительное влияние на значение МУЭ.

Как видно, в разных исследованиях для оптимизации бурения используются различные модели МУЭ с определенными изменениями, и универсальной модели МУЭ не существует. В данном исследовании собраны геологические, каротажные и буровые данные из скважины континентального месторождения, и различные модели МУЭ исследованы на основе фактических данных. Предложено измененное уравнение для изучаемого месторождения. Измененная модель МУЭ применялась для обнаружения зон неэффективного бурения, с этого времени можно вносить необходимые изменения в управляемые буровые параметры для оптимизации буровых операций.

Методы

Целью буровых работ является разрушение и фрагментация горных пород подземных пластов. В ходе этого процесса за счет приложения энергии с поверхности происходят преобразование единицы объема горной породы в более мелкие куски разного размера и разрушение горной породы. Поэтому простым определением МУЭ можно считать отношение подводимой энергии к единице объема разрушенной горной породы [3, 13]:

$$\text{МУЭ} = \frac{\text{Входящая энергия}}{\text{Объем разрушенной породы}}.$$

МУЭ можно определить как энергию, необходимую для бурения единицы объема породы [3]. Приложенная поверхностная энергия может включать осевые, гидравлические и крутящие компоненты.



Принимая во внимание эти компоненты, определение МУЭ можно выразить более полно следующим образом [2, 18]:

$$\text{МУЭ} = \frac{\text{Работа нагрузки на долото} + \text{Работа вращательного долота} + \text{Работа гидравлической силы жидкости}}{\text{Объем выбуренной породы}}. \quad (1)$$

Уравнение (1) применялось в измененном виде в различных моделях с введением разных эксплуатационных и геологических условий бурового процесса. Первая модель была представлена Р.Тилом (1965) как энергия, необходимая для разрушения, удаления и бурения единицы объема породы. Она состояла из двух частей – приложенной осевой и вращательной энергий и имела следующий вид [3]:

$$\text{МУЭ} = e_t + e_r,$$

где e_t – приложенная осевая энергия; e_r – вращательная энергия.

Рассмотрев эти типы энергий, Р.Тил представил модель следующим образом:

$$\text{МУЭ} = \frac{\text{ННД}}{\text{Пл}_д} + \frac{120\pi(\text{СВ})(\text{КМ})}{(\text{Пл}_д)(\text{СП})}, \quad (2)$$

где $\text{Пл}_д$ – площадь долота; СВ – скорость вращения; КМ – крутящий момент; СП – скорость проходки; ННД – нагрузка на долото.

Пессье и Фир провели эксперименты на моделируемой буровой установке и рассмотрели крутящий момент на долоте в качестве основного входного параметра для расчета МУЭ. Исследователи отметили, что крутящий момент на поверхности, зарегистрированный во время бурения, не соответствует фактическому крутящему моменту на долоте. Поэтому они ввели коэффициент трения скольжения, характерный для долота, как функцию отношения крутящего момента на поверхности, приложенного к нагрузке на долото, и диаметра долота. Коэффициент трения скольжения может оценить крутящий момент на долоте, когда измерения крутящего момента под поверхностью недоступны [24]. Учитывая коэффициент трения скольжения, МУЭ можно рассчитать следующим образом:

$$\text{МУЭ} = \frac{\text{ННД}}{\text{Пл}_д} + \frac{13,33\mu_d(\text{СВ})(\text{ННД})}{\text{дм}_д \text{СП}}, \quad (3)$$

где μ_d – коэффициент трения скольжения долота; $\text{дм}_д$ – диаметр долота, согласно исследованию М.Арменты [12], $\text{дм}_д = 0,25$ для шарошечных долот, $\text{дм}_д = 0,5$ для долот, армированных поликристаллическими алмазами.

Ф.Дюпри и др. [27] подчеркнули важность мониторинга МУЭ для оптимизации бурового процесса. На основе изучения производительности долота по полевым данным исследователи предположили максимальную производительность долота 40 % при среднем значении 35 % независимо от типа долота и внесли изменения в модель МУЭ. Результаты показали, что значения МУЭ из следующей формулы примерно равны ограниченной прочности породы на сжатие:

$$\text{МУЭ} = 0,35 \left(\frac{\text{ННД}}{\text{Пл}_д} + \frac{120\pi(\text{СВ})(\text{КМ})}{(\text{Пл}_д)(\text{СП})} \right). \quad (4)$$

М.Армента [12], рассматривая влияние гидравлической энергии бурового раствора в модели МУЭ, ввел понятие удельной энергии бурения:

$$\text{УЭБ} = \frac{\text{ННД}}{\text{Пл}_д} + \frac{120\pi(\text{СВ})(\text{КМ})}{\text{Пл}_д(\text{СП})} - \frac{1980000\lambda(\text{ГМ}_д)}{\text{Пл}_д(\text{СП})}, \quad (5)$$

где λ – гидравлический коэффициент долота, зависящий от диаметра долота; $\text{ГМ}_д$ – гидравлическая мощность долота.

Коэффициент гидравлической мощности долота можно определить по размеру долота, используемого во время бурения [12]. В средних и мягких породах гидравлическая энергия бурового раствора



может ослабить пласт до того, как долото коснется его [18]. К.Мохан и др. [2, 18], рассматривая воздействие гидравлической силы бурового раствора, ввели понятие удельной гидромеханической энергии (УГМЭ) как силы действующей на долото, равной и противоположной воздействию жидкости на пласт:

$$\text{УГМЭ} = \frac{\text{ННД}_э}{\text{Пл}_д} + \frac{120\pi(\text{СВ})(\text{КМ}) + 1154\eta(\Delta\text{Д}_д)(\text{Р})}{(\text{Пл}_д)(\text{СП})},$$

где ННД_э – эффективная нагрузка на долото; ΔД_д – перепад давления на долоте; η – коэффициент снижения энергии; Р – расход бурового раствора.

О.Олорунтоби и др. [7] раскритиковали модель УГМЭ и подчеркнули отсутствие нормального градиента порового давления и эквивалентной циркуляционной плотности бурового раствора (ПБР) в расчете МУЭ. В связи с этим они предложили расширить модель УГМЭ следующим образом:

$$\text{УГМЭ} = \left(\frac{\text{ННД}}{\text{Пл}_д} + \frac{120\pi(\text{СВ})(\text{КМ})}{(\text{Пл}_д)(\text{СП})} + \frac{0,10628(\text{ПБР})(\text{Р}^3) \left(1 - \left(\frac{\text{МЛП}}{\text{СПП}} \right)^{-0,122} \right)}{(\text{Пл}_д)(\text{СП})(\text{СПП}^2)} \right) \left(\frac{\text{НГПД}}{\text{ЭЦП}} \right), \quad (6)$$

где НГПД – нормальный градиент порового давления; ЭЦП – эквивалентная циркуляционная плотность бурового раствора; ПБР – плотность бурового раствора; СПП – суммарная площадь потока сопел; МЛП – межлопастная площадь как пространство, где скапливается буровой шлам.

Основное применение концепции МУЭ – оптимизация энергии бурения с точки зрения приложенной поверхностной энергии [4]. Производительность буровых работ можно воспроизвести путем изучения отношения приложенной МУЭ к ППС [10, 23, 24]. Приложение избыточной энергии может привести к многочисленным проблемам, включая вибрации в бурильной колонне, повышенный износ долота и снижение скорости проходки. Поэтому баланс приложенной МУЭ и ППС породы имеет решающее значение для обеспечения оптимальной производительности бурения [28]. Исследования показали, что использование ПОС вместо ППС породы не дает верных результатов. Если бурение рассматривается в атмосферных условиях, значение МУЭ коррелирует с ПОС породы. Однако в реальных условиях бурения значение МУЭ приближается к ППС породы и, как правило, намного выше, чем ПОС породы. Поэтому оптимальные условия для буровых работ достигаются, когда вся энергия идет на разрушение горной породы, без заметных потерь энергии или неэффективного бурения [4, 17, 29], а прочность горной породы служит эталонным параметром для расчета энергии, затраченной на бурение [18, 19, 30]. Исходя из этого, механическую производительность буровых работ можно представить следующим образом:

$$\text{Пр}_м = \left(\frac{\text{ППС}}{\text{МУЭ}} \right) \cdot 100.$$

Обычно, когда МУЭ приближается к пределу прочности породы на сжатие, механическая производительность увеличивается [23, 24, 27]. Одна из широко распространенных формул в механике горных пород для расчета ППС выведена на основе принципа Терцаги и критерия Мора – Кулона [10]:

$$\text{ППС} = \text{ПОС} + \Delta\text{Д} + \left(2\Delta\text{Д} \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right), \quad (7)$$

где φ – угол внутреннего трения породы; ΔД – дифференциальное давление между давлением бурового раствора и поровым давлением.

Для расчета ПОС на основе литологического состава пород предлагаются различные эмпирические формулы. В табл.1 показано несколько общих формул расчета ПОС для карбонатных, известняковых и доломитовых пород.



Таблица 1

Уравнения для расчета ПОС горных пород [31-33]

Литологический состав пласта	Исследователи	Уравнение	Требуемые параметры	
Карбонат	Режевский, Новик (1971)	$ПОС = 276(1 - 3\varnothing)^2$	Пористость	
Известняк	Милитцер, Столл (1973)	$ПОС = 2,45V_p^{1,82}$	Скорость продольных волн	
	Голубев, Рабинович (1976)	$\log ПОС = 0,358V_p + 0,283$		
Карбонат	Сарда и др. (1993)	$ПОС = 258e^{-9\varnothing}$	Пористость	
	Фаркухар и др. (1994)	$ПОС = 174,8e^{-0,093\varnothing}$		
Известняк, доломит, мергель, песчаник, гематит, туф, диабаз	Кристарас и др. (1997)	$ПОС = 9,95V_p^{1,21}$	Скорость продольных волн	
Карбонат	Эдиманн и др. (1998)	$ПОС = -3,255\varnothing + 129,54$	Пористость	
	Ясар и др. (2004)	$ПОС = 31,54(V_p) - 63,7$	Скорость продольных волн	
Известняк, доломит	Чантдун и др. (2006)	$ПОС = \frac{\left(\frac{7682}{\Delta t}\right)^{1,82}}{145}$	Время распространения продольных волн	
Карбонат		$ПОС = \frac{10^{2,44 + \frac{109,14}{\Delta t}}}{145}$		
Известняк		$ПОС = 13,8E_d^{0,51}$	Динамический модуль Юнга	
Доломит		$ПОС = 25,1E_d^{0,34}$		
Карбонат		$ПОС = 143e^{-6,95\varnothing}$	Пористость	
		$ПОС = 135e^{-4,8\varnothing}$		
Известняк		Амин и др. (2007)		$ПОС = 89,432e^{-0,0546\varnothing}$
Доломит				$ПОС = 62,567e^{-0,0203\varnothing}$
Карбонатная порода с прослоями сланца	Афсари и др. (2010)	$ПОС = 2,28 + 4,1089E_s$	Статический модуль Юнга	
Карбонат	Амани и др. (2013)	$ПОС = 570,808e^{-0,031\Delta t}$	Время распространения продольных волн	
		$ПОС = 194,4 - 0,6072\Delta t$ $ПОС = 194,4 - 646,1\varnothing$ $ПОС = 194,4 - 0,01644\Delta t^2$ $ПОС = 194,4 + 8,792\varnothing\Delta t$	Время распространения продольных волн и пористость	
Карбонат		Наджиби и др. (2015)	$ПОС = 11,05E_s^{0,66}$	Статический модуль Юнга
			$ПОС = 12,8\left(\frac{E_d}{10}\right)^{1,32}$	Динамический модуль Юнга
	$ПОС = 3,67V_p^{2,14}$		Скорость продольных волн	

Как показано в табл.1, модуль Юнга требуется для расчета ПОС во многих уравнениях. Кроме того, согласно уравнению (7), для расчета ППС требуется угол внутреннего трения. В табл.2 представлены общие эмпирические соотношения для расчета модуля Юнга и угла внутреннего трения [34-36].



Таблица 2

Эмпирические уравнения для расчета модуля Юнга [34-36] и угла внутреннего трения [37-39]

Литологический состав пласта	Исследователи	Уравнение	Требуемые параметры
Карбонат	Эйсса и др. (1988)	Расчет модуля Юнга $E_s = 0,74E_d - 0,82$	Динамический модуль Юнга
		$\log E_s = 0,02 + 0,77 \log \rho E_d$	Динамический модуль Юнга, плотность
	Эдиманн и др. (1998)	$E_s = -0,7831\varnothing + 38,878$	Пористость
Доломит	Амин и др. (2007)	$E_s = 92,612e^{-0,0475\varnothing}$	
Известняк		$E_s = 86,094e^{-0,0534\varnothing}$	
Общий	Фьяер и др. (2008)	$E_d = \rho V_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right)$	Плотность, скорость продольных волн, скорость поперечных волн
Карбонат	Афсари и др. (2010)	$E_s = 0,4145E_d - 1,0593$	Динамический модуль Юнга
Асмари и Сарвак	Наджиби и др. (2015)	$E_s = 0,014E_d^{1,96}$	
		$E_s = 0,169V_p^{3,324}$	Скорость продольных волн
Известняк	Эдиманн (1998)	Расчет угла внутреннего трения $\varphi = -0,7779\varnothing + 41,929$	Пористость
Карбонат	Арчер и др. (2012)	$\varphi = 26,5 - 37,4(1 - \varnothing - V_{sh}) + 62,1(1 - \varnothing - V_{sh})^2$	Пористость, объем сланца

В рамках настоящего исследования сначала были собраны и обработаны данные, а также разработана оптимальная модель МУЭ для изучаемого месторождения, затем определены зоны неэффективного бурения путем сравнения МУЭ с ППС породы. Кроме того, проанализированы соотношения между различными буровыми параметрами для формирования выводов об оптимизации управляемых переменных бурения.

Необходимые буровые данные были собраны и обработаны на первом этапе. Затем буровые данные были использованы в оптимальной модели МУЭ. Кроме того, данные, полученные из петрофизических журналов, были извлечены и обработаны с помощью программного обеспечения Geolog. После внесения необходимых исправлений в исходные журнальные данные они были сгруппированы и классифицированы для оценки ППС. Наконец, мы сравнили рассчитанные значения МУЭ и ППС, чтобы сделать вывод о производительности бурового процесса.

Месторождение, рассматриваемое в настоящем исследовании – одно из крупнейших континентальных нефтяных месторождений Ирана. Оно расположено в юго-западной части страны, общая глубина 4130 м. Данные для исследования были извлечены из отчетов по одной из скважин – ежедневных отчетов по бурению, журналов проб бурового раствора, буровых и петрофизических журналов.

В исследуемой скважине данные каротажа доступны только по разрезу коллектора свиты Асмари, т.е. в диапазоне глубин от 3840 до 4100 м. Поэтому исследование ограничено этим диапазоном глубин, поскольку для расчета ППС необходимы данные каротажа. Свита Асмари, как основной коллектор на месторождении, подразделяется на шесть отдельных слоев, в основном состоящих из доломитовых карбонатов, сланца и мергеля.

После сбора буровых данных был проведен их статистический анализ для лучшего понимания и выявления выбросов и неинформативных значений. В табл.3 представлены результаты описательной статистики буровых параметров.



Таблица 3

Описательный статистический анализ буровых параметров

Статистические показатели	ННД, кН	КМ, кН·м	СВ, об/мин	СП, м/ч	Р, м³/с	ПБР, кг/м³
Среднее значение	7702,5	1949,6	160,6	10,8	458,2	9
Медиана	7204,5	2032,2	176,2	10,6	456	9,1
Мода	0	0	0	15,6	0	9,1
Стандартное отклонение	3425,5	325	35,9	6,7	18,8	0,2
Дисперсия	11733791,8	105650	1291,1	44,8	353,1	0,03
Минимум	1719,4	942,7	55,4	1,6	368,3	7,5
Максимум	22642,1	2539,3	185,6	95,1	511,3	9,5

Каротажные данные также собирались и сортировались в программном обеспечении Geolog. Особенности данных исследуемой скважины по типам каротажа (верхняя глубина каротажа 3840 м; нижняя глубина – 4115 м; шаг каротажа 0,1 м): CALI – диаметр скважины; PE – фотоэлектрический фактор; HDRS – глубинное сопротивление; HMRS – среднее удельное сопротивление; NPHI – нейтронный каротаж; RHOV – плотность; DRHO – исправленная плотность; POTA – калий; THOR – торий; URAN – уран; SGR – гамма-каротаж с элементами тория и калия; CGR – гамма-каротаж с элементами тория, калия и урана; GR – гамма-каротаж; DT – время пробега продольной волны.

Буровые и каротажные данные обычно собирают с помощью специальных датчиков, поэтому в них могут быть ошибки, т.е. значения, которые следует удалить из базы данных. Например, из-за осевых колебаний бурильной колонны могут быть зарегистрированы значения ННД, намного превышающие допустимый предел (учитывая ограничения, связанные с размером и типом долота и длиной бурильной колонны). Важно удалить такие выбросы из базы данных. Выбросы – наблюдения, которые численно далеки от других данных наблюдений. Для этого существует несколько методов. В настоящем исследовании для удаления статистических выбросов был применен метод диаграммы размаха («ящик с усами»). Диаграмма размаха – очень полезный инструмент для анализа данных, обеспечивающий графическое представление распределения данных, позволяющий интуитивно сравнивать статистические параметры. Эта диаграмма позволяет наглядно увидеть дисперсию и асимметрию данных. Кроме того, диаграмма размаха дает возможность идентифицировать области с более высокой или низкой концентрацией данных [40, 41]. При рассмотрении диаграммы размаха точки, находящиеся за пределами нижней и верхней граничных линий, определяются как выбросы.

В данном исследовании с использованием буровых и каротажных данных были рассчитаны и сопоставлены общепринятые модели МУЭ – Тила, Пессье и Фира, Дюпри и Кедерица, УЭБ и УГМЭ. Согласно модели Тила, на МУЭ влияют такие параметры, как нагрузка на долото, площадь долота, скорость вращения, крутящий момент и скорость проходки. В модели Пессье и Фира МУЭ рассчитывалась с использованием стандартного значения коэффициента трения скольжения, предложенного М.Арментой, для типов долот, используемых в исследуемой скважине. Исходя из этого, для интервалов глубины, где использовались штыревые долота, рассматривалось значение коэффициента трения 0,25, а для интервалов, где использовались долота с поликристаллическими алмазными резаками, применялось значение коэффициента трения 0,5.

В уточненной модели Дюпри и Кедерица МУЭ рассчитывалась по уравнению (4). В модель в качестве важного параметра была включена механическая производительность бурения, равная 0,35, в соответствии с предложением Дюпри и Кедерица. Однако можно рекомендовать применение других значений в различных геологических и эксплуатационных условиях [10, 11, 15].

Для расчета УЭБ использовалась формула (5), представленная М.Арментой, в которой в дополнение к буровым параметрам, упомянутым в первоначальной модели Тила, удельная энергия бурения зависит от других критически важных параметров, которые игнорировались в предыдущих моделях, а именно от расхода и веса бурового раствора. Кроме того, коэффициент влияния гидравлики долота был определен как 0,018 [12].



Полная модель УГМЭ была рассчитана с использованием уравнения (6). Эта модель включает все энергетические компоненты – осевую, вращательную и гидравлическую энергии бурового раствора. Помимо буровых параметров в модель также были введены градиент порового давления и эквивалентная плотность циркуляции.

Что касается литологического состава исследуемой свиты, для оценки механических и прочностных свойств породы был использован набор эмпирических уравнений (табл.4). Эти уравнения также применялись для расчета скоростей продольных и поперечных волн. Литологический состав свиты Асмари был определен с помощью сводного графика нейтронной плотности (рис.1), где нижняя (плотность 2,6 г/см³), средняя (плотность 2,71 г/см³) и верхняя линии (плотность 2,87 г/см³) относятся к песчанику, известняку и доломиту соответственно. Программное обеспечение Geolog определяет и строит эти линии с помощью инструмента нейтронного каротажа (Dual Spaced Neutron II), который применялся в исследуемой скважине. Учитывая распределение точек между линиями плотности известняка и доломита, литологический состав свиты Асмари попадает в карбонатную группу, что указывает на сочетание известняка и доломита.

Таблица 4

Эмпирические уравнения для определения механических и прочностных свойств горных пород [34, 35, 38]

Параметр	Уравнение	Исследователи
Угол внутреннего трения	$\phi = 26,5 - 37,4(1 - \phi - V_{sh}) + 62,1(1 - \phi - V_{sh})^2$	Арчер и Расули (2012)
Скорость продольных волн	$V_p = \frac{304,8}{DT}$	–
Скорость поперечных волн	$V_s = (0,8042V_p) - 855,9$	Кастанья (1985)
Динамический модуль Юнга	$E_d = \rho V_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right)$	Фьяер и др. (2008)
Статический модуль Юнга	$E_s = 0,014E_d^{1,96}$	Наджиби и др. (2015)
Неограниченная прочность на сжатие	$ПОС = 12,8 \left(\frac{E_d}{10} \right)^{1,32}$	Наджиби и др. (2015)
Ограниченная прочность на сжатие	$ППС = ПОС + \Delta D + \left(2\Delta D \frac{\sin \phi}{1 - \sin \phi} \right)$	Кайседо и др. (2005)

Обсуждение

Когда МУЭ приближается к ППС породы, она находится в оптимальном диапазоне, что указывает на корректный выбор управляемых параметров бурения. В данном разделе представлен подробный анализ собранных данных с особым вниманием к оценке значений МУЭ и их изменению с глубиной. Такое всестороннее понимание буровых условий имело решающее значение для эффективности операций. Затем путем сравнения расчетных значений МУЭ по стволу скважины и их оптимального значения (равного ППС породы) были определены зоны неэффективного бурения. После этого была проанализирована связь между МУЭ, скоростью проходки и другими буровыми параметрами для более точного описания буровых условий в исследуемой скважине.

После сбора буровых данных модели МУЭ были рассчитаны с использованием уравнений

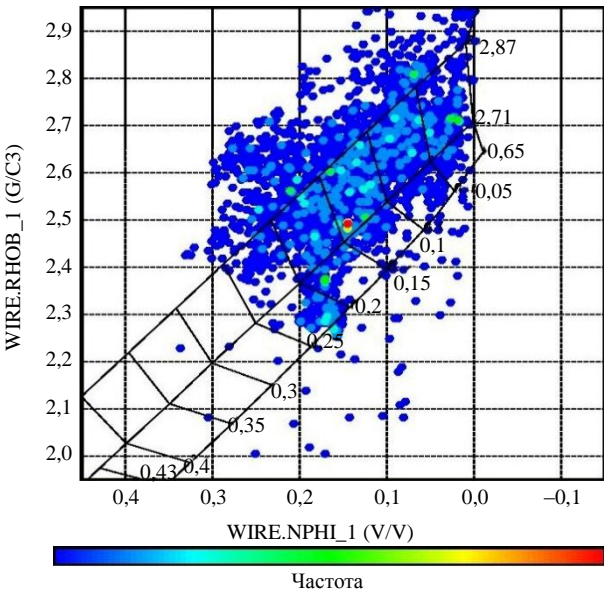


Рис.1. Зависимость нейтронной плотности от литологического состава

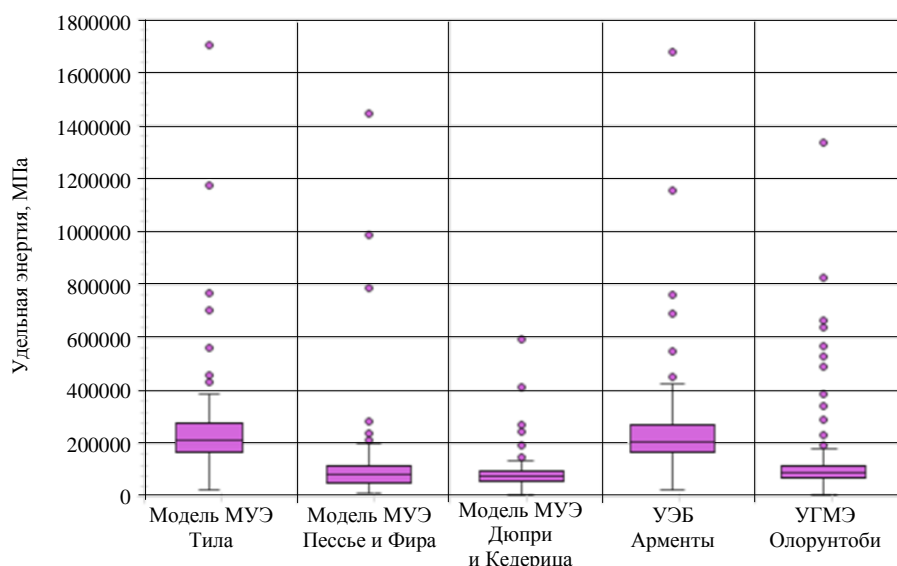


Рис.2. Статистические выбросы для моделей МУЭ

(2)-(6), а затем по методу диаграммы размаха были удалены выбросы. На рис.2 показана диаграмма размаха для выявления выбросов в рассчитанных значениях МУЭ. Точки данных, расположенные значительно выше или значительно ниже диаграммы, являются выбросами. Согласно рис.2, наибольшее количество выбросов было в моделях МУЭ, рассчитанных по Тилу, Пессье и Фиру, а также УЭБ. В табл.5 приведены верхняя и нижняя границы, первый и третий квартили, общее количество точек и точки выбросов для моделей МУЭ.

Таблица 5

Нижние и верхние границы для моделей МУЭ и количество выбросов, МПа

Характеристика	Модель МУЭ				
	Тила	Пессье и Фира	Дюпри и Кедерица	УЭБ	УГМЭ
Первый квартиль	171132,9	55558,7	59896,5	167835,2	72126,8
Третий квартиль	275714,1	118843,4	96499,9	271835,4	119711
Нижняя граница	14261,1	39368,3	4991,4	11834,9	750,5
Верхняя граница	432585,9	213770,5	151405,1	427835,7	191087,4
Всего точек	261	261	261	261	261
Точек выбросов	12	7	12	11	30
Оставшиеся точки	249	254	249	250	231

Изменения МУЭ в зависимости от глубины нанесены на график (рис.3) как с удалением выбросов, так и без него. Из графика видно, что значения МУЭ из моделей Тила и УЭБ очень близки друг к другу, почти полностью совпадая. В моделях Пессье и Фира, Дюпри и Кедерица, а также УГМЭ значения МУЭ более низкие, что указывает на лучшие условия.

Модель УГМЭ включает все компоненты энергии, т.е. осевую, вращательную и гидравлическую энергии, обеспечивая более точное представление приложенной поверхностной энергии по сравнению с другими моделями. С другой стороны, как видно на рис.3, модель Дюпри и Кедерица обеспечивает лучшее представление МУЭ по сравнению с другими моделями благодаря коэффициенту механической производительности. Поэтому в данном исследовании предложена следующая комбинация этих двух моделей для расчета МУЭ в исследуемой скважине:

$$МУГМЭ = E_m \left(\frac{ННД}{Пл_д} + \frac{(120\pi)(СВ)(КМ)}{(Пл_д)(СП)} + \frac{0,10628(ПБР)(P^3) \left(1 - \frac{МЛП}{СПП} \right)^{-0,122}}{(Пл_д)(СП)(СПП^2)} \right) \left(\frac{НГПД}{ЭЦП} \right).$$

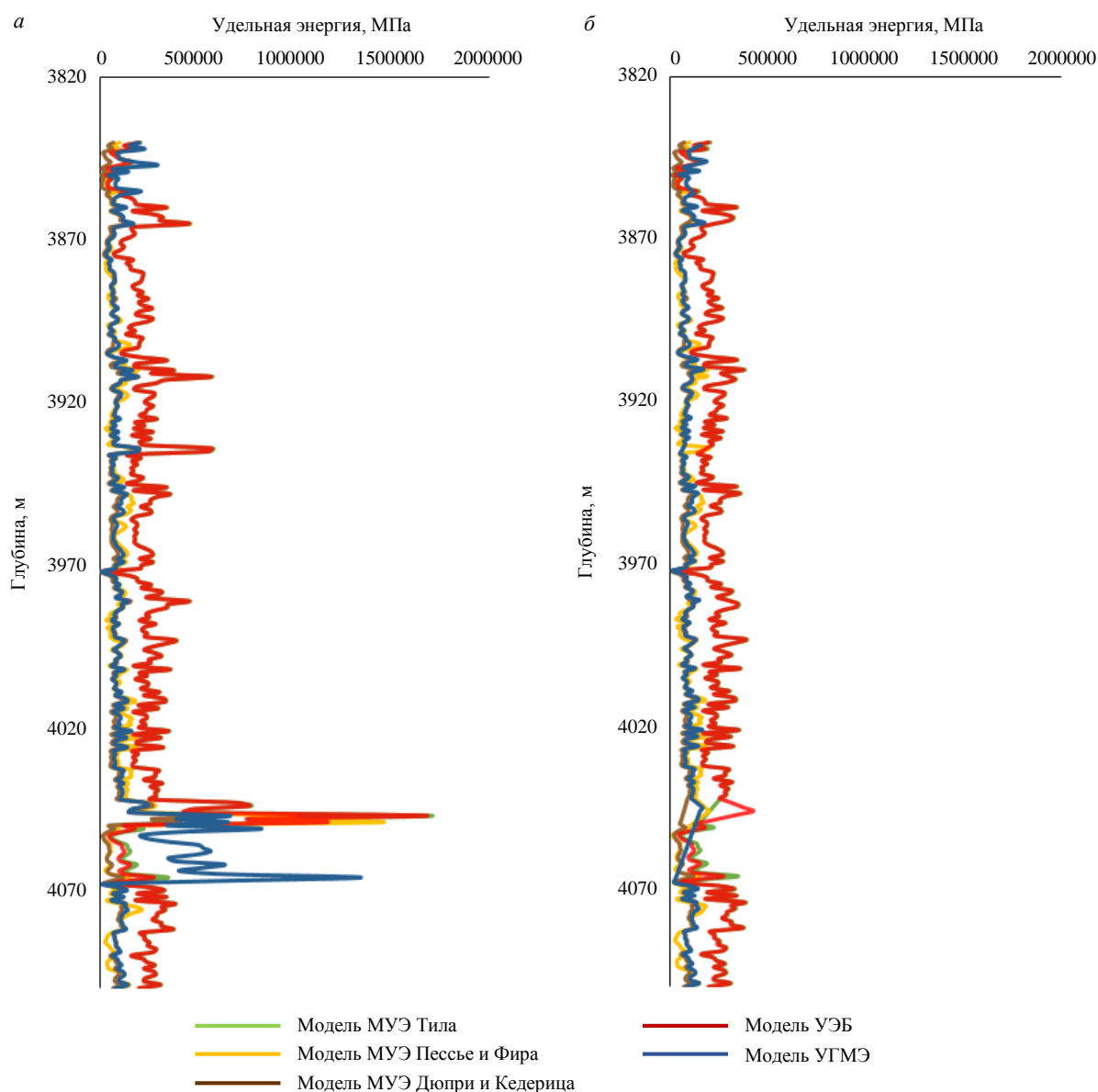


Рис.3. МУЭ в зависимости от глубины: *а* – с выбросами; *б* – выбросы удалены

МУГМЭ, разработанная в данном исследовании, это специальная модель МУЭ, которая учитывает как влияние механической производительности, так и факторы гидравлической энергии. МУГМЭ имеет наименьшее возможное значение по сравнению с другими моделями МУЭ, обеспечивая оптимальное представление приложенной поверхностной энергии. На рис.4 показаны неограниченная и ограниченная прочности породы на сжатие (рис.4, *а*), статический и динамический модуль Юнга (рис.4, *б*), скорости сдвиговых и продольных волн (рис.4, *в*), угол внутреннего трения (рис.4, *г*). ППС сравнивается с МУГМЭ для определения зон, где бурение считается неэффективным.

После определения значений МУГМЭ и ППС породы эти значения были нанесены на график вместе с другими буровыми параметрами свиты Асмари для сравнения значений удельной энергии с диаграммой прочности породы на сжатие с целью выявления проблемных зон (рис.5). На определенных глубинах в скважине буровые параметры претерпели резкие изменения, и влияние этих изменений на МУГМЭ весьма заметно. В диапазоне глубин от 4043 до 4068 м скорость бурения снизилась, что сопровождалось снижением скорости вращения и крутящего момента и увеличением скорости расхода буровой жидкости. В частности, скорость бурения снизилась от 2,7 до 0,3 м/ч, скорость вращения снизилась от 180 до 70 об/мин, а крутящий момент упал от 2711 до 1627 Н·м, в то время как расход буровой жидкости увеличился от 0,028 до 0,031 м³/с. Эта зона обозначена

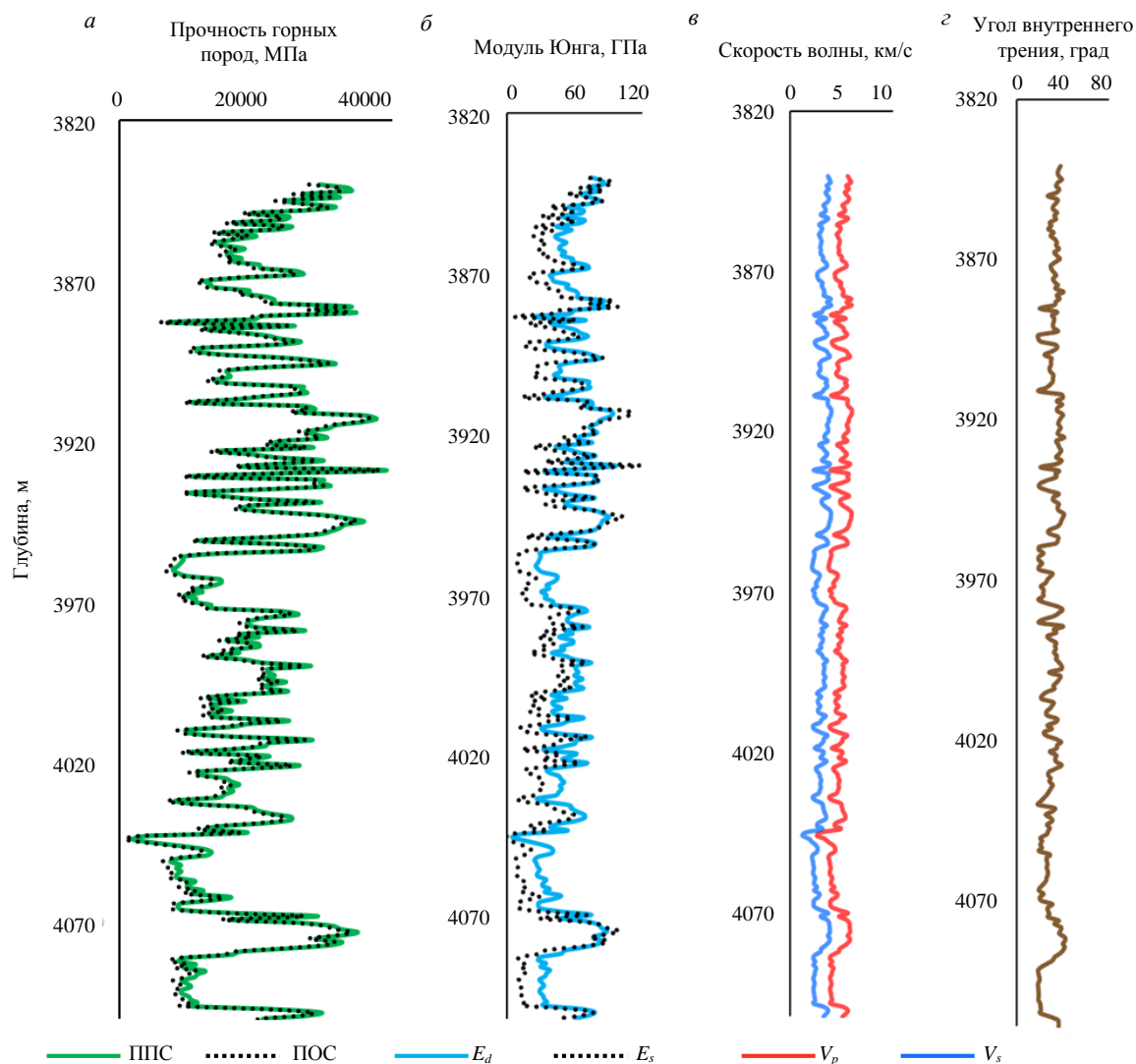


Рис.4. Механические и прочностные свойства горных пород в исследуемой скважине

серым цветом. В данном диапазоне глубин удельная энергия внезапно увеличилась по сравнению с прочностью породы на сжатие, что сопровождалось снижением скорости проходки. Поэтому зона была определена как проблемная.

Для детального анализа наблюдаемых результатов были изучены отчеты по бурению для этого диапазона глубин. Отмечалось, что из-за чрезмерно приложенной энергии, превышающей прочность горной породы, буровое долото получило значительные повреждения: семь резцов долота с поликристаллическими алмазными элементами были потеряны, а десять резцов сломаны. При эффективных буровых операциях вся приложенная поверхностная энергия расходуется на разрушения горной породы, т.е. увеличение поверхностной энергии должно приводить к увеличению скорости проходки. В противном случае это означает, что приложенная энергия была потрачена впустую на вибрации, колебания и износ бурового долота.

Для дальнейшего анализа исследуемой скважины была изучена связь управляемых буровых параметров со скоростью проходки и МУГМЭ. На рис.6 показано изменение скорости проходки в зависимости от нагрузки на долото и частоты вращения. В эффективном бурении при увеличении нагрузки на долото осевое усилие на долото должно увеличивать скорость проходки до достижения порогового значения нагрузки. Однако из рис.6 видно, что увеличение нагрузки на долото не привело к значительному увеличению скорости проходки, а в какой-то момент скорость проходки даже снизилась. Следовательно, увеличение нагрузки на долото в этой скважине не способствовало повышению производительности бурения и привело к большему износу долота. Серым цветом обозначена проблемная зона, где увеличение нагрузки на долото от 26 до 35 кН приводит к снижению скорости проходки.

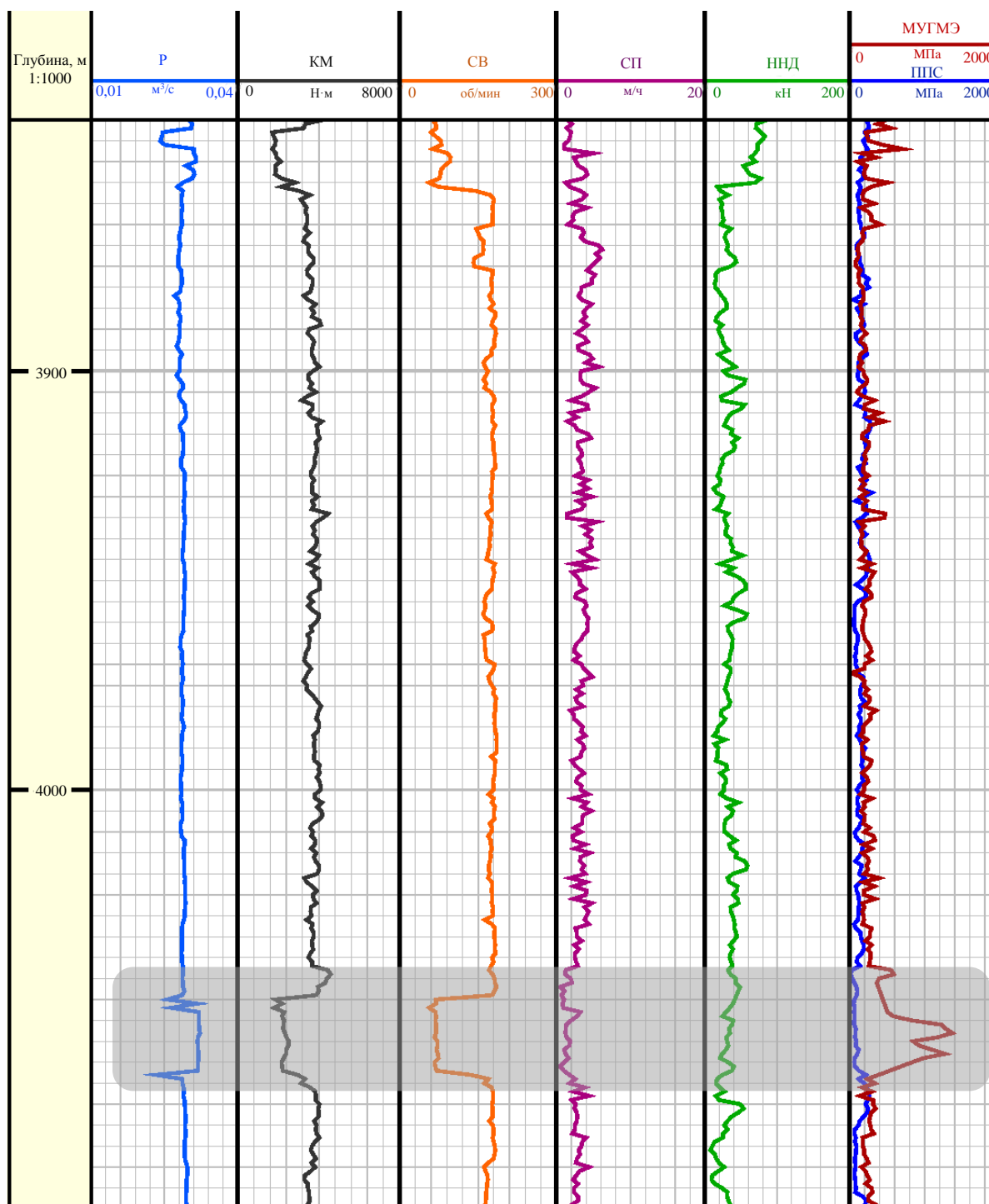


Рис.5. Оценка и анализ МУЭ и ППС породы в исследуемой скважине

В оптимизированных операциях между скоростью вращения буровой колонны и скоростью проходки должна быть прямая связь. Однако, как видно из рис.6, в исследуемой скважине нет существенной связи между скоростью вращения и скоростью проходки. Увеличение скорости вращения может привести к существенному приложению энергии, проявляющемуся в виде вибраций в буровой колонне. Это может повлечь повреждение долота, увеличение крутящего момента и повышение удельной механической энергии, в конечном итоге не обеспечивая оптимальных буровых условий. Для определения оптимальной скорости вращения нагрузка на долото должна поддерживаться постоянной при изменении скорости вращения. Наблюдая за изменениями скорости проходки и МУЭ, можно определить оптимальную скорость вращения, где ее увеличение сопровождается заметным увеличением скорости проходки.

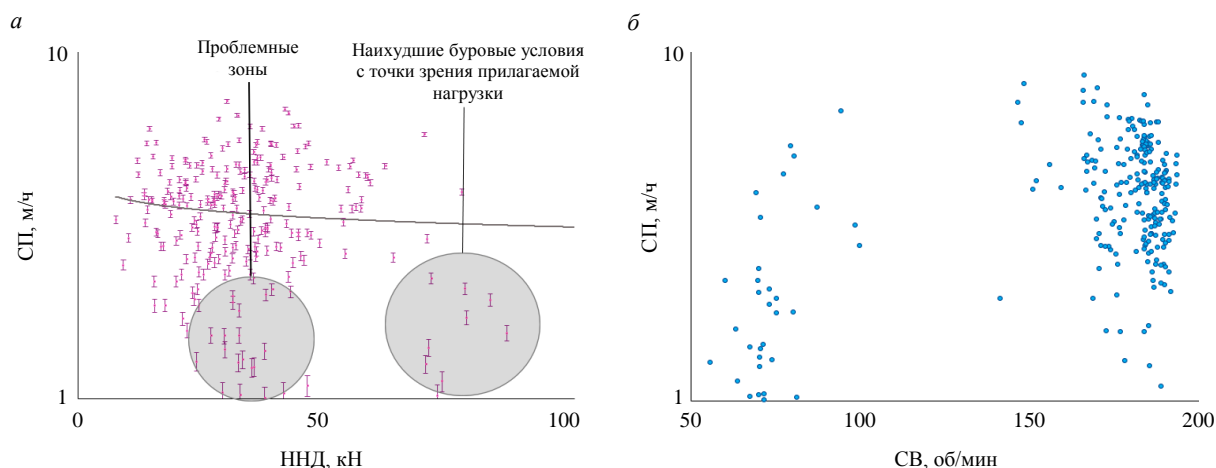


Рис.6. Скорость проходки в зависимости от нагрузки на долото (а) и частоты вращения (б)

Другим управляемым параметром, влияющим на скорость проходки и МУЭ, является расход бурового раствора, закачиваемого в скважину. Буровой раствор с оптимальным расходом способствует удалению шлама из-под долота, его транспортировке из скважины на поверхность и увеличению скорости проходки. В исследуемой скважине расход оставался относительно постоянным на уровне около $0,028-0,029 \text{ м}^3/\text{с}$.

На рис.7, а показаны МУГМЭ и ППС породы при различных скоростях проходки, на основании которых были определены зоны эффективного и неэффективного бурения в исследуемой скважине. Верхняя левая часть рисунка соответствует зоне неэффективного бурения, где приложенная поверхностная энергия намного выше, чем ППС породы. Это означает, что увеличение энергии не привело к увеличению скорости проходки. Нижний правый угол рисунка соответствует эффективной зоне бурения, где МУГМЭ ближе к ППС породы. Это означает, что увеличение потребляемой энергии привело к увеличению скорости проходки. Между ними находится переходная зона от неэффективного к эффективному бурению.

Рис.7, б иллюстрирует связь между скоростью проходки и нагрузкой на долото. В диапазоне от 22,24 до 44,48 кН ННД скорость проходки приближается примерно к 6,1 м/ч. При этой скорости проходки МУГМЭ падает ниже 344,73 МПа. Это обоснованный результат, поскольку значение МУГМЭ ближе к ППС породы, что подразумевает эффективность буровых операций.

При анализе взаимосвязи между буровыми параметрами можно сделать вывод, что оптимальные диапазоны для нагрузки на долото, расхода бурового раствора, крутящего момента и скорости вращения составляют от 22,24 до 44,48 кН, от 0,027 до 0,029 $\text{м}^3/\text{с}$, от 2522 до 3091 Н·м и от 160 до 180 об/мин соответственно. Оптимальные значения были выбраны таким образом, чтобы минимизировать МУГМЭ, сохраняя при этом скорость проходки. Также в исследуемой скважине была выявлена зона неэффективного бурения, где приложение избыточной поверхностной энергии по сравнению с прочностью породы привело к повреждению бурового долота.

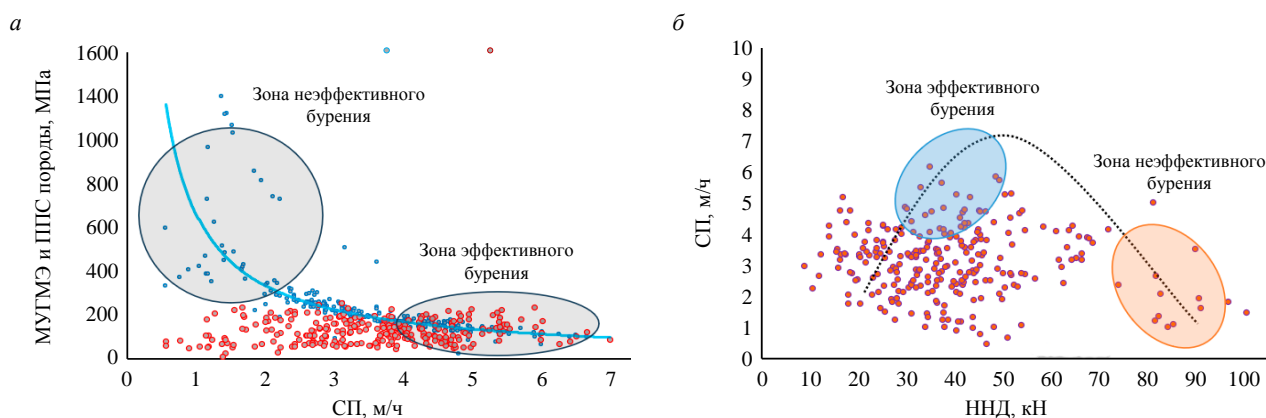


Рис.7. Сравнение МУГМЭ и ППС со скоростью проходки (а) и скорости проходки с ННД (б) с определением зон эффективного и неэффективного бурения



Заклучение

Оптимизация бурового процесса важна, поскольку снижает общую стоимость скважины. Существует несколько подходов к оптимизации бурения, в данной работе рассматривается концепция удельной механической энергии. При использовании реальных полевых данных были проверены некоторые общепринятые модели МУЭ и разработана новая модель МУЭ. Сравнение значений МУЭ из новой модели с прочностью горных пород может привести к повышению производительности бурения. На базе проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

- Разработана измененная модель МУЭ для исследуемой скважины. По сравнению с предыдущими моделями измененная модель дает значения удельной энергии ближе к ППС. Измененная модель учитывает влияние таких параметров как нагрузка на долото, скорость проходки, расход бурового раствора и коэффициент механической производительности.
- В исследуемой скважине рассчитанное оптимальное значение МУГМЭ составило менее 206,84 МПа, так как в этом диапазоне глубин значения удельной механической энергии были близки к прочности породы пласта.
- Оптимальные диапазоны нагрузки на долото, расхода бурового раствора, крутящего момента и скорости вращения были определены как 22,24-44,48 кН, 0,027-0,029 м³/с, 2522-3091 Н·м и 160-180 об/мин соответственно. С применением оптимизированных значений получено снижение МУГМЭ, при котором скорость проходки достигает 4,57-6,1 м/ч.
- Применение высокой нагрузки на долото, т.е. свыше 66,72 кН, значительно снижает скорость проходки (до 1,52 м/ч). При этом МУЭ выходит за пределы оптимального диапазона, превышая 344,73 МПа. Это происходит потому, что применение повышенных значений нагрузки на долото приводит к его износу, вызывающему снижение скорости проходки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Weiqiang Song, Huidong Mu, Wenjuan Ji et al. Evaluation and optimization of drilling efficiency while drilling based on improved rock-breaking specific energy model of bit // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2024. Vol. 10. Iss. 1. № 174. DOI: [10.1007/s40948-024-00872-9](https://doi.org/10.1007/s40948-024-00872-9)
2. Kunshin A., Dvornikov M., Timashev E., Starikov V. Development of Monitoring and Forecasting Technology Energy Efficiency of Well Drilling Using Mechanical Specific Energy // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 19. № 7408. DOI: [10.3390/en15197408](https://doi.org/10.3390/en15197408)
3. Mantegazini D.Z., Nascimento A., Dornelas V.F. et al. Analysis and Multi-Objective Optimization of the Rate of Penetration and Mechanical Specific Energy: A Case Study Applied to a Carbonate Hard Rock Reservoir Based on a Drill Rate Test Using Play-Back Methodology // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Iss. 6. № 2234. DOI: [10.3390/app14062234](https://doi.org/10.3390/app14062234)
4. Khalilidermani M., Knez D. A Survey of Application of Mechanical Specific Energy in Petroleum and Space Drilling // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 9. № 3162. DOI: [10.3390/en15093162](https://doi.org/10.3390/en15093162)
5. Mohammadi Behboud M., Ramezanzadeh A., Tokhmechi B. et al. Estimation of geomechanical rock characteristics from specific energy data using combination of wavelet transform with ANFIS-PSO algorithm // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2023. Vol. 13. Iss. 8. P. 1715-1740. DOI: [10.1007/s13202-023-01644-z](https://doi.org/10.1007/s13202-023-01644-z)
6. Oloruntobi O., Butt S. Energy-based formation pressure prediction // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 173. P. 955-964. DOI: [10.1016/j.petrol.2018.10.060](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.060)
7. Oloruntobi O., Butt S. Application of specific energy for lithology identification // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 184. № 106402. DOI: [10.1016/j.petrol.2019.106402](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106402)
8. Leusheva E.L. Evaluation of Possible Application of Powder Made from Fallen Tree Leaves as a Drilling Mud Additive // *International Journal of Engineering – Transactions B: Applications*. 2024. Vol. 37. Iss. 8. P. 1592-1599. DOI: [10.5829/ije.2024.37.08b.12](https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.08b.12)
9. Leusheva E., Brovkina N., Morenov V. Investigation of Non-Linear Rheological Characteristics of Barite-Free Drilling Fluids // *Fluids*. 2021. Vol. 6. Iss. 9. № 327. DOI: [10.3390/fluids6090327](https://doi.org/10.3390/fluids6090327)
10. Zamanzadeh Talkhouncheh M., Davoodi S., Wood D.A. et al. Robust Machine Learning Predictive Models for Real-Time Determination of Confined Compressive Strength of Rock Using Mudlogging Data // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024. Vol. 57. Iss. 9. P. 6881-6907. DOI: [10.1007/s00603-024-03859-w](https://doi.org/10.1007/s00603-024-03859-w)
11. Dupriest F.E., Witt J.W., Remmert S.M. Maximizing ROP With Real-Time Analysis of Digital Data and MSE // *International Petroleum Technology Conference*, 21-23 November 2005, Doha, Qatar. OnePetro, 2005. № IPTC-10607-MS. DOI: [10.2523/IPTC-10607-MS](https://doi.org/10.2523/IPTC-10607-MS)
12. Armenta M. Identifying Inefficient Drilling Conditions Using Drilling-Specific Energy // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 21-24 September 2008, Denver, CO, USA. OnePetro, 2008. № SPE-116667-MS. DOI: [10.2118/116667-MS](https://doi.org/10.2118/116667-MS)
13. Rafatian N., Miska S., Ledgerwood L.W. et al. Experimental Study of MSE of a Single PDC Cutter Interacting With Rock Under Simulated Pressurized Conditions // *SPE Drilling & Completion*. 2010. Vol. 25. Iss. 1. P. 10-18. DOI: [10.2118/119302-PA](https://doi.org/10.2118/119302-PA)
14. Thomson I.J., Mathur R. The Use of Downhole Drilling Parameters Combined With Surface and Downhole Mechanical Specific Energy Data Helped Identify Under-Reamer Dysfunctions in GoM Deepwater Projects // *SPE Deepwater Drilling and Completions Conference*, 5-6 October 2010, Galveston, TX, USA. OnePetro, 2010. № SPE-137139-MS. DOI: [10.2118/137139-MS](https://doi.org/10.2118/137139-MS)
15. Hammoutene C., Bits S. FEA Modelled MSE/UCS Values Optimise PDC Design for Entire Hole Section // *North Africa Technical Conference and Exhibition*, 20-22 February 2012, Cairo, Egypt. OnePetro, 2012. DOI: [10.2118/149372-MS](https://doi.org/10.2118/149372-MS)



16. Chao Xiong, Zhong-Wei Huang, Huai-Zhong Shi et al. Performances of a Stinger PDC cutter breaking granite: Cutting force and mechanical specific energy in single cutter tests // *Petroleum Science*. 2023. Vol. 20. Iss. 2. P. 1087-1103. DOI: [10.1016/j.petsci.2022.10.006](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.10.006)
17. Xuyue Chen, Xu Du, Chengkai Weng et al. A real-time drilling parameters optimization method for offshore large-scale cluster extended reach drilling based on intelligent optimization algorithm and machine learning // *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 291. № 116375. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2023.116375](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116375)
18. Mohan K., Adil F., Samuel R. Comprehensive Hydromechanical Specific Energy Calculation for Drilling Efficiency // *Journal of Energy Resources Technology*. 2015. Vol. 137. Iss. 1. № 012904. DOI: [10.1115/1.4028272](https://doi.org/10.1115/1.4028272)
19. Mohammadi Behboud M., Ramezanzadeh A., Tokhmechi B. Studying empirical correlation between drilling specific energy and geo-mechanical parameters in an oil field in SW Iran // *Journal of Mining and Environment*. 2017. Vol. 8. Iss. 3. P. 393-401. DOI: [10.22044/jme.2016.689](https://doi.org/10.22044/jme.2016.689)
20. Dvoynikov M., Kunshin A., Blinov P., Morozov V. Development of Mathematical Model for Controlling Drilling Parameters with Screw Downhole Motor // *International Journal of Engineering – Transactions B: Applications*. 2020. Vol. 33. Iss. 7. P. 1423-1430. DOI: [10.5829/ije.2020.33.07a.30](https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.07a.30)
21. Литвиненко В.С., Двойников М.В. Методика определения параметров режима бурения наклонно прямолинейных участков скважины винтовыми забойными двигателями // *Записки Горного института*. 2020. Т. 241. С. 105-112. DOI: [10.31897/PMI.2020.1.105](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.105)
22. Jinbo Song, Jianlong Wang, Bingqing Li et al. Real-Time Drilling Parameter Optimization Model Based on the Constrained Bayesian Method // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 21. № 8030. DOI: [10.3390/en15218030](https://doi.org/10.3390/en15218030)
23. Khoshouei M., Bagherpour R. Measurement, prediction, and modeling of the drilling specific energy by soft rock properties during the drilling operation // *Measurement*. 2023. Vol. 222. № 113679. DOI: [10.1016/j.measurement.2023.113679](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113679)
24. Yavari H., Fazelizadeh M., Aadnoy B.S. et al. An approach for optimization of controllable drilling parameters for motorized bottom hole assembly in a specific formation // *Results in Engineering*. 2023. Vol. 20. № 101548. DOI: [10.1016/j.rineng.2023.101548](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101548)
25. Menand S., Mills K. Use of Mechanical Specific Energy Calculation in Real-Time to Better Detect Vibrations and Bit Wear While Drilling // *AADE National Technical Conference and Exhibition*, 11-12 April 2017, Houston, TX, USA. American Association of Drilling Engineers, 2017. № AADE-17-NTCE-033.
26. Ramba V., Selvaraju S., Subbiah S. et al. Optimization of drilling parameters using improved play-back methodology // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 206. № 108991. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.108991](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108991)
27. Dupriest F., Lai S., Behounek M. et al. Standardization of Mechanical Specific Energy Equations and Nomenclature // *SPE Drilling & Completion*. 2023. Vol. 38. Iss. 1. P. 73-89. DOI: [10.2118/208777-PA](https://doi.org/10.2118/208777-PA)
28. Xuyue Chen, Deli Gao, Boyun Guo, Yongcun Feng. Real-time optimization of drilling parameters based on mechanical specific energy for rotating drilling with positive displacement motor in the hard formation // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. Vol. 35. Part A. P. 686-694. DOI: [10.1016/j.jngse.2016.09.019](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.09.019)
29. Song Deng, Shuo Yang, Yudie Chi et al. Bit optimization method for rotary impact drilling based on specific energy model // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 218. № 110977. DOI: [10.1016/j.petrol.2022.110977](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110977)
30. Kuilin Huang, Yingxin Yang, Gao Li et al. Torsion and vibration reduction mechanism of roller PDC hybrid bit // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 208. Part B. № 109491. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.109491](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109491)
31. Verma A.K., Deb D., Dey A.C. et al. Development of one dimensional geomechanical model for a tight gas reservoir // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. № 21433. DOI: [10.1038/s41598-021-00860-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-00860-z)
32. Ye Liu, Shuming Liu, Jiafeng Zhang, Jie Cao. Real-time estimation of geomechanical characteristics using drilling parameter data and LWD // *Geoenergy Science and Engineering*. 2025. Vol. 244. № 213450. DOI: [10.1016/j.geoen.2024.213450](https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213450)
33. Shijie Shen, Yanfang Gao, Lichun Jia. A Comparison of the Relationship between Dynamic and Static Rock Mechanical Parameters // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Iss. 11. № 4487. DOI: [10.3390/app14114487](https://doi.org/10.3390/app14114487)
34. Abdul Aziz Q.A., Awadh S.M., Al-Mimar H.S. Estimation of Rock Mechanical Properties of the Hartha Formation and their Relationship to Porosity Using Well-Log Data // *Iraqi Geological Journal*. 2024. Vol. 57. № 1A. P. 34-44. DOI: [10.46717/igj.57.1A.4ms-2024-1-15](https://doi.org/10.46717/igj.57.1A.4ms-2024-1-15)
35. Daraei A., Sharifi F., Qader D.N. et al. Prediction of the static elastic modulus of limestone using downhole seismic test in Asmari formation // *Acta Geophysica*. 2024. Vol. 72. Iss. 1. P. 247-255. DOI: [10.1007/s11600-023-01109-1](https://doi.org/10.1007/s11600-023-01109-1)
36. Davarpanah S.M., Ván P., Vászárhelyi B. Investigation of the relationship between dynamic and static deformation moduli of rocks // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2020. Vol. 6. Iss. 1. № 29. DOI: [10.1007/s40948-020-00155-z](https://doi.org/10.1007/s40948-020-00155-z)
37. Almalikee H.S. Predicting Rock Mechanical Properties from Wireline Logs in Rumaila Oilfield, Southern Iraq // *American Journal of Geophysics, Geochemistry and Geosystems*. 2019. Vol. 5. № 2. P. 69-77.
38. Zixu Wang, Junhong Huang, Yanglong Chen et al. Dynamic mechanical properties of different types of rocks under impact loading // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. № 19147. DOI: [10.1038/s41598-023-46444-x](https://doi.org/10.1038/s41598-023-46444-x)
39. Shahani N.M., Ullah B., Shah K.S. et al. Predicting Angle of Internal Friction and Cohesion of Rocks Based on Machine Learning Algorithms // *Mathematics*. 2022. Vol. 10. Iss. 20. № 3875. DOI: [10.3390/math10203875](https://doi.org/10.3390/math10203875)
40. Rakhi, Gupta B., Lamba S.S. An efficient local outlier detection approach using kernel density estimation // *Franklin Open*. 2024. Vol. 8. № 100162. DOI: [10.1016/j.fraope.2024.100162](https://doi.org/10.1016/j.fraope.2024.100162)
41. Cangussu N., Milheiro-Oliveira P., Matos A.M. et al. Comparison of outlier detection approaches for compressive strength of cement-based mortars // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. № 110276. DOI: [10.1016/j.jobee.2024.110276](https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.110276)

Авторы: Саджад Хошро, научный сотрудник (Технологический университет Саханд, Тебриз, Иран), <https://orcid.org/0009-0001-4603-4842>, Сейед Шахаб Табатабаи Моради, канд. техн. наук, доцент (Технологический университет Саханд, Тебриз, Иран), s.sh.tabatabaee@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1484-6926>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Ядерный магнитный резонанс как метод ревизии теории и практики фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов

Р.Э.Дашко¹, Д.Л.Колосова¹✉, А.С.Мазур², А.В.Иевлев²

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

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Дашко Р.Э., Колосова Д.Л., Мазур А.С., Иевлев А.В. Ядерный магнитный резонанс как метод ревизии теории и практики фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 67-76. [EDN VSGJYK](#)

Аннотация

В статье приведены основные положения и допущения, положенные в основу модели фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов, предложенной К.Терцаги в 1925 г. для расчетов осадок сооружений. К одному из главных допущений, требующих пересмотра, относится положение о поровой воде глинистых грунтов, свойства которой тождественны свободной воде. На современном этапе поровую воду следует рассматривать с позиций ее структурированности под воздействием активных центров твердых частиц, ионов и др. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния активных центров твердой поверхности, прежде всего глинистых частиц, на изменение структуры воды с использованием установок ядерного магнитного резонанса различных поколений. Приведены закономерности изменения структурированности поровой воды в водонасыщенных глинистых грунтах различного гранулометрического и минерального составов в диапазоне изменения их условного физического состояния по влажности. Структурированность поровой воды в грунтах способствует ее инертности к восприятию внешнего давления и, соответственно, к необходимости пересмотра позиций фильтрационной консолидации в пользу реологической модели прогноза развития осадок сооружений как основного критерия их устойчивости.

Ключевые слова

ядерный магнитный резонанс; структуры поровой воды; фильтрационная консолидация; водонасыщенные глинистые грунты; устойчивость; поровое давление

Финансирование

Экспериментальная часть работы поддержана внутренним грантом Санкт-Петербургского государственного университета (инициативный проект, ID 100349765).

Поступила: 03.07.2024

Принята: 10.04.2025

Онлайн: 03.07.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Теория и практика проектирования и расчетов устойчивости оснований, которые представлены водонасыщенными глинистыми грунтами, базируется на модели фильтрационной консолидации К.Терцаги, предложенной в 1925 г. [1]. Основным положением модели служит анализ уплотнения водонасыщенных тонкодисперсных грунтов при оттоке (фильтрации) поровой воды под действием роста напряжений. Такая модель применяется не только при строительстве и эксплуатации сооружений на глинистых грунтах, но и при решении некоторых задач в практической гидрогеологии. Считается, что наблюдаемый в ряде случаев рост дебитов эксплуатационных скважин во время продолжительных откачек происходит за счет оттока (фильтрации) воды из глинистых относительных водоупоров при снижении уровня подземных вод на величину S и, соответственно, роста нормальных напряжений на водоупоры ($\sigma_z = \gamma_w S$, где γ_w – удельный вес воды) [2].

При математическом обосновании модели фильтрационной консолидации К.Терцаги были сделаны следующие допущения:

- рассмотрение одномерной задачи уплотнения водонасыщенного глинистого грунта без возможности бокового расширения (мощность слоя глинистого грунта h , отнесенная к ширине площади загрузки b , менее либо равна 0,25);

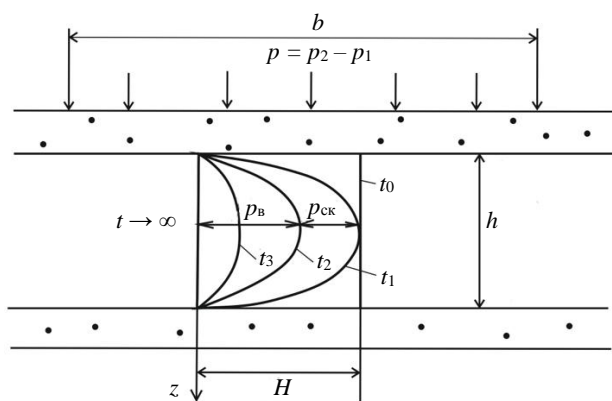


Рис.1. Изохроны распределения порового давления по высоте слоя глинистого грунта z для различной продолжительности t приложения давления (согласно гипотезе К.Терцаги)

Основное уравнение гипотезы фильтрационной консолидации связывает изменение напоров в поровой воде глинистого грунта во времени t с изменением напоров H по глубине слоя z :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = C_u \frac{\partial^2 H}{\partial z^2},$$

где C_u – коэффициент консолидации,

$$C_u = \frac{k(1 + e_1)}{a\gamma_w},$$

e_1 – начальный коэффициент пористости глинистого грунта; a – коэффициент сжимаемости грунта в интервале давлений $p_2 - p_1$.

В практике механики грунтов отмечается, что при коэффициенте консолидации $C_u \leq 10^7$ см²/год фильтрационная консолидация развивается настолько медленно, что ею можно пренебречь.

Развитие теории фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов с учетом аномальности поровой воды проводилось рядом ученых [3, 4]. Необходимо отметить работы А.И.Ксенофонтова, использовавшего реологические модели для описания деформационного поведения водонасыщенных глинистых грунтов как однофазных сред при снижении их коэффициента фильтрации до $k \leq 10^{-3}$ м/сут.

Изучение структуры воды в глинистых грунтах имеет принципиальное научно-практическое значение при анализе длительной устойчивости сооружений различного уровня капитальности, в основании которых залегают водонасыщенные глинистые отложения различного генезиса и возраста [5]. Известно, что такие грунты имеют разные вещественный и гранулометрический составы, физическое состояние, структурные связи и, следовательно, варьирование прочности и несущей способности [6, 7]. Использование модели фильтрационной консолидации при проектировании сооружений приводит к существенному завышению расчетного сопротивления R за счет уплотнения грунтов при проведении экспериментальных исследований для получения характеристик сопротивления сдвигу грунтов: угла внутреннего трения ϕ и сцепления c . Эти параметры рассматриваются как базовые и используются в расчетах устойчивости наземных сооружений различного класса капитальности [8-10]. Превышение расчетного сопротивления при использовании некорректных (завышенных) значений ϕ и c над проектными давлениями p_c создает предпосылки для перехода строящихся и эксплуатируемых сооружений в предаварийное либо аварийное состояния [11].

Методы изучения трансформации структуры воды под воздействием активных центров твердой поверхности

Исследования изменения структур воды на различных подложках (кварцевых и слюдяных) проводились еще в 60-80-х годах XX века специалистами в области физики и физико-химии. Следует отметить исследования изменения состояния воды под действием активных центров SiO_2 ,

- глинистый грунт полностью водонасыщен и поровая жидкость имеет свойства свободной воды;
- структурные связи между частицами грунта отсутствуют;
- фильтрация воды из грунта подчиняется линейному закону Дарси:

$$v = -k \frac{\partial H}{\partial l},$$

где v – скорость фильтрации; $\frac{\partial H}{\partial l}$ – градиент напора; k – коэффициент фильтрации грунтов;

- в любой момент времени t , отличного от нуля, все внешнее давление $p = p_2 - p_1$ распределяется на поровую воду p_v (поровое давление) и скелет грунта $p_{ск}$ (эффективное давление) (рис.1).



а также работы научной школы М.С.Медика (эксперименты на слюдяных пластинах). При изучении структуры воды в кварцевых капиллярах размером 0,03-0,04 мкм фиксировалось увеличение вязкости адсорбированной воды на 35-40 % по сравнению со свободной водой [12]. Кварцевые подложки в силу достаточно простого кристаллохимического строения обладают малым количеством активных центров по сравнению с алюмосиликатами – полевыми шпатами, слюдой и глинистыми минералами, при этом наиболее сложным строением характеризуются глинистые частицы.

Важной особенностью исследований научной школы М.С.Медика является выполнение экспериментальных работ на пластинках слюд в условиях изменения состояния их поверхности и, соответственно, активности и количества энергетических центров [13, 14]. Результаты выполненных работ показали, что диэлектрическая постоянная воды ϵ_v уменьшается с 80 до 4,5 при снижении толщины адсорбированной пленки воды с 2 до 0,07 мкм, а теплопроводность λ при такой же толщине пленки на свежем сколе слюды становится сопоставимой с теплопроводностью металлов и достигает 60 Вт/м·град, при этом промывка свежерасщепленной поверхности слюды в кипящей воде существенно снижает показатель λ до 0,6 Вт/м·град (вода в объеме).

Следует ответить на вопрос, какую роль играют активные центры различных минералов и как возрастает радиус их влияния, определяемый кристаллохимическими особенностями строения решетки минералов и степенью их дисперсности. Исследования таких энергетически неоднородных активных центров, связанных с точечными дефектами твердой поверхности различных сред (металлических и неметаллических), проводились Г.И.Дистлером. Было установлено, что активные центры делятся на две группы: эпитаксиальные – изменяющие плотность воды в сторону ее увеличения; поляризующие – дальнodelствующиe, останавливающие трансляционное движение молекул воды на расстоянии 10 мкм. Модель трансляционного движения – скачкообразных перемещений молекул воды из равновесных положений, пребывая в равновесном состоянии 10^{-13} с, в совокупности с колебательными и вращательными движениями, была предложена ранее Я.И.Френкелем при обосновании жидкого состояния вещества. В твердообразных телах подобное движение отсутствует.

Наиболее точным методом определения кристаллохимического строения жидких и твердых веществ выступает метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР), который регистрирует переходы между магнитными энергетическими уровнями атомных ядер, вызываемые радиочастотным (РЧ) излучением [15]. В зарубежных странах ЯМР активно используется для исследования порового пространства грунтов различного состава [16-18].

Поровые воды в грунтах содержат ионы и комплексные соединения органического и неорганического состава в различных концентрациях [19]. Кроме того, в порах грунта присутствуют микроорганизмы и их метаболиты, а также газы различного генезиса (биохимический, глубинный, каталитический) [20-22].

Исследования влияния содержания катионов в растворах солей перхлоратов на структурирование воды (HClO_4^- – анион, не влияющий на структуру свободной воды) были выполнены В.И.Чижигом [23]. Все исследованные растворы перхлоратов были приготовлены на полностью дегазированной воде, время спин-решетчатой релаксации которой T_1 составляет примерно 3,5 с, величина T_1 дистиллята несколько ниже и равна 2,5 с. Экспериментально установлено, что параметр T_1 в присутствии положительно-гидратирующих ионов снижается примерно в три раза по сравнению с полностью дегазированной водой, наименьшее снижение наблюдается в растворах перхлората натрия, наиболее существенное – в растворах магния.

Предположение об отсутствии свободной воды в глинистых грунтах различного состава и состояния впервые было выдвинуто и подтверждено работами Р.Э.Дашко, выполненными на установке ЯМР ЭХО-4 (^1H частота составляла 20 МГц) при исследовании изменения структурных особенностей поровой воды в тонкодисперсных грунтах [24]. Опыты проводились с водонасыщенными глинистыми грунтами различного гранулометрического и минерального состава, а также физического состояния. Необходимо отметить, что глинистые грунты обладают наибольшим количеством активных центров не только в связи с особенностями кристаллохимического строения различных алюмосиликатов и силикатов, но и содержаниями живой компоненты и ее метаболитов (газы, белки, липиды, кислоты и др.) [25-27]. Не только живые, но и мертвые клетки имеют чаще всего положительный заряд [28]. Основными полиэдрами структуры глинистых слоистых алюмосиликатов выступают кремнекислородные тетраэдры, а также октаэдры с различными катионами (Al^{+3} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+).

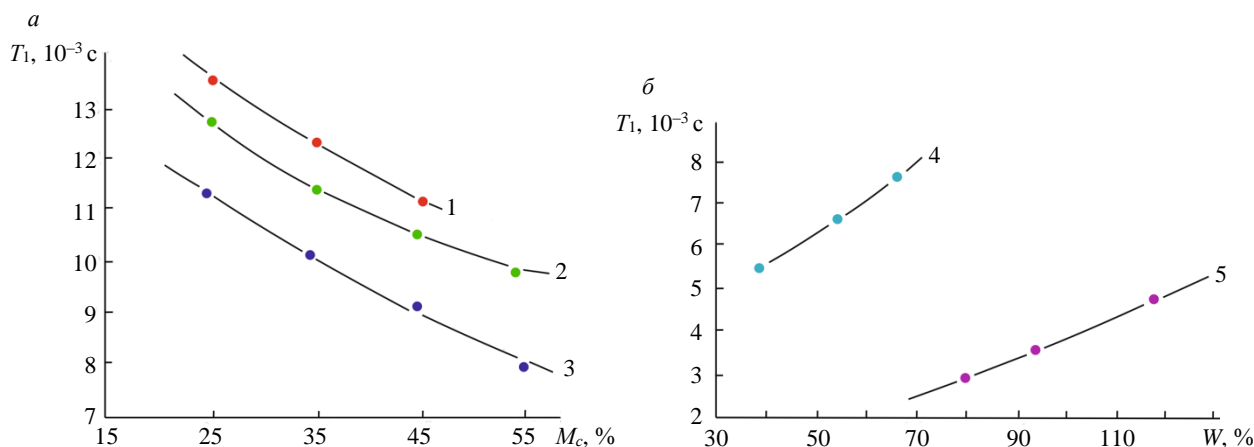


Рис.2. Изменение времени спин-решетчатой релаксации T_1 поровой воды от содержания глинистой фракции в грунте M_c и влажности грунта на пределе текучести W_L (а); минерального состава глинистых грунтов (б) [24]

1 – $W = 1,1 W_L$; 2 – $W = W_L$; 3 – $W_p < W < W_L$; 4 – гидрослюдистые глины; 5 – бентонитовые глины

При проведении исследований на установке ЭХО-4 были изучены особенности структуры поровой воды дисперсных грунтов в зависимости от следующих факторов:

- процентного содержания глинистой фракции M_c при неизменности ее минерального состава (группа гидрослюд) (рис.2, а);
- изменения влажности грунтов W как показателя их состояния, W_L – влажность грунтов на пределе текучести (рис.2, а) [29];
- влияния активности минерального состава глинистой фракции на величину T_1 – группы монтмориллонита (бентонит) и гидрослюды (рис.2, б);
- варьирования минерализации поровых вод различного химического состава (рис.3).

Проведенные исследования показали, что свободная вода при такой вариации состава и состояния глинистых грунтов полностью отсутствует, так как усредненный параметр T_1 составляет $n \cdot 10^{-3}$ с по сравнению со свободной водой ($T_1 = 2,5$ с). При этом наибольшее снижение T_1 наблюдается при наименьших влажностях (при постоянстве минерального состава) и наличии более активных глинистых минералов группы монтмориллонита (бентонита) даже при весьма высоких влажностях $W > 70$ %.

Изучение влияния минерализации и ионного состава поровых растворов на структуру воды показало, что основное воздействие оказывают активные центры глинистых частиц, что подтверждается показателем T_1 , измеренным в присутствии отрицательно (K^+) и положительно-гидратирующих ионов (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+}), при этом значения T_1 остаются в пределах $n \cdot 10^{-3}$ с.

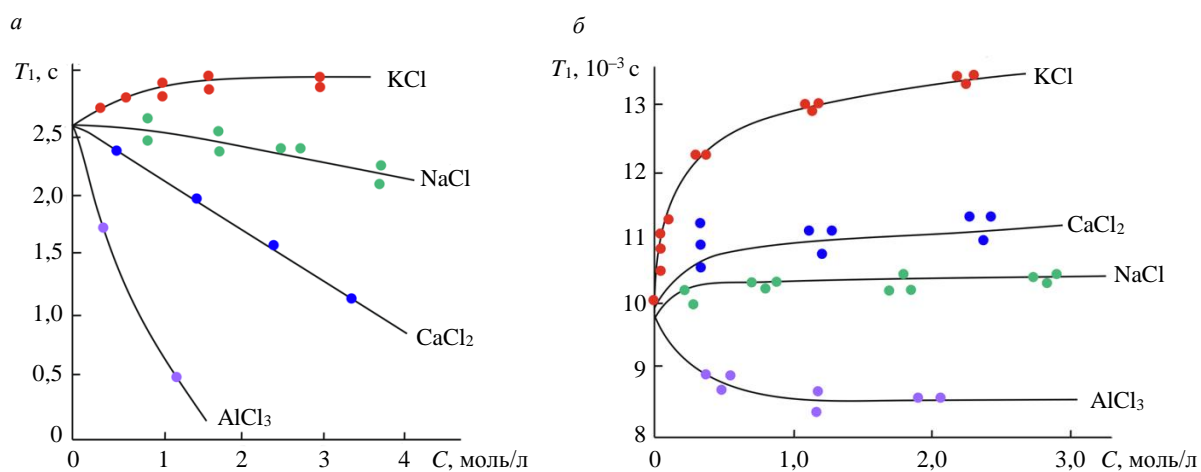


Рис.3. Изменение времени спин-решетчатой релаксации T_1 протонов воды: а – в растворах от их концентрации C ; б – поровых растворов глинистых гидрослюдистых грунтов концентрации C ; $M_c = 54$ %, $W = W_L$ [24]



Исследования структуры поровой воды в водонасыщенных глинистых грунтах были продолжены на современных установках ЯМР (релаксометр ЭХО-12 с ^1H частотой 20 МГц был сконструирован на кафедре радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета). Времена спин-решетчатой релаксации измерялись при стандартной последовательности импульсов инверсии-восстановления. Длительность 90° РЧ-импульса составляет 3,8 мкс, «мертвое» время – 32 мкс, отношение сигнал/шум ~ 900 . В качестве синтезатора последовательностей используется импульсный генератор Spin Core с тактовой частотой 100 МГц. Программно-аппаратный интерфейс «ЭхоСкан» для всего комплекса написан на объектно-ориентированном языке программирования LabVIEW. Интервал между импульсами составлял от 0,2 до 400 мкс, разделен на 60 отдельных значений. Все исследования проводились при нормальных условиях. Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании кафедры ядерно-физических методов исследования и ресурсного центра «Магнитно-резонансные методы исследования» Санкт-Петербургского государственного университета.

Результаты выполненных экспериментальных исследований позволили оценить изменение структуры поровой воды в водонасыщенных глинистых грунтах послойно по мере удаления от активных центров твердых частиц.

Серия исследований была выполнена для изучения влияния различного содержания глинистой фракции в грунтах, имеющих постоянное физическое состояние, которое отвечает условно текучему, согласно нормативным положениям в механике грунтов и инженерной геологии. Такое состояние глинистых грунтов соответствует влажности почв на границе начала загнивания корневой системы растений W_L в условиях их избыточного увлажнения. Все исследованные грунты имели одинаковый минеральный состав (группа гидрослюды).

Практика механики грунтов и инженерной геологии показывает, что грунты в условно текучем состоянии (W близка к W_L) содержат в поровом пространстве свободную воду, способную воспринимать самые малые давления и удаляться из грунта согласно закону Дарси.

Изменения содержания глинистой фракции и параметров физического состояния исследованных грунтов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав и некоторые физические свойства исследуемых глинистых грунтов

Номер образца	Тип грунта	Размер фракций и содержание в образцах, %		Влажность W , %	Пределы пластичности, %		Число пластичности I_p , %
		Глинистая (<0,002 мм)	Пылеватая (0,002-0,05 мм)		Влажность на пределе текучести W_L	Влажность на пределе раскатки W_P	
1	Суглинок средний пылеватый	16	84	26,7	26,7	15,8	10,9
2	Суглинок тяжелый пылеватый	28	72	34,2	34,2	19,5	14,7
3	Глина пылеватая	40	60	45,0	45,0	24,0	21,0

Наименования грунтов даются согласно широко используемой в инженерной геологии трехчленной классификации грунтов В.В.Охотина по содержанию песчаных, пылеватых и глинистых фракций. Количество глинистой фракции определяет величины характерных влажностей W_L и W_P (табл. 1).

Обсуждение результатов

В ходе проведения экспериментальных исследований образцов фиксированного состояния и влажности (табл. 1) на установке ЭХО-12 (частота 20 МГц) были получены значения параметра T_1 , которые характеризуют степень структурирования поровой воды по мере удаления ее протонов от активных центров на поверхности твердых частиц. Обработка результатов осуществлялась с помощью программно-аппаратного интерфейса «ЭхоСкан» при поиске наилучшей аппроксимации по методу Левенберга – Марквардта (табл. 2).



Таблица 2

Значения времени спин-решетчатой релаксации T_1 для грунтов текучей консистенции с различным содержанием глинистой фракции

Номер образца	Тип грунта	Содержание глинистой (<0,002 мм) фракции, %	$W = W_L, \%$	Время спин-решетчатой релаксации, мс	
				T_{1s}	T_{1c}
1	Суглинок средний пылеватый	16	26,7	0,4	17,6
2	Суглинок тяжелый пылеватый	28	34,2	0,7	11,9
3	Глина пылеватая	40	45,0	0,9	10,8

Примечание. T_{1s} – характеризует структурированность поровой воды на твердой поверхности частиц, T_{1c} – в центральной части поры.

Общая тенденция изменения T_1 по мере роста глинистой фракции, определяющей наибольшее число активных центров в образце грунта, прослеживается в снижении максимальных величин T_1 , что связано с сокращением размера пор и, соответственно, наибольшего влияния тонкодисперсных частиц на структурированность поровой воды. Основным выводом согласно результатам проведенных исследований – отсутствие свободной воды в порах водонасыщенных глинистых грунтов в наиболее неустойчивом текучем состоянии. Отметим, что даже максимальное полученное значение $T_{1c} = 17,62$ мс более чем на два порядка ниже значения свободной воды $T_1 = 2,5$ с.

Сопоставление результатов современных исследований структуры поровой воды на установке ЭХО-12 с ранее полученными закономерностями (ЭХО-4) дает возможность убедиться в их численной идентичности. Средневзвешенные значения T_1 (по процентному соотношению наиболее вероятностных значений T_1) совпадают с величинами T_1 , полученными для глинистых грунтов различного гранулометрического состава в текучем состоянии ($W = W_L$) (табл.3).

Таблица 3

Сравнение значений T_1 , полученных на установках ЭХО-4 и ЭХО-12

Содержание глинистой (<0,002 мм) фракции, %	Время спин-решетчатой релаксации T_1 , мс		Примечание
	ЭХО-4	ЭХО-12	
16	–	13,22	Экспериментальные исследования выполнены на грунтах одного и того же минерального, гранулометрического составов и физического состояния
28	12,10	9,36	
40	11,10	8,60	

Для образцов с различным содержанием глинистой фракции были записаны спектры сигналов спада магнитной индукции FID (free induction decay) после быстрого преобразования Фурье на установке ЭХО-12 (рис.4, а-в). Так как приемник релаксометра использует синхронный фазовый детектор и не имеет возможности квадратурного обнаружения, все спектры были записаны со смещением от резонансной частоты на 47,5 кГц с разрешением спектра 500 Гц. На рис.4, г показан совмещенный спектр сигналов с нормировкой по оси амплитуды.

Трактовка спектров сигналов протонов поровой воды для трех образцов глинистых грунтов при $W = W_L$ позволяет объяснить ее структурированность на различном удалении от активных центров твердых частиц, которые обозначены как 1-я и 2-я компоненты в табл.4. Спектр изменения строения поровой воды сравнивается со спектром сигнала объемной воды.

Компонента 1 устанавливает закономерности увеличения структурированности поровой воды различных глинистых грунтов при росте содержания глинистой фракции в наибольшем удалении от твердой поверхности – в центральной области поры (действие поляризующих центров по Г.И.Дистлеру); 2-я компонента позволяет проследить те же закономерности вблизи твердой поверхности (эпитаксиальные центры). Значение HWHM 1-й компоненты в наиболее удаленных слоях воды в 4-6 раз выше того же параметра для свободной воды (0,2 кГц).

Постоянство значения 3-й компоненты, вероятно, характеризует кристаллизационную воду глинистого минерала, которая входит в его структуру. Такая вода обычно удаляется при температуре обжига глин выше 300-600 °С.

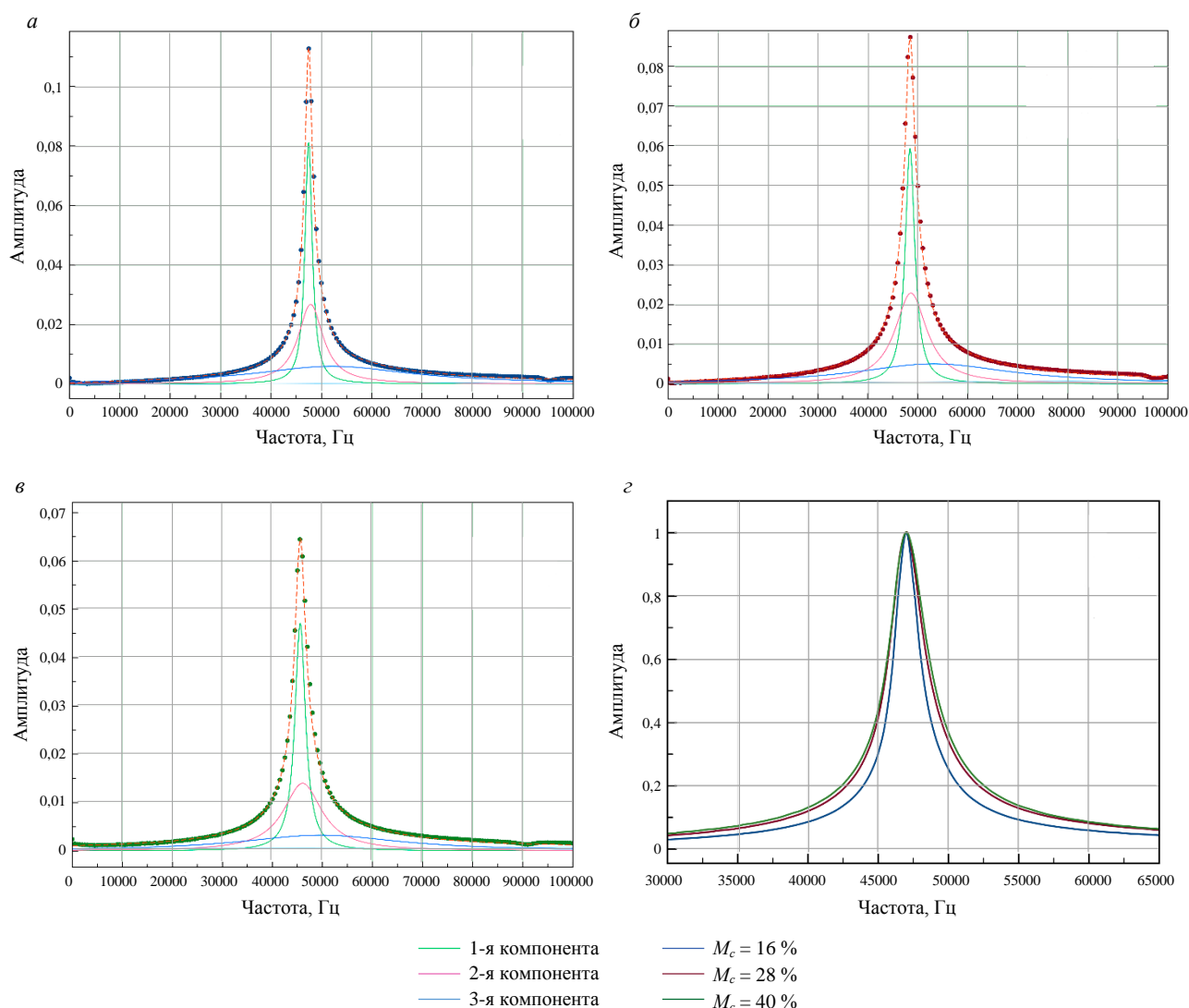


Рис.4. Спектры сигнала FID, записанные для водонасыщенных глинистых грунтов различного гранулометрического состава постоянного физического состояния ($W = W_L$): а – $M_c = 16\%$; б – $M_c = 28\%$; в – $M_c = 40\%$; з – совмещенный спектр трех испытанных образцов

Таблица 4

Значения NWHM (half width at half maximum), полученные при обработке спектров сигналов

Компоненты	NWHM, кГц			
	$M_c = 16\%$	$M_c = 28\%$	$M_c = 40\%$	Объемная вода
1	0,86	1,17	1,29	0,2
2	3,0	3,9	4,7	–
3	19,0	19,0	19,0	–

Примечание. Параметр NWHM применяется при анализе спектров и обозначает половинную ширину на уровне половинной амплитуды.

Кроме исследований степени структурирования поровой воды водонасыщенных глинистых грунтов, находящихся в условиях квазитекучего состояния, были выполнены эксперименты на образце грунта при $W = W_p$. Согласно действующей классификации грунтов в механике грунтов и инженерной геологии такое состояние рассматривается как квазитвердое и W_p характеризуется как влажность на пределе пластичности. Показатель W_p в почвоведении соответствует влажности начала увядания корневой системы растений, вакуумные насосы которых не способны «откачивать» почвенную влагу. Этот показатель фиксирует максимальное количество физически связанной воды в глинистых грунтах и определяется как параметр максимальной молекулярной влагоемкости $W_{m \max}$,

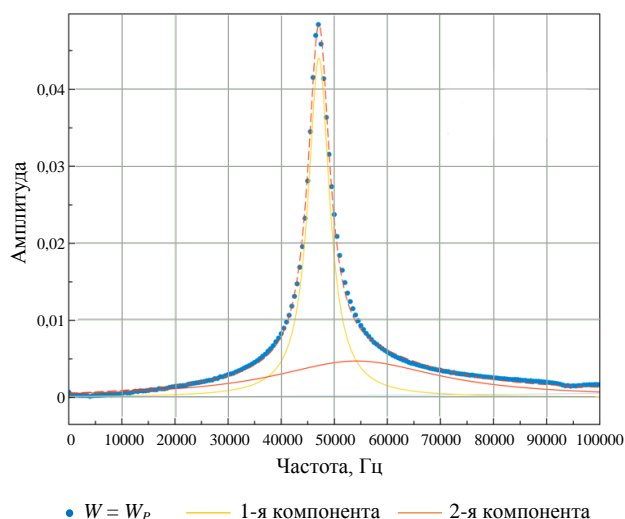


Рис.5. Спектр сигнала FID, полученный для образца водонасыщенного глинистого грунта при $W = W_p$ и содержании глинистой фракции 40 %

который близок по величине к влажности W_p . Значение $W_{m \max}$ получают путем удаления воды из образцов глинистых грунтов толщиной 2 мм под давлением 6,55 МПа.

Структура воды для водонасыщенного глинистого образца ($M_c = 40\%$) определялась при влажности, близкой к $W = W_p = 26\%$. Значения параметра T_1 , определенного на установке ЭХО-12, варьировали от 4,76 до 9,62 мс. Более узкий диапазон изменения T_1 может быть объяснен наименьшим диаметром пор и большим влиянием эпитаксиальных центров на структурированность поровой воды по сравнению с поляризующими. При анализе полученного спектра сигнала выделяются лишь две компоненты, в том числе кристаллизационная вода в структуре глинистого минерала (19 кГц) и единая компонента, характеризующая адекватность структуры поровой воды в грунте (рис.5).

Анализируя рис.5, можно отметить, что значение НВНМ для данного типа водонасыщенного

глинистого грунта в условно твердом состоянии в 12,5 раз отличается от того же параметра, характерного для свободной воды, что отвечает наиболее упрочненной структуре поровой воды из всех исследованных образцов.

При передаче давления от сооружения на водонасыщенные грунты наблюдается его перераспределение между твердыми частицами и поровой водой. Исследователи по-разному подходили к вопросам фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов, интенсивность развития которой зависит от динамики изменения порового давления.

Согласно самым первым теоретическим моделям одномерного сжатия К.Терцаги и В.А.Флорина значение порового давления постепенно снижается от 100 % (по К.Терцаги) и от 80 % (по В.А.Флорину) во времени до нулевых значений. Согласно Н.А.Цытовичу, развитие порового давления рассматривается как процесс, характеризующийся постепенным повышением порового давления, а затем его рассеиванием до остаточных значений, которые зависят от состояния глинистых грунтов и прочности структурных связей.

Экспериментальные исследования относительных величин поровых давлений p_v/p при одномерной задаче уплотнения с различным содержанием глинистой фракции M_c и близким физическим состоянием показали идентичность снижения p_v/p по мере увеличения степени структурированности поровой воды и, соответственно, степени ее инертности по отношению к давлению p (рис.6).

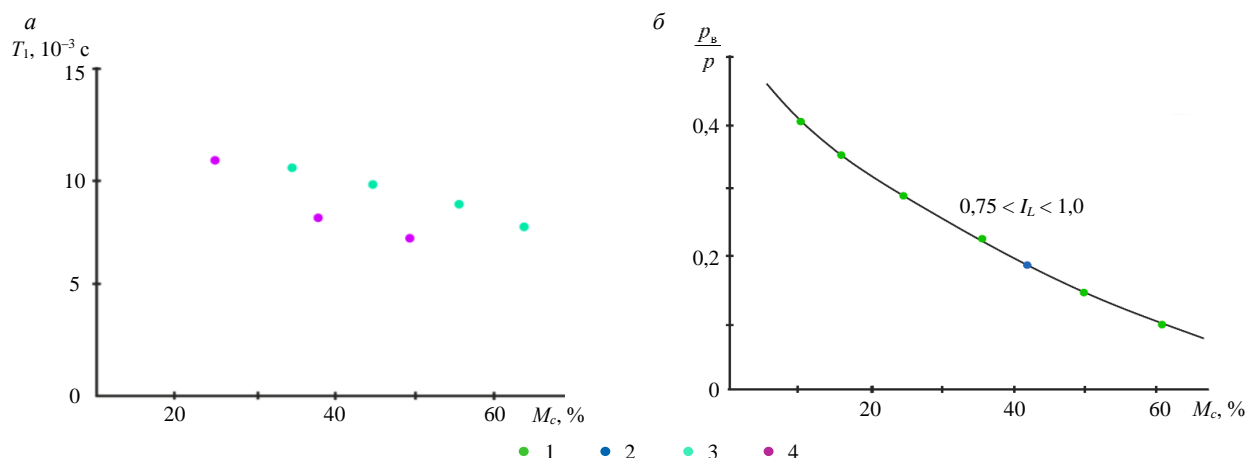


Рис.6. Закономерность изменения структурированности воды по значению T_1 (а) и относительной величины порового давления p_v/p (б) от содержания глинистой фракции в грунтах M_c и показателя текучести I_L

1 – лабораторные исследования; 2 – полевые замеры; 3 – ЭХО-4; 4 – ЭХО-12



Как известно, одномерная задача уплотнения (без возможности бокового расширения) относится к теоретическим. В условиях одновременного развития вертикальных и боковых деформаций значения поровых давлений снижаются до нулевых значений.

Деформации развиваются за счет ползучести скелета грунтов, т.е. структурированная поровая вода проявляет себя как инертная составляющая. Следовательно, основная физическая модель водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов должна трактоваться законами реологии, которые отвечают реальной работе грунтов оснований.

Заключение

В настоящее время назрела необходимость пересмотра модели фильтрационной консолидации К.Терцаги, которая широко используется в практике проектирования сооружений различного назначения, в том числе капитальных и уникальных на водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтах различного генезиса и возраста [30-32]. Такие грунты составляют от 60 до 80 % в строении осадочного чехла не только России, но и всего мира.

Пересмотр модели К.Терцаги должен базироваться на позициях оценки степени структурированности поровой воды в тонкодисперсных грунтах, что предопределяет особенности взаимодействия сооружений с глинистыми грунтами.

Наиболее достоверные результаты по изменению структуры воды под действием различных энергетических центров могут быть получены на основе применения ЯМР. Обзор ранее выполненных исследований структуры воды с использованием других методов показывает ограниченность воздействия активных центров твердых поверхностей силикатов и алюмосиликатов на преобразование воды в порах грунтов.

Практика механики грунтов и инженерной геологии показывает, что глинистые грунты в квази-текучем и близком к нему состоянии содержат в достаточном количестве свободную воду, которая, принимая на себя часть внешнего давления, удаляется из глинистых отложений, способствуя снижению их влажности, повышению плотности и прочности. Использование некорректных характеристик сопротивления сдвигу глинистых грунтов создает условие для перехода сооружений в аварийное либо предаварийное состояние при необоснованном завышении несущей способности грунтов в основании.

Экспертные заключения по таким ситуациям обычно ограничиваются формально выполненным анализом и поиском ошибок в инженерных изысканиях, или нарушением регламента строительства. При этом полностью отсутствует критический анализ достоверности параметров сопротивления сдвигу водонасыщенных глинистых грунтов, используемых в расчетах несущей способности оснований сооружений, которые проектируются по второму предельному состоянию.

В настоящей статье анализируются результаты исследований структурирования поровой воды в различных глинистых грунтах в зависимости от их физического состояния, гранулометрического и минерального состава, а также состава поровых вод на установках ЯМР различного поколения (ЭХО-4 и ЭХО-12). Сравнительная оценка результатов показала, что в глинистых грунтах даже текучей консистенции отсутствует свободная вода. Поровая вода характеризуется различной степенью структурированности по мере удаления от активных центров твердых частиц. Такой вывод сделан на основе полученных данных по значениям времени спин-решетчатой релаксации T_1 и ширине спектральных линий NWMH.

Структурированность поровой воды в тонкодисперсных грунтах предопределяет ее инертность к восприятию давления в условиях нового напряженного состояния в зонах взаимодействия системы сооружение – глинистый грунт [33, 34]. Такое положение диктует необходимость применять реологические принципы, характеризующие поведение глинистых грунтов как квазиоднородной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Powrie W. Soil mechanics. Concepts and applications. CRC Press, 2014. 682 p.
2. Мироненко В.А., Сердюков Л.И., Котов И.Г. О влиянии сжимаемости «водоупорных» пород на процесс фильтрации в водоносных пластах // Записки Горного института. 1971. Т. 62. № 2. С. 39.
3. Флорин В.А. Основы механики. В 2 т. Л.; М.: Госстройиздат, 1959-1961.
4. Зарецкий Ю.К. Теория консолидации грунтов. М.: Наука, 1967. 270 с.
5. Bernal J.D., Fowler R.H. A Theory of Water and Ionic Solution, with Particular Reference to Hydrogen and Hydroxyl Ions // The Journal of Chemical Physics. 1933. Vol. 1. № 8. P. 515-548. DOI: 10.1063/1.1749327
6. Мустафин М.Г., Нгуен Хыу Вьет. Оценка вертикальных смещений оснований зданий и сооружений на основе анализа элементов деформационной сети // Геодезия и картография. 2019. № 3. С. 11-19. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-945-3-11-19



7. Шулятьев О.А., Исаев О.Н., Наятов Д.В., Шарафутдинов Р.Ф. Прогноз развития деформаций основания многофункционального жилого комплекса // Геотехника. 2017. № 2. С. 4-15.
8. Трабун В.И., Шулятьев О.А., Шулятьев С.О. и др. Анализ результатов геотехнического мониторинга башни «Лахта Центр» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. № 2. С. 15-21.
9. Васенин В.А., Шашкин А.Г. Вековые осадки зданий Санкт-Петербурга. СПб: Изд-во Института «Геореконструкция», 2022. 440 с.
10. Шашкин А.Г., Зенцов В.Н., Улицкий В.М. Развитие подземного пространства мегаполиса // Жилищное строительство. 2018. № 9. С. 30-36.
11. Корнилов Ю.Н., Царева О.С. Совершенствование методики наблюдений за деформациями зданий и сооружений // Геодезия и картография. 2020. № 4. С. 9-18. DOI: [10.22389/0016-7126-2020-958-4-9-18](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-958-4-9-18)
12. Дерягин Б.В., Чупаев Н.В. Новые свойства жидкостей. М.: Наука, 1971. 176 с.
13. Metsik M.S. Splitting of Mica Crystals and Surface Energy // The Journal of Adhesion. 1972. Vol. 3. Iss. 4. P. 307-314. DOI: [10.1080/00218467208072201](https://doi.org/10.1080/00218467208072201)
14. Gudkov O.I., Metsik M.S. Dielectric properties of mica at shf // Soviet Physics Journal. 1973. Vol. 16. № 5. P. 664-667. DOI: [10.1007/BF00898805](https://doi.org/10.1007/BF00898805)
15. Jacobsen N.E. NMR Data Interpretation Explained: Understanding 1D and 2D NMR Spectra of Organic Compounds and Natural Products. Wiley, 2017. 656 p.
16. Meyer M., Buchmann C., Schaumann G.E. Determination of quantitative pore-size distribution of soils with ¹H NMR relaxometry // European Journal of Soil Science. 2018. Vol. 69. Iss. 3. P. 393-406. DOI: [10.1111/ejss.12548](https://doi.org/10.1111/ejss.12548)
17. Jäger A., Bertmer M., Schaumann G.E. The relation of structural mobility and water sorption of soil organic matter studied by ¹H and ¹³C solid-state NMR // Geoderma. 2016. Vol. 284. P. 144-151. DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.08.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.024)
18. Brax M., Köhne M., Kroener E., Schaumann G.E. Potential of NMR relaxometry to unravel the properties of mucilage in several pore sizes // Geoderma. 2019. Vol. 340. P. 269-278. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.01.013](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.013)
19. Moritsugu N., Nara T., Koda S. et al. Molecular Mechanism of Acceleration and Retardation of Collective Orientation Relaxation of Water Molecules in Aqueous Solutions // The Journal of Physical Chemistry B. 2020. Vol. 124. Iss. 51. P. 11730-11737. DOI: [10.1021/acs.jpcc.0c10036](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c10036)
20. Барях А.А., Андрейко С.С., Федосеев А.К. Газодинамическое обрушение кровли при разработке месторождений калийных солей // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 601-609. DOI: [10.31897/PMI.2020.6.1](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.1)
21. Shuangbiao Han, Zhiyuan Tang, Chengshan Wang et al. Hydrogen-rich gas discovery in continental scientific drilling project of Songliao Basin, Northeast China: new insights into deep Earth exploration // Science Bulletin. 2022. Vol. 67. Iss. 10. P. 1003-1006. DOI: [10.1016/j.scib.2022.02.008](https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.02.008)
22. Mukhopadhyay S., Parai R. Noble Gases: A Record of Earth's Evolution and Mantle Dynamics // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2019. Vol. 47. P. 389-419. DOI: [10.1146/annurev-earth-053018-060238](https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060238)
23. Chizhik V.I. NMR relaxation and microstructure of aqueous electrolyte solutions // Molecular Physics. 1997. Vol. 90. Iss. 4. P. 653-660.
24. Дашко Р.Э. Инженерно-геологический анализ и оценка водонасыщенных глинистых пород как основания сооружений. СПб: Изд-во Института «Геореконструкция», 2015. 384 с.
25. Pereira I., Fomitcheva-Khartchenko A., Petrini L., Kaigala G.V. Nip the bubble in the bud: a guide to avoid gas nucleation in microfluidics // Lab on a Chip. 2019. Vol. 19. № 14. P. 2296-2314. DOI: [10.1039/C9LC00211A](https://doi.org/10.1039/C9LC00211A)
26. Cheremisina O., Litvinova T., Sergeev V. et al. Application of the Organic Waste-Based Sorbent for the Purification of Aqueous Solutions // Water. 2021. Vol. 13. Iss. 21. № 3101. DOI: [10.3390/w13213101](https://doi.org/10.3390/w13213101)
27. Куликова Н.В., Данильев С.М., Ефимова Н.Н., Куликов А.И. Моделирование данных сейсмотомографии и электротомографии для песчано-глинистого разреза с наличием приповерхностных скоплений газа // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 2 (44). С. 26-30. DOI: [10.25714/MNT.2020.44.004](https://doi.org/10.25714/MNT.2020.44.004)
28. Бактериальная палеонтология / Под ред. А.Ю.Розанова. М.: Российская академия наук, 2021. 124 с.
29. O'Kelly B.C. Review of Recent Developments and Understanding of Atterberg Limits Determinations // Geotechnics. 2021. Iss. 1. P. 59-75. DOI: [10.3390/geotechnics1010004](https://doi.org/10.3390/geotechnics1010004)
30. Протосеня А.Г., Кумов В.В. Влияние структуры массива грунта в смешанном забое тоннеля на форму и размер мульд осадок земной поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 4. С. 5-21. DOI: [10.25018/0236_1493_2024_4_0_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_4_0_5)
31. Karasev M., Astapenka T. Assessment of the Influence of Formation Conditions of Embankments and Spoil Heaps on Their Stability When Dumped on Clay-Salt Slurries // Eng. 2025. Vol. 6. Iss. 1. № 2. DOI: [10.3390/eng6010002](https://doi.org/10.3390/eng6010002)
32. Яковлева А.А., Мовчан И.Б., Мединская Д.К., Садыкова З.И. Количественные интерпретации потенциальных полей: от параметрических пересчетов к геоструктурным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 11. С. 198-215. DOI: [10.18799/24131830/2023/11/4152](https://doi.org/10.18799/24131830/2023/11/4152)
33. Морозов К.В., Демехин Д.Н., Бахтин Е.В. Многокомпонентные датчики деформаций для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 80-97. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_6_2_0_80](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_2_0_80)
34. Деменков П.А., Романова Е.Л., Котиков Д.А. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола и вмещающего массива горных пород в условиях неравномерности его контура // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 11. С. 33-48. DOI: [10.25018/0236_1493_2023_11_0_33](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_33)

Авторы: Регина Эдуардовна Дашко, д-р геол.-минерал. наук, профессор (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-2469-0910>, Дарья Леонидовна Колосова, аспирант (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), daryakolmot@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6472-8399>, Антон Станиславович Мазур, специалист (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-2746-6762>, Александр Вячеславович Иевлев, научный сотрудник (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-8764-2852>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Исследование особенностей разрушения андезита и песчаника в условиях квазистатического и динамического нагружения

И.А.Банникова✉, С.В.Уваров, Д.В.Ефремов, М.В.Банников

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Как цитировать эту статью: Банникова И.А., Уваров С.В., Ефремов Д.В., Банников М.В. Исследование особенностей разрушения андезита и песчаника в условиях квазистатического и динамического нагружения // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 77-90. [EDN QCVFAN](#)

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование природных материалов, таких как песчаник и андезит, часто встречающихся в горно-, нефте-, газодобывающей промышленности и при строительстве дорог. Образцы цилиндрической формы испытывались под действием квазистатического и динамического нагружений в условиях сохранения фрагментов. Для установления стадийности и механизмов разрушения, определения распространения трещин в материале образцы исследовались методом рентгеновской томографии до и после испытаний. Квазистатическое одноосное сжатие осуществлялось с регистрацией полей деформации методом корреляции цифровых изображений и сигналов акустической эмиссии *in situ*. Выявлены отличительные особенности разрушения андезита и песчаника. Разрушение андезита, состоящего из твердой и мягкой фаз, происходит по мягкой фазе по квазихрупкому сценарию, а размер фрагментов соответствует твердой фазе. При формировании магистральных вертикальных трещин по всему объему песчаника достаточно однородного материала, состоящего из прочных, слабо связанных между собой песчинок, резкого падения несущей способности не наблюдалось благодаря тому, что песчинки продолжали удерживаться вместе за счет сил трения в условиях сжатия. После снятия нагрузки образец рассыпался на фрагменты. Разрушение образцов при квазистатическом нагружении происходило в две стадии – накопление повреждений (появление множества магистральных трещин, сонаправленных с линиями максимального напряжения) и образование дочерних трещин с последующим полным разрушением. В случае динамического сжатия при достаточном значении энергии нагружающего импульса происходило полное фрагментирование образца, причем разрушение сопровождалось отрывом образовавшихся фрагментов. Результаты работы предполагается использовать при создании численных моделей разрушения с учетом кинетики зарождения и роста дефектов в горных породах, в том числе для оптимизации процессов бурения.

Ключевые слова

разрушение горных пород; квазистатическое и динамическое нагружения; поле деформации; акустическая эмиссия; рентгеновская томография; электронная микроскопия; рентгеноструктурный анализ; корреляция цифровых изображений; андезит; песчаник

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края, проект № 20-41-596013, и в рамках Государственного задания ПФИЦ УрО РАН (тема № 124020200116-1).

Поступила: 27.06.2024

Принята: 28.01.2025

Онлайн: 27.06.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Горные породы играют ключевую роль в геологических процессах и имеют важное значение для понимания эволюции земной коры. Изучение их механических свойств и стадийности перехода к разрушению [1] под воздействием различных нагрузок является актуальной задачей современной геологии и материаловедения. Квазистатическое сжатие позволяет изучить медленные и постепенные процессы, происходящие в породах, в то время как динамическое сжатие моделирует быстрые и интенсивные нагрузки, характерные для природных катастроф [2, 3] и геологических процессов [4-6], а также процессов горной добычи, в том числе взрывными методами [7, 8].

Проведено множество экспериментальных и теоретических работ [9], посвященных исследованию механизмов, приводящих к деформации и разрушению конденсированных сред, таких как



каменистые горные породы [10-12], песчаники (глины) [13-15], стекла [16], жидкости (как неотъемлемые связующие в горной породе) [17, 18], стеклокерамики [19], керамики (композиты) [20, 21] и др. [22, 23], в широком диапазоне скоростей нагружения 10^{-4} - 10^9 с⁻¹. Такие работы являются актуальными и затрагивают многие сферы деятельности человека: моторо-, машино-, самолето- и кораблестроение, архитектура, строительство [24-26], горно-, нефте- и газодобывающая промышленность [27-29], космическая инженерия [30]. В экспериментальных [31, 32] и теоретических работах [33, 34] представлены интерпретация прогнозирования и описание динамики процесса разрушения образцов горных пород.

В настоящей работе в дополнение к фундаментальным исследованиям авторов [35] проведено комплексное исследование горных пород, чаще всего встречающихся при бурении скважин в горнодобывающей промышленности, при строительстве автомобильных и железных дорог, – песчаника и андезита. Из-за разнообразия этих пород прочностные свойства их образцов с разных месторождений могут существенно отличаться. Динамическое разрушение песчаника и андезита мало изучено. Для установления стадийности и механизмов разрушения этих пород проведено экспериментальное исследование материалов в условиях квазистатического и динамического нагружений с совместной регистрацией сигналов акустической эмиссии (АЭ) [16] и полей деформации методом корреляции цифровых изображений (DIC – digital image correlation) [36, 37]. В настоящее время АЭ и DIC приобретают все большую популярность в качестве методов исследования разрушения горных пород. Акустическая эмиссия обеспечивает высокую чувствительность к изменениям в структуре породы и позволяет получать информацию о динамике разрушения в режиме реального времени, тогда как анализ корреляции изображений точно определяет геометрические параметры трещин и их распределение. Эти методы помогают оценить механические свойства пород, прогнозировать их поведение при нагрузках и оценивать стадийность перехода от поврежденности к разрушению.

Методы

Образцы. Для исследований подобраны две характерные горные породы, чаще всего встречающиеся при бурении скважин, формировании карьеров месторождений и строительстве дорог. Песчаник предоставлен НТЦ «Газпромнефть» (Ботубинский горизонт, глубина забора 2920-2950 м, за пределами месторождения разведывательной скважины). Андезит собран в зоне установки опор кресельной канатной дороги на Эльбрус, высота 2350 м над уровнем моря, Кабардино-Балкарская Республика, пос. Терскол. Оба вида материала с предполагаемыми элементами кварцита. Для испытаний вырезались образцы цилиндрической формы. Максимальный размер образца был ограничен размерами установки для проведения динамических испытаний. Для соблюдения одинаковых начальных условий образцы при квазистатическом сжатии были той же формы. Масштабный фактор в данной работе не исследовался. Но, исходя из данных томографии образцов песчаника и андезита, характерные масштабы структурной гетерогенности меньше размеров образца. Можно предположить, что образец песчаника таких размеров составляет структуру пласта, из которого был взят, поэтому для таких образцов отсутствует влияние масштабного фактора. Параметры образцов и условия нагружения представлены в табл.1. Отличие андезита от песчаника состояло в том, что плотность песчаника варьировалась в более широком диапазоне – 2057-2600 кг/м³.

Таблица 1

Параметры и условия нагружения образцов

Материал	Номер образца	Метод нагружения	Средний диаметр d , мм	Средняя высота h , мм	Плотность ρ , кг/м ³		Начальная масса m , г
Песчаник	San1, San2, San3, San4	DL	10,80±0,01	10,20±0,01	2057-2600		1,82-2,58±0,0001
	San5, San6	QSL					1,9777±0,0001 2,0448±0,0001
Андезит	Mou1	QSL	11,06±0,01	11,79±0,01	2534	2545±48	2,8712±0,0001
	Mou2		11,04±0,01	10,23±0,01	2528		2,4763±0,0001
	Mou3	DL	11,05±0,01	11,24±0,01	2553		2,7522±0,0001
	Mou4		11,06±0,01	11,48±0,01	2563		2,8278±0,0001

Примечание. DL (dynamic loading) – динамическое нагружение; QSL (quasi-static loading) – квазистатическое нагружение.



Исследование состава материала методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Элементный состав исследовался по K-серии рентгеновского излучения с помощью системы энергодисперсионного анализа Oxford Instruments INCA X-ACT Spectrometer к электронному микроскопу Hitachi S-3400. Химический состав необходим для идентификации образцов (горные породы из различных месторождений могут различаться). Химический состав исследуемых материалов определялся при помощи сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N с приставкой к микроскопу INCA (под руководством В.П.Бачурихина, лаборатория электронной микроскопии, Пермский государственный национальный исследовательский университет). Состав образца песчаника Sanb представлен в табл.2. В данном материале преобладают следующие элементы: O (53,2-53,91 %), Si (23,26-25,28 %), т.е. кварцит с включением Al (8,63-8,86 %), Fe (4,00-4,37 %), Na (2,08-2,79 %), K (2,37-2,62 %) и небольшое количество Cl, Mg, Ca, Ti, S.

Таблица 2

Состав песчаника

Элемент	Испытание 1		Испытание 2	
	Количество, мас.%	Объем, ат. %	Количество, мас.%	Объем, ат. %
O K	53,20	67,85	53,91	68,36
Na K	2,79	2,48	2,08	1,83
Mg K	1,43	1,20	1,32	1,10
Al K	8,86	6,70	8,63	6,49
Si K	23,26	16,90	25,28	18,26
S K	0,24	0,15	—	—
Cl K	2,19	1,26	1,27	0,73
K K	2,62	1,37	2,37	1,23
Ca K	0,59	0,30	0,68	0,34
Ti K	0,44	0,19	0,46	0,20
Fe K	4,37	1,60	4,00	1,45
Итого	100		100	

Состав андезита (анализировался фрагмент массива, из которого были вырезаны образцы) представлен в табл.3. В исследуемом материале преобладают следующие элементы: O (61,08-63,26 %), Si (23,79-24,63 %), Al (5,94-6,28 %), Na (2,86-3,58 %), K (1,46-1,50 %), не исключается присутствие Ca (0,77-0,95 %), Fe (0,37-0,89 %).

Андезит имел белые включения, анализ которых проводился с помощью микроскопа дополнительно (табл.4). Во включении больше всего кварцита SiO₂ (O 57,9-58,53 %, Si 23,73-23,99 %) с небольшой примесью Al, Na, Ca, K, Fe.

Для сравнительного анализа проведено дополнительное исследование кварцита, полученного с центрального плато Уганды (Африка), с помощью электронной сканирующей микроскопии (табл.5): содержание элементов SiO₂ (O 61,12-63,06 %, Si 36,94-38,88 %) с небольшой примесью включений, в составе которого находились следующие элементы: O 53,3 %, Si 21,73 %, Al 13,53 %, K 6,76 %, Fe 2,83 %, Mg 1,16 %, Na 0,68 %.

Таблица 3

Состав андезита

Элемент	Испытание 1		Испытание 2	
	Количество, мас.%	Объем, ат. %	Количество, мас.%	Объем, ат. %
O K	61,08	73,33	63,26	74,99
Na K	2,86	2,39	3,58	2,95
Mg K	2,15	1,70	0,49	0,38
Al K	5,94	4,23	6,28	4,41
Si K	24,63	16,84	23,79	16,06
K K	1,50	0,74	1,46	0,71
Ca K	0,95	0,46	0,77	0,36
Fe K	0,89	0,31	0,37	0,13
Итого	100		100	



Таблица 4

Состав включения белого цвета андезита

Элемент	Испытание 1		Испытание 2	
	Количество, мас.%	Объем, ат.%	Количество, мас.%	Объем, ат.%
O K	57,90	70,88	58,53	71,45
Na K	3,47	2,96	3,67	3,12
Al K	9,76	7,09	8,83	6,39
Si K	23,73	16,55	23,99	16,68
K K	1,17	0,59	1,35	0,67
Ca K	3,96	1,94	3,00	1,46
Fe K	—	—	0,62	0,22
Итого	100,00		100,00	

Таблица 5

Состав кварцита и его включений

Элемент	Испытание 1		Испытание 2		Состав включений	
	Количество, мас.%	Объем, ат.%	Количество, мас.%	Объем, ат.%	Количество, мас.%	Объем, ат.%
O K	61,12	73,40	63,06	74,98	53,30	67,88
Na K	—	—	—	—	0,68	0,61
Mg K	—	—	—	—	1,16	0,98
Al K	—	—	—	—	13,53	10,22
Si K	38,88	26,60	36,94	2,02	21,73	15,76
K K	—	—	—	—	6,76	3,52
Fe K	—	—	—	—	2,83	1,03
Итого	100		100		100	

Для определения фазового состава представленные горные породы (кварцит, андезит, песчаник) были исследованы методом рентгеноструктурного анализа. Исследования проводились методом порошков, съемка осуществлялась на рентгеновском аппарате УРС-60 с помощью камеры РКУ ($d = 114,6$ мм) на фотопленку¹, излучение анода – Со. Полученные рентгенограммы представлены на рис.1. Все представленные горные породы имеют кристаллическую структуру. Гало, соответствующее аморфной фазе, отсутствует. Опираясь на данные элементного состава, можно предположить, что материал (кварцит) представляет собой SiO_2 в чистом виде (рис.1, а). Оценка межплоскостных расстояний по рентгенограмме на рис.1, а и сравнение их с табличными значениями² подтвердило, что в кварците преобладает α -кварц. Линии на рентгенограммах рис.1, а совпадают с линиями рентгенограммы на рис.1, б, в, следовательно, материалы из андезита

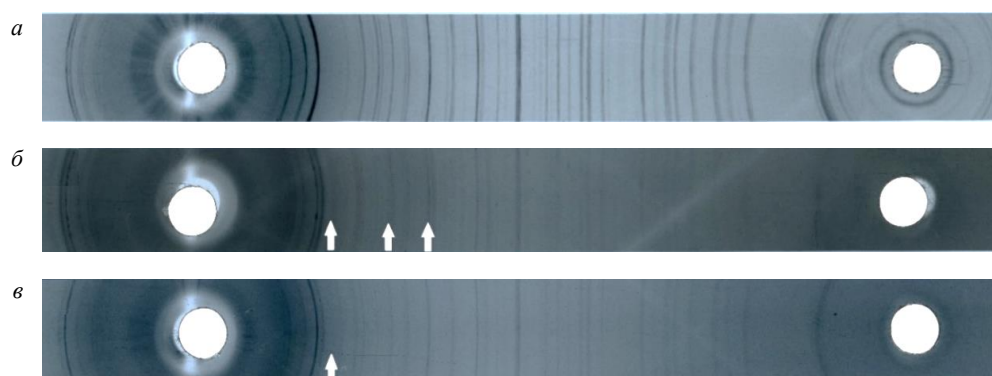


Рис.1. Рентгенограммы исследуемых горных пород: кварцит (а); андезит (б); песчаник (в)

¹ Китайгородский А.И. Рентгеноструктурный анализ. М.; Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. 650 с.

² Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. 862 с.



и песчаника также содержат α -кварц в большом количестве, что соответствует результатам элементного состава. Андезит и песчаник содержат дополнительные фазы. Элементный состав показывает, что природные материалы содержат в небольшом количестве доломит ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). На рентгенограмме (рис.1, б) прослеживаются три наиболее интенсивные линии межплоскостных расстояний $d/n = 2,89; 2,19; 1,80$, соответствующие доломиту, на рис.1, в прослеживается одна наиболее интенсивная линия с межплоскостным расстоянием $d/n = 2,89$, соответствующая доломиту (отмечена стрелкой)³.

Определение фазового состава горных пород методом рентгеноструктурного анализа весьма затруднительно, однако в совокупности с методом определения элементного состава и сравнения дифракционных картин уже известных веществ может быть использовано для быстрого определения фазового состава горных пород, присутствия аморфной или кристаллической фаз.

Квазистатическое нагружение природных материалов. Испытания образцов из природных материалов – песчаника и андезита – проводились на электромеханической универсальной испытательной машине Shimadzu AG-X plus совместно с приложением TRAPEZIUM X, осуществляющей одноосное квазистатическое сжатие. Испытания проводились с регистрацией полей деформации *in situ* методами корреляции цифровых изображений АЭ и DIC. Датчики регистрации АЭ были зафиксированы на верхней и нижней траверсах нагружающей машины Shimadzu AG-X plus. Камера LaVision Imager pro X была установлена напротив образца для регистрации полей деформации. Сохранность фрагментов реализовывалась за счет цилиндрического прозрачного экрана из ПММА, установленного на нижней траверсе. Скорость нагружения для всех образцов (San5, San6, Mou1, Mou2) была одинаковой – 0,5 мм/мин ($8,3 \cdot 10^{-6}$ м/с), а скорость деформации $\sim 10^{-3}$ с⁻¹. Зависимости нагружающей силы от хода верхней траверсы представлены на рис.2, а, б. На кривых, полученных на образцах андезита (Mou1, Mou2), присутствуют скачки, связанные с образованием трещин, не приводящих к полной потере несущей способности образца. По достижении максимума (~ 9 и 13,2 кН соответственно) образцы разрушались. В отличие от песчаника, образцы андезита вели себя подобно композитной керамике [20]. При разрушении образцов из песчаника достигались максимальные значения по силе нагружения перед разрушением $F \sim 2,75$ кН (San6) и 2,85 кН (San5), но затем образцы начинали, вероятно, компактироваться (рис.2, в); на рис.2, б наблюдается выход на плато при одном и том же значении $F \sim 0,8-1,2$ кН ($\sim 8-12$ МПа). Следовательно, песчаник ведет себя подобно пластичным материалам с выраженным пределом текучести, т.е. разрушение материала проходит в результате скольжения (сдвига) его слоев по определенным плоскостям, подобно пластическим материалам. Песчаник сохраняет несущую способность и форму после достижения предела прочности.

В работе проведена оценка среднего значения деформации для образцов андезита: Mou1 ~ 3 %, Mou2 – 5 %, для образцов из песчаника – 2,5 %. Оценены значения модуля деформации – для андезита $\sim 3,1-2,8$ ГПа, для песчаника – 1,2 ГПа. Данные, полученные при квазистатическом нагружении, далее использовались для выбора длины и скорости ударника при динамическом нагружении образцов. Внешний вид некоторых образцов песчаника и андезита сразу после нагружения представлены на рис.2, в-д. Для них характерно возникновение множественных магистральных трещин по высоте образца и образование большого количества фрагментов, соизмеримых с высотой образца. Результаты обработки сигналов системой регистрации АЭ для образцов из андезита и песчаника в условиях квазистатического нагружения приведены на рис.3. Сначала регистрируются одиночные импульсы (первые 50-70 с), связанные с зарождением магистральных трещин, а множество импульсов (начиная с 70-80 с) характерно для стадии объединения трещин, приводящей к полному разрушению образца. На рис.3, д, е показана вероятность распределения энергии импульсов больше некоторого заданного значения. Наблюдаются перегибы, которые связываются с переходными механизмами в процессе разрушения образцов. Протяженная ступенька на кумулятивном распределении энергии импульсов для песчаника (рис.3, е) может быть связана с псевдопластичным механизмом разрушения таких образцов.

³ Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. 862 с.

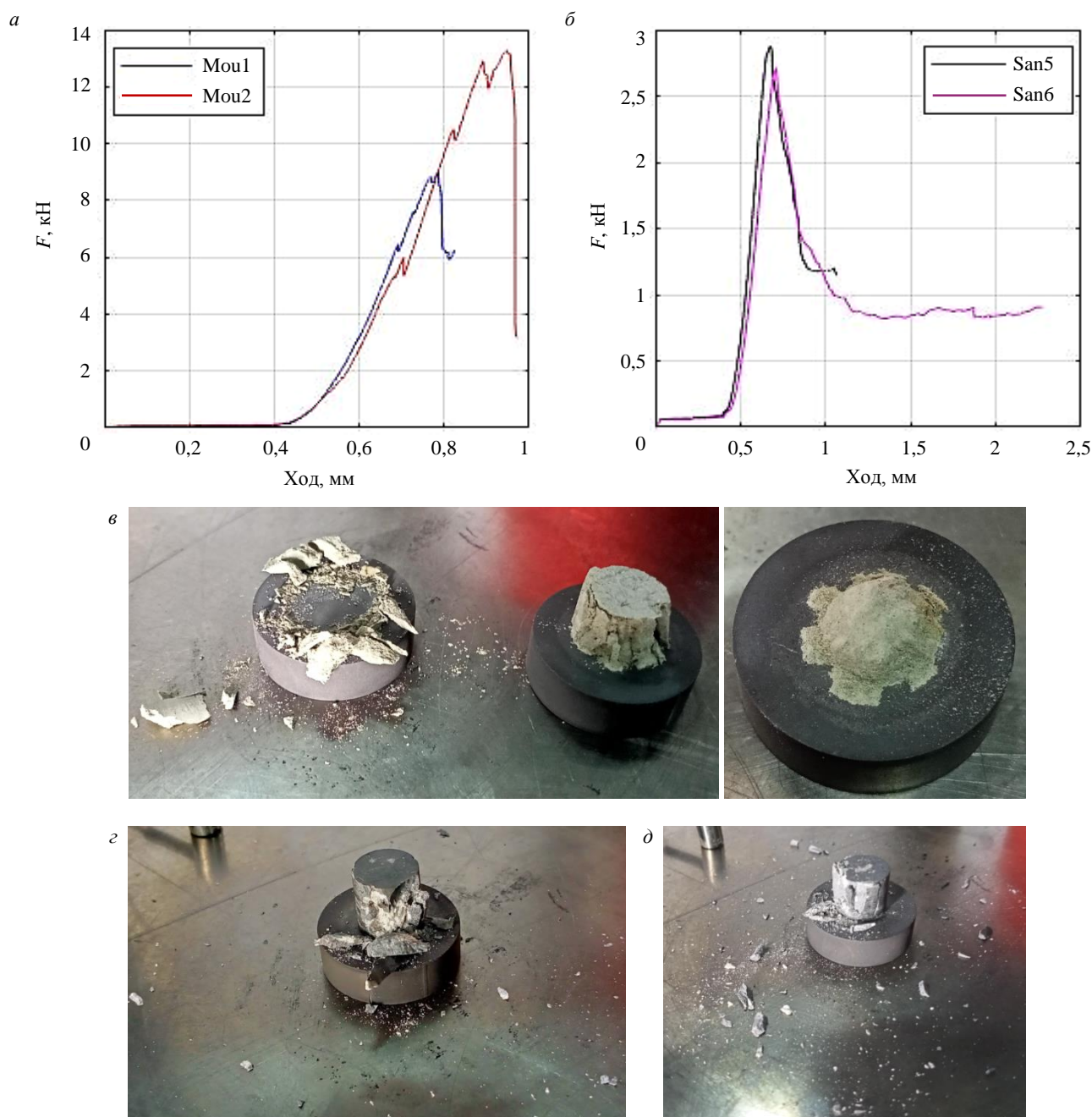


Рис.2. Зависимости приложенной силы от хода верхней траверсы испытательной машины Shimadzu AG-X plus для образцов андезита (а) и песчаника (б) и внешний вид образцов песчаника San6 (в) и андезита Mou1 (г), Mou2 (д) после квазистатического сжатия

Приведены поля деформаций в результате обработки данных системой регистрации DIC при испытаниях образцов из андезита (рис.4, а) и песчаника (рис.4, б) на квазистатическое сжатие. В образцах Mou1 и Mou2 в процессе нагружения наблюдаются растрескивание материала и образование сетчатой структуры по границам кварцитовых зерен (рис.4, а). В критический момент образец фрагментируется на большое число трехмерных фрагментов среднего размера и разрушается. В образцах песчаника (рис.4, б) явно выражено возникновение вертикальной магистральной трещины и на критическом этапе эксперимента – появление множества дочерних трещин по всему объему. Образец разрушается на крупные фрагменты и отдельные песчинки. Как показали данные рентгеновской томографии, в образцах природного материала нельзя исключить наличие трещин до испытаний.

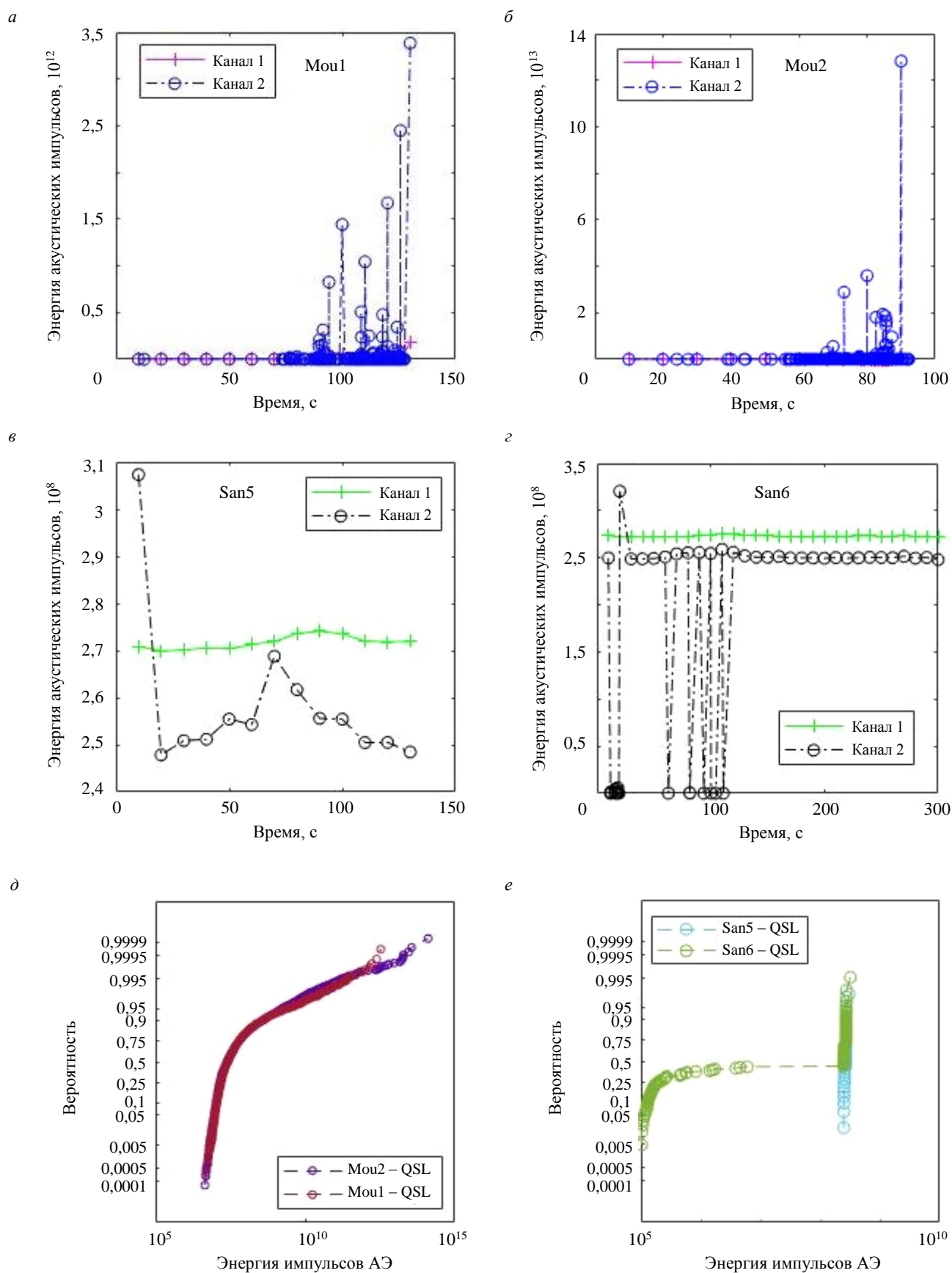


Рис.3. Сигналы энергии акустических импульсов с течением времени: для образцов андезита (а, б) и песчаника (в, г), а также вероятность распределения энергии импульсов при разрушении для андезита (д) и песчаника (е)

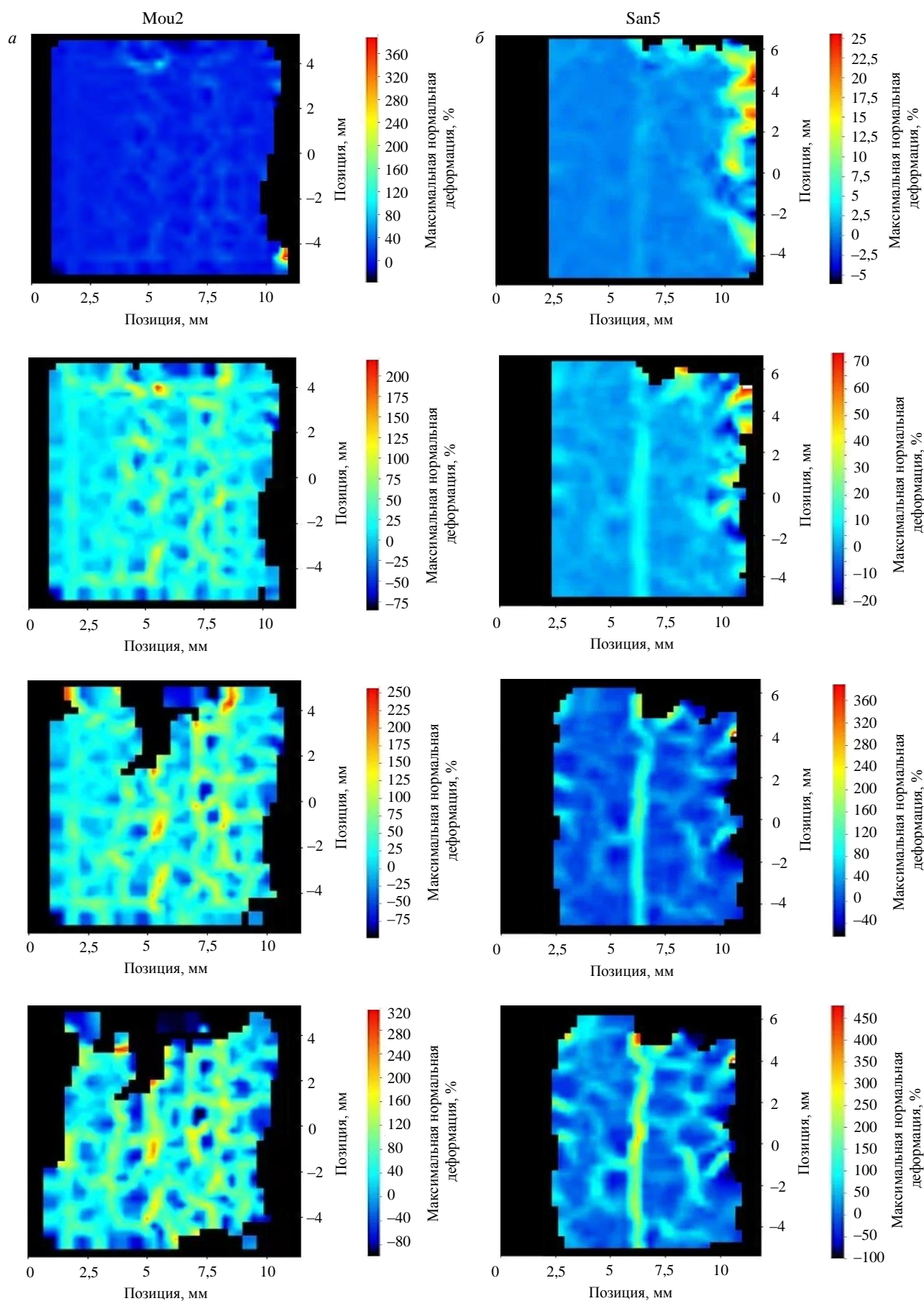


Рис.4. Данные полей деформаций методом DIC для образца андезита Mou2 (а) и образца песчаника San5 (б) в условиях квазистатического сжатия



Динамическое нагружение образцов (песчаник, андезит) проводилось в условиях сохранения фрагментов и реализовывалось на модифицированной установке разрезных стержней Гопкинсона (РСГ-25) (лаборатория физических основ прочности, ИМСС УрО РАН, Пермь). Параметры эксперимента (длина и скорость ударника) выбирались такими, чтобы максимально достижимое давление на образец (определяемое скоростью ударника) и максимально достижимая деформация (определяемая скоростью и длиной ударника) гарантированно позволяли разрушить образец. Для оценки этих величин использовались данные квазистатического нагружения. Динамическое нагружение образцов андезита (Mou3, Mou4) проводилось при разных скоростях ударника – 9,8 и 20,8 м/с. При достижении максимальных значений напряжений для Mou3 (нагружающее напряжение $\sigma = 143$ МПа, деформация $\varepsilon = 7,5 \cdot 10^{-3}$) скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ равнялась 430 с^{-1} , для Mou4 ($\sigma = 428$ МПа, $\varepsilon = 15,3 \cdot 10^{-3}$) скорость деформации составила 1353 с^{-1} (рис.5, а). Значение энергии разрушения определялось как площадь под деформационной кривой до σ_{\max} для образца Mou3 – 0,84 Дж (из возможных под всей кривой 1,7 Дж), для образца Mou4 – 5,2 Дж (из возможных 9,8 Дж). Поскольку образец Mou3 нагружался с меньшей скоростью ударника, он не был полностью разрушен, но, как показал анализ рентгеновской томографии, был испещрен трещинами по всему объему. Другой образец фрагментировался полностью, проводился анализ статистики его фрагментации. Фрактолюминесценцию данных образцов зафиксировать не удалось, сигналы слабые, несмотря на объемное содержание кварцита в материале.

Динамическое нагружение цилиндрических образцов песчаника проводилось в интервале скоростей деформации $863\text{--}1447 \text{ с}^{-1}$ в интервале напряжений $603,8\text{--}44,8$ МПа. Результаты обработки данных с регистрирующей аппаратуры установки «РСГ-25» приведены на рис.5, б. Оценена энергия нагружения образцов (как площадь под кривой «напряжение – деформация»): San1 – 2,3, San2 – 1,75, San3 – 8,3, San4 – 6,38 Дж. Все образцы были разрушены в режиме сохранения фрагментов (не менее 98 % от начальной массы образца).

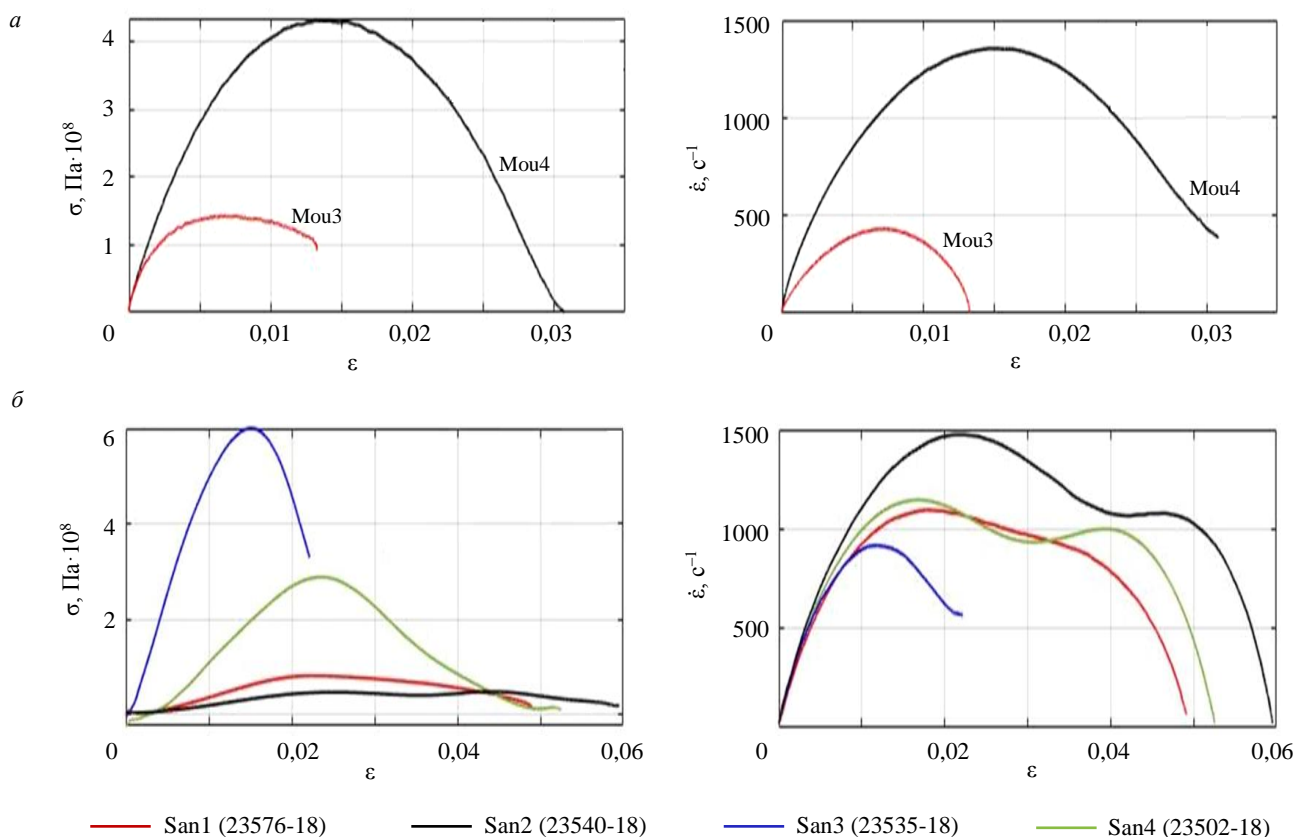


Рис.5. Изменение нагружающего напряжения и скорости деформации от значения деформации образцов андезита (а) и песчаника (б)



Исследование образцов методом рентгеновской томографии. Для определения распространения трещин и образования поверхности разрушения проводились исследования образцов до и после испытаний на рентгеновском томографе Bruker (ИМСС УрО РАН, Пермь). На конечное разрушение материала оказывают влияние не только условия нагружения, но и свойства материала, дефекты (поры, трещины) до испытаний. В работе представлен анализ рентгеновской томографии некоторых образцов песчаника (San7 – образец из той же партии, что и San5, San6), андезита (Mou3, Mou4). До испытаний андезит и песчаник были неоднородными по составу, с вкраплениями материалов другого типа, что подтверждается результатами исследования состава материалов на электронном сканирующем микроскопе Hitachi S-3400N и рентгеноструктурного анализа. Также в образцах песчаника (рис.6, *а-в*), в отличие от андезита (рис.6, *г-е*), наблюдались трещины. В образцах присутствуют неоднородности одинаковой плотности, выделенные одним цветом на приведенных изображениях. После испытаний исследовались образцы, не полностью фрагментированные.

Несмотря на наличие или отсутствие небольших трещин в образцах песчаника его разрушение под действием квазистатического сжатия проходило по единому сценарию: накопление поврежденности по всему объему – формирование магистральных трещин по высоте образца и последующее разрушение (см. рис.4, *б*). Приведены некоторые фотографии сечений образца San5 в результате квазистатического сжатия (рис.7, *а*). Несмотря на то, что крупный фрагмент не разрушился, внутри него наблюдаются трещины по высоте всего объема образца. Основная поверхность разрушения крупного фрагмента образует форму песочных часов.

После динамического нагружения (при скорости ударника 9,8 м/с) в деформированном образце андезита Mou3 на рентгеновском томографе зафиксировали трещины по всему объему (рис.7, *б*). Несмотря на присутствие включений (белые и серые) в материале, трещины распространялись не по их границам, а сквозь них, что говорит о малой степени влияния этих включений на характер распространения трещин.

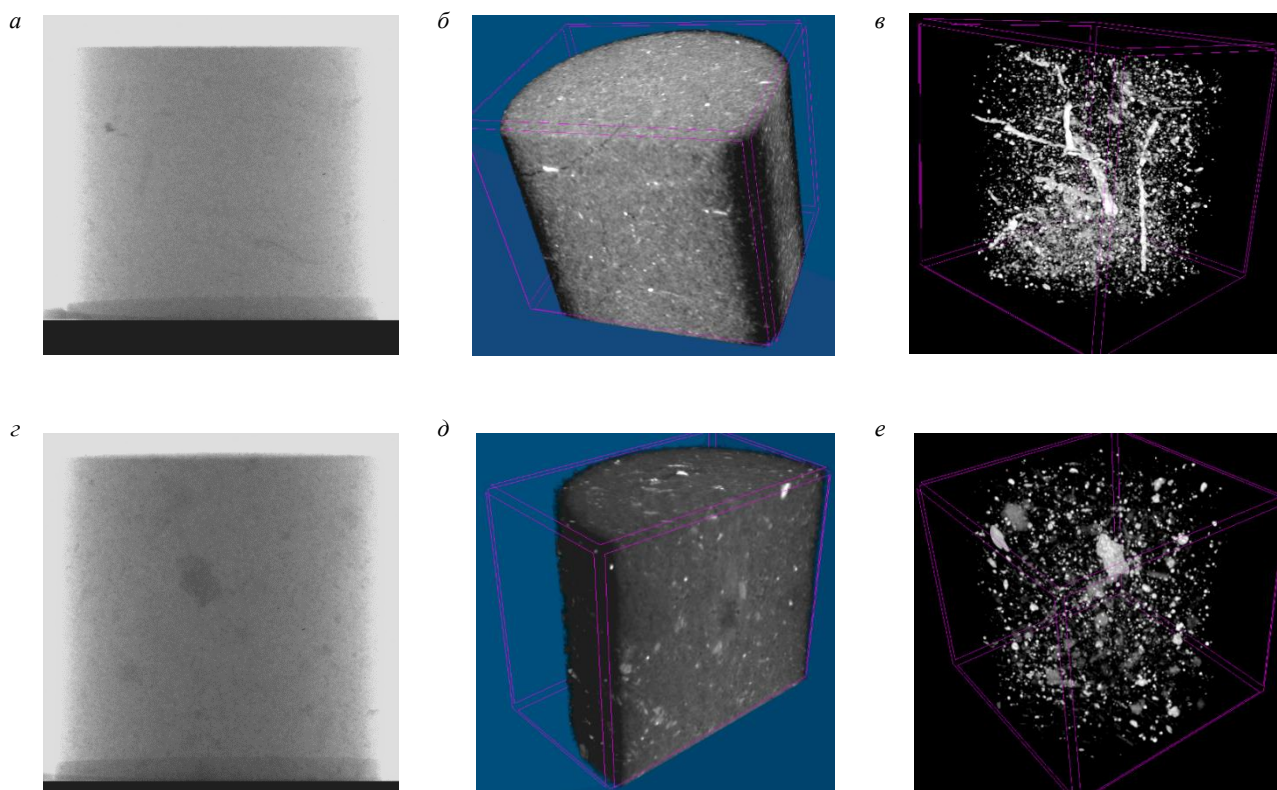


Рис.6. Результаты рентгеновской томографии до нагружения: внешний вид образцов песчаника (San7) и андезита (Mou4) (*а, г*); изображение их сечений (*б, д*) и 3D-изображения вкраплений в образцах – серые и белые области (*в, е*)

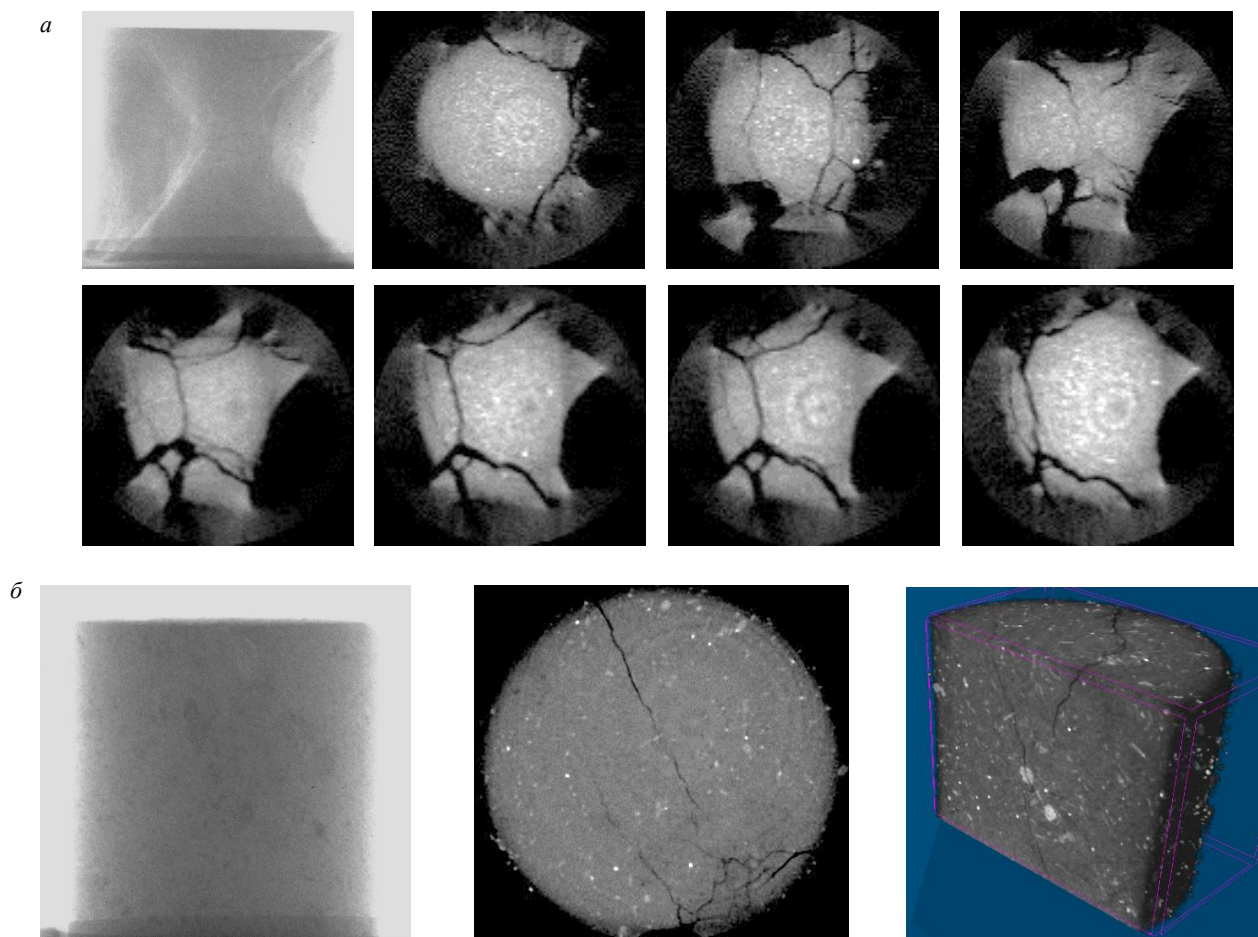


Рис.7. Результаты обработки данных рентгеновского томографа Bruker: *а* – фотографии образца песчаника San5 и его сечений по высоте с интервалом 1,5-2 мм после квазистатического сжатия; *б* – изображение образца андезита Mou3 после динамического сжатия (слева направо): вид сбоку, сечение по высоте вблизи верхнего основания, боковое сечение

Обсуждение результатов

Как показали результаты экспериментов и анализа данных, андезит состоит из твердой и мягкой фаз, поэтому размеры фрагментов соответствуют твердой фазе, а разрушение происходит по мягкой фазе. В таком материале происходит квазихрупкое разрушение. Песчаник является однородным материалом и состоит из прочных, слабо связанных между собой песчинок. Поэтому несмотря на то, что в образце формируются магистральные вертикальные трещины по всему объему образца, резкого падения несущей способности не наблюдается благодаря тому, что песчинки продолжают удерживаться вместе за счет сил трения в условиях сжатия. После снятия нагрузки образец рассыпается на фрагменты.

Предполагалось, что фазовый состав может повлиять на формирование трещин при квазистатическом и особенно при динамическом нагружении, для чего проводилась рентгеновская томография образцов до разрушения и после, а также при проведении эксперимента применялся метод DIC. Анализ андезита методом DIC показал, что разрушение проходит по границам вкраплений разных фаз, тогда как в песчанике при более однородном фазовом составе на последнем критическом этапе деформирования образуется одна магистральная и дочерние трещины (см. рис.4). Рентгеновская томография позволила увидеть, как магистральные трещины проходят в объеме образцов с неоднородным фазовым составом, и установить очаги поврежденности. Только после сопоставления данных DIC и томографии можно создать полную картину разрушения горной породы в процессе нагружения. Однако данных DIC недостаточно для однозначного вывода о процессе разрушения горных пород и характере развития поврежденности всего образца, поскольку места выхода трещин на поверхность образца (см. рис.4) не дают полной картины эксперимента, разрушения носят совершенно иной характер (рис.7).



Заключение

Проведены испытания образцов горной породы (песчаник и андезит) под действием квазистатического и динамического нагружений в условиях сохранения фрагментов в широком интервале скоростей деформаций (10^{-3} - 10^3 с $^{-1}$). Часть экспериментов выполнялась с *in situ* регистрацией акустической эмиссии, фрактолюминесценции и DIC. Как показал анализ данных акустической эмиссии, DIC и томографии, на разрушение природных материалов влияют не только условия нагружения, но и характеристики исследуемого материала – плотность, дефектная структура (поры и трещины), элементный состав. Разрушение образцов при квазистатическом нагружении происходило в две стадии: накопление поврежденности (появление множества магистральных трещин) и последующее полное разрушение [35]. В случае динамического сжатия при достаточном значении энергии нагружающего импульса происходило полное фрагментирование образца, причем разрушение сопровождалось отрывом образовавшихся фрагментов.

Для получения полной картины необходимо сопоставить данные АЭ и DIC с результатами анализа статистики фрагментации горных пород и данных морфологии поверхности разрушения. Исследование акустической эмиссии при нагружении проводилось для последующего анализа стадийности процесса перехода от режима накопления поврежденности к макроскопическому нагружению материала. Для образцов андезита, исходя из энергии импульсов, выделяются две стадии (см. рис.3, а, б), когда на начальном этапе она почти не превышает пороговое значение, высокоэнергетические импульсы появляются при приближении к критической стадии. При этом при нагружении песчаника (см. рис.3, в, г) энергия сигналов акустической эмиссии остается на одном уровне, за исключением некоторых всплесков при формировании трещин скольжения. На графиках вероятности распределения энергии импульсов при нагружении андезита и песчаника (см. рис.3, д, е) можно увидеть точку перегиба, соответствующую переходу энергии импульсов АЭ от стадии накопления повреждений к критической стадии разрушения. Разделение стадий разрушения позволит обосновать методологию управляемой фрагментации в лабораторных условиях.

Полученные результаты используются при создании численных моделей разрушения горных пород. Эти модели учитывают многомасштабную кинетику зарождения и роста дефектов как критического явления (структурно-скейлинговые переходы). Возможно, в настоящее время количество испытанных образцов не позволяет сделать выводы о полной достоверности результатов, но в дальнейшем (с набором статистики) планируется использовать эти данные для оптимизации реальных процессов бурения.

Важным этапом является определение параметров модели на основе лабораторных экспериментов по фрагментации образцов породы в необходимом диапазоне интенсивностей нагружения. Статистические и кинетические закономерности фрагментации регистрируются с помощью независимых методов (распределение фрагментов по размерам (массе), кинетика сигналов фрактолюминесценции, акустической эмиссии). Методы обработки статистических распределений фрагментов по размерам и кинетике разрушения позволяют установить закономерности критичности. Оптимальными для реализации процессов бурения могут быть режимы, соответствующие множественной самоподдерживающейся фрагментации, которые определяются динамикой приложения нагрузки. Флуктуации сигналов акустической эмиссии можно связать с фрагментацией породы и образованием пластов при бурении.

Авторы выражают благодарность НТЦ «Газпромнефть» за предоставленные материалы, Пермскому государственному национальному исследовательскому университету (лаборатория электронной микроскопии) за предоставленное оборудование для исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Перишкин А.Ю. и др. Экспериментальное и численное изучение катастрофической стадии разрушения горных пород и горных массивов // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 5. С. 43-55. DOI: [10.24411/1683-805X-2020-15004](https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-15004)
2. Викторов С.Д., Кочанов А.Н., Одинцев В.Н. Фрагментация образцов углей при интенсивном динамическом воздействии // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83. № 6. С. 743-746. DOI: [10.1134/S0367676519060383](https://doi.org/10.1134/S0367676519060383)



3. Мартемьянов А.Н., Петров Ю.В. Изучение динамического разрушения пород песчаника на основе критерия инкубационного времени // Прикладная механика и техническая физика. 2019. Т. 60. № 3. С. 162-172. DOI: [10.15372/PMTF20190317](https://doi.org/10.15372/PMTF20190317)
4. Xibing Li, Fengqiang Gong, Ming Tao et al. Failure mechanism and coupled static-dynamic loading theory in deep hard rock mining: A review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. Iss. 4. P. 767-782. DOI: [10.1016/j.jrmge.2017.04.004](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.04.004)
5. Hong-bo Du, Feng Dai, Yi Liu et al. Dynamic response and failure mechanism of hydrostatically pressurized rocks subjected to high loading rate impacting // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2020. Vol. 129. № 105927. DOI: [10.1016/j.soildyn.2019.105927](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105927)
6. Yuan Xu, Feng Dai, Hongbo Du. Experimental and numerical studies on compression-shear behaviors of brittle rocks subjected to combined static-dynamic loading // International Journal of Mechanical Sciences. 2020. Vol. 175. № 105520. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2020.105520](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105520)
7. Нурхонов Х.А., Латипов З.Ё., Саидов К.А., Исломов М.А. Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на параметры взрывных работ при проходке подземных горных выработок // Universum: технические науки. 2024. № 5-4 (122). С. 35-38.
8. Заиров Ш.Ш., Каримов Ё.Л., Латипов З.Ё. и др. Разработка способа взрывания горных пород с сохранением геологической структуры рудных тел // Universum: технические науки. 2023. № 12-4 (117). С. 17-21.
9. Yang Ye, Thoeni K., Yawu Zeng et al. Numerical Investigation of the Fragmentation Process in Marble Spheres Upon Dynamic Impact // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. Vol. 53. Iss. 3. P. 1287-1304. DOI: [10.1007/s00603-019-01972-9](https://doi.org/10.1007/s00603-019-01972-9)
10. Карасев М.А., Петрушин В.В., Рысин А.И. Применение метода конечно-дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макроструктурном уровне // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 4. С. 48-66. DOI: [10.25018/0236_1493_2023_4_0_48](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_4_0_48)
11. Виноградов Ю.И., Хохлов С.В., Зигангиров Р.Р. и др. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 231-245.
12. Щербаков И.П., Чмель А.Е. Конкурентное накопление повреждений внутри и между зерен при разрушении гранита при повышенных температурах // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 11. С. 2084-2091. DOI: [10.15372/GiG20161110](https://doi.org/10.15372/GiG20161110)
13. Yan Cheng, Lockner D., Duda M. et al. Interlaboratory comparison of testing hydraulic, elastic, and failure properties in compression: lessons learned // Environmental Earth Sciences. 2023. Vol. 82. Iss. 21. № 509. DOI: [10.1007/s12665-023-11173-x](https://doi.org/10.1007/s12665-023-11173-x)
14. Eremeyev V.A., Balandin V.I., Balandin V.I. et al. Experimental study and numerical simulation of the dynamic penetration into dry clay // Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2023. Vol. 35. Iss. 2. P. 457-469. DOI: [10.1007/s00161-023-01189-w](https://doi.org/10.1007/s00161-023-01189-w)
15. Vinciguerra S.C., Greco A., Pluchino A. et al. Acoustic Emissions in Rock Deformation and Failure: New Insights from Q-Statistical Analysis // Entropy. 2023. Vol. 25. Iss. 4. № 701. DOI: [10.3390/e25040701](https://doi.org/10.3390/e25040701)
16. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф. Экспериментальное и теоретическое изучение актов трещинообразования в гетерогенных материалах // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 6. С. 915-923. DOI: [10.15372/GiG20170607](https://doi.org/10.15372/GiG20170607)
17. Десятникова М.А., Игнатова О.Н., Раевский В.А., Целиков И.С. Динамическая модель роста и схлопывания пор в жидкостях и твердых веществах // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53. № 1. С. 115-122. DOI: [10.15372/FGV20170114](https://doi.org/10.15372/FGV20170114)
18. Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагин В.А. и др. Методы и средства определения динамической прочности воды // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2023. Т. 16 (3). С. 258-271.
19. Okuma G., Maeda K., Yoshida S. et al. Morphology of subsurface cracks in glass-ceramics induced by Vickers indentation observed by synchrotron X-ray multiscale tomography // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. № 6994. DOI: [10.1038/s41598-022-11084-0](https://doi.org/10.1038/s41598-022-11084-0)
20. Давыдова М.М., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Пространственно-временная масштабная инвариантность при динамической фрагментации квазихрупких материалов // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 1. С. 100-107.
21. Grady D.E. Hugoniot equation of state and dynamic strength of boron carbide // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 117. Iss. 16. № 165904. DOI: [10.1063/1.4918604](https://doi.org/10.1063/1.4918604)
22. Roters F., Diehl M., Shantraj P. et al. DAMASK – The Düsseldorf Advanced Material Simulation Kit for modeling multi-physics crystal plasticity, thermal, and damage phenomena from the single crystal up to the component scale // Computational Materials Science. 2019. Vol. 158. P. 420-478. DOI: [10.1016/j.commatsci.2018.04.030](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.04.030)
23. Fengbo Han, Roters F., Raabe D. Microstructure-based multiscale modeling of large strain plastic deformation by coupling a full-field crystal plasticity-federal solver with an implicit finite element solver // International Journal of Plasticity. 2020. Vol. 125. P. 97-117. DOI: [10.1016/j.iplas.2019.09.004](https://doi.org/10.1016/j.iplas.2019.09.004)
24. Макеев А.И. Формирование маршрута магистральной трещины разрушения в многоуровневой структуре конгломератных строительных композитов // Строительство и реконструкция. 2023. № 5. С. 119-131. DOI: [10.33979/2073-7416-2023-109-5-119-131](https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-109-5-119-131)
25. Valavi M., Casar Z., Mohamed A.K. et al. Molecular dynamic simulations of cementitious systems using a newly developed force field suite ERICA FF // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 154. № 106712. DOI: [10.1016/j.cemconres.2022.106712](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106712)
26. Соколова Ю.А., Кондращенко В.И., Кесарийский А.Г. и др. Расчетно-экспериментальные исследования внутренних напряжений в строительных материалах // Эксперт: теория и практика. 2020. № 4(7). С. 60-65. DOI: [10.24411/2686-7818-2020-10037](https://doi.org/10.24411/2686-7818-2020-10037)
27. 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](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139)
28. Кориунов 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](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.16)



29. Sakuma H., Lockner D.A., Solum J., Davatzes N.C. Friction in clay-bearing faults increases with the ionic radius of interlayer cations // Communications Earth & Environment. 2022. Vol. 3. № 116. DOI: [10.1038/s43247-022-00444-3](https://doi.org/10.1038/s43247-022-00444-3)
30. Katsuragi H. Physics of Soft Impact and Cratering. Springer, 2016. 307 p. DOI: [10.1007/978-4-431-55648-0](https://doi.org/10.1007/978-4-431-55648-0)
31. Шкуратник В.Л., Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л. Закономерности акустической эмиссии каменной соли при различных скоростях одноосного деформирования и температурном воздействии // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61. № 3. С. 190-197. DOI: [10.15372/PMTF20200320](https://doi.org/10.15372/PMTF20200320)
32. Потокин А.С., Пак А.К. Исследования акустической и электромагнитной эмиссий при одноосном сжатии образцов скальных горных пород // Наукосфера. 2020. № 11 (2). С. 86-91. DOI: [10.5281/zenodo.4309468](https://doi.org/10.5281/zenodo.4309468)
33. Кульков Д.С., Имашев С.А. Анализ сигналов акустической эмиссии в образцах геоматериалов в условиях одноосного сжатия // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова. 2019. № 2-1 (50). С. 274-280.
34. Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Зайцев А.В. и др. Особенности проявления эффекта Кайзера при трехосном непропорциональном сжатии песчаника с переориентацией приложенных напряжений // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2023. Т. 10. № 1. С. 69-76. DOI: [10.15372/FPVGN2023100110](https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100110)
35. Bannikova I.A., Uvarov S.V., Chudinov V.V., Naimark O.B. Scaling laws in fragmentation dynamics of ceramics and natural materials // Procedia Structural Integrity. 2023. Vol. 47. P. 602-607. DOI: [10.1016/j.prostr.2023.07.063](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.063)
36. Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. и др. Особенности локализации деформации при растяжении сильвинита // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 2. С. 127-138. DOI: [10.15593/perm.mech/2015.2.08](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.2.08)
37. Ударцев А.А. Анализ полей деформаций методом корреляции цифровых изображений образцов горных пород с дефектом при одноосном сжатии // Горное эхо. 2019. № 3 (76). С. 34-37. DOI: [10.7242/echo.2019.3.9](https://doi.org/10.7242/echo.2019.3.9)

Авторы: Ирина Анатольевна Банникова, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник (Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия), talgacheva@icmt.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1344-1265>, Сергей Витальевич Уваров, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник (Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-7538-0971>, Денис Викторович Ефремов, инженер (Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-6509-1228>, Михаил Владимирович Банников, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник (Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-5737-1422>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Реконструкция геодинамической истории комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал: мультидисциплинарный подход

А.В.Березин¹, Л.И.Салимгараева^{1,2}✉, В.Н.Пучков²

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Как цитировать эту статью: Березин А.В., Салимгараева Л.И., Пучков В.Н. Реконструкция геодинамической истории комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал: мультидисциплинарный подход // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 91-100. [EDN AEBPRK](#)

Аннотация

Представлено детальное изучение истории развития комплекса Марун-Кеу на Полярном Урале. С помощью оригинальных и литературных данных определены диапазоны значений температур и давлений магматической и метаморфической стадий эволюции пород, геотермический градиент и мощность континентальной коры. В термобарометрических расчетах для магматической стадии используют методы машинного обучения (алгоритм «случайного леса»), основанные на экспериментальных данных, и требуют минимальных петрохимических сведений о составе пород. Оценки *PT* параметров метаморфической стадии проводились программным комплексом THERIAK-DOMINO. Породы, вмещающие эклогиты, могут быть результатом частичного плавления континентальной коры под воздействием разогретых основных-ультраосновных расплавов. Установлено, что давление на пике эклогитового метаморфизма, вероятно, не превышало 21 кбар, а значения температуры – 730-750 °C. Регрессивный метаморфизм в эклогитах Марун-Кеу был ограничен температурой не выше 640 °C и давлением не ниже 5 кбар. Геотермический градиент при становлении протолитов эклогитов составлял 13 °C/км, что хорошо согласуется с современными данными для континентальной коры. Угол погружения субдуцировавшей плиты был оценен в 6-8°, а расчетная скорость субдукции составляла 2,2-2,9 см/год, что не противоречит гипотезе континентальной субдукции.

Ключевые слова

метаморфизм; петрогенезис; геодинамика; эклогит; коровая эволюция; субдукция

Финансирование

Исследования выполнены в рамках проекта Российского научного фонда № 22-17-00177.

Поступила: 28.08.2024

Принята: 28.01.2025

Онлайн: 27.06.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Уральский ороген представляет классический пример складчатого пояса, прошедшего полный цикл геодинамической эволюции [1]. В пределах Уральского орогена находится значительное количество месторождений различных полезных ископаемых [2-4]. Комплекс Марун-Кеу на Полярном Урале – один из эталонных мест проявления эклогитов – главнейших маркеров геодинамических обстановок. По причине удаленности и сложного геологического строения этот комплекс до сих пор изучен слабо; его возраст [5-7], характер протолитов эклогитов [8, 9], условия образования пород [10-12] и положение в истории развития региона [13-15] являются предметами дискуссий. Большинство проведенных исследований комплекса Марун-Кеу сосредоточено на участке Слюдяная горка. На сравнительно малой площади (~5 км²) обнажаются эклогиты, развитые по различным типам пород – от ультрабазитов до долеритовых порфиринов.

Наиболее значимый вклад в изучение геологического строения комплекса внесен Н.Г. Удовиной, опубликовавшей в 1971 г. монографию «Эклогиты Полярного Урала» по результатам детальных геолого-петрографических работ 1956 и 1962 годов [8]. Проявления эклогитов представлены



блоками и линзовидными телами, размещенными в гнейсах, иногда с участками амфиболитов. В эклогитах имеет место развитие гранатитов и кианитсодержащих парагенезисов.

Эклогитизация контролируется зонами деформаций [14], которые являются проводниками флюидов. Она проявлена в зонах сдвига мощностью от 1 см до 10 м, тогда как в стороне от зон деформаций сохраняются магматические текстуры и минералы исходных интрузивных пород. В этих зонах деформаций часто образуется сеть прожилков, сложенных как эклогитами, так и номинеральными зональными агрегатами, представленными омфацитом, гранатом и амфиболом. Метаморфизм эклогитовой фации привел к образованию сложных взаимоотношений эклогитов и амфиболитов, что может стать причиной ошибочных *PT* реконструкций.

Выделяются несколько направлений исследований эклогитов Марун-Кеу: исследование состава минеральных фаз, определение *PT* условий формирования минеральных парагенезисов и оценка времени формирования с последующей геодинамической интерпретацией. В большинстве работ исследуется небольшая группа образцов – не более десятка, а чаще – от одного до трех [10-12]. Такая особенность часто приводит к многообразию гипотез, так как разные авторы исследуют пробы из буквально одного обнажения. В связи с тем, что критерии отбора образцов зависят от специфики исследования (например геохронология и масс-балансовые расчеты для метасоматитов), они могут давать разные результаты. Об этом свидетельствует значительный разброс *PT* параметров для комплекса Марун-Кеу (рис.1) и соответственно наличие разных геодинамических моделей.

Процесс метаморфизма приурочен к зонам трещиноватости и деформаций и особенно затрагивает мелкие ксенолиты эклогитов. Однако зафиксированы тела массивных эклогитов без видимых признаков привноса вещества. Отметим, что ни в одной из известных авторам работ не приводятся оценки относительного количества метаморфически измененных пород по всему комплексу Марун-Кеу. Таким образом, предполагая, что незначительная часть пород была изменена (сильноизмененные породы по данным литературного источника в нашу выборку не включались), с обработкой большого количества

данных по их составам возможно выделить особенности, характерные для всего комплекса в целом. За более чем шестидесятилетний период исследования комплекса Марун-Кеу опубликовано значительное количество геохимической информации по породам, которая часто использовалась описательно, без интерпретации.

Цель настоящей работы – выявить основные тенденции в эволюции комплекса Марун-Кеу на основе большого количества данных по составу пород, который соответственно и определяет минеральные парагенезисы в них. Для этого решался вопрос, не противоречат ли результаты ранних оценок параметров эволюции, полученные по небольшому количеству представительных образцов, обобщенной модели, предложенной авторами и использующей ретроспективные данные по составам пород (в том числе при отсутствии данных по составу минералов). Оценивался характер эволюции протолитов эклогитов Марун-Кеу от магматической стадии к пиковым *PT* условиям. Впервые устанавливался генезис гнейсов, содержащих блоки эклогитов и ультрабазитов.

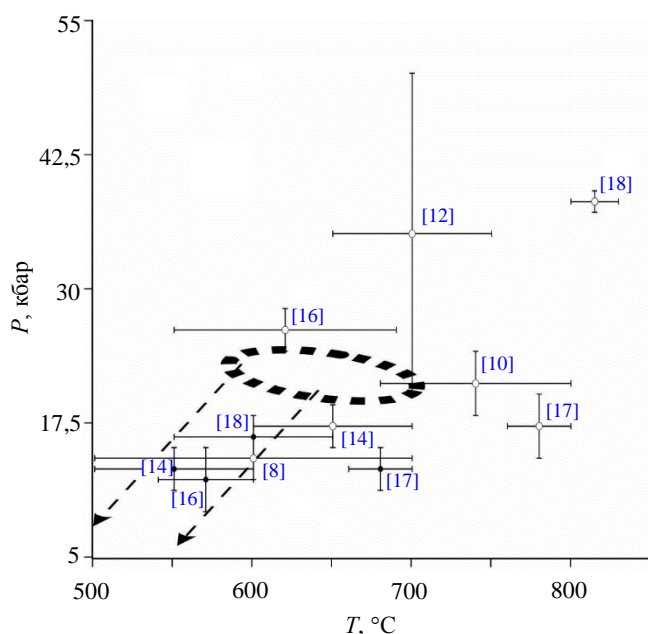


Рис.1. Сводная диаграмма *PT* параметров для пород комплекса Марун-Кеу, построенная по опубликованным данным. Белые маркеры – параметры «пиковой» стадии, черные – регрессивной стадии метаморфизма. Горизонтальные и вертикальные «усы» соответствуют расчетным погрешностям в *PT* параметрах. Область предполагаемых пиковых параметров метаморфизма указана эллипсом с пунктирной границей. Линии со стрелками ограничивают *PT* область для регрессивной стадии метаморфизма



Образцы и методы исследований

Помимо оригинальных анализов, из литературных источников извлечены данные о химическом составе пород. Включая данные авторов (15 образцов), выборка составила 66 образцов эклогитов и 19 – гнейсов и гранитов, ассоциирующих с эклогитами. Все составы пород для проведения моделирования нормированы к 100 %, исключая данные по MnO и P_2O_5 .

Первая задача заключалась в определении температур и давлений, соответствующих магматическому этапу становления пород. Для решения подобного рода задач обычно используется набор классических методов термобарометрии [19-21], однако в данном случае эти методы для массива данных часто невозможно корректно применить по причине полного или частичного отсутствия в литературе информации о составе минералов. В современной литературе описаны альтернативные методы термобарометрии, основанные на методах машинного обучения. С помощью более чем 2900 экспериментальных данных из 135 экспериментов в работе [22] показана возможность расчета температуры с ошибкой до 50 °С, давления – до 2 кбар, используя только химический состав пород по главным элементам. Принцип расчета следующий – петрогенные оксиды для каждой экспериментальной точки, за исключением P_2O_5 и MnO , были нормализованы до 100 %, также отмечены все стабильные минеральные фазы из 10 групп минералов (Ol, Орх, Срх, Plag, Amph, Bt, Ksp, Qtz, Ох, Gt – по [22]). Далее к массиву экспериментальных данных был применен метод «случайного леса» – один из алгоритмов машинного обучения, который строит несколько деревьев решений и в качестве ответа выдает среднее значение параметра (например, T или P).

Проведенный нами расчет температур и давлений кристаллизации по 66 ультрабазитам и базитам (в том числе эклогитам) показал, что эти параметры варьируются от 1340-1100 °С и 10-4 кбар соответственно. Средние ошибки расчета не превышают 75 °С для температуры и 2,5 кбар – по давлению. Сравнение с оценками, приведенными в работе [10], показало их высокую сходимость по давлению (6-8 кбар [10] и 6-9 кбар у авторов) и удовлетворительную – по температуре (1253±15 °С [10] и 1192±37 °С у авторов). Для определения плотностей силикатных расплавов с учетом петрогенных оксидов (10-компонентная система), давления и температуры нами был использован метод, реализованный в статье [23] на языке программирования Python, ошибка расчета не превышала 0,02 г/см³. Для установления возможной природы метаморфизованных кислых-средних пород, вмещающих эклогиты и ультрабазиты, в программном комплексе Rhyolite-MELTS [24] проведено моделирование возможности их образования при частичном плавлении докембрийской континентальной коры [25] под воздействием основных-ультраосновных расплавов.

С целью определения генерального тренда метаморфической эволюции пород авторами настоящей работы проведено физико-химическое моделирование в программном комплексе THERIAK-DOMINO [26]. Используются составы пород по главным элементам и литературные данные о наличии в них таких минеральных фаз, как пироксены, оливин, шпинель (для субсолидусной магматической ассоциации) и граната, омфацита, амфибола, хлорита (для метаморфической ассоциации). Для расчетов применялась адаптированная база данных ds55 [27] (два варианта для основных и кислых пород), поскольку зачастую данные о породе и составе минералов недоступны. Расчеты проводились при условном присутствии минеральных фаз при фиксированных PT параметрах. Для моделирования ассоциации Ol – Орх – Срх использовались база стандартных термодинамических свойств минералов и свойства смешения их твердых растворов JUN92.bs [28]. С целью оценки величин температур и давлений при переходе от магматической стадии к пиковой метаморфической – эклогитовой – отдельно рассчитывалась устойчивость ассоциации Ol – Орх – Срх, часто наблюдаемая в эклогитах как реликтовая. Моделирование проводилось при избытке H_2O (оценивалось по сопоставимости модельных и петрографических данных), Fe^{3+} оценено приблизительно, исходя из количества эпидота, биотита или амфибола в породах. Аббревиатуры минералов даны по статье [29], если не указано иное.

Обсуждение результатов

Проведенные расчеты позволили установить, что кристаллизация ультрабазитов и базитов (в том числе протолитов эклогитов) проходила в диапазоне температур 1340-1100 °С и давлений от 11 до 4 кбар. Это соответствует наблюдаемым в породах минеральным парагенезисам (Ol, Орх,



Срх, Plag). Такие данные позволяют непосредственно оценить плотности основных-ультраосновных расплавов, которые внедрялись в вещество коры. Поскольку система кора – интрузия должна находиться в гидростатическом равновесии, то плотности расплавов будут близки плотности коры, представляя, по сути, ее разрез (рис.2, а). Значения максимальной плотности $3,06 \text{ г/см}^3$ пород соответствуют наибольшим давлениям и температурам, убывая в дальнейшем до $2,60 \text{ г/см}^3$.

Оценка максимальной мощности коры при внедрении расплавов проводилась дифференцированно, в соответствии с изменением плотности и давления (рис.2, а), принимая все давление литостатическим. Полученные оценки составляют диапазон 38–40 км и хорошо согласуются с современными данными для континентальной коры [30]. Основываясь на рис.2, можно предположить, что по крайней мере часть наиболее высокотемпературных ультраосновных пород может определяться первичным мантийным происхождением вблизи границы кора – мантия, либо, как и локальная область высокоплотных ультрабазитов ($\sim 1170^\circ\text{C}$), быть кумулатной природы. Можно достаточно уверенно предположить, что ультраосновные и основные породы комплекса Марун-Кей обладают природой частичных выплавов из верхней мантии, тогда как часть пород, вмещающих блоки эклогитов и ультрабазитов, могла быть образована путем плавления вещества континентальной коры. Предложена авторская методика оценки температурного градиента, основанная на непосредственной генетической связи кислых пород как продуктов частичного плавления континентальной коры при термальном воздействии основных-ультраосновных расплавов. Предполагается, что породы континентальной коры уже нагреты до какой-то температуры, в соответствии с градиентом. В первом приближении можно считать, что плавление вмещающих пород континентальной коры начинается одновременно с внедрением в нее основных расплавов. Кристаллизация минералов из «приконтактовой», относительно магматической камеры, выплавки (кислой-средней по составу) начинается только после того, как система магматическая камера – кора достигнет температурного равновесия. Таким образом, непосредственная разница рассчитанных температур кристаллизации для основных и кислых-средних составов будет пропорциональна температуре непосредственного нагрева пород континентальной коры, определяемой температурным градиентом. Для нивелирования ошибок в индивидуальных определениях расчет проведен путем разбивки всего диапазона давлений на интервалы с шагом 1 кбар и вычисления средней разницы температур в их пределах (принцип такого расчета проиллюстрирован на рис.2, б). Как показывает рис.2, в, расчетные точки градиента образуют линейный тренд, угловой коэффициент

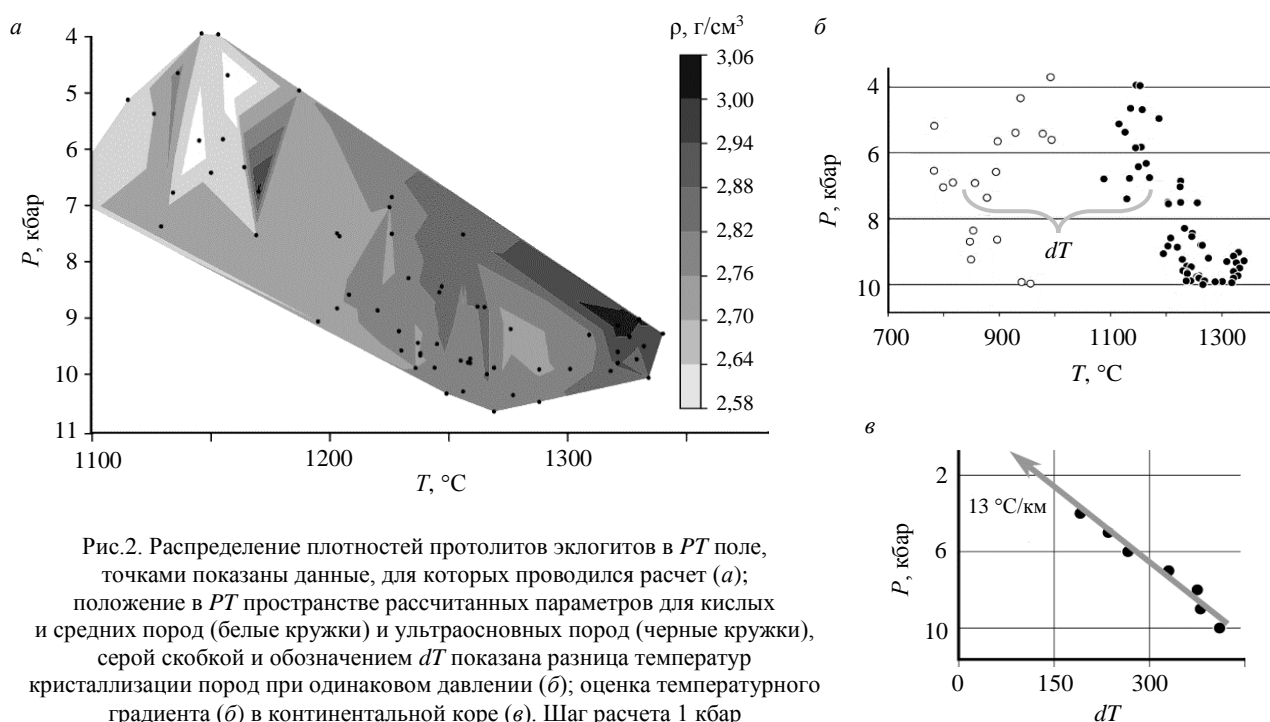


Рис.2. Распределение плотностей протолитов эклогитов в PT поле, точками показаны данные, для которых проводился расчет (а); положение в PT пространстве рассчитанных параметров для кислых и средних пород (белые кружки) и ультраосновных пород (черные кружки), серой скобкой и обозначением dT показана разница температур кристаллизации пород при одинаковом давлении (б); оценка температурного градиента (б) в континентальной коре (в). Шаг расчета 1 кбар

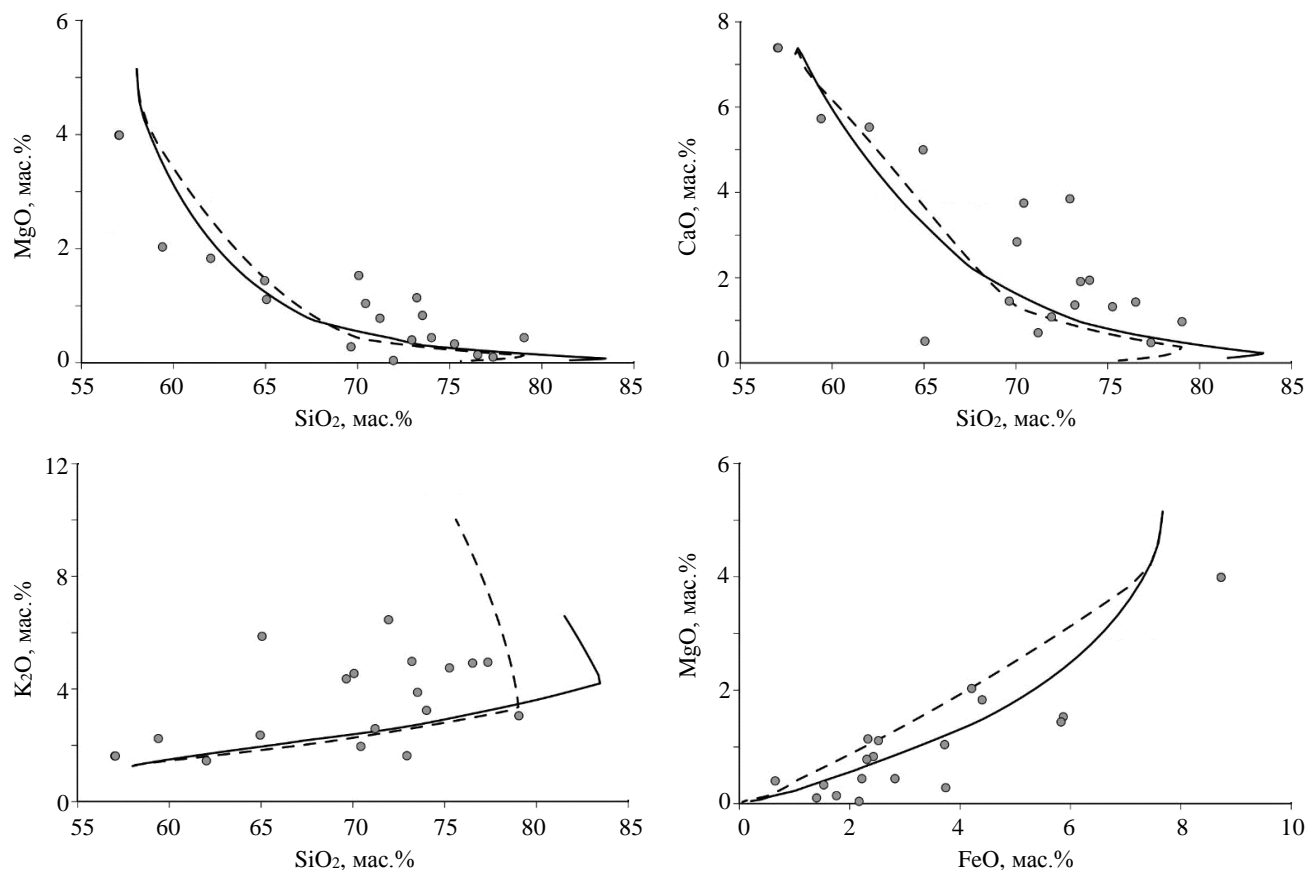


Рис.3. Вариационные диаграммы для пород матрикса эклогитов Марун-Кей с модельными траекториями частичного плавления вещества континентальной коры при давлениях 5 (пунктирная линия) и 10 (сплошная линия) кбар

которого соответствует температурному градиенту около 13 °С/км. Эти результаты следует считать предварительными ввиду ограниченного количества данных для расчетов.

Как показано на рис.3, положение фигуративных точек составов пород, вмещающих тела основных (в том числе эклогитов) и ультраосновных пород, удовлетворительно описывается моделью равновесного плавления материала континентальной коры по статье [25], принимая ее состав на глубинах, соответствующих давлениям 4-10 кбар, постоянным. Разные степени частичного плавления пород коры, необходимые для генерации таких составов, могли определяться разным режимом термального воздействия на нее, зависящим, например, от объема магматических камер, теплофизических свойств и состава расплава. Следует отметить, что максимальные температуры, необходимые для генерации таких расплавов, находятся в хорошей согласованности с расчетными температурами, описанными выше, для протолитов эклогитов, не превышая их. Отклонения точек составов пород от модельных траекторий, особенно щелочей, может быть связано с их значительной подвижностью при процессе частичного плавления.

Оценки пикового давления и температуры, соответствующих эклогитовому этапу метаморфизма комплекса Марун-Кей, весьма различны. Некоторые из авторов предполагают параметры, соответствующие ультравысокобарическим условиям – вплоть до 50 кбар [12]. Наиболее корректные, на наш взгляд, оценки пиковых параметров, основанные на методах мультиминеральной термобарометрии, приведены в статье [10], где авторы оценивают пиковые условия эклогитового метаморфизма – 22 кбар и 680 °С. Близкие им величины – 20,5 кбар и 790 °С приведены в работе [17] и интерпретируются как часть сложного тренда эволюции пород – от эклогитовой фации через гранулитовую к амфиболитовой фации.

Как показал расчет (рис.4), точки составов пород образуют вытянутую область, имеющую отрицательный угловой коэффициент, соответствующий градиенту порядка 13 °С/км. Поле

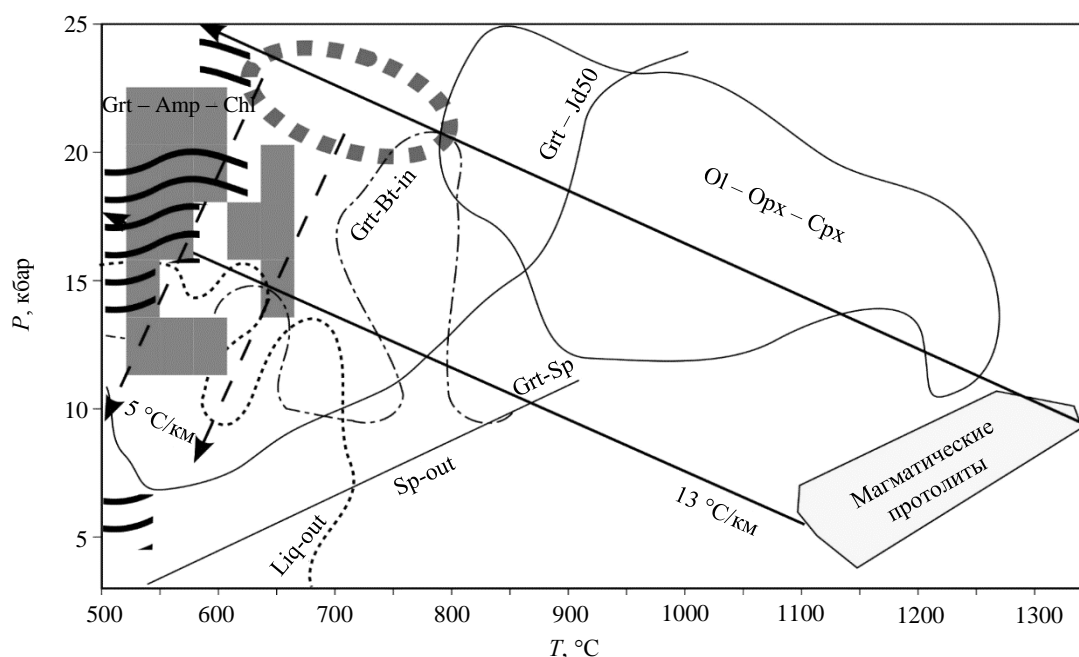


Рис.4. Сводная диаграмма полей устойчивости минеральных ассоциаций в породах Марун-Кеу, построенная по результатам моделирования

Ассоциации: Ol – Орх – Срх – оливин-ортопироксен-клинопироксеновая (постмагматическая, предпиковая), Grt – Amp – Chl – гранат-амфибол-хлоритовая (темно-серое поле), Grt – Jd50 – гранат-омфацитовая; Grt-Bt-in – граница поля устойчивости ассоциации граната-биотита (штрихпунктирная линия); Sp-out – граница устойчивости включений шпинели (сплошная линия); Liq-out – приближенная граница начала плавления для пород матрикса, включающего блоки эклогитов (штриховая линия); парагенезисы с тальком (черные волнистые линии); область предполагаемых пиковых параметров метаморфизма (эллипс с серой пунктирной границей); расчетные градиенты: прогрессивная стадия (сплошные линии со стрелками), регрессивная (пунктирные линии со стрелками).

Светло-серое поле для магматической стадии эволюции пород дано согласно рис.2, а

ассоциации Ol – Срх – Орх не пересекается с областью магматических протолитов ввиду того, что в базе стандартных термодинамических свойств минералов и свойств смешения их твердых растворов JUN92.bs [28] отсутствуют данные для расплавов. При условиях пересечения трендом данного градиента области пиковых параметров эклогитового метаморфизма и неустановлении коэсита в эклогитах комплекса Марун-Кеу можно предположить вероятность нахождения пиковой температуры в интервале 600-800 °C, что не противоречит приведенным выше литературным данным, а давления – не выше 25 кбар. При дальнейшей интерпретации рис.4 следует учесть, что ультрабазиты при метаморфизме могли достигать области стабильности амфибола и хлорита с образованием соответствующих парагенезисов. Отметим, что линейные ограничения (линии градиентов) на рисунке не предполагают линейного характера эволюции от магматических к метаморфическим породам, а лишь ограничивают возможную область вариантов.

Предполагая совместное перемещение эклогитов и вмещающих их пород, можно уточнить направление преобразований, используя данные полей устойчивости граната, биотита и эпидота, а также условий начала процессов плавления пород матрикса эклогитов. Моделирование показало, что ассоциация гранат и биотит, широко проявленная в гнейсах, не стабильна выше 21 кбар. Поле устойчивости ассоциации гранат – биотит – эпидот еще уже и ограничено диапазоном давления 7-13 кбар и температуры не выше 730 °C. При этих параметрах степень частичного плавления субстрата кислого состава с образованием мигматитов весьма незначительна, что полностью согласуется с полевыми наблюдениями авторов и известными литературными данными [8].

Для регрессивной, постэклогитовой стадии метаморфизма авторские, а также литературные [18] данные однозначно фиксируют присутствие включений амфибола и хлорита в гранате, причем их составы аналогичны этим же минералам в матриксе породы. Это позволяет достаточно жестко ограничить предельные температуры равновесия величиной 670 °C, а также оценить параметры давления – не ниже 11 кбар. В некоторых зернах граната установлено наличие талька, вероятно заместившего оливин. По результатам моделирования было установлено, что тальк становится



стабильным ниже 20 кбар и при температуре около 640 °С, и его поле стабильности частично перекрывается описанной выше ассоциацией гранат – амфибол – хлорит, образуя достаточно компактную область, вплоть до параметров менее 11 кбар и 500 °С соответственно. Используя оценку пиковых параметров и данные по регрессивной ветви метаморфизма, возможно оценить геотермический градиент, который составляет 5 ± 2 °С/км.

Авторы предполагают в качестве наиболее вероятной модели образования комплекса Марун-Кей процессы, связанные с субдукцией и последующей эксгумацией в ходе коллизии. Поэтому для корректной оценки скорости погружения было необходимо оценить угол наклона субдуцирующей плиты. Согласно расчетам по эмпирическим уравнениям [31], значение угла наклона находится в диапазоне 6–8°, что представляется вполне правдоподобным [32].

Принимая максимальное давление магматического этапа в 11 кбар, а пиковые условия эклогитового метаморфизма в 21 кбар, и полагая давление литостатическим, что правомерно вплоть до глубин 60–80 км [33], получаем оценки вертикальных скоростей погружения порядка 0,23–0,37 см/год. Аппроксимируя субдуцирующую плиту в первом приближении жесткой плоскостью, для приведенных выше углов наклона плиты получаем оценку скорости субдукции в диапазоне 2,9–2,2 см/год, принимая возраст для магматических протолитов 470–500 млн лет, а возраст эклогитового метаморфизма – 360–370 млн лет [17, 34, 35]. На сегодняшний момент авторам неизвестны прецизионные определения времени образования регрессивных парагенезисов, поэтому корректно оценить скорость эксгумации пород на данный момент не представляется возможным.

Дискуссия и выводы

Проведенные расчеты позволили установить, что диапазон температур 1340–1100 °С и давлений от 11 до 4 кбар для магматической стадии формирования протолитов эклогитов хорошо согласуется с современными представлениями о разрезе континентальной коры. Учитывая плотность пород, очевидно, что наиболее ультраосновные разности были размещены в нижней коре. Расчетный геотермический градиент в 13 °С/км не противоречит этому предположению и косвенно указывает на максимально возможный возраст материала коры – 2,5 млрд лет [36]. Градиент 5 °С/км, отвечающий регрессивной стадии, практически однозначно определяет максимальную оценку возраста регрессивного метаморфизма – около 600 млн лет. Следуя известным данным [17, 34, 35], авторы придерживаются именно такого порядка величин – 470–500 млн лет для магматического протолита эклогитов и гранитов и 360–370 млн лет для возраста эклогитового метаморфизма.

Механизм, который мог привести к наблюдаемым совместно в настоящее время эклогитам и вмещающим породам матрикса, нам представляется следующим. Поскольку расплавы основных и ультраосновных пород внедрялись в вещество коры, то при этом происходило его частичное плавление. Об этом может свидетельствовать близкий возраст ядер циркона в эклогитах и кислых породах, составляющий примерно 500 млн лет [36]. Однако ввиду малого размера внутрикоровых магматических резервуаров основных-ультраосновных пород относительный объем таких выплавок был весьма незначительным. Следует отметить, что на стадиях эволюции, следующих с временным разрывом за магматическим этапом (эклогитовый метаморфизм и последующая эксгумация пород на верхние уровни), первичные контакты были утрачены – сорваны или тектонизированы. Кроме этого, вероятно, что в комплексе Марун-Кей могут присутствовать и реликтовые блоки, соответствующие древней континентальной коре. Анортозиты, часто описываемые в качестве компонентов нижней континентальной коры [25], в том числе эклогитизированные, также отмечены на участке Слюдяная горка. Возможна и альтернативная интерпретация присутствия анортозитов как пород-кумулятов.

Альтернативному варианту, который предполагает, что все породы матрикса эклогитов являются просто тектонически совмещенным коровым веществом, противоречит то, что породы матрикса варьируются по составу от средних до практически ультракислых. Изотопно-геохимические данные по циркону из пород матрикса также указывают на то, что породы матрикса могли испытать эклогитовый метаморфизм совместно с основными и ультраосновными породами данного района [35].



Пиковые условия эклогитового метаморфизма, вероятно, не превышали 21 кбар по давлению и 730-750 °С по температуре. Эти значения хорошо соотносятся с оценками, данными ранее [10]. Кроме того, отмечается, что в эклогитовых ассоциациях Слюдяной горки не установлен омфациит с мольной долей жадеитового минала $X_{Jd} > 0,5$, который предполагал бы большие пиковые давления. Наличие включений рутила как в гранате, так и в натровом пироксене по результатам моделирования ограничивает снизу давление эклогитового метаморфизма величиной около 18 кбар. Однако такие включения установлены не повсеместно. Следует отметить, что на этапе перемещения из коровых условий в условия эклогитовой фации породы проходили различный барический путь, соответствующий разной глубине, вплоть до давлений 15-16 кбар.

Приведенные параметры имеют значительные отличия от оценок по термометрам и барометрам для пары гранат и ортопироксен (830 °С и 39 кбар по [18]). Это обусловлено тем, что для качественных определений критично содержание алюминия в пироксене и хрома в гранате, которые крайне малы и с учетом метода определения состава минералов могут приводить к существенному завышению значений давления и температуры. В работе [16] авторы оценили давление в 27 кбар и, указывая на включения поликристаллического кварца в гранате, интерпретируют его как псевдоморфозы по коэситу. Однако в подавляющем большинстве зерен граната наблюдается обычный кварц, что позволяет предположить пиковое давление, не достигающее поля устойчивости коэсита.

Гипотеза, предполагающая давление до 50 кбар [12], основана на интерпретации присутствия сегрегаций карбонатов, не рассматривая их как результат проникновения карбонатных флюидов на регрессивной стадии метаморфизма. Наличие таких сегрегаций в одном обнажении указывает скорее на их ограниченное распространение в породах. Также остается неясной стабильность апатита, обогащенного REE, при столь высоких давлениях.

Регрессивная минеральная ассоциация в эклогитах, как правило представленная хлоритом, амфиболом и тальком, определяет постпиковую ветвь эволюции. Диапазон давления здесь составляет 5-11 кбар при температуре ниже 640 °С. Расчетный геотермический градиент для этой ветви эволюции пород составил около 5 °С/км. Это значение крайне мало и может представлять собой результат интегрального действия процессов эксгумации пород и их остывания. Для точной оценки скорости эксгумации и PT параметров при этом требуются дополнительные исследования.

Природа образования гнейсов, в том числе вмещающих эклогиты, может быть интерпретирована как результат частичного плавления вещества древней коры. Однако нельзя исключать и присутствия кислых пород, протолитами которых могли быть метаосадки. Этот вопрос требует дальнейших геохимических и изотопно-геохимических доказательств.

Угол погружения плиты во время формирования комплекса Марун-Кеу был оценен в 6-8°, а предполагаемая скорость субдукции могла составлять 2,2-2,9 см/год. Такая оценка хорошо согласуется с единственным известным авторам значением – 2,8 см/год, полученным ранее на основе геологических данных [37]. Учитывая субизотермический характер постпиковой истории развития пород, можно предположить возможный механизм в рамках гипотезы континентальной субдукции. Термомеханическое моделирование, проведенное ранее [38], показало, что континентальная субдукция медленнее, по сравнению с океанической (1-3 см/год), а ее низкая скорость определяет относительно малую степень деформации пород. При таких процессах возможно погружение континентальной окраины на относительно небольшие глубины и лишь часть погруженных пород может достигать высокобарных PT условий, что и приводит к большому разбросу оценок давлений и температур на относительно локальных участках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов К.С., Пучков В.Н. Структурно-формационные зоны Уральского складчатого пояса: обзор данных и развитие новых идей // Геотектоника. 2022. № 6. С. 78-113. DOI: [10.31857/S0016853X22060030](https://doi.org/10.31857/S0016853X22060030)
2. Кисин А.Ю., Притчин М.Е., Озорнин Д.А. Геолого-структурная позиция Светлинского месторождения золота (Южный Урал) // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 369-376. DOI: [10.31897/PMI.2022.46](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.46)
3. Недосекова И.Л. Карбонатитовые комплексы Южного Урала: геохимические особенности, рудная минерализация и связь с геодинамическими обстановками // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 349-368. DOI: [10.31897/PMI.2022.28](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.28)



4. Попов М.П. Особенности редкометалльного оруденения и генетическая связь минеральных ассоциаций в восточном обрамлении Мурзинско-Адуйского антиклинария (Уральская изумрудноносная полоса) // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 337-348. DOI: [10.31897/PMI.2022.19](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.19)
5. Шацкий В.С., Симонов В.А., Ягоутиц Э. и др. Новые данные о возрасте эклогитов Полярного Урала // Доклады Академии наук. 2000. Т. 371. № 4. С. 519-523.
6. Андреичев В.Л., Ронкин Ю.Л., Серов П.А. и др. Новые данные о докембрийском возрасте эклогитов Марункеу (Полярный Урал) // Доклады Академии наук. 2007. Т. 413. № 4. С. 503-506.
7. Glodny J., Austrheim H., Molina J.F. et al. Rb/Sr record of fluid-rock interaction in eclogites: The Marun-Keu complex, Polar Urals, Russia // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2003. Vol. 67. Iss. 22. P. 4353-4371. DOI: [10.1016/S0016-7037\(03\)00370-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00370-3)
8. Удовкина Н.Г. Эклогиты Полярного Урала (на примере южной части хр. Марун-Кей). М.: Наука, 1971. 191 с.
9. Удовкина Н.Г. Эклогиты СССР. М.: Наука, 1985. 288 с.
10. Лю И., Перчук А.Л., Арискин А.А. Высокобарный метаморфизм в перидотитовом кумулате комплекса Марун-Кей, Полярный Урал // *Петрология*. 2019. Т. 27. № 2. С. 138-160. DOI: [10.31857/S0869-5903272138-160](https://doi.org/10.31857/S0869-5903272138-160)
11. Liu Y.Y., Perchuk A.L., Philippot P. Eclogites from the Marun-Keu Complex, Polar Urals, Russia: a record of hot subduction and sub-isothermal exhumation // *Geological Society, London, Special Publications*. 2019. Vol. 474. P. 255-274. DOI: [10.1144/SP474.6](https://doi.org/10.1144/SP474.6)
12. Шмелев В.Р., Мэн Ф.-С. Свидетельства ультравысокобарической эволюции гранатовых перидотитов Полярного Урала // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 513. № 1. С. 90-95. DOI: [10.31857/S2686739723601187](https://doi.org/10.31857/S2686739723601187)
13. Glodny J., Pease V., Montero P. et al. Protolith ages of eclogites, Marun-Keu Complex, Polar Urals, Russia: implications for the pre- and early Uralian evolution of the northeastern European continental margin // *Geological Society, London, Memoirs*. 2004. Vol. 30. P. 87-105. DOI: [10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.09](https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.09)
14. Molina J.F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A. The eclogites of the Marun-Keu complex, Polar Urals (Russia): fluid control on reaction kinetics and metasomatism during high *P* metamorphism // *Lithos*. 2002. Vol. 61. Iss. 1-2. P. 55-78. DOI: [10.1016/S0024-4937\(02\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00070-1)
15. Molina J.F., Poli S., Austrheim H. et al. Eclogite-facies vein systems in the Marun-Keu complex (Polar Urals, Russia): textural, chemical and thermal constraints for patterns of fluid flow in the lower crust // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2004. Vol. 147. P. 484-504. DOI: [10.1007/s00410-004-0569-z](https://doi.org/10.1007/s00410-004-0569-z)
16. Гульбин Ю.Л., Михальский Е.В. Моделирование минеральных парагенезисов и термобарометрия метавулканических пород серии Рузер, Южные горы Принс-Чарльз, Восточная Антарктида // Записки Российского минералогического общества. 2019. Т. 148. № 5. С. 24-44. DOI: [10.30695/zrmo/2019.1485.01](https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1485.01)
17. Abdrakhmanov I.A., Gulbin Y.L., Skublov S.G., Galankina O.L. Mineralogical Constraints on the Pressure-Temperature Evolution of Granulites in the Bungar Hills, East Antarctica // *Minerals*. 2024. Vol. 14. Iss. 5. № 488. DOI: [10.3390/min14050488](https://doi.org/10.3390/min14050488)
18. Никитина Л.П., Марин Ю.Б., Кореишкова М.Ю. и др. Ксенолиты высокоглиноземистых пироксенитов в базальтах вулкана Сигурд, о. Шпицберген (арх. Свальбард) как индикаторы геодинамики литосферы региона в палеозое // *Геология и геофизика*. 2022. Т. 63. № 10. С. 1319-1340. DOI: [10.15372/GiG2022106](https://doi.org/10.15372/GiG2022106)
19. Weber G., Blundy J. A Machine Learning-Based Thermobarometer for Magmatic Liquids // *Journal of Petrology*. 2024. Vol. 65. Iss. 4. № ega020. DOI: [10.1093/petrology/egae020](https://doi.org/10.1093/petrology/egae020)
20. Iacovino K., Till C.B. DensityX: A program for calculating the densities of magmatic liquids up to 1,627 °C and 30 kbar // *Volcanica*. 2019. Vol. 2. № 1. P. 1-10. DOI: [10.30909/vol.02.01.0110](https://doi.org/10.30909/vol.02.01.0110)
21. Gualda G.A.R., Ghiorso M.S., Lemons R.V., Carley T.L. Rhyolite-MELTS: a Modified Calibration of MELTS Optimized for Silica-rich, Fluid-bearing Magmatic Systems // *Journal of Petrology*. 2012. Vol. 53. Iss. 5. P. 875-890. DOI: [10.1093/petrology/egr080](https://doi.org/10.1093/petrology/egr080)
22. Rudnick R.L., Fountain D.M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective // *Reviews of Geophysics*. 1995. Vol. 33. Iss. 3. P. 267-309. DOI: [10.1029/95RG01302](https://doi.org/10.1029/95RG01302)
23. de Capitani C., Petrakakis K. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software // *American Mineralogist*. 2010. Vol. 95. Iss. 7. P. 1006-1016. DOI: [10.2138/am.2010.3354](https://doi.org/10.2138/am.2010.3354)
24. Holland T.J.B., Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest // *Journal of Metamorphic Geology*. 1988. Vol. 16. Iss. 3. P. 309-343. DOI: [10.1111/j.1525-1314.1998.00140.x](https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00140.x)
25. Berman R.G. Internally-Consistent Thermodynamic Data for Minerals in the System Na₂O-K₂O-CaO-MgO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-H₂O-CO₂ // *Journal of Petrology*. 1988. Vol. 29. Iss. 2. P. 445-522. DOI: [10.1093/petrology/29.2.445](https://doi.org/10.1093/petrology/29.2.445)
26. Warr L.N. IMA-CNMNC approved mineral symbols // *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85. Iss. 3. P. 291-320. DOI: [10.1180/mgm.2021.43](https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43)
27. Hacker B.R., Kelemen P.B., Behn M.D. Continental Lower Crust // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2015. Vol. 43. P. 167-205. DOI: [10.1146/annurev-earth-050212-124117](https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124117)
28. Куликова К.В., Варламов Д.А. Эклогит-гнейсовый комплекс хребта Марункеу (Полярный Урал) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания, 15-18 октября 2014, Иркутск, Россия. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2014. Вып. 12. С. 177-179.
29. Селятицкий А.Ю., Куликова К.В. Эволюция химического состава граната при метаморфизме перидотитов УНР-комплекса Марун-Кей (Полярный Урал) // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2017. № 8. С. 36-43. DOI: [10.19110/2221-1381-2017-8-36-43](https://doi.org/10.19110/2221-1381-2017-8-36-43)
30. Jiashun Hu, Gurnis M. Subduction Duration and Slab Dip // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2020. Vol. 21. Iss. 4. № e2019GC008862. DOI: [10.1029/2019GC008862](https://doi.org/10.1029/2019GC008862)
31. Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. Геодинамическая модель глубинного строения палеосубдукционной зоны на восточной окраине Русской палеоплиты и распределение месторождений нефти и газа // Вестник Пермского университета. Геология. 2020. Т. 19. № 1. С. 1-12. DOI: [10.17072/psu.geol.19.1.1](https://doi.org/10.17072/psu.geol.19.1.1)
32. Yamato P., Agard P., Burov E. et al. Burial and exhumation in a subduction wedge: Mutual constraints from thermomechanical modeling and natural P-T-t data (Schistes Lustrés, western Alps) // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2007. Vol. 112. Iss. B7. № B07410. DOI: [10.1029/2006JB004441](https://doi.org/10.1029/2006JB004441)



33. Удоротина О.В., Куликова К.В., Шуйский А.С. и др. Гранитоидный магматизм севера Урала: U-Pb возраст, эволюция, источники // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 2. С. 287-309 (in English). DOI: [10.5800/GT-2021-12-2-0525](https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0525)
34. Salimgaraeva L., Berezin A., Sergeev S. et al. Zircons from Eclogite-Associated Rocks of the Marun-Keu Complex, the Polar Urals: Trace Elements and U-Pb Dating // Geosciences. 2024. Vol. 14. Iss. 8. № 206. DOI: [10.3390/geosciences14080206](https://doi.org/10.3390/geosciences14080206)
35. Nicoli G., Moyon J.-F., Stevens G. Diversity of burial rates in convergent settings decreased as Earth aged // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. № 26359. DOI: [10.1038/srep26359](https://doi.org/10.1038/srep26359)
36. López-Carmona A., Tishin P.A., Chernyshov A.I. et al. UHP metamorphism in the Polar Urals: evidences from the Marun-Keu Complex (Russia) // Петрология магматических и метаморфических формаций: Материалы Всероссийской петрографической конференции с международным участием. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2016. Вып. 8. С. 15-19 (in English).
37. Иванов К.С. Оценка палеоскоростей субдукции и коллизии при формировании Урала // Доклады Академии наук. 2001. Т. 377. № 2. С. 231-234.
38. Завьялов С.П., Захаров В.С. Континентальная субдукция в палеопротерозое: условия и особенности протекания по результатам суперкомпьютерного моделирования // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2016. Т. 91. Вып. 4-5. С. 103-116.

Авторы: Алексей Васильевич Березин, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-5324-5840>, Ляйсан Ильшатовна Салимгареева, канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия), научный сотрудник (Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия), fluoritecaf2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3285-847X>, Виктор Николаевич Пучков, д-р геол.-минерал. наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник (Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия) <https://orcid.org/0000-0003-2972-5497>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Ранне-среднедевонские рудовмещающие вулканогенные формации Змеиногорского рудного района северо-западной части Рудного Алтая

М.Л.Куйбида¹✉, И.В.Викентьев², Н.Н.Крук¹, О.В.Мурзин³, Н.М.Мурзина⁴, А.В.Чугаев², В.А.Яковлев¹,
Я.Ю.Шелепов¹, А.В.Нарыжнова¹, П.А.Фоминых¹, Е.Д.Зюков¹, Г.Ф.Карманов¹

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

³ Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу, Новосибирск, Россия

⁴ Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия

Как цитировать эту статью: Куйбида М.Л., Викентьев И.В., Крук Н.Н., Мурзин О.В., Мурзина Н.М., Чугаев А.В., Яковлев В.А., Шелепов Я.Ю., Нарыжнова А.В., Фоминых П.А., Зюков Е.Д., Карманов Г.Ф. Ранне-среднедевонские рудовмещающие вулканогенные формации Змеиногорского рудного района северо-западной части Рудного Алтая // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 101-114. [EDN RLVEBT](#)

Аннотация

Приведены результаты геологических, геохимических и изотопно-геохронологических исследований ранне-среднедевонских вулканогенно-осадочных толщ в северо-западной части Рудного Алтая, вмещающих колчеданно-полиметаллические месторождения. Исследование обусловлено необходимостью решения проблем типизации и корреляции вулканических комплексов в свете изучения их структурно-формационных, литолого-фациальных и палеоструктурных особенностей, что является традиционно необходимым элементом геологических работ при изучении формирования рудно-магматических систем. Цель работы – реконструкция вулканической последовательности на ранне-среднедевонском временном интервале, а также качественная оценка вклада вулканогенных формаций рифтогенной и надсубдукционной природы, с которыми генетически связаны колчеданно-полиметаллические месторождения. Изотопное U-Pb-датирование цирконов из туфов стратотипического разреза соответствует возрасту ~390 млн лет. Формирование вулканогенных толщ происходило в тектонической обстановке, связанной с открытием морского бассейна, что соответствует начальному этапу рифтогенеза в Рудном Алтае. Геохимические характеристики показали, что породы в нижней части разреза наиболее близки к породам энциалических островных дуг, обязанных своим петрогенезисом флюидонасыщенным условиям частичного плавления коровых субстратов под контролем режима дегидратации субдуцирующей плиты. В верхней части разреза вулканические породы по своим геохимическим характеристикам напоминают породы бимодальных ассоциаций из рифтогенных обстановок в тыловых частях энциалических островных дуг. Это подтверждается анализом генетического типа сообщества формаций (магматической, осадочной и рудоносной) и согласуется с геохимическим типом вулканических пород, близким типу рифтогенных обстановок. Концептуальный геодинамический сценарий соответствует формированию рудных месторождений Рудного Алтая в переходной зоне между островной дугой и задуговым бассейном, подобно рифтогенным обстановкам Восточной окраины Азии.

Ключевые слова

колчеданно-полиметаллические месторождения; базальт-риолитовый вулканизм; бимодальная формация; задуговый бассейн; мельнично-сосновский вулканический комплекс

Финансирование

Исследование выполнено за счет проекта № 13.1902.24.44, соглашение 075-15-2024-641 Минобрнауки Российской Федерации.

Поступила: 20.09.2024

Принята: 28.01.2025

Онлайн: 27.05.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Рудно-Алтайский металлогенический пояс обладает высоким промышленным потенциалом колчеданно-полиметаллических месторождений различных масштабов, превосходящим по своей уникальности крупнейшие металлогенические провинции Японии, Канады, Кипра [1-3]. Колчеданно-полиметаллическая формация Рудного Алтая отвечает важнейшему геолого-генетическому типу свинцово-цинковых месторождений, залегающих в вулканогенных толщах (VMS – volcanogenic



massive sulfide; Cu, Pb, Zn) [4-6]. При решении проблем типизации и корреляции вулканических комплексов, формирования рудно-магматических систем и геодинамических реконструкций необходимым является изучение структурно-формационных, литолого-фациальных и палеоструктурных особенностей вулканогенно-осадочных отложений [7]. Несмотря на значительный объем исследовательских работ по Рудному Алтаю, ряд вопросов, связанных с расшифровкой петрогенезиса магматизма, геохимическими вариациями в вертикальных и латеральных рядах, а также корреляцией между его геохимической специализацией и типами рудных ассоциаций разных возрастных уровней, остался нерешенным. Настоящая работа освещает недостаточно изученный геологический объект, который относится к инициальным рудовмещающим вулканогенно-осадочным образованиям и локализован в северо-западной части Рудного Алтая. Цель работы заключалась в реконструкции вулканической последовательности на ранне-среднедевонском временном интервале и качественной оценке вклада вулканогенных формаций рифтогенной и надсубдукционной природы, с которыми генетически связаны колчеданно-полиметаллические месторождения. Одним из инструментов, позволяющим решать вопросы магматической петрологии и проводить корреляцию с формированием рудных месторождений, являются изотопно-геохимические исследования магматических комплексов [8-10] и анализ их формационной принадлежности [11-13].

Геологический обзор. Территория исследований относится к западной части Алтае-Саянского сектора Центрально-Азиатского складчатого пояса или Алтайского тектонического коллажа – Алтаидам [14-16]. Рудно-Алтайский блок ограничен Иртышской сдвиговой зоной от фрагмента плиты Иртыш-Зайсанского палеоокеана и Северо-Восточной зоной смятия – от надвинутых со стороны Сибирского континента тектонических блоков Горного Алтая (рис.1).

Вулканогенно-осадочные толщи, связанные с раннедевонской активизацией на окраине Сибирского континента, формировались на метаморфизованной толще раннепалеозойского складчатого фундамента, при этом магматизм обладал чертами антидромной контрастной базальт-риолитовой формации, проявившись как следствие рифтогенных процессов в условиях мелководно-морской обстановки [14]. В рассматриваемом стратиграфическом разрезе северо-западной части Рудного Алтая инициальным вулканогенно-осадочным отложениям соответствуют два вулканических ритма [17] – мельничная (D_{2e1} , риолиты) и сосновская свиты (D_{2zv1} , риолиты). Предполагается, что произошедшее в раннем девоне внедрение мантийных магм, связанных с рифтогенезом, привело к крупномасштабному плавлению мощной терригенной толщи палеошельфа и генерации существенно кислых продуктов магматизма, с которыми, в свою очередь, генетически связаны главные колчеданно-полиметаллические месторождения Рудного Алтая.

Формирование рудных месторождений первой половины девона происходило преимущественно в периоды частичного затухания вулканической активности синхронно с седиментацией и было связано с гидротермальной активностью на морском дне. Согласно современным представлениям, месторождения характеризуются как колчеданно-полиметаллические, относятся к собственному рудноалтайскому геолого-промышленному типу и содержат четыре главных компонента – Fe, Cu, Pb и Zn с повышенными концентрациями Ba, Ag, Au, а также некоторых халькофильных (As, Bi и т.д.) и сидерофильных (Co, Ni и т.д.) элементов [18, 19]. В некоторых случаях формирование месторождений удается отождествлять с деятельностью черных курильщиков, фрагменты сульфидных труб которых были найдены в разных частях Рудного Алтая [18].

В мировой практике подобные геологические обстановки принято рассматривать в контексте процессов литосферного растяжения, связанных или с рифтогенезом океанических островных дуг, или с формированием задуговых бассейнов [4-6]. Одним из актуальных геодинамических сценариев для Рудного Алтая в девоне [20] является миграция вулканического фронта от континента к океану с рифтогенезом и расширением задугового бассейна [21-23] по образу и подобию развития обстановок Западно-Тихоокеанского типа [16]. Принимая за основу эту гипотезу, актуальными является ее верификация путем изучения геохимических типов девонского вулканизма, и, в перспективе, реконструкция его мантийных источников и механизмов формирования на каждой тектонической стадии развития Рудного Алтая.

Проведено геологическое изучение мельничной и сосновской свит в районе их стратотипических разрезов на опорном участке г. Мельничные сопки к западу от Змеиногорска северо-западной части Рудного Алтая (рис.2, а, в). Детальная характеристика особенностей девонского вулканизма на этом участке приведена в объяснительных записках к геологическим листам Алтайской серии [23].

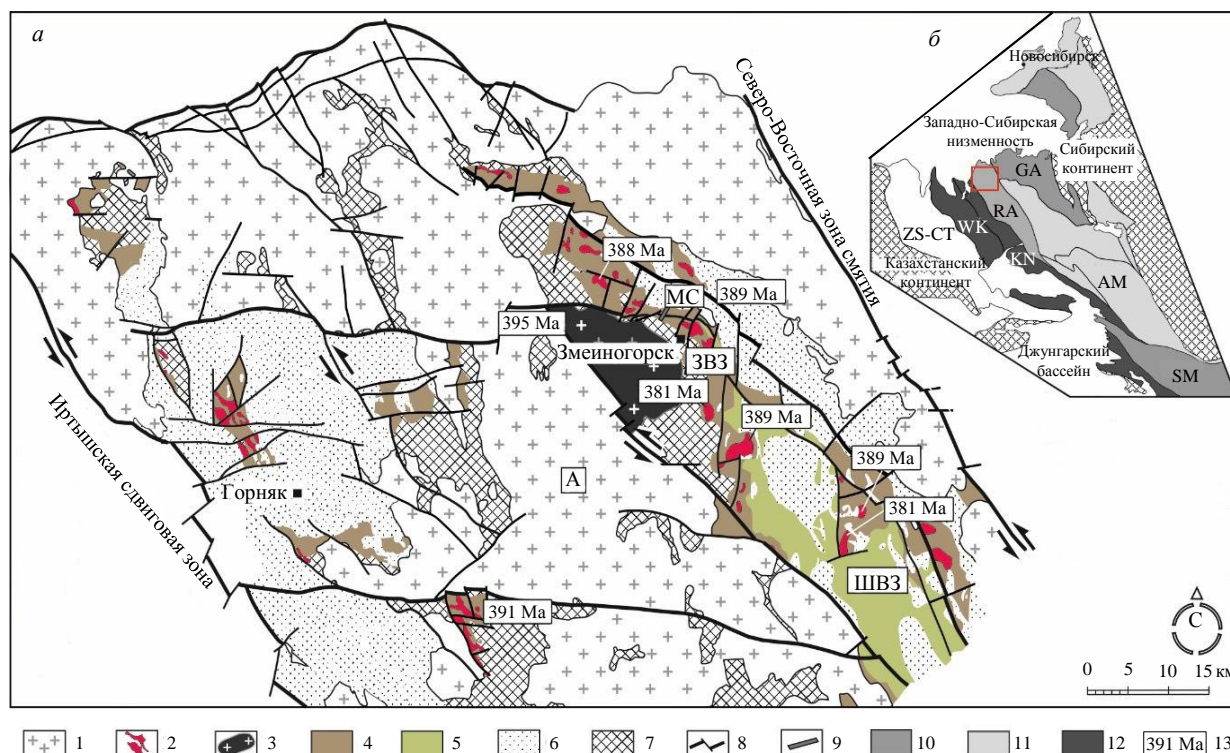


Рис.1. Структурно-геологическая схема с размещением девонских магматических комплексов северо-западной части Рудного Алтая [17] с дополнениями (а) и тектоническая схема западной части Алтае-Саянской складчатой области [15] (б)

1 – гранитоиды, D₂-C₂ (объединенные); 2 – субвулканические интрузии риолит-порфиров мельнично-сосновского вулканического комплекса (D₁₋₂); 3 – гранитоиды массива Мохнатые сопки с точкой датирования [20] и контурами предполагаемой магматической камеры эродированного палеовулкана; 4 – мельничная и сосновская вулканические свиты (D₁₋₂); 5 – шипуновская вулканическая свита (D₂₋₃); 6 – прочие вулканические и осадочные комплексы девона (объединенные); 7 – каледонский фундамент Рудного Алтая (S-D₁); 8 – разрывные нарушения; 9 – профиль стратотипического разреза на участке Мельничные сопки (МС); 10 – герцинские вулканоплутонические пояса; 11 – каледонский террейново-орогенный пояс Сибири; 12 – сутурная зона (Иртыш-Зайсанский палеоокеан); А – Алейское поднятие; ЗВЗ – Змеиногорская вулканическая зона; ШВЗ – Шипунихинская вулканическая зона; террейны: GA – Горно-Алтайский; RA – Рудно-Алтайский; KN – Калба-Нарымский; WK – Западно-Калбинский; ZS-CT – Жарма-Саурский и Чингиз-Тарбагатайский; AM – Алтае-Монгольский; SM – Южно-Монгольский; 13 – ранее изученные вулканические центры с точками датирования [17]

Аналитические методы

Аналитические исследования, выполненные в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН им. В.С.Соболева, Новосибирск), включали РФА-анализ горных пород (Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Fe₂O₃; спектрограф S4 Pioneer), ICP-MS анализ с разложением твердых образцов на стандартный набор до 25 микроэлементов (14 REE, 4 HFSE, Cs, Ba, Sr, Y, Rb, Th, U; масс-спектрометр Finnigan Element; АЦ ИГМ СО РАН, Новосибирск); изотопный возраст цирконов методом ICP-MS (прибор Element XR (Thermo), Thermo Fisher Scientific (Германия) с приставкой для лазерной абляции New Wave UP-213 (New Wave Research, Inc., США), научный сотрудник Д.В.Семенова, младший научный сотрудник А.В.Карпов); CL-изображения цирконов электронным сканирующим микроскопом JSM-6510LV (Jeol), старший научный сотрудник А.Т.Титов. Определение концентрации рудных компонентов проводилось портативным XRF-анализатором Olympus Vanta M-Series (Лаборатория № 214 ИГМ СО РАН, старший научный сотрудник П.А.Неволько). В основу классификации горных пород легли петрохимические диаграммы для вторично измененных горных пород, основанные на немобильных элементах [4-6], а также оценка степени вторичных изменений пород в шлифах (хлоритизация, окварцевание, альбитизация). В основу классификации стратифицированных вулканогенно-осадочных и субвулканических образований были положены рекомендации [11]. За основу интерпретации геодинамической обстановки были взяты региональные геологические данные [17], исследования петрогеохимического состава пород [4-6] и формационный анализ [12, 13].

Анализ осадочной формации. В изученном разрезе Мельничных сопки было выделено три субформации, различающиеся по гранулометрическому составу и фактически соответствующие трем главным перерывам в вулканической активности (рис.2, а, б). Более детальное выделение

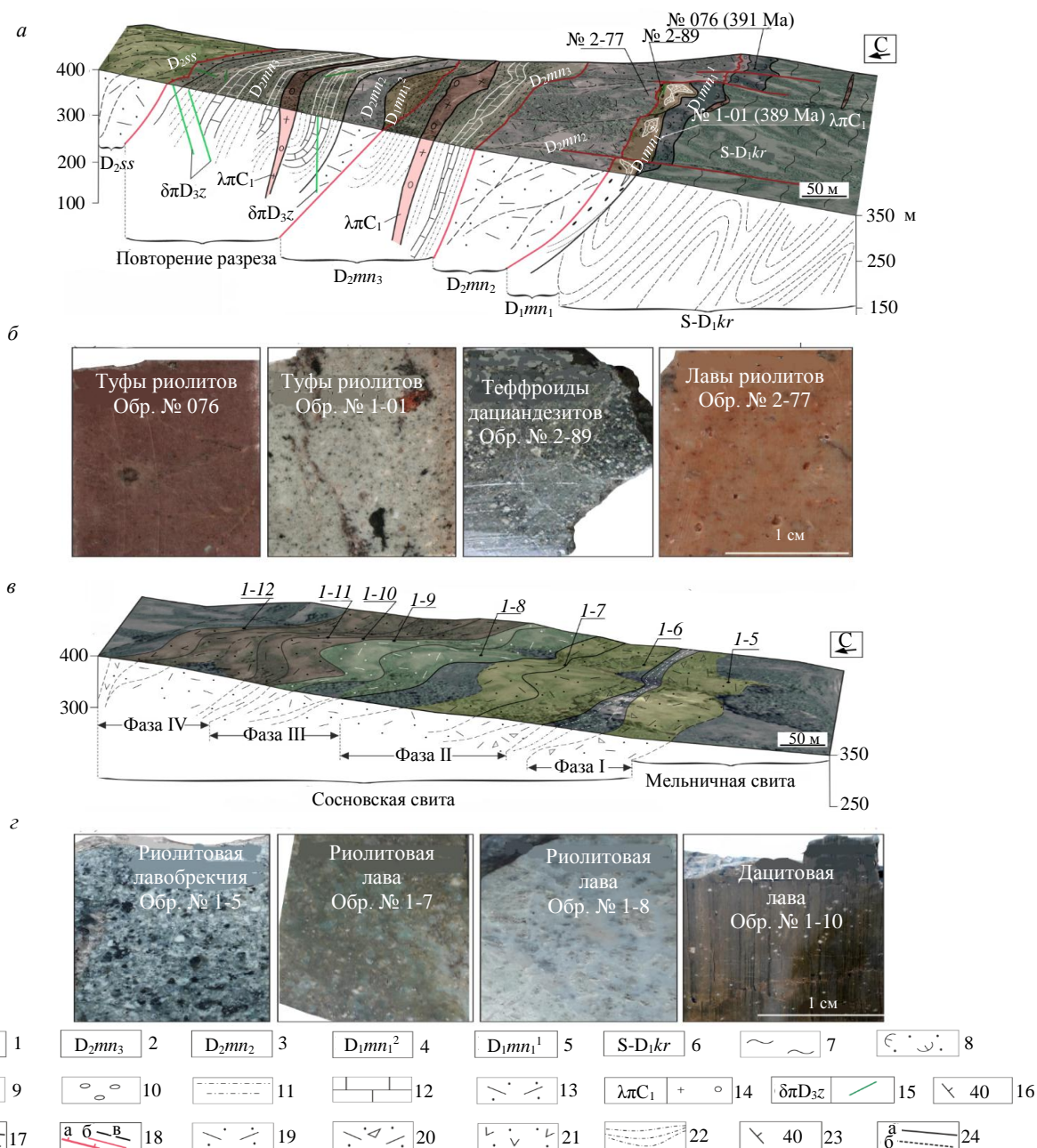


Рис.2. Теневая модель рельефа участка Мельничные сопки с вынесенными контурами геологических тел мельничной свиты, подсвеченная с запада (а) с представительными фотографиями образцов мельничной свиты S-D_{1kr} (б) и с вынесенными контурами геологических тел сосновской свиты, подсвеченной с запада (цифрам соответствуют точки отбора проб из лавовых потоков) (в) с представительными фотографиями образцов сосновской свиты (г)

1-7 – стратиграфические подразделения мельнично-сосновского вулканического комплекса: 1 – сосновская свита, 2 – верхнемельничная подсвита, 3 – среднемельничная подсвита, 4 – нижнемельничная подсвита, 5 – нижнемельничная подсвита (верхняя пачка), 6 – нижнемельничная подсвита (нижняя пачка), 7 – корбалихинская толща; 8-15 – литологический состав: 8 – метаморфические сланцы, 9 – туфы кислого состава, 10 – туффы, 11 – конгломераты, гравелиты, песчаники, 12 – известняки, мергели, 13 – лавы кислого состава, 14 – субвулканические интрузии риодацитов, 15 – дайки долеритов змеиногорского интрузивного комплекса (?); 16 – элементы залегания; 17 – геологические границы: а – достоверные, б – предполагаемые; 18 – разрывные нарушения: а – надвиги, б – прочие, в – предполагаемые; 19-22 – литологический состав: 19 – лавы риолитов, 20 – лавобрекчия риолитов, 21 – лавы дацитов, 22 – алевриты; 23 – элементы залегания; 24 – геологические границы: а – достоверные, б – предполагаемые.

Геологическая схема составлена с использованием материалов О.В.Мурзина

осадочных пачек, которое позволило бы более тонко выявить все перерывы в вулканической деятельности, затруднено из-за тектонического дублирования пачек в различных масштабах участка.

Первая субформация (нижняя часть мельничной свиты) представлена однотипными слабоокатанными грубообломочными (псефитовыми) гравелитами. Обломки гравелитов сложены зелеными сланцами из подстилающей каледонской толщи и кремнистыми породами, возможно представляющими собой более ранний вулканогенный материал из мельничной свиты.



Вторая субформация (средняя часть мельничной свиты) характеризовалась отложением туффитов за счет размыва ранее отложенных пепловых туфов риолитового состава и накоплением мелкообломочных песчано-алевролитовых отложений с карбонатной составляющей. Известняки и песчаники слагают линзообразной формы тела небольшой мощности, алевролиты образуют пластообразные тела.

Третья субформация (верхняя часть мельничной свиты и нижняя часть сосновской свиты) характеризуется однотипными мелкообломочными алевролитами с тонкой микрослойчатостью и имеет максимальную мощность из всех осадочных пачек. Согласно классификации терригенных пород, они могут относиться к полевошпатовым грауваккам, кварц-литокластито-микститовым песчаникам или к кварцевым грауваккам. На геодинамических диаграммах (не показано) составы песчаников соответствуют таковым из так называемых провинций поднятого фундамента, рециклированного орогена и смешанных орогенных песков [24].

Проведенный анализ показывает, что осадочная составляющая мельничной свиты большей частью представлена тонкообломочными породами – алевролитами, которые приурочены к верхней части толщи (D_{2mn3}), и лишь в подчиненном количестве – туффитами, гравелитами, песчаниками и известняками в ее нижней и средней частях (D_{1mn1}^2). Осадочный компонент сосновской свиты (D_{2ss}) приурочен к нижней части ее разреза, представляя собой маломощную пачку алевролитов.

Терригенные и карбонатные отложения описываемого участка между собой имеют согласные залегания. Направление падения слоев преимущественно северное с изменением азимута падения от 350° до $10-20^\circ$ и вариациями угла падения от $45-50^\circ$ до 60° . Форма геологических тел пласто- и линзообразная в мельничной свите и пластообразная в сосновской свите. Наблюдаемые линзообразные формы геологических тел могут свидетельствовать об их формировании преимущественно за счет заполнения осадочным материалом отрицательных форм рельефа морского дна, также подобная морфология может быть обусловлена тектонической природой. Осадочная составляющая мельничной свиты состоит на 97 % из алевролитов и на 3 % из туффитов, песчаников и известняков. Весь осадочный компонент сосновской свиты целиком заключен внутри единственной маломощной пачки алевролитов, составляющей 3 % общей мощности. В качестве формациеобразующего вида всего разреза выступают алевролиты с суммарной мощностью отложений ~ 650 м при общей мощности других отложений (туффиты, гравелиты, песчанико-алевролиты и известняки) $\sim 60-65$ м. Таким образом, главный объем осадочного компонента формации сосредоточен только в средней части, разделяя два отличающиеся по специфике этапа вулканической активности, соответствующие мельничной и сосновской свитам.

Анализ магматической формации. Формациеобразующими видами мельничной и сосновской свит выступают риолитовые туфы и лавы в соотношении 15:85 % (рис.2, б). Из более мафических пород установлены только туффиты дациандезитов, слагающих маломощную пачку в средней части мельничной свиты, и лавы дациандезитов в верхней части сосновской свиты. Вулканогенные образования представлены лавами, лавобрекчиями, туфами и прорывающими их субвулканическими интрузиями. Интрузии слагают как выдержанные по мощности пластовые, так и линзообразные тела. В мельничной свите ~ 20 % объема занимают лавы и лавобрекчии риолитов и туфы риолитов с преобладающей долей осадочных отложений ~ 80 %. Сосновская свита на 97 % сложена лавами и лавобрекчиями риолитов и лавами дациандезитов при подчиненном количестве ~ 3 % осадочных пород соответственно (рис.2, г).

Из субвулканических образований базитового ряда на участке исследований присутствуют только долеритовые дайки в средней части разреза. На основании петрографических характеристик можно сделать вывод, что они имеют более поздний – живет-франский – возраст, соответствуя таким образом периоду извержения базальтов давыдовско-каменевского вулканического комплекса [17]. В верхней части мельничной свиты заключены тонкие линзы брекчиевидных вулканических пород дациандезитового состава, чье петрографическое определение затруднено. Если рассматривать эти породы с точки зрения эффузивного происхождения, они содержат обломочный материал, все компоненты которого отличаются от такового из подстилающих пачек. Это позволяет рассматривать их как чуждые изучаемой вулканической формации.



Результаты U-Pb (LA-ICP-MS)-датирования. Ранее полученный изотопный U-Pb-возраст цирконов из комагматических гранитоидов (395-384 млн лет) и субвулканических риолитов (390 млн лет) в первом приближении определяет период формирования инициального магматизма в северо-западной части Рудного Алтая [17]. Для настоящего исследования были отобраны пробы цирконов из риолитовых туфов нижней части мельничной свиты. В пробах риолитовых лавах сосновской свиты цирконы не были обнаружены. Зерна циркона отсутствуют также и в вулканомиктовых песчаниках средней части мельничной свиты. Для датирования цирконов были выбраны участки преимущественно в краевых частях зерен с учетом зональности, трещиноватости и видимых включений (рис.3).

Диаграммы Th/U-отношений для изученных проб показывают, что все значения лежат в интервале от 0,2 до 0,6, это указывает на магматическую природу цирконов. Погрешности определения возраста и измерений изотопных отношений приводятся на уровне 1σ , а погрешности конкордантных возрастов и пересечений дискордий с конкордией приводятся на уровне 2σ .

В пробе № 76 зерна бледно-желтой окраски, алмазного блеска, дипирамидального габитуса ($k = 1,6-3,4$ при среднем значении 2,5), с узкой осцилляторной зональностью, иногда трещиноватые. Выполнено 45 определений возраста в 35 зернах циркона в течение одной измерительной сессии. Изотопный возраст, полученный по пересечению дискордии с линией равных возрастов для 35 зерен цирконов, с суммарным количеством точек датирования – 37 показал значения ~ 391 млн лет.

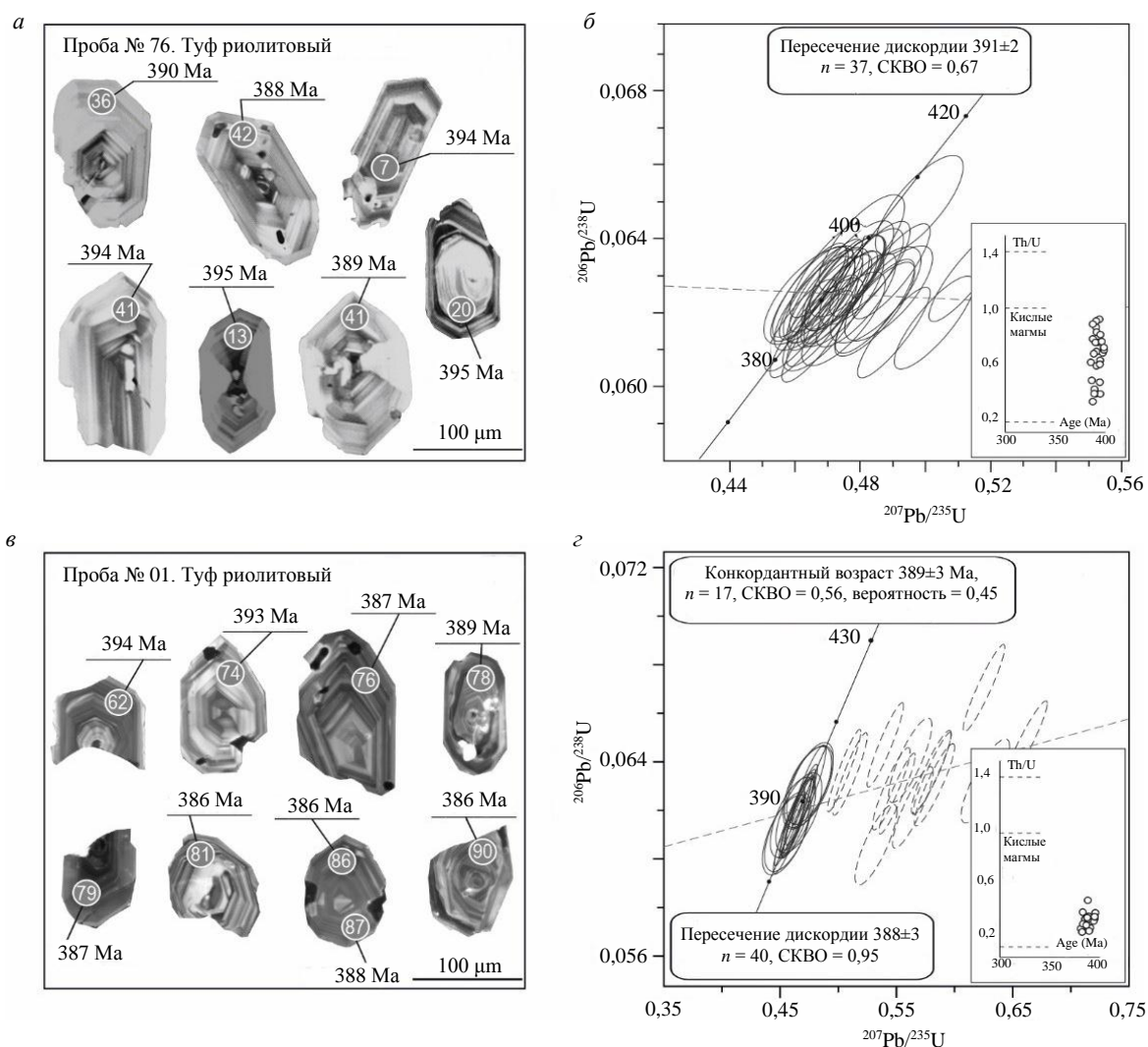


Рис.3. Фотографии внутреннего строения зерен цирконов с указанием точек датирования (а, в) и диаграммы с конкордиями, иллюстрирующие результаты изотопного U-Pb-датирования (б, г) вулканогенных пород участка Мельничные сопки. Значения Th/U-отношений в исследуемых цирконах представлены на врезках (б, г)



В пробе № 01 зерна бледно-желтой окраски, алмазного блеска, дипирамидального габитуса ($k = 0,7-2,8$ при среднем значении 1,4) с узкой осцилляторной зональностью. Выполнено 40 определений возраста в 35 зернах циркона в течение одной измерительной сессии. Изотопный возраст, полученный по пересечению дискордии с линией равных возрастов по 14 зернам цирконов с суммарным количеством точек датирования – 17, ~ 389 млн лет. Полученные результаты по двум пробам согласуются с ранее полученными изотопными U-Pb-данными возрастов для субвулканических риолитов мельнично-сосновского вулканического комплекса [20].

Петрогеохимическая классификация вулканических пород. Проанализировано 15 образцов вулканогенных пород (лавы и туфы), 5 образцов туфогенно-осадочных пород (туффиты, песчаники, алевролиты) из мельничной свиты и 8 образцов лав из сосновской свиты. Поскольку формирование обсуждаемых вулканогенных толщ было связано с обстановкой морского дна, это позволяет рассматривать их в качестве составляющих классической спилит-кератофировой формации [7], в составе которой, помимо вулканогенных пород, могут быть широко распространены и разновидности пирокластической природы (туфы, туффиты и т.д.). Вариации подвижных элементов в вулканогенных породах подводных обстановок рассматриваются как результат массообмена при реакции магмы с проникающей в нее морской водой и/или с поднимающимися разогретыми гидротермальными флюидами [4, 5, 25]. Известно, что ультракислые вулканические породы Рудного Алтая не являются специфичным классом пород, они были подвержены интенсивным вторичным изменениям, выраженным в окремнении и альбитизации [20].

Анализ вариаций щелочей указывает на существенную роль калиевого метасоматоза в некоторых вулканогенных породах мельничной свиты ($K_2O/Na_2O = 28-343$) [26, 27]. Большая часть составов обладает аномальными содержаниями SiO_2 (81,26-89,48 мас.%), располагаясь на TAS-диаграмме (рис.4, а) в области силекситов, что предполагает взаимодействие с вторичными кремнекислыми растворами. Наиболее сильному метасоматозу были подвержены туфы нижнемельничной подсвиты ($SiO_2 = 80,38-89,48$ мас.%, $K_2O/Na_2O = 35-342$), в чуть меньшей степени были изменены лавы среднемельничной подсвиты и некоторые лавы сосновской свиты ($SiO_2 = 82,25-88,68$ мас.%, $K_2O/Na_2O = 1,12-50,3$). Характер вторичных изменений в этих вулканических породах соответствует породам субвулканических риолитов мельнично-сосновского вулканического комплекса [20]. Слабоизмененные составы кислых лав мельничной и сосновской свит в общей последовательности их формирования характеризуются снижением содержаний SiO_2 (74,26-67,81 мас.%) и суммой щелочей ($Na_2O + K_2O = 6,03-7,89$ мас.%), позволяющих формально отнести их к риолитам среднекалиевой известково-щелочной серии и к низкокалиевому толеитовому ряду ($K_2O = 1,11-3,7$ мас.%) на диаграмме $SiO_2 - K_2O$ (рис.4, б). В сравнении с лавами и туфами мельничной свиты петрохимические составы сингенетичных туфогенно-осадочных пород не отражают каких-либо существенных вторичных изменений, характеризуясь более низкими содержаниями SiO_2 (70,06-76,17 мас.%), значениями отношений K_2O/Na_2O (0,1-0,79) и суммы щелочей ($Na_2O + K_2O = 2,54-4,84$ мас.%). Петрохимические характеристики изученной коллекции свидетельствуют об отсутствии непрерывной дифференцированной серии, включающей андезиты, традиционно рассматриваемой в составе вулканических серий надсубдукционных обстановок.

Геохимическая классификация. Геохимическая классификация измененных горных пород основана на относительно неподвижных элементах, которые наименее подвержены воздействию постмагматических процессов, включая обстановки морского дна и метаморфизм до уровня амфиболитовой фации. В подводных обстановках элементы ряда легких лантаноидов (LREE – La-Sm, включая Eu) более эффективно поддаются выщелачиванию и подвижности, чем тяжелые (HREE – Er-Lu, включая Y) [25], особенно в условиях, когда движение гидротермальных флюидов сосредоточено вдоль хорошо проницаемых зон, где реализуются высокие соотношения флюид/порода. На основании классификации с высокозарядными элементами (Zr, Nb, Y, Ti), немобильными в гидротермальном флюиде при низких степенях метаморфизма, составы вулканических пород мельничной и сосновской свит принципиально не различаются, соответствуя полю составов риолитов, реже дацитов, в пределах диапазона составов нормальной щелочности (рис.4, в). Вариации LREE концентраций по отношению к HREE ($La/Yb_n = 1,12-12,6$) имеют широкий диапазон от толеитовой до известково-щелочной серий (рис.4, г): известково-щелочная серия – $La/Yb > 5$; переходные составы – $La/Yb \sim 3-5$;

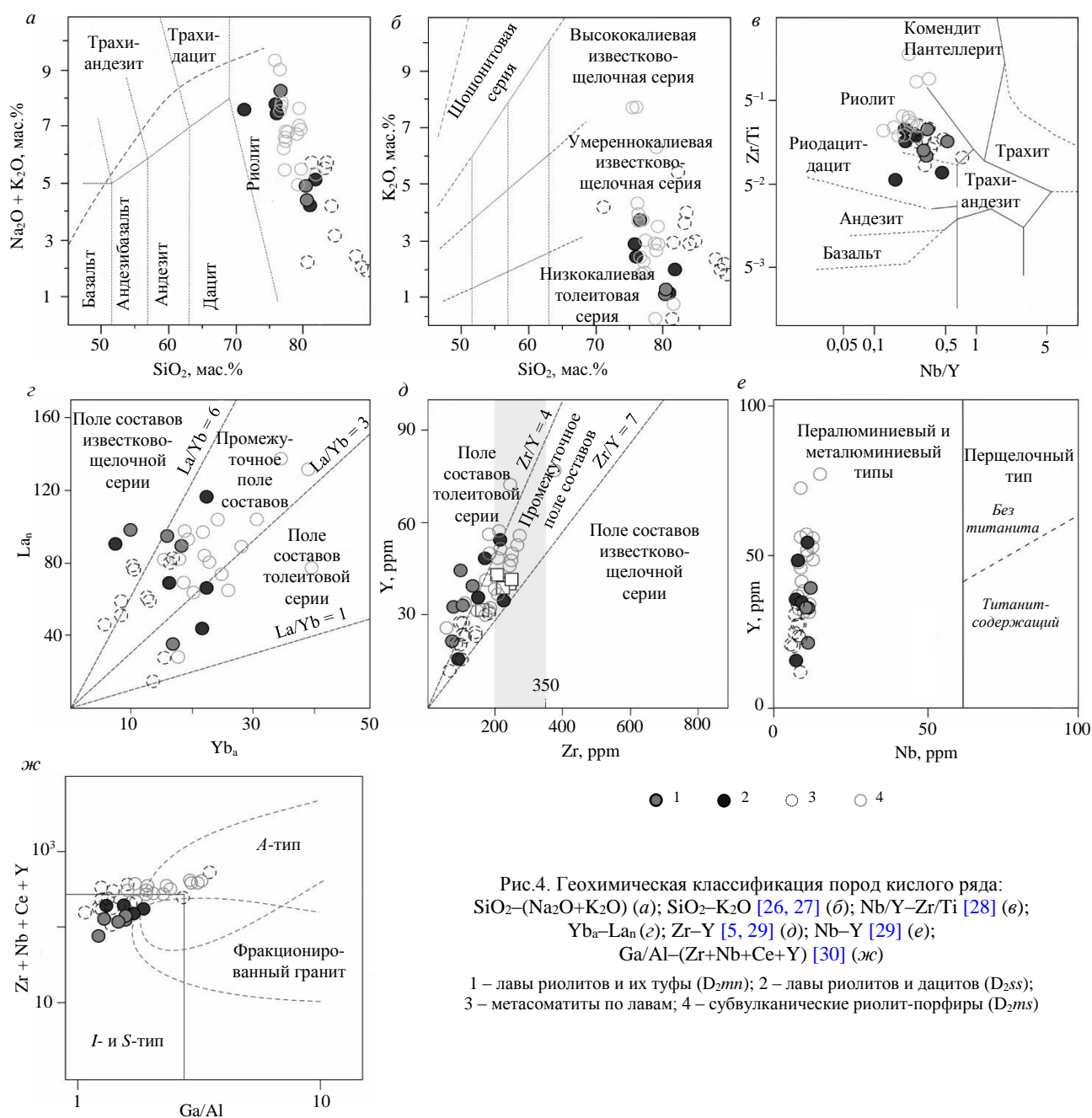


Рис.4. Геохимическая классификация пород кислого ряда:
 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (а); $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ [26, 27] (б); $\text{Nb/Y}-\text{Zr/Ti}$ [28] (в);
 Yb_a-La_a (г); $\text{Zr}-\text{Y}$ [5, 29] (д); $\text{Nb}-\text{Y}$ [29] (е);
 $\text{Ga/Al}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ [30] (ж)
 1 – лавы риолитов и их туфы (D_{2mn}); 2 – лавы риолитов и дацитов (D_{2ss});
 3 – метасоматиты по лавам; 4 – субвулканические риолит-порфиры (D_{2ms})

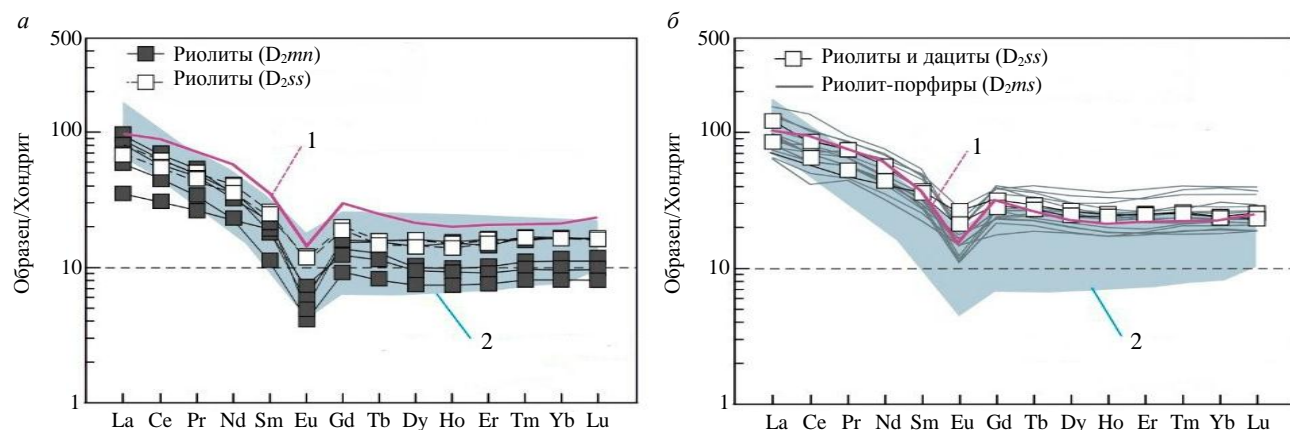


Рис.5. Спектры REE, нормированные к хондриту [31], в сравнении с высокотемпературным восстановленным (1) и низкотемпературным окисленным (2) риолитами Новой Зеландии [32, 33]



толеитовая серия – $La/Yb < 3$. Однако нормализованные к хондриту REE спектры (рис.5, а, б) [34] имеют общий когерентный характер, что допускает их использование для интерпретаций. Анализ немобильных элементов (см. рис.4, д) [4-6] показывает, что фигуративные точки составов лежат преимущественно в поле толеитовой серии с уклоном в сторону известково-щелочной, поскольку имеют относительно низкие значения своих индикаторных отношений ($Zr/Y = 3-6,6$, $Zr < 350$ ppm). Очевидно, что обсуждаемые геохимические типы по своей природе не были перщелочными, о чем свидетельствуют индикаторные соотношения $Nb/Y (< 0,52)$ и относительно низкие концентрации $Nb (< 12$ ppm); см. рис.4, е) [29]. Также маловероятно, что их родительские магмы не могли быть пералюминиевой природы, поскольку изученные составы имеют положительную эволюционную тенденцию в распределении значений Ga/Al (см. рис.4, ж), отличаясь от высокофракционированных кислых магм S- и I-типа [30]. Суммарные концентрации Nb , Y , Zr и $Ce (< 347$ ppm) в совокупности с низкими значениями Ga/Al отношения (1,26-3,52) и содержаниями Zn (9-187 ppm) указывают на принадлежность изученных пород к области составов I-S-типа вблизи области составов A_2 -типа. Содержания крупноионных литофильных элементов (LILE: Rb , Ba , Cs , Sr) демонстрируют более значимые вариации в одном и том же типе сильно измененных пород, что соответствует их высокой подвижности при гидротермальных процессах [25]. Например, соотношение Rb/Sr для слабоизмененных пород варьирует от 0,02 до 1,2, в сильноизмененных разновидностях – от 0,4 до 6,0. В большинстве случаев область распределения составов имеет близкое сродство с ранее изученными субвулканическими риолитами мельнично-сосновского вулканического комплекса [20], которые обладают более выраженными переходными геохимическими характеристиками между островодужными и внутриплитными магматическими формациями.

Составы слабоизмененных лав мельничной свиты, нормированные к хондриту [34], характеризуются ассиметричными спектрами REE с широким диапазоном значения $(La/Yb)_n$ отношений (2,11-10,09), обладая почти ровными до положительных формами спектров HREE $(Gd/Yb)_n = 0,96-1,29$ и европиевой аномалией ($Eu/Eu^* = 0,28-0,51$; $Eu^* = Eu_n/(Sm_n \cdot Gd_n)^{1/2}$ (рис.5, а). По геохимическим характеристикам изученные породы наиболее близки к породам энсиалических островных дуг, объясненных своим петрогенезисом флюидонасыщенным условиям частичного плавления коровых субстратов, под контролем режима дегидратации субдуцирующей плиты [32, 33]. Лавы сосновской свиты нижней части разреза характеризуются REE со спектрами, близкими к лавам мельничной свиты $(La/Yb)_n = 4,27-4,9$, $(Gd/Yb)_n = 1,16-1,24$, отличающимися менее выраженной Eu -аномалией ($Eu/Eu^* = 0,5-0,54$; рис.5, б). В верхней части разреза эти вулканиды обладают более обогащенными спектрами REE $(La/Yb)_n = 2,96-5,18$, $(Gd/Yb)_n = 1,21-1,33$, $Eu/Eu^* = 0,65-0,75$, таким образом соответствуя субвулканическим риолитам мельнично-сосновского вулканического комплекса [20]. Породы по своим редкоэлементным спектрам, нормированным к хондриту [34] и ряду других геохимических характеристик, напоминают риолиты бимодальных ассоциаций из рифтогенных обстановок в тыловых частях энсиалических островных дуг, например трог Окинава [35-37], рифт Куроко [38-40], рифт Таупо [41, 42]. В совокупности с относительно высокими содержаниями HREE (157-210 ppm), Y (48-54 ppm) и Zr (172-217 ppm) родительские магмы этих риолитов могли образоваться при более редуцированных условиях частичного плавления [32, 33] по сравнению с предшествующими магмами, имеющими более выраженные надсубдукционные геохимические характеристики (HREE = 66-174, $Y = 16-39$, $Zr = 76-179$ ppm). Кроме того, эмпирически установлено, что фельзитовые породы A-типа обладают в 2-3 раза более высокими содержаниями Zn , чем аналогичные по составу гранитоиды S-, I- и M-типов и близкие к ним вулканические породы (< 60 ppm [6]), что объясняется высокой растворимостью Zn при высоких температурах в таких магматических системах. Косвенно это указывает на металлоносность родительских магм исследованных риолитов.

Анализ рудоносной формации. Проанализировано 13 образцов пород из мельнично-сосновского вулканического комплекса, а также три образца из субвулканических интрузий. Вертикальное распределение рудных компонентов представлено на рис.6. Породы комплекса характеризуются высокими концентрациями Zn , Pb , Cu , Ba и содержат As , Bi , Co , Ni и Cr . В среднем наибольшие содержания Zn , Pb , Cu и Ba приурочены к вулканогенным и вулканогенно-осадочным пачкам. Среди субвулканических интрузий выделяется долерит с высокими концентрациями как Zn , Pb , Cu , Ba , так и Co , Ni , Cr . Вероятно, появление Co , Ni и Cr в породах этого интрузивного комплекса связано с более поздним базальтоидным вулканизмом, который возник на изучаемой территории с конца живета и продолжался до начала франа [17].

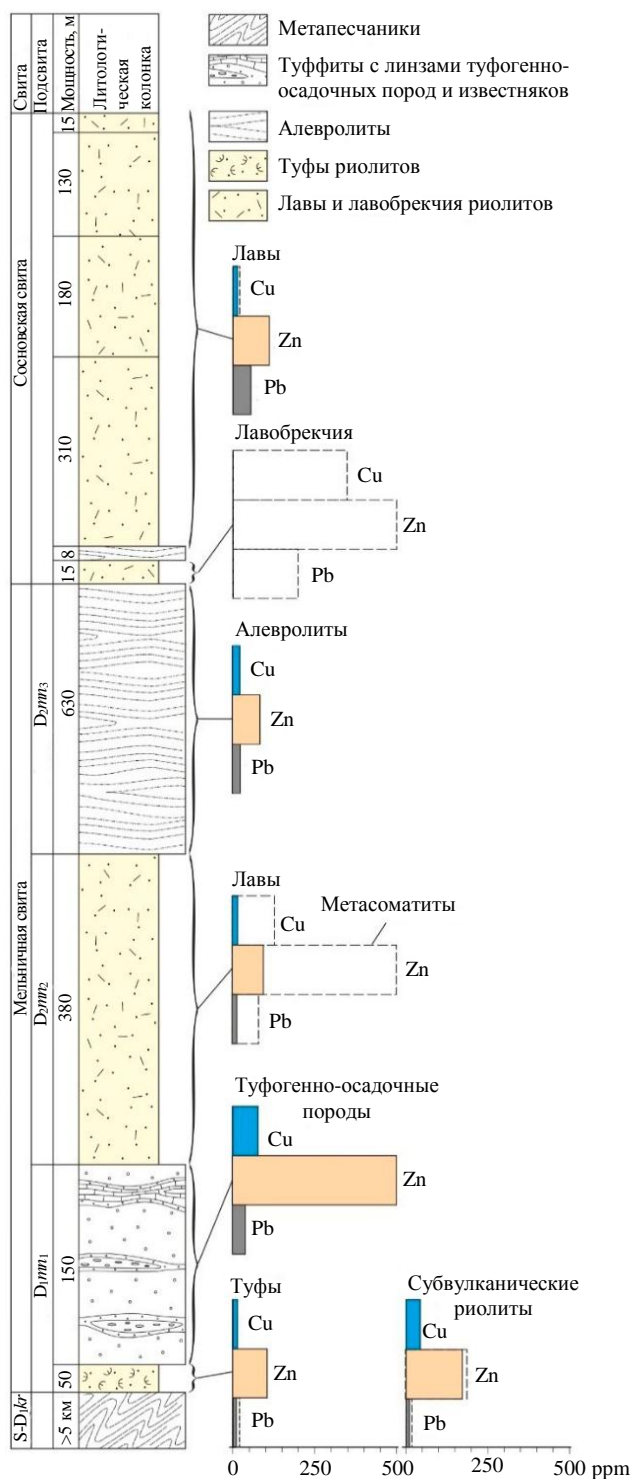


Рис.6. Распределение рудных компонентов в разрезе мельнично-сосновского вулканического комплекса

Для мельничной свиты характерны минимальные концентрации Zn, Pb, Cu (до 1164, 78, 162 г/т соответственно) при максимальных концентрациях As (до 52 г/т). В сосновской свите наблюдается обратное распределение этих компонентов (Zn до 15648; Pb до 307; Cu до 497; As до 3 г/т). Более высокие содержания As в мельничной свите связаны с ранними диагенетическими процессами преобразования осадков на небольших глубинах, что характерно для ряда вулканогенно-гидротермальных месторождений, образованных в мелководно-морских условиях [32]. Напротив, высокие содержания Zn, Pb и Cu в сосновской свите соответствуют имеющимся данным об их связи с эндогенными процессами (магматической активностью) [17]. Увеличение содержаний Zn в разрезе указывает на нарастающую активность вулканизма в связи с прогрессирующими рифтогенными процессами – большая часть вулканогенных и вулканогенно-осадочных отложений комплекса имеет повышенные содержания Zn (свыше 60 г/т), что характерно для рифтогенных (А-тип) кислых магм окраинно-континентальных обстановок [4-6].

Обсуждение результатов

С точки зрения анализа осадочных формаций [12, 13] в большинстве случаев появление грубообломочных фаций в разрезе, как продуктов разрушения растущих горных поднятий, должно свидетельствовать о проявлении тектонической активизации. С другой стороны, грубообломочные фации можно рассматривать как внутриформационные образования, связанные с кратковременным разрушением вулканических построек в периоды вулканического затишья. В данном исследовании петрографические наблюдения указывают на уменьшение гранулометрического состава осадочных пород (от гравелитов к алевролитам) и на увеличение доли продуктов вулканизма вплоть до их полного преобладания в разрезе от подошвы мельничной свиты к кровле сосновской свиты.

Формально уменьшение гранулометрической размерности осадочных пород снизу вверх по разрезу в последовательности гравелиты –

песчанико-алевролиты – алевролиты на участке Мельничные сопки соответствует признакам трансгрессии морского бассейна, связанной с тектоническим опусканием территории. В общих чертах это не противоречит описываемой геологической ситуации в Рудном Алтае, где девонской магматической активизации предшествовало воздымание территории и формирование брахиформной антиклинальной складчатости фундамента, а на границе среднего и позднего девона четко проявился режим растяжения с формированием рифтовой зоны в тыловой части северо-запада Рудного Алтая [17]. При этом береговая линия материковой части должна была находиться в относительной удаленности.



Породы обладают массивными текстурами, отсутствует косая слоистость в обнажениях, свидетельствуя об относительной удаленности прибрежной мелководно-морской зоны и отсутствии интенсивной волновой активности. В обломках гравелитов отсутствуют явные минералогические признаки привноса чужеродного материала из континентальной части, на что могли бы указывать пертитовые зерна калишпатов, обломки гранитных пород и зерна кварца с мозаичным строением.

Среди других косвенных признаков отмечается базальный цемент в породах, указывающий на среднюю степень перемива первичного осадочного материала. В вулканомиктовых песчаниках мельничной свиты не были обнаружены цирконы. Корреляция между стилем осадконакопления и палеонтологическими данными (глубиной обитания фауны) также указывает на плавный переход от прибрежной зоны (внутренняя часть шельфа) к более глубоководным зонам (внешняя часть шельфа). Таким образом, набор геологических признаков свидетельствует в пользу погружения территории, начавшегося в обстановке мелководно-морского бассейна, в относительной удаленности от береговой линии континента, но без явных признаков активного рифтогенеза, поскольку отсутствуют свидетельства лавинной седиментации грубообломочного материала [17].

С точки зрения анализа магматических формаций [11-13] в изученном разрезе мельнично-сосновского вулканического комплекса отсутствует непрерывная серия от базальтов к риолитам, являющаяся классическим индикатором большинства субдукционно связанных обстановок. Широкое распространение имеют пирокластические породы кислого состава (туфы риолитов) и, за исключением редких прослоев туфов дациандезитов, отсутствует пирокластический материал андезитового состава.

На участке исследований мельничная и сосновская свиты обнаруживают различную специфику своего образования, выраженную в различной продолжительности и интенсивности извержений. Мельничная свита состоит преимущественно из лав и лавобрекчий риолитов и их туфов. Сосновская свита полностью состоит из лав и лавобрекчий риолитов, т.е. кислых эффузивных продуктов извержений, которые из-за своей высокой вязкости должны были накапливаться в непосредственной близости от центров извержений, пирокластический материал отсутствует.

Лавы мельничной свиты обладают в основном массивными, редко полосчатыми (флюидальными) текстурами, указывающими на течение лавовых потоков. В свою очередь, в лавах сосновской свиты наблюдается большее текстурное разнообразие – распространены как массивные, полосчатые (флюидальные), пятнистые, так и сферолоидные текстуры. Пятнистая текстура может быть связана с вторичными изменениями, в то время как образование лав со сферолоидной текстурой связано с тем, что предшествующая ей лава (с хорошо развитыми структурами течения) содержала в себе большое количество растворенных летучих компонентов [11]. Это соответствует наблюдениям авторов – в разрезе сосновской свиты сферолоидным лавам предшествуют тонкополосчатые лавы.

Сравниваемое количество изверженного вулканического материала в обеих свитах, выраженное в мощностях, имеет соотношение 4:6. Вулканически активный период мельничной свиты можно охарактеризовать как угнетенный спорадический, с резким преобладанием пирокластических продуктов извержений над лавами, несколько раз чередовавшихся с кратковременными вулканическими паузами и накоплением внутриформационного грубообломочного осадочного материала. В противоположность ему период формирования вулканизма сосновской свиты имел более интенсивный и почти непрерывный характер, выраженный в извержениях лав при отсутствии пирокластического материала, что произошло после накопления толщи мелкообломочного осадочного материала. В исследовании [43] подобный механизм извержения (с отсутствием пирокластического материала) объясняется увеличением глубины от 200 м и более, в результате чего взрывная деятельность вулканов уменьшается вплоть до полного прекращения. Это предполагает прямую связь с высоким гидростатическим давлением столба морской воды, что приводит только к медленному подъему порций кислых магм, с последующим их выдавливанием на поверхность морского дна и закупориванием жерла.

Наконец, если включать в состав формации дайки долеритов, которые не имеют к ней отношения, то формально речь идет о бимодальной базальт-риолитовой (кварц-кератофировой) формации, связанной с относительно мелководными морскими условиями образования [12]. Совокупность обсуждаемых признаков, которыми обладает все сообщество формаций (вулканогенной,



осадочной и рудоносной), в большей мере говорит в пользу рифтогенной обстановки. Если считать, что извержения лав на дневную поверхность являются результатом возросшей проницаемости континентальной литосферы и активизации глубокопроникающих разломных зон, то вулканические извержения мельничной свиты отражают инициальную стадию этого развития, а сосновской свиты – более прогрессивную стадию развития тектонических процессов. Если провести увязку магматических, седиментационных и тектонических процессов в масштабах всего девонского временного отрезка от конца эмса до начала франа, когда произошла вспышка базитового вулканизма в северо-западной части Рудного Алтая, то формирование мельнично-сосновского вулканического комплекса можно интерпретировать как инициальное, соответствующее началу растяжения земной коры.

Концептуальный геодинамический сценарий. Несмотря на противоречия в интерпретации геодинамической природы Рудного Алтая [20], общим для большинства авторов является вывод о последовательности от инициального рифтогенеза (D_{1-2}) к формированию островной дуги (D_3-C_1). Однако с точки зрения предлагаемых моделей остается необъяснимым, по каким причинам инициальный вулканизм Рудного Алтая (ранний-средний девон) представлен бимодальной ассоциацией, развивавшейся в рифтогенной обстановке на фоне общего погружения мелководно-морского бассейна и без предшествующих островодужных ассоциаций, а в позднем девоне на месте рифтогенного бассейна Рудного Алтая, судя по формальным признакам, формировалась островная дуга с андезитами [14, 17].

Как известно, развитие бимодального вулканизма является обычным явлением обстановок растяжения, в то время как развитие андезитов обычно соответствует геодинамическим условиям сжатия. Актуальные исследования, основанные на модели Extension Subduction Orogen [44], предполагают, что движущей силой формирования окраинных задуговых бассейнов является изменение геометрии и откат субдуцирующей плиты в совокупности с внедрением астеносферного диапира в зону субдукции, что приводит к миграции вулканического фронта, расширению задугового бассейна и, соответственно, к интерференции геохимических признаков магматизма [35-37]. Однако, по аналогии с развитием Японского задугового бассейна, процесс не является однонаправленным – возможно чередование эпизодов растяжения и сжатия в случае обратно-поступательного движения субдуцирующей плиты. Открытие задуговых бассейнов на Восточной окраине Азии сопровождалось формированием грабеноподобных структур и бассейнов типа пулл-апарт, а также разнонаправленным вращением крупных континентальных блоков и латеральными лево- и правосдвиговыми перемещениями тектонических блоков вдоль главных сдвиговых зон и сопряженных разломов [45, 46].

В Рудно-Алтайском блоке также широко распространены тектонические макроструктуры, которые являются индикаторными для определения режимов проявления вулканизма, – крупные сдвиговые зоны и сопряженные с ними разломы, бассейны типа пулл-апарт, геолого-картографические свидетельства вращения отдельных блоков, маркируемые субвулканическими интрузиями и др. С учетом кинематических характеристик и пространственного положения разломов девонская тектоническая структура Рудно-Алтайского блока может быть рассмотрена как negative flower (tulip) структура, согласно структурно-кинематическим моделям и аналоговому моделированию [47, 48]. Геодинамическая интерпретация авторов статьи, основанная на модели скольжения окраинно-континентальных литосферных плит [49], предполагает активизацию тектонической зоны между островной дугой и задуговым бассейном, подобно таковой на Восточной окраине Азии. Это соответствует представлениям предшественников [14], проводивших аналогию между колчеданно-полиметаллическим поясом Рудного Алтая и провинцией «зеленых туфов» в Японии (тип Куроко), сформированной в режиме растяжения в субмаринных условиях позади островной дуги [38-40].

Заключение

Реконструкция формирования инициальных вулканогенных формаций, генетически связанных с ранне-среднедевонскими колчеданно-полиметаллическими месторождениями северо-западной части Рудного Алтая, позволила сформулировать следующие выводы:

- Формирование вулканогенных формаций происходило в тектонической обстановке, связанной с инициальной стадией обстановки рифтогенеза.



• Петрогеохимические интерпретации и анализ генетического типа сообщества формаций (магматической, осадочной и рудоносной) указывают на их связь с рифтогенной обстановкой. Изотопный U-Pb возраст цирконов из инициальных туфогенных толщ ~ 390 млн лет.

• Концептуальный геодинамический сценарий предполагает формирование рудных месторождений Рудного Алтая в переходной зоне между островной дугой и задуговым бассейном, подобно таковым обстановкам Восточной окраины Азии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vikentyev I.V., Belogub E.V., Novoselov K.A., Moloshag V.P. Metamorphism of volcanogenic massive sulphide deposits in the Urals. Ore geology // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 85. P. 30-63. DOI: [10.1016/j.oregeorev.2016.10.032](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.032)
2. Чекалин В.М., Дьячков Б.А. Рудноалтайский полиметаллический пояс: закономерности распределения колчеданного оруденения // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 6. С. 513-532. DOI: [10.7868/S0016777013060026](https://doi.org/10.7868/S0016777013060026)
3. Чернышев И.В., Викентьев И.В., Чугаев А.В. и др. Источники металлов колчеданных месторождений Рудного Алтая по данным высокоточного MC-ICP-MS изучения изотопного состава свинца // Геохимия. 2023. Т. 68. № 6. С. 545-569. DOI: [10.31857/S001675252306002X](https://doi.org/10.31857/S001675252306002X)
4. Galley A.G., Hannington M.D., Jonasson I.R. Volcanogenic Massive Sulphide Deposits // Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 2007. Special Publication № 5. P. 141-161.
5. Brueckner S.M., Johnson G., Wafforn S. et al. Potential for Volcanogenic Massive Sulfide Mineralization at the A6 Anomaly, North-West British Columbia, Canada: Stratigraphy, Lithogeochemistry, and Alteration Mineralogy and Chemistry // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 8. № 867. DOI: [10.3390/min11080867](https://doi.org/10.3390/min11080867)
6. Piercey S.J., Hinchey J.G., Sparkes G.W. Volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits of the Dunnage Zone of the Newfoundland Appalachians: setting, styles, key advances, and future research // Canadian Journal of Earth Sciences. 2023. Vol. 60. № 8. P. 1104-1142. DOI: [10.1139/cjes-2022-0148](https://doi.org/10.1139/cjes-2022-0148)
7. Кузнецов В.В., Кудрявцева Н.Г., Серавина Т.В. и др. Основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. М.: Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, 2019. 208 с.
8. Levashova E.V., Mamykina M.E., Skublov S.G. et al. Geochemistry (TE, REE, Oxygen) of Zircon from Leucogranites of the Belokurikhinsky Massif, Gornyy Altai, as Indicator of Formation Conditions // Geochemistry International. 2023. Vol. 61. № 13. P. 1323-1339. DOI: [10.1134/S001670292311006X](https://doi.org/10.1134/S001670292311006X)
9. Левашова Е.В., Скублов С.Г., Хамдард Н. и др. Геохимия циркона из пегматитовых лейкогранитов комплекса Лагман, провинция Нуристан, Афганистан // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. № 2. № ES2011. DOI: [10.2205/2024es000916](https://doi.org/10.2205/2024es000916)
10. Скублов С.Г., Левашова Е.В., Мамыкина М.Е. и др. Полифазный Белокурихинский массив гранитов, Горный Алтай: изотопно-геохимическое исследование циркона // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 552-575.
11. Лучицкий И.В. Основы палеовулканологии. В 2 т. Т. 2. Древние вулканы. М.: Наука, 1971. 383 с.
12. Кузнецов Ю.А. Главные типы магматических формаций. М.: Недра, 1964. 387 с.
13. Цейслер В.М. Учение о геологических формациях в связи с изучением состава, строения и эволюции земной коры // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. № 2. С. 3-9.
14. Любецкий Большой Алтай (геология и металлогения). Т. 1. Геологическое строение / Под ред. Г.Н.Щербы. Алматы: Гылым, 1998. 304 с.
15. Добрецов Н.Л. Эволюция структур Урала, Казахстана, Тянь-Шаня и Алтае-Саянской области в Урало-Монгольском складчатом поясе (Палеоазиатский океан) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 1-2. С. 5-27.
16. Ярмолюк В.В., Кузьмин М.И., Воронцов А.А. Конвергентные границы западно-тихоокеанского типа и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 12. С. 1831-1850.
17. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Серия Алтайская. Лист М-44-XI (Змеиногорск). Объяснительная записка. СПб: Изд-во Санкт-Петербургской картографической фабрики ВСЕГЕИ, 2001. 174 с.
18. Гасков И.В. Особенности развития колчеданных рудно-магматических систем в островодужных обстановках Рудного Алтая и Южного Урала // Литосфера. 2015. № 2. С. 17-39.
19. Масленников В.В., Масленникова С.П., Третьяков Г.А. и др. Блеклые руды в палеозойских «курильщиках» из колчеданных месторождений Урала и Рудного Алтая // Минералогия. 2015. № 4. С. 53-78.
20. Kuibida M.L., Murzin O.V., Kruk N.N. et al. Whole-rock geochemistry and U-Pb ages of Devonian bimodal-type rhyolites from the Rudny Altai, Russia: Petrogenesis and tectonic settings // Gondwana Research. 2020. Vol. 81. P. 312-338. DOI: [10.1016/j.gr.2019.12.002](https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.12.002)
21. Nakamura H., Iwamori H., Nakagawa M. et al. Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs // Gondwana Research. 2019. Vol. 70. P. 36-49. DOI: [10.1016/j.gr.2019.01.007](https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.01.007)
22. Seung Ryeol Lee. Physical conditions for basaltic volcanism beneath the Jeju volcanic field and the geodynamic implications // Geosciences Journal. 2024. Vol. 28. № 5. P. 789-798. DOI: [10.1007/s12303-024-0031-3](https://doi.org/10.1007/s12303-024-0031-3)
23. Dey B., Shibata T., Yoshikawa M. LOMU Type Alkali Basalts in East Asia Sourced from Subduction Recycling of Multiple Ancient Crustal Components // Journal of Petrology. 2024. Vol. 65. Iss. 10. № ega104. DOI: [10.1093/petrology/egae104](https://doi.org/10.1093/petrology/egae104)
24. Dickinson W.R., Suczek C.A. Plate Tectonics and Sandstone Compositions // AAPG Bulletin. 1979. Vol. 63. Iss. 12. P. 2164-2182.
25. Humphris S.E., Blusztajn J., Yuanfeng Cai. Rare Earth Element Mobility and Sr Isotope Systematics of Altered Volcanic Rocks from Seawater-Based and Magmatically Influenced Hydrothermal Systems: Brothers Volcano, Kermadec Arc (IODP Expedition 376) // Economic Geology. 2023. Vol. 118. № 7. P. 1699-1717. DOI: [10.5382/econgeo.4961](https://doi.org/10.5382/econgeo.4961)
26. Middlemost E.A.K. Naming materials in the magma/igneous rock system // Earth-Science Reviews. 1994. Vol. 37. Iss. 3-4. P. 215-224. DOI: [10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
27. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1976. Vol. 58. Iss. 1. P. 63-81. DOI: [10.1007/BF00384745](https://doi.org/10.1007/BF00384745)



28. Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements // *Chemical Geology*. 1977. Vol. 20. P. 325-343. DOI: [10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
29. Shennott J.G., Vaughan M.W., Hao-Yang Lee, Iizuka Y. Late Jurassic Leucogranites of Macau (SE China): A Record of Crustal Recycling During the Early Yanshanian Orogeny // *Frontiers in Earth Science*. 2020. Vol. 8. № 311. DOI: [10.3389/feart.2020.00311](https://doi.org/10.3389/feart.2020.00311)
30. Fu Yuan Wu, Xiao Chi Liu, Wei Qiang Ji et al. Highly fractionated granites: Recognition and research // *Science China Earth Sciences*. 2017. Vol. 60. № 7. P. 1201-1219. DOI: [10.1007/s11430-016-5139-1](https://doi.org/10.1007/s11430-016-5139-1)
31. Barrie C.T., Hannington M.D. Classification of Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits Based on Host-Rock Composition // *Volcanic Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings*. Society of Economic Geologists, 1999. Vol. 8. P. 1-11. DOI: [10.5382/Rev.08.01](https://doi.org/10.5382/Rev.08.01)
32. Bachmann O., Huber C. The Inner Workings of Crustal Distillation Columns; the Physical Mechanisms and Rates Controlling Phase Separation in Silicic Magma Reservoirs // *Journal of Petrology*. 2019. Vol. 60. Iss. 1. P. 3-18. DOI: [10.1093/petrology/egy103](https://doi.org/10.1093/petrology/egy103)
33. Deering C.D., Gravley D.M., Vogel T.A. et al. Origins of cold-wet-oxidizing to hot-dry-reducing rhyolite magma cycles and distribution in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2010. Vol. 160. Iss. 4. P. 609-629. DOI: [10.1007/s00410-010-0496-0](https://doi.org/10.1007/s00410-010-0496-0)
34. Sun S.-s., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geological Society, London, Special Publications*. 1989. Vol. 42. P. 313-345. DOI: [10.1144/GSL.SP.1989.042.01.1](https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.1)
35. Xiaohui Li, Zhigang Zeng, Huixin Yang et al. Integrated major and trace element study of clinopyroxene in basic, intermediate and acidic volcanic rocks from the middle Okinawa Trough: Insights into petrogenesis and the influence of subduction component // *Lithos*. 2020. Vol. 352-353. № 105320. DOI: [10.1016/j.lithos.2019.105320](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105320)
36. Agangi A., Manalo P.C., Takahashi R. et al. Magmatic evolution and metal systematics of back-arc volcanic rocks of north-east Japan and implications for deposition of massive sulphide Kuroko ores // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2022. Vol. 177. Iss. 12. № 115. DOI: [10.1007/s00410-022-01980-z](https://doi.org/10.1007/s00410-022-01980-z)
37. Yagi M., Hasenaka T., Ohguchi T. et al. Transition of magmatic composition reflecting an evolution of rifting activity // *Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2001. Vol. 30. Iss. 6. P. 265-287. DOI: [10.2465/gkk.30.265](https://doi.org/10.2465/gkk.30.265)
38. Shikazono N., Ogawa Y., Utada M. et al. Geochemical behavior of rare earth elements in hydrothermally altered rocks of the Kuroko mining area, Japan // *Journal of Geochemical Exploration*. 2008. Vol. 98. Iss. 3. P. 65-79. DOI: [10.1016/j.gexplo.2007.12.003](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2007.12.003)
39. Manga M., Mitchell S.J., Degruyter W., Carey R.J. Transition of eruptive style: Pumice raft to dome-forming eruption at the Havre submarine volcano, southwest Pacific Ocean // *Geology*. 2018. Vol. 46. № 12. P. 1075-1078. DOI: [10.1130/G45436.1](https://doi.org/10.1130/G45436.1)
40. Collins W.J. Nature of extensional accretionary orogens // *Tectonics*. 2002. Vol. 21. № 4. P. 6-1 – 6-12. DOI: [10.1029/2000TC001272](https://doi.org/10.1029/2000TC001272)
41. Yuxiang Zhang, Zhigang Zeng, Xiaoyuan Wang et al. Factors controlling the geochemical differences between two types of rhyolites in the middle Okinawa Trough // *Geosciences Journal*. 2020. Vol. 24. № 1. P. 35-48. DOI: [10.1007/s12303-018-0084-2](https://doi.org/10.1007/s12303-018-0084-2)
42. Zehua Guo, Zenghui Yu, Ke Wang et al. Origins of magmatism in the Okinawa Trough: Fe-Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints // *International Geology Review*. 2024. Vol. 66. Iss. 8. P. 1590-1606. DOI: [10.1080/00206814.2023.2245864](https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2245864)
43. Hosoi J., Tanii Y., Okada M., Haneda Y. Rotated Transtensional Basins Formed During Back-Arc Spreading in Japan: Simultaneous Rapid Tectonic Rotation and Basin Subsidence // *Tectonics*. 2023. Vol. 42. Iss. 6. № e2022TC007642. DOI: [10.1029/2022TC007642](https://doi.org/10.1029/2022TC007642)
44. Ganbat A., Pastor-Galán D., Hirano N. et al. Cretaceous to Miocene NW Pacific Plate kinematic constraints: Paleomagnetism and Ar-Ar geochronology in the Mineoka Ophiolite Melange (Japan) // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021. Vol. 126. Iss. 5. № e2020JB021492. DOI: [10.1029/2020JB021492](https://doi.org/10.1029/2020JB021492)
45. Kinoshita H., Yamaji A. Arc-parallel extension in preparation of the rotation of southwest Japan: Tectonostratigraphy and structures of the Lower Miocene Ichishi Group // *Island Arc*. 2021. Vol. 30. Iss. 1. № e12418. DOI: [10.1111/iar.12418](https://doi.org/10.1111/iar.12418)
46. Gürbüz A., Şaroğlu F. Chapter 7 – Right-Lateral Strike-Slip Faulting and Related Basin Formations in the Turkish–Iranian Plateau // *Developments in Structural Geology and Tectonics*. Elsevier, 2019. Vol. 3. P. 101-130. DOI: [10.1016/B978-0-12-815048-1.00007-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815048-1.00007-X)
47. Bhattacharya A.R. Strike-Slip Faults // *Structural Geology*. Springer, 2022. P. 231-243. DOI: [10.1007/978-3-030-80795-5_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80795-5_12)
48. Zhu Mengjia, Wang Guangzeng, Li Sanzhong et al. An overview of structures associated with bends of strike-slip faults: Focus on analogue and numerical models // *Marine and Petroleum Geology*. 2024. Vol. 167. № 106983. DOI: [10.1016/j.marpetgeo.2024.106983](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.106983)
49. Ханчук А.И., Гребенников А.В., Иванов В.В. Альб-сеноманские окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // *Тихоокеанская геология*. 2019. Т. 38. № 3. С. 4-29. DOI: [10.30911/0207-4028-2019-38-3-4-29](https://doi.org/10.30911/0207-4028-2019-38-3-4-29)

Авторы: Максим Леонидович Куйбиды, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), taxkub@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6038-0410>, Илья Владимирович Викентьев, д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник (Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-9133-7562>, Николай Николаевич Крук, д-р геол.-минерал. наук, член-корреспондент РАН, директор (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-4166-1000>, Олег Владимирович Мурзин, начальник отдела (Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0009-0004-9557-9832>, Наталья Михайловна Мурзина, ведущий геолог (Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0009-0006-6574-0407>, Андрей Владимирович Чугаев, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник (Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-0528-3965>, Владислав Александрович Яковлев, младший научный сотрудник (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-9810-9108>, Ярослав Юрьевич Шелепов, младший научный сотрудник (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-3447-9411>, Анна Викторовна Нарыжнова, младший научный сотрудник (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-2832-1485>, Павел Андреевич Фоминых, научный сотрудник (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0009-0009-2944-5680>, Евгений Дмитриевич Зюков, лаборант (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0009-0007-7855-4969>, Глеб Федорович Карманов, лаборант (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0009-0006-3109-8321>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Определение индекса технического состояния энергокомплексов производственных объектов в системе поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры газовой отрасли

А.А.Шаповало¹✉, В.К.Аверьянов², Ю.В.Сербин²

¹ ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия

² АО «Газпром промгаз», Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Шаповало А.А., Аверьянов В.К., Сербин Ю.В. Определение индекса технического состояния энергокомплексов производственных объектов в системе поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры газовой отрасли // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 115-128. [EDN FDIGKL](#)

Аннотация

Изменения условий хозяйствования предприятий газовой отрасли и нормативной базы создания и эксплуатации объектов энергетики требуют развития энергетической инфраструктуры производственных объектов. Многообразие и большое количество существующих объектов энергетики, а также применение риск-ориентированного подхода к управлению газовой отраслью приводят к необходимости создания систем поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры производственных объектов в масштабе отрасли. Цель исследования – разработка комплекса математических моделей определения индекса технического состояния энергокомплексов производственных объектов, используемого для подготовки структурированной информации в рамках создания системы поддержки принятия решений по стратегическому развитию системы, позволит принять решение о минимально необходимом объеме и сроках реконструкции энергетической инфраструктуры производственного объекта в современных условиях при ограничениях на финансирование реконструкции. Решение подобной многокритериальной задачи потребовало: обоснования множества допустимых альтернатив решения, оценки рисков при принятии конкретных решений, разработки системы и математических зависимостей оценки критериальных показателей, составляющих индекса технического состояния с учетом предпочтений и решающих правил, а также правил определения весомости составляющих оценки в величине интегрального показателя. На основе разработанных математических моделей сформулирован алгоритм определения индекса технического состояния одиночного энергокомплекса производственного объекта, являющийся составной частью обобщенного алгоритма применения математического обеспечения системы поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры предприятий газовой отрасли.

Ключевые слова

объекты энергетики; газовая отрасль; система поддержки принятия решений; математическое обеспечение; индекс технического состояния; риск-ориентированный подход

Поступила: 16.10.2024

Принята: 28.01.2025

Онлайн: 25.06.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Обеспечение высокого уровня конкурентоспособности в условиях динамичного изменения условий хозяйствования предприятий газовой отрасли [1, 2] невозможно без улучшения комплексных бизнес-процессов, включая выработку оптимальных решений по развитию энергетической инфраструктуры производственных объектов¹, в условиях применения риск-ориентированного подхода (РОП) к управлению в отрасли, предполагающего рамочные ограничения в финансировании различного рода программ.

С использованием известных детерминированных подходов сложно принять обоснованное решение по составлению сбалансированных перечней мероприятий комплексных целевых

¹ СТО Газпром 2-2.3-141-2007. Энергохозяйство ОАО «Газпром». Термины и определения.



программ реконструкции и технического перевооружения энергетических объектов для совокупности различных производственных объектов (ПрОб) газовой отрасли с большим числом энергетических систем различного профиля. Действенным средством помощи в процессе принятия решений по развитию иерархически сложных производственных комплексов является применение систем поддержки принятия решений (СППР) [3-5].

Структурирование информации о техническом уровне и состоянии анализируемых объектов энергетики, в том числе с использованием разработанных методов анализа [6, 7], выполняемое в рамках научно обоснованной системы поддержки принятия решений, позволяет улучшить бизнес-процесс принятия комплексного решения по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры предприятий газовой отрасли.

СППР по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры базируется на математическом обеспечении, позволяющем количественно определить весь спектр значимых показателей и критериев, оценивающих объекты энергетики на текущий момент и в перспективе, в том числе с применением различных вариантов технических решений по их реконструкции с учетом положений принятой Концепции развития энергоснабжения производственных объектов газовой отрасли [6].

Оценка предприятий газовой отрасли в настоящее время складывается из оценок отдельных производственных объектов с обеспечивающими их функционирование системами электроснабжения, теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения, а также системами промышленной вентиляции и кондиционирования воздуха, которые предложено [6] рассматривать в виде единых энергетических комплексов (ЭК). Состояние и технический уровень энергокомплексов, а также их соответствие заданным требованиям авторы [7, 8] предлагают оценивать путем определения индекса технического состояния (ИТС). Представляется актуальной разработка математических моделей и алгоритмов определения индекса технического состояния ЭК ПрОб, позволяющих обеспечить информационную поддержку в рамках СППР по управлению стратегическим развитием энергетической инфраструктуры с учетом недопущения снижения уровня конкурентоспособности предприятий отрасли, связанного с появлением неоправданных рисков из-за несоответствия технического уровня и состояния производственных объектов изменившимся требованиям в условиях применения РОП к управлению в газовой отрасли.

Методы

Функционирование энергетической инфраструктуры производственных объектов в условиях применения РОП к управлению их развитием приводит к необходимости учета целого ряда рисков [9, 10], среди которых для ЭК ПрОб газовой отрасли наиболее значимыми являются:

- рыночные риски газовой отрасли, вызывающие изменение объемов добычи, хранения, переработки и товарно-транспортной работы, а также необходимость диверсификации товарной продукции, что изменяет требования к энергетике ПрОб по номенклатуре и объемам вырабатываемых (передаваемых) объектами энергетики энергоресурсов;
- экологические риски, приводящие к необходимости компенсации причиненного ущерба окружающей среде и затратам на доведение технических решений ЭК ПрОб до вновь заданных экологических требований;
- производственно-технические риски, связанные с ростом потенциального ущерба из-за вероятных отказов энергетического оборудования, вызванных различными причинами, включая повышенный физический износ, некачественное выполнение технического обслуживания, текущего и капитального ремонтов (ТО, ТР и КР) оборудования, а также совершения ошибок оперативным персоналом.

Задачей математического обеспечения определения ИТС ЭК ПрОб является подготовка структурированной информации для принятия решения о минимально необходимом объеме и сроках реконструкции энергетической инфраструктуры с целью обеспечения эффективного функционирования производственного объекта в современных условиях при ограничениях на финансирование реконструкции в условиях применения РОП.

Анализ источников [11-13 и др.] показал, что математические модели и алгоритмы в настоящее время активно и успешно используются для решения ряда задач систем поддержки принятия решений различного назначения. Вместе с тем, в литературе приводятся, как правило, только отдельные фрагменты разработки СППР [12-14], либо рассматриваются общие вопросы их использования [15-17].



Описание математического обеспечения для определения ИТС ЭК ПрОб в условиях действия ограничений, вносимых применением РОП к управлению развитием газовой отрасли, в литературе в настоящее время отсутствует, поэтому требуется его разработка.

Математическое обеспечение СППР по управлению стратегическим развитием энергетической инфраструктуры применительно к оценке ИТС ЭК одиночного ПрОб

Комплекс технологических задач, решаемых предприятиями газовой отрасли, определяет состав производственных объектов и соответствующий ему состав энергетических объектов, позволяющих решать эти задачи. Необходима оценка соответствия решаемым технологическим задачам следующих иерархий энергокомплексов:

- отдельного производственного объекта (установки комплексной подготовки газа, компрессорной станции, газораспределительной станции и пр.);
- группы объектов добычи, объектов транспортировки углеводородного сырья или продуктов переработки по магистральным газопроводам (газоконденсатного месторождения, магистрального газопровода, газоперерабатывающего завода);
- группы объектов отдельного предприятия газовой отрасли и газовой отрасли в целом.

Базовой ячейкой разрабатываемого комплекса математических моделей и алгоритмов СППР по управлению развитием энергетической инфраструктуры предприятий отрасли является математическое обеспечение, предназначенное для оценки ИТС ЭК отдельного ПрОб. Структура ЭК отдельного ПрОб приведена в статье [7], их показатели в дальнейшем используются для определения характеристик энергокомплексов групп ПрОб.

Требования к разрабатываемому комплексу математических моделей

С учетом перечня предлагаемых к решению задач [7], принято следующее:

- математические модели создаются для определения ИТС ЭК типовых ПрОб добычи, хранения, транспортировки природного газа. Оценка показателей энергетической инфраструктуры уникальных производственных объектов обеспечивается за счет дополнительной адаптации базового математического обеспечения к условиям конкретных объектов;
- оцениваемые энергетические комплексы на момент создания полностью соответствовали требованиям действующих нормативных документов и обеспечивали функционирование без ограничений производственного объекта, т.е. ИТС имел максимальное значение, равное единице;
- технические решения систем, входящих в состав ЭК ПрОб, оцениваются одновременно по комплексному критерию технологической результативности и безопасности и комплексному критерию экономической эффективности [6, 18];
- составляющие, входящие в ИТС ЭК ПрОб, определяются при использовании минимально необходимого количества доступных исходных данных;
- оценка величин показателей существующих ЭК выполняется с учетом срока их эксплуатации;
- математические модели и алгоритм их применения способствуют выявлению критичных изменений требований к энергетической инфраструктуре со стороны ПрОб и выбору минимально достаточного организационно-технического решения для их достижения;
- математические модели определения отдельных составляющих ИТС и самого ИТС обеспечивают сравнимость одноименных показателей при оценке ЭК ПрОб различного типа и позволяют формировать тренды показателей при изменении сценарных условий, что способствует принятию обоснованных решений при формировании перечней мероприятий по развитию ЭК в условиях РОП к управлению в отрасли;
- тренды величин показателей, критериев и ИТС ЭК ПрОб определяются на весь период коммерческого использования рассматриваемой энергетической инфраструктуры;
- математическое обеспечение оценки ИТС ЭК ПрОб позволяет оценивать риски от несоответствия существующих объектов энергетической инфраструктуры изменившимся требованиям по обеспечению функционирования производственного объекта в новых условиях, а также способствовать принятию вариантов реконструкции и нового строительства объектов энергетической инфраструктуры, соответствующих этим рискам.

Определение величины ИТС ЭК ПрОб с целью принятия решения о необходимости совершенствования энергокомплекса в современных условиях (после изменения требований к энергообеспечению или условий хозяйствования) является многокритериальной задачей, которую можно представить следующим кортежем [19]:

$$\langle t, X, R, A, F, G, D \rangle,$$

где t – тип задачи (1 – разработка и создание ЭК, оценивается соответствие показателям технического задания, 2 – эксплуатация ЭК, оценивается соответствие изменившимся требованиям к ЭК в процессе эксплуатации); X – множество допустимых альтернатив решения задачи развития ЭК (от полной реконструкции до совершенствования отдельной установки с целью улучшения отдельного критериального показателя); R – множество критериев, составляющих оценки ИТС ЭК; A – множество шкал оценки критериев, применимых для различных этапов жизненного цикла ЭК; F – отображение множества допустимых альтернатив на множество оценок рисков при принятии конкретных решений по развитию ЭК; G – система предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР), использующая предпочтения для различных периодов жизненного цикла ЭК; D – решающее правило, отражающее систему предпочтений ЛПР для ЭК различных типов ПрОб.

Далее рассмотрим вариант поддержки принятия решений на этапе эксплуатации ЭК ПрОб.

Перечень рисков, напрямую связанных с изменениями требований к энергоснабжению [9, 20, 21], позволил определить минимально достаточный перечень оцениваемых комплексных показателей ЭК ПрОб:

- возможность обеспечения определенного количества и качества энергоресурсов, количества и качества очистки воды и стоков во всех заданных режимах функционирования объекта;
- оценка надежности работы оборудования, входящего в состав ЭК, связана с обеспечением требуемых объемов и сроков поставки продукции предприятий газовой отрасли потребителям;
- оценка экологической, конструкционной, электро-, пожаро- и взрывобезопасности энергокомплексов, а также энергоэффективности реализуемых ими технологических процессов, экономичности создания и эксплуатации, связана с обеспечением требований к ПрОб с точки зрения безопасности и эффективности его функционирования.

В соответствии с принятой Концепцией развития энергоснабжения производственных объектов газовой отрасли [6, 22] и действующими нормативными документами², оценку энергетических комплексов каждого конкретного производственного объекта предлагается выполнять следующим образом.

1. Определяются показатели пяти систем, входящих в ЭК ПрОб, по семи комплексным технико-экономическим критериям.

• Системы, входящие в ЭК ПрОб: электроснабжения (СЭС, $i = 1$); теплоснабжения (СТС, $i = 2$); водоснабжения (СВС, $i = 3$); водоотведения (СВО, $i = 4$); промышленной вентиляции и кондиционирования воздуха производственных и административно-бытовых зданий и сооружений (СВиКВ, $i = 5$).

• Комплексные критерии: обеспеченность количеством энергоресурсов ($j = 1$); качество энергоресурсов ($j = 2$); надежность оборудования ($j = 3$); безопасность эксплуатации ЭК ($j = 4$); энергоэффективность функционирования ($j = 5$); совершенство эксплуатации ЭК ($j = 6$); затраты на создание и эксплуатацию ($j = 7$).

2. Определяются технико-экономические показатели, критерии и ИТС для ЭК ПрОб в целом.

Описание математического обеспечения для определения ИТС ЭК ПрОб выполняется по принципу «система, входящая в ЭК-показатель» с присвоением всем величинам соответствующих индексов – R_{ij} для отдельных систем энергоснабжения и $R_{ЭК}$ для ЭК ПрОб в целом.

Математические модели определения ИТС ЭК производственных объектов

Исходные данные для расчета показателей, составляющих ИТС ЭК ПрОб. Вопросам моделирования отдельных свойств энергетического оборудования и систем энергоснабжения посвящены работы [22-24 и др.], особенности применения моделей в СППР различного типа рассмотрены в [25]. Для выполнения расчетов по приведенным в анализируемых источниках моделям требуется использование большого количества исходной информации, поиск которой требует существенных трудозатрат, особенно с учетом разнообразия технических решений существующих и проектируемых энергетических объектов.

В рассматриваемом подходе для снижения затрат времени на сбор исходных данных и разработку математического обеспечения сравнительной оценки состояния ЭК ПрОб авторами [6]

² СТО Газпром 18000.1-002-2020. Идентификация опасностей и управление рисками в области производственной безопасности.



предлагается выявлять наиболее типичные сочетания технических решений входящих в их состав СЭС, СТС, СВС, СВО и СВиКВ с характерными наборами энергетического оборудования.

Результаты разработки математических моделей показали возможность выполнения сравнительных оценок отдельных показателей и оценки ИТС ЭК ПрОб в части решения задач по управлению стратегическим развитием ЭК предприятий газовой отрасли с использованием доступного для руководителей служб эксплуатации ПрОб блока исходной информации без привлечения сторонних специалистов высокой квалификации.

Определение величин комплексных технико-экономических показателей систем, входящих в ЭК ПрОб. Основным назначением разработанных математических моделей является оценка величин показателей ЭК конкретных ПрОб для определения соответствия изменившимся требованиям. В условиях существенной неопределенности исходной информации по всей совокупности оборудования энергетических объектов, входящих в состав ЭК, оценки выполняются в сравнении с «базовым» (проектным) состоянием по одинаковым для всех объектов энергетики газовой отрасли косвенным признакам, характеризующим состояние и технический уровень технических решений СЭС, СТС, СВС, СВО и СВиКВ.

Математические модели оценки величин отдельных показателей разделены на две группы: требующие расчетов по математическим зависимостям и требующие выставления балла соответствия по правилам.

К первой группе относятся модели определения следующих критериев: обеспеченность количеством энергоресурсов R_{i1} , надежность энергооборудования ЭК R_{i3} , затраты на создание и эксплуатацию ЭК R_{i7} .

Критерий обеспеченности количеством энергоресурсов определяется отношением максимально возможного количества энергоресурса (электрической или тепловой энергии), подачи исходной воды, воздуха, отведения и очистки стоков по отношению к соответствующему требуемому количеству (на примере СЭС):

$$R_{i1} = \frac{P_{1 \text{ возм}}}{P_{1 \text{ треб}}},$$

где $P_{1 \text{ возм}}$ – суммарная максимально возможная мощность источников электроэнергии для анализируемого уровня напряжения с учетом максимального коэффициента их загрузки и обеспечения заданной надежности, кВт; $P_{1 \text{ треб}} = P_{\text{год max}}$ – максимальная проектная или максимальная фактическая электрическая мощность для анализируемого уровня напряжения за период последних 5 лет, кВт.

Критерий определяется для энергетических ресурсов и рабочих сред необходимой номенклатуры: электрической энергии с различными уровнями напряжения переменного и постоянного тока; тепловой энергии в виде пара и теплоносителя для отопления и горячего водоснабжения производства, на хозяйственно-бытовые нужды и т.п.

Расчет критерия выполняется для совместимых по времени самого энергоемкого режима работы производственного объекта, самого неблагоприятного режима компенсации микроклимата (для систем теплоснабжения, СВиКВ), максимального потребления исходной воды и очистки максимального количества стоков всех видов при питании от основных и резервных источников энергоресурсов и воды.

Критерий надежности оборудования ЭК R_{i3} определяется путем анализа схемно-технического решения системы энергоснабжения. При отсутствии статистической информации по отказам надежность оборудования косвенно определяется величиной относительного срока службы (отношением фактического срока службы $T_{\text{ф}}$ энергетического оборудования к назначенному сроку службы $T_{\text{н}}$): $R_{i3} = T_{\text{ф}} / T_{\text{н}} < = > 1$.

При величине критерия надежности оборудования ниже единицы оборудование эксплуатируется в пределах срока службы и соответствует проектному значению. При увеличении срока нахождения энергетического объекта в эксплуатации более назначенного срока службы величина относительного времени нахождения его в эксплуатации становится больше единицы, что приводит к снижению величины среднего времени наработки до отказа наименее надежного элемента в

соответствии с распределением Вейбулла³ и снижением надежности системы по отношению к проектной.

Величина критерия R_{i3} определяется для всех систем, входящих в ЭК по группам потребителей энергоресурсов и воды, отводу и очистке стоков.

Критерий затрат на создание и эксплуатацию R_{i7} определяется в соответствии с общепринятыми правилами, включая расчет капитальных вложений в строительство (реконструкцию) на основе калькуляции или сметной документации для отдельных подсистем, систем и ЭК в целом; затрат на эксплуатацию подсистем, систем и ЭК ПрОб (приобретение топлива, энергетических ресурсов и воды, плата за сброс очищенных с различным качеством стоков; издержки на текущее обслуживание, текущий и капитальный ремонты ТО, ТР и КР; ущербы от отказа энергетического оборудования),

$$R_{i7\text{созд-реконстр}} = KB_{\text{создание } i} + \sum (KB_{\text{реконстр. } ik}),$$

$$R_{i7\text{экспл}} = \sum (Z_{\text{экспл. } in}),$$

где $KB_{\text{создание } i}$ – капитальные вложения в создание системы, млн руб.; $KB_{\text{реконстр. } ik}$ – капитальные вложения в k -ю реконструкцию системы за жизненный цикл (ЖЦ), млн руб.; $Z_{\text{экспл. } in}$ – затраты на ведение режима (включая затраты на приобретение энергоресурсов, штрафы и пени из-за несоответствия ЭК требованиям нормативных документов, ущербы от возможных отказов оборудования ЭК), ТО, ТР и КР за n -й год эксплуатации ЭК в течение ЖЦ, млн руб. за год.

Отличием расчетов величин, составляющих критерий R_{i7} , по разработанным моделям от общепринятых является определение эксплуатационных затрат и ущербов от отказа энергетического оборудования в зависимости от срока службы ЭК ПрОб. При нахождении ЭК за пределами назначенного срока службы затраты на эксплуатацию увеличиваются. Увеличение определяется совместно статистическими расчетными и экспертными методами.

Ко второй группе (применительно к этапу апробации разработанного математического обеспечения СППР) отнесены все остальные комплексные критерии, определяемые по следующим правилам.

Критерий качества энергоресурсов R_{i2} определяет соответствие качества всех видов энергоресурсов R_{i2l} , вырабатываемых (передаваемых) всеми подсистемами, системами всем группам потребителей. Определяется на основании замеров параметров энергоресурсов на входе потребителя: $R_{i2} = f(R_{i21}, R_{i22}, \dots, R_{i2l})$.

Критерий безопасности эксплуатации R_{i4} определяет соответствие всех энергетических объектов, входящих в ЭК ПрОб, требованиям нормативных документов по следующим составляющим: конструкционной, пожаро- и взрывобезопасности, электробезопасности, безопасности по требованиям котлонадзора и экологической безопасности. Величины составляющих критерия безопасности R_{i4l} определяются актами проверки требований безопасности с разделением на системы и виды безопасности: $R_{i4} = f(R_{i41}, R_{i42}, \dots, R_{i4l})$.

Критерий энергоэффективности функционирования R_{i5} определяет соответствие объектов энергетики, входящих в ЭК ПрОб, требованиям нормативных документов по следующим составляющим: удельное потребление всех видов энергоресурсов, потери всех видов энергоресурсов при функционировании энергетических объектов во всех режимах. Величины составляющих критерия энергоэффективности R_{i5l} определяются по результатам энергообследования ЭК составом внедренных систем автоматизации с целью энергосбережения: $R_{i5} = f(R_{i51}, R_{i52}, \dots, R_{i5l})$.

Критерий совершенства эксплуатации R_{i6} определяет эффективность ведения режима систем энергоснабжения, выполнения работ по ТО, ТР и КР оборудования всех энергетических объектов, входящих в состав ЭК ПрОб, в зависимости от уровня интеграции ЭК в системы автоматизации объекта и предприятия: $R_{i6} = f(R_{i61}, R_{i62})$.

Балл соответствия по перечисленным критериям выставляется экспертами по заранее определенным правилам.

³ ГОСТ Р 50779.27-2017. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных.



Правила для выставления балла соответствия (на примере критерия безопасности эксплуатации): 5 – нет актов по нарушениям видов безопасности; 4 – не норма по несущественному параметру; 3 – не норма по существенному параметру; 2 – не норма по ряду существенных параметров; 1 – имеется предписание о приостановке эксплуатации системы.

Приведенные модели позволяют численно определить величины критериев отдельных систем, входящих в ЭК, в единицах и баллах соответствия.

В дальнейшем, после накопления достаточной статистической информации по объектам оценки, предполагается совершенствовать наполнение составляющих ИТС и математические модели для их оценки, а также более полно интегрировать модели оценки в автоматизированную систему определения ИТС ЭК ПрОб с целью минимизации человеческого фактора.

Обеспечение сравнимости оценок критериальных показателей ЭК различных типов. Сравнимость величин, составляющих ИТС, предлагается обеспечить следующим методом:

- Выполняется интерпретация для каждого показателя, входящего в ИТС, при этом определяется, какое из значений конкретного показателя (наибольшее или наименьшее) является лучшим с точки зрения обеспечения максимума величины ИТС ЭК.

- Определяется база нормирования (лучшие значения показателей $R_{j \text{ баз}}$) для оценки одноименных показателей всех систем и составляющих комплексных показателей, участвующих в сравнении.

- Выполняется нормирование расчетных величин отдельных показателей или критериев: для случая, когда наилучшее значение показателя максимально,

$$r_j = \frac{R_j}{R_{\text{баз}}},$$

для случая, когда наилучшее значение показателя минимально,

$$r_j = \frac{R_{\text{баз}}}{R_j}.$$

В результате нормирования величины всех показателей и критериев оказываются в интервале $0 \dots 1$, наибольшее значение нормированного показателя или критерия означает наилучшее состояние ЭК с точки зрения обеспечения максимума величины ИТС оцениваемой подсистемы, системы или ЭК по данному показателю (критерию).

- Величины нормированных показателей (критериев) для всех оцениваемых систем ПрОб сводятся в матрицы одинаковой размерности. В случае отсутствия в составе конкретного ЭК определенного типа одной из систем или подсистем (например, отсутствие системы водоснабжения в составе энергокомплекса вдоль трассовых потребителей или отсутствие среднего уровня напряжения в СЭС, или отсутствие выработки пара на котельной в СТС) соответствующие элементы матрицы заполняются единицами. Таким образом исключается влияние этих показателей на величину интегральной оценки при свертке показателей.

- Выполняется свертка составляющих для определения комплексных критериев по каждой из систем, входящих в ЭК, и для определения величины ИТС ЭК ПрОб. Свертка производится с использованием сепарабельного свертывания при геометрическом усреднении. Подобный способ свертки отдельных свойств позволяет получать максимальное значение интегрального показателя (критерия) в случае наилучшего сочетания оценок отдельных свойств с учетом их весомости (значимости), при этом величина критерия с учетом его значимости тем больше, чем выше вес критерия в составе интегральной оценки [26, 27]. Отсутствующие для конкретных систем свойства со значением «1» не изменяют величины критерия, а сама величина критерия или ИТС после свертки находится в пределах интервала $0 \dots 1$.

При определении величин коэффициентов весомости составляющих комплексных критериев, входящих в интегральный показатель ИТС ЭК ПрОб, могут использоваться различные методы. Наиболее часто применяемыми являются экспертные, статистические, предельных и номинальных значений, а также различные стоимостные методы [28-30].

Перечисленные методы определения весомости отдельных показателей (критериев) имеют свои достоинства и недостатки. Полученные значения весомостей должны позволять получить



адекватные для решаемой задачи результаты – формировать оптимальный перечень мероприятий для достижения минимально достаточного уровня отдельных показателей и ИТС ЭК ПрОб в условиях минимизации затрат на проведение оценки индекса технического состояния.

В рамках разработанного математического обеспечения и в соответствии с полученным трехуровневым «деревом свойств» ЭК ПрОб (рис.1) требуется определить весомости критериев для трех уровней.

Уровень 3. Весомость отдельных l -х составляющих в рамках величины конкретного комплексного критерия $K_{vj/l}$ (например, составляющие критерия количества электрической энергии СЭС по уровням напряжения и видам тока, или надежность функционирования источников и СВО,

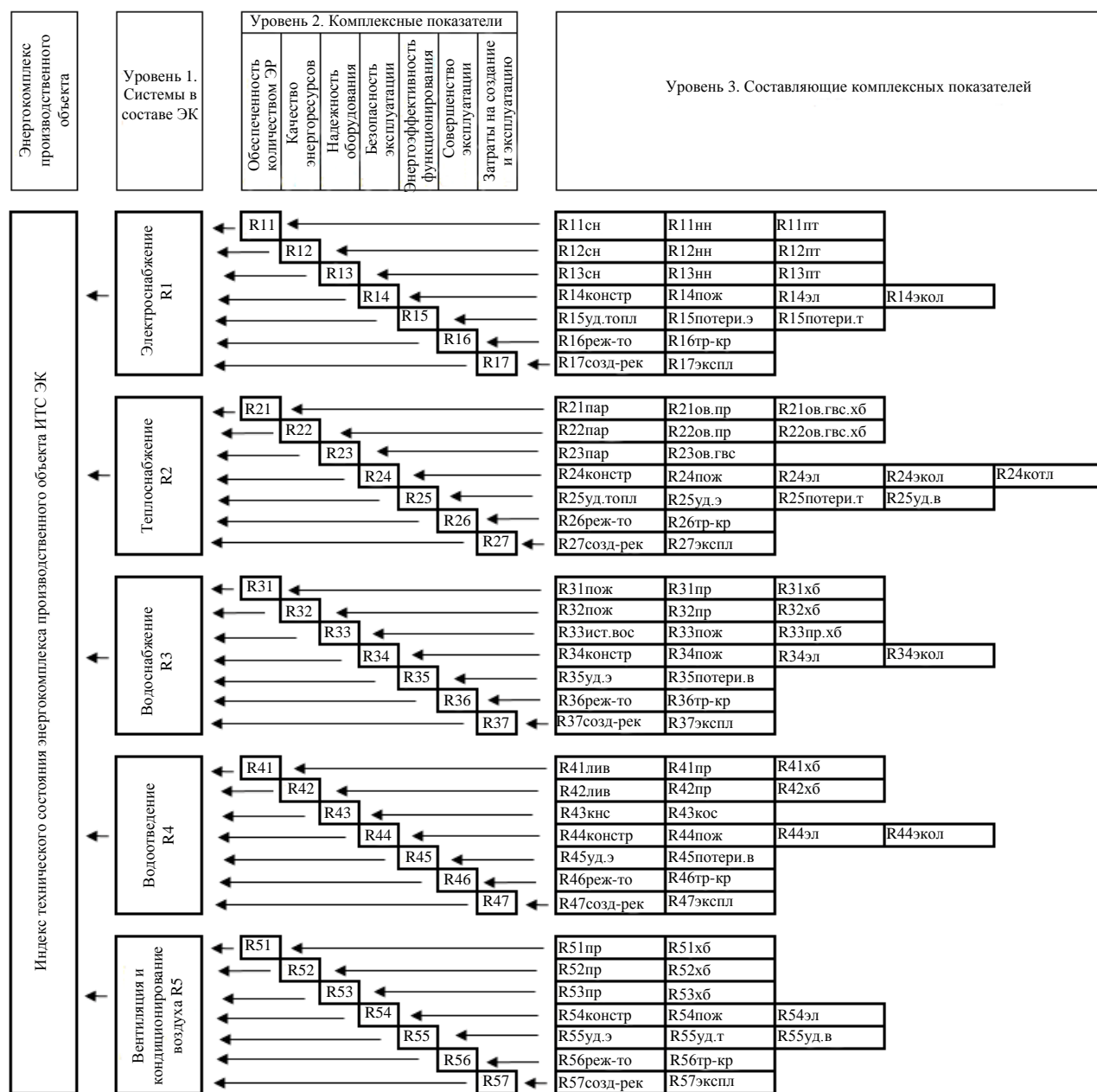


Рис.1. «Дерево свойств» для оценки показателей энергокомплекса производственного объекта

сн / нн / пт – среднее / низкое напряжение / напряжение постоянного тока; пар / ов.пр / ов.гвс.хб – пар / тепло на отопление и вентиляцию для производства / тепло и горячее водоснабжения на хозяйственно-бытовые нужды; пож / пр / хб – противопожарное / производственное / хозяйственно-бытовое водоснабжение; лив / пр / хб – водоотведение ливневых / производственных / хозяйственно-бытовых стоков; пр / хб – производственная / хозяйственно-бытовая вентиляция и кондиционирование воздуха; кос / вос / кнс – канализационные очистные сооружения / водоочистные сооружения / канализационные насосные станции; констр / пож / эл / экол / котл – конструкционная безопасность / пожаро-взрывобезопасность / экологическая безопасность / электробезопасность / безопасность по требованиям котлонадзора; уд.топл / уд.э / уд.т / уд.в – удельное потребление топлива, электроэнергии, тепла, воды; потери.э / т / в – потери электроэнергии / тепла / воды; то / тр-кр – техническое обслуживание / текущий и капитальный ремонт; созд-рек / экспл – создание и реконструкция / эксплуатация



составляющих систем водоснабжения для нужд пожаротушения или производства и хозяйственно-бытовых нужд). Весомость отдельных составляющих $K_{влj}$ может быть определена экспертами. Экспертная группа состоит из шести и более экспертов высокой квалификации с наивысшим уровнем информированности об объекте оценки и высоким уровнем адаптации к источникам информации [29, 31, 32].

Проведенные в рамках апробации разработанного математического обеспечения оценки показали, что значимость составляющих в рамках комплексного критерия, как правило, указывается экспертами как одинаковая. Поэтому на настоящем этапе составляющие комплексных критериев учитываются с одинаковой весомостью:

$$K_{влj} = 1/l_j,$$

где l_j – количество составляющих в составе j -го комплексного показателя; сумма весов отдельных составляющих комплексного показателя в этом случае равна 1.

Уровень 2. Весомость комплексных критериев в составе интегрального показателя ИТС отдельной системы, входящей в ЭК, и ИТС энергетического комплекса в целом. Определение величин весомости критериев в составе ИТС требует привлечения экспертной группы, поскольку предполагает учет изменений условий хозяйствования предприятий газовой отрасли или другой сложно формализуемой информации. Такая оценка проводится в темпе изменения условий хозяйствования (например, один раз в год перед формированием целевых комплексных программ развития энергоснабжения), ее результаты $K_{влj}$ применяются при оценке показателей ЭК ПрОб всех типов. Эксперты наивысшей квалификации для каждого j -го комплексного критерия выставляют балл от 1 до 10.

Сходимость оценок в пределах экспертной группы определяется методами математической статистики путем вычисления коэффициента конкордации [26]:

$$W = \frac{12C}{m^2(n^3 - n)},$$

где C – сумма квадратов отклонений сумм баллов по каждому параметру оценки от средней суммы баллов; m – количество экспертов; n – количество параметров оценки.

При значениях коэффициента конкордации более 0,5 сходимость мнений экспертов считается достаточной, для ее повышения выполняют повторные туры оценки после дополнительного повышения уровня информированности экспертов [29].

После получения достаточной сходимости мнений экспертов величины выставленных баллов нормируются с использованием правила 4. В качестве базового значения принимается сумма выставленных баллов по всем семи критериальным показателям.

Уровень 1. Весомость отдельных систем (СЭС, СТС, СВС, СВО, СВиКВ) $K_{в2i}$ в составе интегрального показателя ИТС ЭК. Величины весомостей указанного типа могут быть определены путем проведения экспертных оценок [33]. Применение для этой цели метода ранжирования, основанного на анализе количества и значимости связей между отдельными системами в структуре ЭК в зависимости от типа производственного объекта по методу Фишберна [34–36], представляется более предпочтительным.

Состав систем, подсистем и структура связей в ЭК ПрОб определены нормативными документами газовой отрасли и соответствуют типу производственного объекта, их значимость авторы предлагают определять сравнительной оценкой ущерба, который может получиться в случае отказа оборудования каждой из систем с использованием следующего способа шкалирования: 1 – нет ущерба (связь информационная); 2 – отказ системы приводит к отказу одной из систем ЭК и не приводит к прекращению технологического процесса на ПрОб; 3 – отказ системы приводит к отказу ЭК в целом и нарушению технологического процесса производственного объекта.

Общий вес отдельной системы определяется перемножением количества ее связей с другими системами ЭК на балл оценки ущерба при ее отказе. Полученная оценка весомости нормируется с использованием правила 4. В качестве базового значения принимается сумма полученных весов всех пяти систем.



Определение комплексных критериев и интегрального показателя ИТС ЭК производственного объекта. Свертка составляющих, входящих в отдельные комплексные критерии, и комплексных критериев в пределах отдельных систем ЭК ПрОб выполняется с выражениями

$$R_{ij} = \prod_1^{lj} r_{ijl}^{K_{b1jl}};$$

$$R_i = R_{\text{ИТС } i} \prod_1^j r_{ij}^{K_{b1j}},$$

где r_{ijl} – нормированное значение l -й составляющей j -го комплексного критерия для i -й системы ЭК ПрОб; r_{ij} – нормированное значение j -го комплексного критерия для i -й системы ЭК ПрОб; K_{b1jl} , K_{b1j} – коэффициенты весомости отдельных l -х составляющих j -го комплексного критерия конкретного типа и самого j -го комплексного показателя в ИТС системы, входящей в ЭК ПрОб.

Свертка комплексных критериев отдельных систем ЭК ПрОб в интегральный показатель ИТС ЭК ПрОб выполняется в соответствии с выражением

$$\text{ИТС}_{\text{ЭК}} = R_{\text{ЭК}} = \prod_1^i r_i^{K_{b2i}},$$

где r_i – нормированное значение комплексного критерия для i -й системы ЭК ПрОб; K_{b2i} – коэффициент весомости (значимость) i -й системы в составе ЭК ПрОб.

В результате применения комплексной оценки с учетом «дерева свойств» и весомости отдельных составляющих в комплексных критериях и интегральном показателе получена рангово-экспертная функция, позволяющая определить отклонение величины ИТС конкретного объекта от максимально достижимого значения при возможности выявления направления, которое в наибольшей мере влияет на улучшение величины ИТС энергокомплекса.

Алгоритм применения математических моделей определения ИТС одиночного ЭК в СППР. На основе предложенного комплекса математических моделей разработан алгоритм подготовки информации для построения трендов критериальных показателей и ИТС отдельных систем и ЭК на анализируемый период (рис.2). Продолжительность периода выбирается различной (например, может соответствовать назначенному сроку службы энергетического оборудования конкретного типа).

Сравнение расчетных и требуемых величин критериев на современном этапе позволяет выявлять несоответствия по всем значимым для энергетического оборудования параметрам с указанием величины рассогласования и периода возникновения критичного несоответствия. Величины критических несоответствий параметров ЭК связаны с возникновением производственно-технических и экологических рисков. Риски выражаются в денежном эквиваленте (например, невозможность выполнения производственной задачи в полном объеме и связанный с этим ущерб, издержки от отказов оборудования, от штрафов и пени, на приобретение дополнительных энергоресурсов).

Устранение несоответствия параметров ЭК связано с его реконструкцией. Для конкретного типа производственного объекта из общего перечня, содержащего 69 перспективных технических решений совершенствования энергетических объектов, изложенных в Концепции развития энергоснабжения [6], выбираются технические решения, позволяющие улучшить ту составляющую требований к энергоснабжению, которая не соответствует новым условиям.

Для каждого из выбранных вариантов технических решений определяются критериальные показатели реконструированного энергокомплекса, затраты на реконструкцию с возможными временными сценариями ее выполнения, строятся соответствующие тренды для всего анализируемого периода и формируются рекомендации по доведению показателей ЭК до минимально достаточного уровня требований.

Анализ расчетных трендов ИТС и его составляющих позволяет определить целесообразные направления и комплекс мероприятий по достижению требуемого уровня ИТС и отдельных составляющих в каждый конкретный период жизненного цикла производственного объекта.

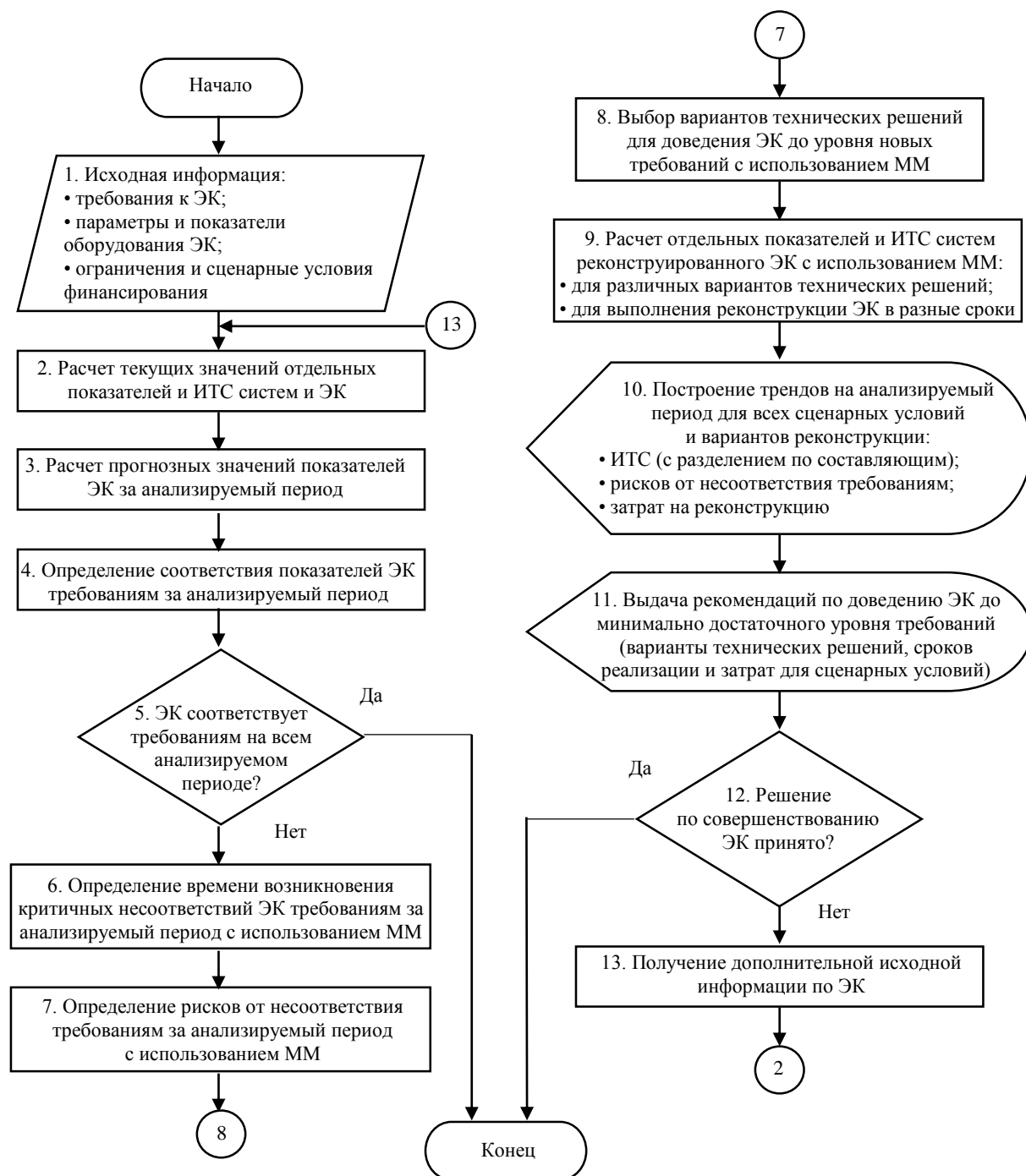


Рис.2. Укрупненный алгоритм применения комплекса математических моделей (ММ) для определения ИТС одиночного ЭК

В качестве примера на рис.3 приведены результаты расчета составляющих ИТС, выполненные с использованием разработанных моделей при условиях: роста нагрузки на СЭС на 20 % на пятом году реализации Программы развития, вызванного увеличением подачи природного газа потребителю, и повышения требований по энергоэффективности оборудования ЭК на 20 % на десятом году, связанного с вводом в действие новых нормативных документов.

Тренды составляющих ИТС показали следующее:

- надежность оборудования ЭК ниже требуемой (0,95 отн.ед.), начиная с первого года;
- обеспеченность количеством энергоресурсов становится ниже требуемой (1,2 отн.ед.), начиная с пятого года;
- энергоэффективность энергокомплекса становится ниже требуемой (4 отн.ед.), начиная с десятого года.

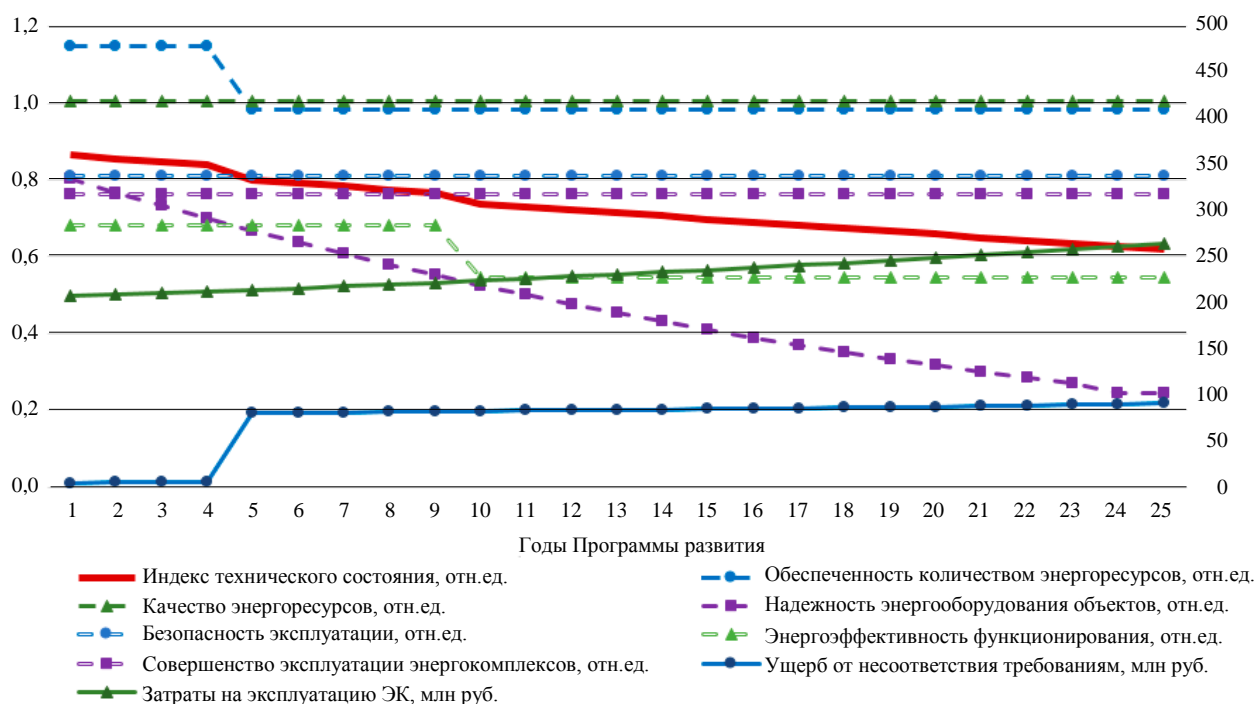


Рис.3. Характеристика ИТС и показателей ЭК компрессорной станции

Суммарные затраты на эксплуатацию ЭК нарастающим итогом (с учетом потенциальных ущербов от отказов оборудования и рисков недопоставки товарной продукции) начинают превышать величину капитальных вложений в создание ЭК (проектные) на девятом году реализации Программы развития.

Результаты

Разработанные комплекс математических моделей и алгоритм являются основой системы поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры как составляющей методологии управления развитием энергетики производственных объектов газовой отрасли.

Математическое обеспечение позволяет численно определить интегральный показатель ИТС существующих энергетических комплексов и его составляющие на всем периоде жизненного цикла ПрОб, а также оценить изменение составляющих ИТС для случаев реализации различных вариантов реконструкции объектов энергетики производственных объектов.

Комплекс математических моделей и алгоритм их применения учитывают особенности, накладываемые условиями эксплуатации существующих ПрОб при ограничениях, вносимых применением РОП в управление развитием предприятий газовой отрасли.

Заключение

Значительные изменения условий хозяйствования и применение РОП в управление газовой отраслью требуют создания системы поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры ПрОб, основой которой является комплекс математических моделей определения индекса технического состояния одиночного энергокомплекса.

Определение величины ИТС ЭК ПрОб с целью принятия решения о необходимости совершенствования энергокомплекса в современных условиях является многокритериальной задачей, решение которой предложено выполнять с использованием кортежа, учитывающего: тип задачи, допустимые альтернативы ее решения с учетом множества оценок рисков при принятии конкретных решений, критерии, составляющие оценку ИТС с учетом системы предпочтений и решающих правил лица, принимающего решение.

В рамках исследования определены цели, задачи и математические зависимости определения ИТС ЭК ПрОб для подготовки структурированной информации при принятии решения о минимально необходимом объеме и сроках реконструкции энергетической инфраструктуры в современных условиях при ограничениях на финансирование реконструкции в условиях применения РОП.



Математические модели для определения отдельных составляющих ИТС в рамках предложенного подхода предполагают использование доступного для руководителей служб эксплуатации блока исходных данных.

В предлагаемом подходе к оценке ИТС ЭК ПрОб разработан комбинированный экспертно-аналитический способ определения весомости отдельных составляющих комплексных критериальных показателей, значимости самих критериальных показателей, определяющих величину ИТС для отдельных систем энергоснабжения, и весов отдельных систем энергоснабжения в составе энергокомплекса.

Разработанный укрупненный алгоритм применения математических моделей для определения ИТС одиночного ЭК предполагает определение соответствия показателей существующих ЭК или ЭК ПрОб после их реконструкции новым требованиям на всем анализируемом периоде, оценку рисков от несоответствия показателей ЭК новым требованиям, а также комплекс процедур для построения трендов показателей и соответствующих им затрат на реконструкцию и величин рисков для принятия обоснованного решения по стратегическому развитию ЭК ПрОб.

В дальнейшем целесообразно продолжить исследования в направлении определения ИТС ЭК группы производственных объектов, формирования требования к энергокомплексам на основе информации об изменении условий хозяйствования предприятий газовой отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семикашев В.В., Гайворонская М.С. Анализ состояния и перспектив развития российской газовой отрасли до и после 2022 г. // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2022. Т. 20. С. 108-127. DOI: [10.47711/2076-318-2022-108-127](https://doi.org/10.47711/2076-318-2022-108-127)
2. Ларионова Е.И., Чинаева Т.И., Шаповалова Е.П. Анализ развития нефтегазового сектора в современных условиях // Статистика и экономика. 2019. Т. 16. № 6. С. 29-36. DOI: [10.21686/2500-3925-2019-6-29-36](https://doi.org/10.21686/2500-3925-2019-6-29-36)
3. Дармилова Ж.Д., Дармилов Э.И., Кривенко Н.И. Особенности принятия управленческих решений в нефтегазовой отрасли // Научный вестник Южного института менеджмента. 2019. № 4. С. 36-42. DOI: [10.31775/2305-3100-2019-4-36-42](https://doi.org/10.31775/2305-3100-2019-4-36-42)
4. Zhang Yu-mei. Mathematical Modeling of Attribute Encryption of Big Data Based on Data Redundancy Technology // Computer Simulation. 2021. Iss. 5. P. 418-422.
5. Dastres R., Soori M. Advances in Web-Based Decision Support Systems // International Journal of Engineering and Future Technology. 2022. Vol. 19. Iss. 1. P. 1-15.
6. Маркелов В.А., Бронников А.Н., Шаповало А.А. и др. Концепция развития энергетики производственных объектов в условиях динамичного изменения условий хозяйствования предприятий газовой отрасли // Газовая промышленность. 2023. Спецвыпуск № 3 (853). С. 8-11.
7. Шаповало А.А. Методология управления развитием энергетики производственных объектов газовой отрасли // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16378. С. 181-190.
8. Poiss G., Vitolina S., Marks J. Development of Indicators for Technical Condition Indexing of Power Transformers // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. 2018. Vol. 3. № 1. P. 148-154. DOI: [10.25046/aj030118](https://doi.org/10.25046/aj030118)
9. Nyenno I., Selivanova N., Korolenko N. et al. The energy policy risk management system model: theories and practices // Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal. 2020. Vol. 23. Iss. 4. P. 33-48. DOI: [10.33223/epj/127699](https://doi.org/10.33223/epj/127699)
10. Londoño A.A., Velásquez J.D. Risk Management in Electricity Markets: Dominant Topics and Research Trends // Risks. 2023. Vol. 11. Iss. 7. № 116. DOI: [10.3390/risks11070116](https://doi.org/10.3390/risks11070116)
11. Imanbayev K., Sinchev B., Sibanbayeva S. et al. Analysis and mathematical modeling of big data processing // Peer-to-Peer Networking and Applications. 2021. Vol. 14. Iss. 5. P. 2626-2634. DOI: [10.1007/s12083-020-00978-3](https://doi.org/10.1007/s12083-020-00978-3)
12. Сагитова Л.А. Алгоритм системы поддержки принятия решений о повышении эффективности регионального энергетического комплекса // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 2. С. 256-262.
13. Drożdż W., Vovk Y., Wiedera K. et al. Sustainability assessment of the energy generation systems // Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics. 2023. Vol. 8. № 2. P. 249-258. DOI: [10.14254/jsdtl.2023.8-2.19](https://doi.org/10.14254/jsdtl.2023.8-2.19)
14. Тихановичев О.В. Постановка задачи обеспечения автоматизации полного цикла поддержки принятия решения // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 6 (96). С. 103-112. DOI: [10.37791/2687-0649-2021-16-6-103-112](https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-6-103-112)
15. Балашова И.В., Терещенко Т.А. Системы поддержки принятия решений // The scientific heritage. 2021. № 79. С. 3-7. DOI: [10.24412/9215-0365-2021-79-4-3-7](https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-79-4-3-7)
16. Самойленко В.С., Федотова А.Ю. Архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 8 (146). DOI: [10.60797/IRJ.2024.146.10](https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.10)
17. Саятин О.В., Тихановичев О.В., Безвесильная А.А., Чискидов С.В. Об одной тенденции развития алгоритмов, реализуемых в системах поддержки принятия решений // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 3. С. 388-397. DOI: [10.15827/0236-235X.142.388-397](https://doi.org/10.15827/0236-235X.142.388-397)
18. Стуров А.Ю., Кувишинов М.С. Подход к оценке экономической эффективности информационно-управляющих систем // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Экономика и менеджмент». 2020. Т. 14. № 3. С. 108-116. DOI: [10.14529/em200312](https://doi.org/10.14529/em200312)
19. Рожко О.Н., Шихалев А.М. Оценка вариантов размещения логистических объектов на территории региона методом многокритериальной оптимизации (на примере Республики Татарстан) // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2017. Т. 10. № 6. С. 153-169. DOI: [10.15838/esc/2017.6.54.10](https://doi.org/10.15838/esc/2017.6.54.10)



20. Камчатова Е.Ю. Управление рисками генерирующих энергокомпаний // Вестник университета. 2018. № 2. С. 50-56. DOI: [10.26425/1816-4277-2018-2-50-56](https://doi.org/10.26425/1816-4277-2018-2-50-56)
21. Рахмани Д. Основные подходы к оценке эффективности применения методологии анализа и управления рисками в энергетической компании // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 9. С. 46-55 (in English). DOI: [10.36724/2072-8735-2022-16-9-46-55](https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-9-46-55)
22. Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Майоров Г.С. Разработка онтологий для автоматизации вычислительных процессов при проектировании трубопроводных систем в энергетике // Онтология проектирования. 2023. Т. 13. № 4 (50). С. 548-561. DOI: [10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561](https://doi.org/10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561)
23. Шклярский Я.Э., Замятина Е.Н., Замятин Е.О. Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 339-347.
24. Токарев И.С. Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16516. С. 171-180.
25. Fernando J.G., Baldelovar M. Decision Support System: Overview, Different Types and Elements // Technoart Transactions on Intelligent Data Mining and Knowledge Discovery. 2022. Vol. 2. Iss. 2. P. 13-18. DOI: [10.36647/TIDMKD/02.02.A003](https://doi.org/10.36647/TIDMKD/02.02.A003)
26. Кендэл М. Ранговые корреляции. М.: Статистика, 1975. 214 с.
27. Ganggang Xu, Chong Zhao, Abdollah Jalilian et al. Nonparametric estimation of the pair correlation function of replicated inhomogeneous point processes // Electronic Journal of Statistics. 2020. Vol. 14. Iss. 2. P. 3730-3765. DOI: [10.1214/20-EJS1755](https://doi.org/10.1214/20-EJS1755)
28. Ключев П.В., Морговева А.Д., Гаврина О.А. и др. Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 392-402.
29. Коробов В.Б. Теория и практика экспертных методов. М.: ИНФРА-М, 2021. 281 с. DOI: [10.12737/monography_5caee0067f1835.43206494](https://doi.org/10.12737/monography_5caee0067f1835.43206494)
30. Илюшин Ю.В., Афанасьева О.В. Разработка Scada-модели компрессорной станции магистрального газопровода // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 686-693. DOI: [10.31897/PMI.2019.6.686](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.6.686)
31. Boiko Y. Methods of forming an expert assessment of the criteria of an information system for managing projects and programs // Technology transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions. 2018. P. 9-11. DOI: [10.21303/2585-6847.2018.00766](https://doi.org/10.21303/2585-6847.2018.00766)
32. Серебрякова Е.А. Методы экспертного оценивания строительных проектов по качественным критериям // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11. № 4. 12 с. DOI: [10.26102/2310-6018/2023.43.4.007](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.007)
33. Коробов В.Б., Тутыгин А.Г., Лохов А.С. Рангово-экспертная функция отклонений для классификации сложных объектов // Проблемы управления. 2023. № 6. С. 56-65. DOI: [10.25728/ru.2023.6.5](https://doi.org/10.25728/ru.2023.6.5)
34. Сигал А.В. Использование последовательностей Фишберна для адекватного моделирования по выборочным данным // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 4. С. 50-60. DOI: [10.17323/2587-814X.2021.4.50.60](https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.4.50.60)
35. Fishburn P.C. Independence in Utility Theory with Whole Product Sets // Operations Research. 1965. Vol. 13. № 1. P. 28-45. DOI: [10.1287/opre.13.1.28](https://doi.org/10.1287/opre.13.1.28)
36. Saaty T.L. Creative Thinking, Problem Solving and Decision Making. Pittsburgh: RWS Publications, 2001. 267 p.

Авторы: Анатолий Антонович Шаповало, канд. техн. наук, начальник управления (ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия), An19660106@yandex.ru, Владимир Константинович Аверьянов, д-р техн. наук, профессор, советник генерального директора (АО «Газпром промгаз», Санкт-Петербург, Россия), Юрий Владимирович Сербин, д-р техн. наук, главный научный сотрудник (АО «Газпром промгаз», Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Экономика сырьевых отраслей

Поиск равновесия по Нэшу для системы из двух взаимосвязанных рынков сырья и продукции

А.А.Мещеряков✉, О.О.Хамисов

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Мещеряков А.А., Хамисов О.О. Поиск равновесия по Нэшу для системы из двух взаимосвязанных рынков сырья и продукции // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 129-141. EDN AULTPU

Аннотация

Исследуется новая модель комплексной экономической системы, которая состоит из двух рынков – сырья и продукции, связанных между собой посредством продажи и переработки сырья в продукцию. Данная модель при достижении рынками равновесного состояния позволяет оценивать товарные потоки и экономическую эффективность каждого производителя сырья или продукции с учетом рыночной конъюнктуры. При такой структуре взаимосвязанных товарных рынков производители продукции на рынке сырья являются покупателями сырья, а на рынке продукции – продавцами. Эта особенность рыночной системы приводит к тому, что функция спроса на сырье задается неявно, и стандартные методы поиска равновесия представляются неэффективными в приложении к данной задаче. С целью поиска равновесного состояния для представленной структуры из взаимосвязанных товарных рынков был разработан алгоритм поиска равновесия по Нэшу, который учитывает стремление каждого рыночного игрока максимизировать свою прибыль с учетом рыночных условий и поведения конкурентов. Благодаря применению методов теории игр и экономического моделирования настоящее исследование дает представление о конкурентной динамике и стратегических взаимодействиях как между игроками в рамках одного товарного рынка с точки зрения конкуренции, так и между самими рынками с точки зрения формирования взаимосвязанного ценообразования. Результаты имеют прикладное значение для разработки рыночных и инвестиционных стратегий предприятий из реальных секторов экономики, программ модернизации производств и оптимизации программ выделения государственных субсидий.

Ключевые слова

оптимизация; рыночные системы; равновесие по Нэшу; метод нащупывания; моделирование рынков

Поступила: 27.07.2024

Принята: 07.04.2025

Онлайн: 15.07.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Поиск новых подходов к оптимизации рыночных стратегий в условиях нестабильной геополитической ситуации и усиливающихся системных изменений в мире является актуальным вопросом. Одним из способов исследовать эффекты от применения той или иной рыночной стратегии является определение состояния рынка, при котором достигается равновесие по Нэшу. Равновесие по Нэшу представляет собой такое состояние экономической системы, при котором ни один из участников экономического процесса не может увеличить прибыль, изменив свою стратегию в одностороннем порядке.

Рассматривается поиск равновесия по Нэшу в системе из двух рынков сырья и продукции, взаимосвязанных посредством переработки сырья в продукцию с добавленной стоимостью. Исследование равновесия по Нэшу на таких рынках имеет важное практическое применение. Например, понимание состояний равновесия может помочь в оптимизации программ модернизации производства, повышении эффективности рыночной стратегии и обосновании политики государственного регулирования. Это исследование также особенно актуально, учитывая нестабильный характер рынков минерально-сырьевого и топливно-энергетического комплексов, где стратегическое взаимодействие производителей, потребителей и регулирующих органов может значительно влиять на общее состояние рынка. Таким образом, стимулом к этому исследованию послужила необходимость разработки надежных алгоритмов, способных находить равновесие по Нэшу в сложных рыночных системах.



Тема поиска равновесия по Нэшу активно исследуется достаточно давно в различных профессиональных областях. Так, поиск равновесия Нэша на несовершенном рынке важен для работы электросети с дерегулированным рынком [1]. С ростом числа возобновляемых источников энергии становится труднее найти равновесие по Нэшу, которое могло бы решить проблему неопределенности возобновляемых источников энергии [2]. Были предложены различные решения этого вопроса с целью максимизации прибыли игроков в некооперативных играх [3]. В статье [4] исследуется динамическая модель международных транзакций «бизнес – бизнес», в которых продавцы и покупатели ищут равновесное состояние в системе спрос – предложение, причем вероятность совпадения зависит как от индивидуальных, так и от совокупных усилий по поиску, в работе [5] исследуется динамика скоординированной монополии с устоявшимися, нейтральными к риску фирмами, и условия, при которых на рынок могут выйти новые конкуренты, а исследование [6] посвящено разработке игровой модели для поиска решений по ценообразованию в конкурентной цепочке поставок, состоящей из доминирующего производителя, который производит один скоропортящийся продукт, и двух ритейлеров, которые вынуждены действовать в условиях нелинейной функции спроса. В статье [7] предлагается метод поиска равновесного состояния рынка на основе аукциона, который применяет методы теории игр с неполной информацией о некооперативной среде. В работе [8] предлагается совершенная конкурентная модель рынка, где цены определяются условиями порога рентабельности. В статье [9] учитываются факторы оптимальных стратегий торгов на рынках со значительной долей возобновляемых источников энергии. В исследовании [10] представлена иерархическая структура распределенного обучения с подкреплением (HNDRL) для поиска равновесий по Нэшу в стратегиях торгов на несовершенных рынках электроэнергии. Помимо равновесия по Нэшу исследователи иногда рассматривают конкурентное равновесие в контексте оптимизации рынков. Например, в статье [11] исследуются различия между равновесием по Нэшу и конкурентным равновесием в контексте рынков электроэнергии. В некоторых работах предлагаются более сложные модели рыночного равновесия, например, в публикации [12] приводится исследование чистых равновесий Нэша в квантовой игре, которая выходит за рамки классической биматричной игры. А в материале [13] исследуется игровой подход Нэша – Штакельберга для анализа стратегических взаимодействий в устойчивых энергетических системах. В статье [14] рассматриваются аналитические и функциональные проблемы понимания влияния добровольных рынков возобновляемой энергии. Авторы подчеркивают отсутствие строгих эмпирических данных и соответствующих статистических методов для выявления этих воздействий.

В современных исследованиях также часто применяют методы теории игр, использующейся для изучения взаимосвязей стратегического поведения рациональных участников рынка, который обычно анализируется с использованием моделей равновесного программирования. Модели равновесия на рынках могут быть классифицированы как модели Курно (для моделирования количеств) [15], Штакельберга (комбинирующие количества и цены) [16], модели, основанные на агентах [17], и др.

В некоторых статьях также рассматриваются расширенные рыночные системы. Так, в работе [5] проводится исследование динамики координированной монополии с устоявшимися, нейтральными к риску фирмами, а в статье [18] показано, что в дилемме заключенных первый наилучший результат достижим, но не может быть интерпретирован как равновесие Нэша. В игре «подсказки» может быть достижим только второй наилучший результат, но существует равновесие Нэша, которое строго предпочтительнее, чем в дилемме заключенных. В статье [19] с помощью теории игр рассматриваются стратегические последствия быстрого энергетического перехода, а в источнике [20] исследуется применение теории игр для долгосрочного энергетического планирования. В статье [21] рассматривается применение теории игр для моделирования поведения участников фондового рынка. Применение методов теории игр и алгоритмов поиска равновесия по Нэшу изучаются в контексте не только моделирования экономических систем, что наглядно показано в источнике [22]. При этом в экономических моделях часто рассматриваются региональные рынки. В статье [23] представлена обобщенная игровая модель Нэша для описания конкурентных отношений между централизованными и локальными энергетическими рынками, а в работе [24] продемонстрирован сравнительный анализ равновесия по Нэшу и последовательного равновесия в контексте региональных энергетических рынков. При этом в источнике [25] исследуется игра, влияющая на рынок, в которой участвуют инвесторы, не склонные к риску.



В некоторых работах, например в [26], рассматриваются исследования методов теории игр, в которых игроки не имеют полной информации об истинном распределении вероятностей, но им необходимо принять решение до реализации рассматриваемых событий. Другие исследования рассматривают сложные рыночные системы из множества продуктовых цепочек, состоящих из поставщиков сырья, поставщиков услуг, производственных интеграторов и потребителей. Тогда модель равновесия для лиц, принимающих решения на всех уровнях, устанавливается вариационным неравенством, что показано в статье [27]. Также в некоторых работах рассматривается влияние поведения участников рынка на ценообразование [28], изучается сеть цепочек поставок сельскохозяйственной продукции [29], для которой устанавливается обобщенная модель равновесия по Нэшу со стохастическими параметрами среди фирм, производящих свежие продукты. Затем происходит преобразование этой модели в смешанную систему с использованием условий Каруша – Куна – Таккера. Иногда исследователи еще больше усложняют задачу, рассматривая не только равновесие, но и так называемые задачи о сделках по Нэшу. Так, в работе [30] предлагается некооперативная модель торгов, которая расширяет модель Рубинштейна.

Точные и аппроксимационные алгоритмы для разных видов игр предлагались с разных точек зрения. Совсем недавно появился ряд работ, продвигающих эти фундаментальные концепции аппроксимации для поиска равновесия по Нэшу. С другой стороны, эмпирические исследования аппроксимации равновесия по Нэшу довольно редки даже для двух игроков [31]. В литературе также рассматривают непрерывные игры, в которых у каждого игрока есть пространство непрерывного действия. В данном случае концепция решения, называемая локальным равновесием по Нэшу, характеризует стратегию, в котором ни один игрок не может получить больший положительный эффект при отклонении от локальной окрестности своей стратегии. Некоторые авторы рассматривают сложные рыночные системы с олигополистическими механизмами ценообразования в цепочках поставок. Однако существующий механизм последовательного ценообразования не в полной мере учитывает ограничения, такие как объем закупок фирм и информацию об изменении каждого параметра, что приводит к отрыву механизма ценообразования от реального рынка [32]. Однако существует и другая проблема, связанная со сходимостью сложных систем, особенно когда методы теории игр применяют для исследования не только экономики, а, например, для моделирования взаимодействующих биологических и социальных систем. Если система не настроена для достижения равновесия, то ее поведение может быть непредсказуемым [33]. Также иногда исследователи рассматривают равновесие Байеса [34], которое является обобщением равновесия по Нэшу в смешанных стратегиях.

На основании приведенного анализа можно сделать вывод, что в большинстве существующих научных работ, так или иначе затрагивающих тему равновесия по Нэшу на различных рынках, рассматриваются в основном энергетические рынки, в меньшей степени исследуются товарные рынки. При этом вопросы поиска равновесия на взаимосвязанных рынках сырья и продукции встречаются намного реже, что подчеркивает актуальность настоящей работы.

Научная новизна и цель работы заключается в создании алгоритма поиска равновесий по Нэшу на двух взаимосвязанных рынках сырья и продукции (вместе – товары). Данная рыночная система характеризуется следующими особенностями:

- на рынке продукции и рынке сырья участвуют по несколько игроков;
- производители продукции на рынке сырья являются покупателями сырья, а на рынке продукции – продавцами;
- покупатели продукции в явном виде задают функцию спроса на продукцию, которая определяется моделью Курно;
- функция спроса на рынке сырья задается неявно с учетом рыночной конъюнктуры на рынке продукции;
- для каждого рынка рассматривается бескоалиционная игра;
- передача сырья и продукции от продавца к покупателю происходит в рамках единых межрыночных бирж, которые хранят весь объем произведенного товара, т.е. продавцы не могут выбрать, кому из покупателей они продают товар и в каком количестве;
- удельные операционные издержки на единицу товара каждого рыночного игрока постоянны и включают в себя все возможные затраты, которые игроки несут в рамках своей операционной деятельности, в том числе затраты на производство, логистику, налоги и иные издержки.



Методы

Постановка проблемы. Рассматривается бескоалиционная игра, в которой часть игроков участвует на обоих рынках: потребители сырья на одном рынке являются производителями продукции на другом. Как следствие, функция спроса на рынке сырья задается неявно, и стандартные методы поиска равновесия сведением к одному рынку не эффективны в приложении к представленной задаче. Рассмотрим общую математическую постановку задачи для поиска равновесия по Нэшу на каждом рынке. Игроки на каждом рынке стремятся максимизировать свою прибыль:

$$\max_{x_{ij} \in R_+} P_{ij}, \quad (1)$$

где P_{ij} – прибыль каждого игрока, у.е.; $i = 1, 2$ – индексы рынков (1 – рынок продукции, 2 – рынок сырья); $j = 1, 2, 3 \dots$ S_i – индексы игроков на каждом рынке (S_i – общее количество игроков на каждом i -м рынке); x_{ij} – суммарное количество товара, проданного j -м игроком на i -м рынке; R_+ – множество неотрицательных действительных чисел.

Прибыль каждого игрока рассчитывается из разницы между полученной от продажи товара выручкой и понесенными операционными издержками:

$$P_{ij} = R_{ij} - C_{ij}, \quad (2)$$

где R_{ij} – выручка каждого игрока, полученная от продажи товара, у.е.; C_{ij} – итоговые операционные издержки каждого игрока, у.е.

Выручка каждого игрока рассчитывается из произведения суммарного количества проданного товара каждого типа и стоимости этого товара на рынке, которая зависит от функции спроса на соответствующем рынке:

$$R_{ij} = x_{ij} \text{price}_i(Q_i), \quad (3)$$

где $\text{price}_i(Q_i)$ – функция спроса на товар на i -м рынке; Q_i – суммарное количество товара, произведенного на i -м рынке.

Функция спроса на рынке продукции задается в явном виде:

$$\text{price}_1(Q_1) = a/Q_1, \quad (4)$$

где a – коэффициент функции спроса на рынке продукции, у.е.; Q_1 – суммарное количество произведенной игроками продукции, $Q_1 = \sum_{j=1}^{S_1} x_{1j}$, ед.

Функция спроса на рынке сырья $\text{price}_2(Q_2)$ задается в неявном виде.

Итоговые операционные издержки производителей продукции зависят от удельных операционных издержек, а также стоимости сырья на рынке сырья. С учетом того, что количество произведенной продукции пропорционально количеству потребленного сырья для каждого игрока, итоговые операционные издержки производителей продукции определяются по формуле:

$$C_{1j} = (c_{1j} + u \cdot \text{price}_2(Q_2))x_{1j}, \quad (5)$$

где c_{1j} – удельные операционные издержки на производство единицы продукции, у.е./ед.; u – коэффициент преобразования сырья в продукцию, описывающий количество единиц сырья, необходимое для производства одной единицы продукции; $\text{price}_2(Q_2)$ – функция спроса на сырье; Q_2 – суммарное количество сырья, приобретаемого производителями продукции на рынке сырья, ед.; x_{1j} – объем продукции, произведенный каждым игроком на рынке продукции, ед.

Итоговые понесенные издержки производителей сырья определяются по формуле:

$$C_{2j} = c_{2j}x_{2j}, \quad (6)$$

где c_{2j} – удельные операционные издержки на производство единицы сырья, у.е./ед.; x_{2j} – объем сырья, произведенного каждым игроком на рынке сырья, ед.



Предлагаемое решение. Алгоритм поиска равновесного состояния между взаимосвязанными рынками сырья и продукции выглядит следующим образом:

1. В явном виде задать функцию спроса на рынке продукции.
2. Для каждого игрока на всех рынках задать значения удельных издержек на производство единицы товара.
3. Выполнить аппроксимацию функции спроса на рынке сырья:
 - а) осуществить поиск равновесия по Нэшу для рынка продукции при каждом заданном значении стоимости сырья; стоимость сырья задать в определенном диапазоне с N количеством точек;
 - б) на основе полученного множества значений объема спроса на сырье и стоимости сырья выполнить аппроксимацию функции спроса на рынке сырья методом наименьших квадратов.
4. Реализовать поиск равновесия по Нэшу для рынка сырья с учетом полученной функции спроса на рынке сырья. Рассчитать значения параметров рынка сырья (общий объем произведенного сырья и его удельная стоимость), при которых достигается равновесие по Нэшу.
5. Выполнить поиск равновесия по Нэшу на рынке продукции с учетом полученной удельной стоимости сырья. Рассчитать значение объема произведенной продукции.

Равновесное состояние между взаимосвязанными рынками сырья и продукции считается достигнутым, когда полученные в результате выполнения предлагаемого алгоритма объемы производства сырья и продукции сходятся.

Для поиска равновесия по Нэшу для каждого рынка предлагается использовать метод нащупывания, который подразумевает, что каждый игрок в рамках соответствующего рынка и согласно условиям бескоалиционной игры стремится максимизировать свою прибыль с учетом известных исторических данных о рыночных стратегиях конкурентов. Для решения задачи максимизации прибыли каждого игрока применялась библиотека алгоритмов для научных и инженерных расчетов SciPy. В качестве метода оптимизации применялся симплекс-метод Нелдера – Мида. Блок-схема описанного алгоритма отображена на рис.1.

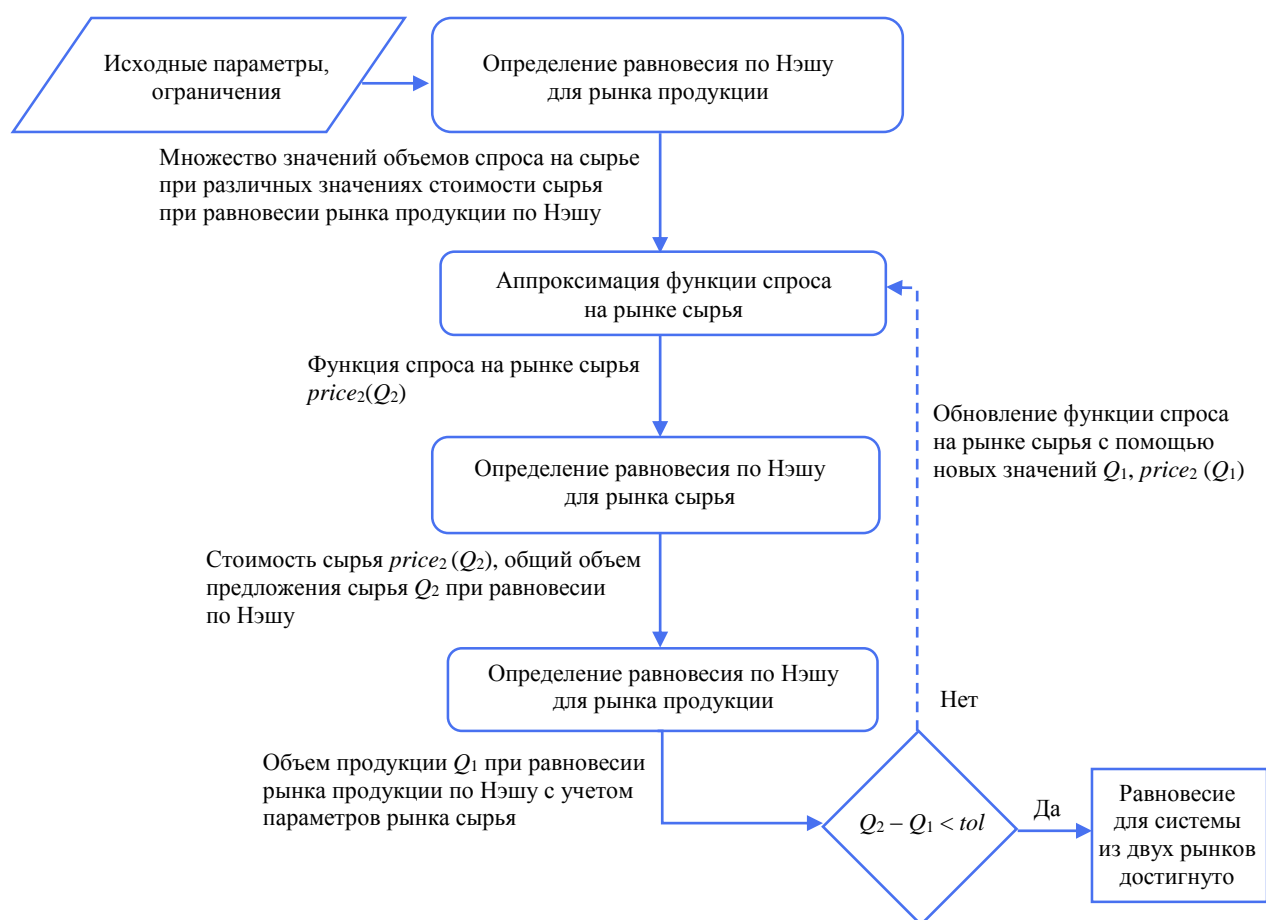


Рис.1. Алгоритм поиска равновесного состояния между взаимосвязанными рынками сырья и продукции



Численный эксперимент. Применим предложенный алгоритм для поиска равновесного состояния между взаимосвязанными рынками сырья и продукции. Для наглядности предположим, что в качестве сырья выступает сырая нефть, а в качестве продукции – нефтепродукты. Таким образом, примем $u = 1$. Зададим исходные значения параметров (табл. 1). Удельные операционные издержки на производство единицы товара для производителей нефти и нефтепродуктов выберем случайно из диапазонов $c_{1j} \in [60, 160]$, $c_{2j} \in [20, 160]$. Обозначим данный набор значений исходных параметров под рыночным сценарием № 1.

Таблица 1

Исходные значения параметров для рыночного сценария № 1

Параметр	Значение
Коэффициент функции спроса на рынке продукции (нефтепродукты) a , у.е.	200 000
Удельные операционные издержки на производство единицы товара, у.е./ед.	
Производитель продукции (нефтепродуктов) 1 c_{11}	25
Производитель продукции (нефтепродуктов) 2 c_{12}	40
Производитель продукции (нефтепродуктов) 3 c_{13}	80
Производитель продукции (нефтепродуктов) 4 c_{14}	120
Производитель продукции (нефтепродуктов) 5 c_{15}	160
Производитель сырья (нефти) 1 c_{21}	110
Производитель сырья (нефти) 2 c_{22}	135
Производитель сырья (нефти) 3 c_{23}	80
Производитель сырья (нефти) 4 c_{24}	105
Производитель сырья (нефти) 5 c_{25}	120

Рассмотрим результаты каждого шага алгоритма:

1. В явном виде зададим функцию спроса на рынке нефтепродуктов в соответствии с формулой (1):

$$price_1(Q_1) = 200000/Q_1.$$

2. Для каждого игрока зададим значения удельных операционных издержек на производство (табл. 1).

3. Выполним аппроксимацию функции спроса на рынке нефти методом наименьших квадратов:

а) зададим диапазон значений стоимости нефти с количеством точек $N = 50$:

$$price_2(Q_1) \in [0, 150].$$

Результаты поиска равновесия по Нэшу на рынке нефтепродуктов методом нащупывания с учетом выбранных точек в заданном диапазоне значений стоимости нефти представлены в табл. 2;

б) выполним аппроксимацию функции спроса на рынке нефти методом наименьших квадратов с учетом значений в табл. 2. Примем, что функция спроса имеет вид полинома четвертой степени, так как полином четвертой степени достигает лучшего значения коэффициента детерминации в рамках данного численного эксперимента ($R^2 = 0,99904$ для полинома четвертой степени; $R^2 = 0,97498$ для полинома третьей степени; $R^2 = 0,85784$ для гиперболы):

$$price_2(Q_2) = AQ_2^4 + BQ_2^3 + CQ_2^2 + DQ_2 + E, \quad (7)$$

где Q_2 – суммарный объем произведенной игроками нефти, ед., $Q_2 = \sum_{j=1}^{S_2} x_{2j}$.

В результате были получены следующие значения коэффициентов функции спроса на рынке нефти для рыночного сценария № 1: $A = 1,72 \cdot 10^{-11}$; $B = -1,50 \cdot 10^{-7}$; $C = 4,95 \cdot 10^{-4}$; $D = -7,55 \cdot 10^{-1}$; $E = 4,79 \cdot 10^2$.



Таблица 2

**Результаты расчета объемов спроса на нефть
при различной удельной стоимости нефти для рыночного сценария № 1**

Параметр	Значения				
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	0,00	3,06	6,12	9,18	12,24
Объем спроса на нефть, ед.	3076,61	2811,84	2589,01	2398,94	2234,90
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	15,31	18,37	21,43	24,49	27,55
Объем спроса на нефть, ед.	2095,14	1998,98	1911,26	1830,92	1757,06
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	30,61	33,67	36,73	39,80	42,86
Объем спроса на нефть, ед.	1688,92	1625,88	1567,37	1512,93	1462,14
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	45,92	48,98	52,04	55,10	58,16
Объем спроса на нефть, ед.	1414,65	1370,15	1328,36	1289,05	1252,00
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	61,22	64,29	67,35	70,41	73,47
Объем спроса на нефть, ед.	1217,01	1183,93	1152,60	1122,89	1094,67
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	76,53	79,59	82,65	85,71	88,78
Объем спроса на нефть, ед.	1067,83	1042,27	1017,92	994,67	972,46
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	91,84	94,90	97,96	101,02	104,08
Объем спроса на нефть, ед.	951,23	930,90	913,47	896,75	880,64
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	107,14	110,20	113,27	116,33	119,39
Объем спроса на нефть, ед.	865,09	850,08	835,58	821,57	808,03
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	122,45	125,51	128,57	131,63	134,69
Объем спроса на нефть, ед.	794,92	782,23	769,94	758,03	746,48
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	137,76	140,82	143,88	146,94	150,00
Объем спроса на нефть, ед.	735,28	724,41	713,85	703,60	693,64

Малые значения коэффициентов A и B полинома четвертой степени объясняются тем, что значения аргумента функции (суммарного объема нефти) достигают нескольких тысяч единиц. Отобразим рассчитанные значения удельной стоимости нефти и соответствующего объема спроса на нефть из табл.2, а также аппроксимированную функцию спроса на нефть (рис.2).

4. В результате расчета равновесия по Нэшу для рынка нефти с учетом аппроксимированной функции спроса получим значение удельной стоимости нефти при равновесии рынка нефти по Нэшу $price_2(Q_2) = 146,39$ у.е./ед.

5. Выполним поиск равновесия по Нэшу для рынка нефтепродуктов с учетом значения удельной стоимости нефти, рассчитанного на шаге 4. На рис.3 представлены графики изменения прибыли

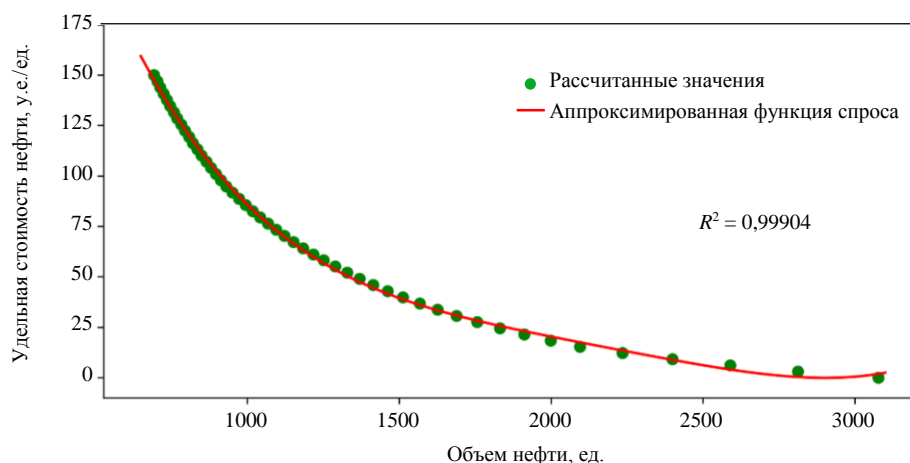


Рис.2. Результат аппроксимации функции спроса на рынке нефти
для рыночного сценария № 1

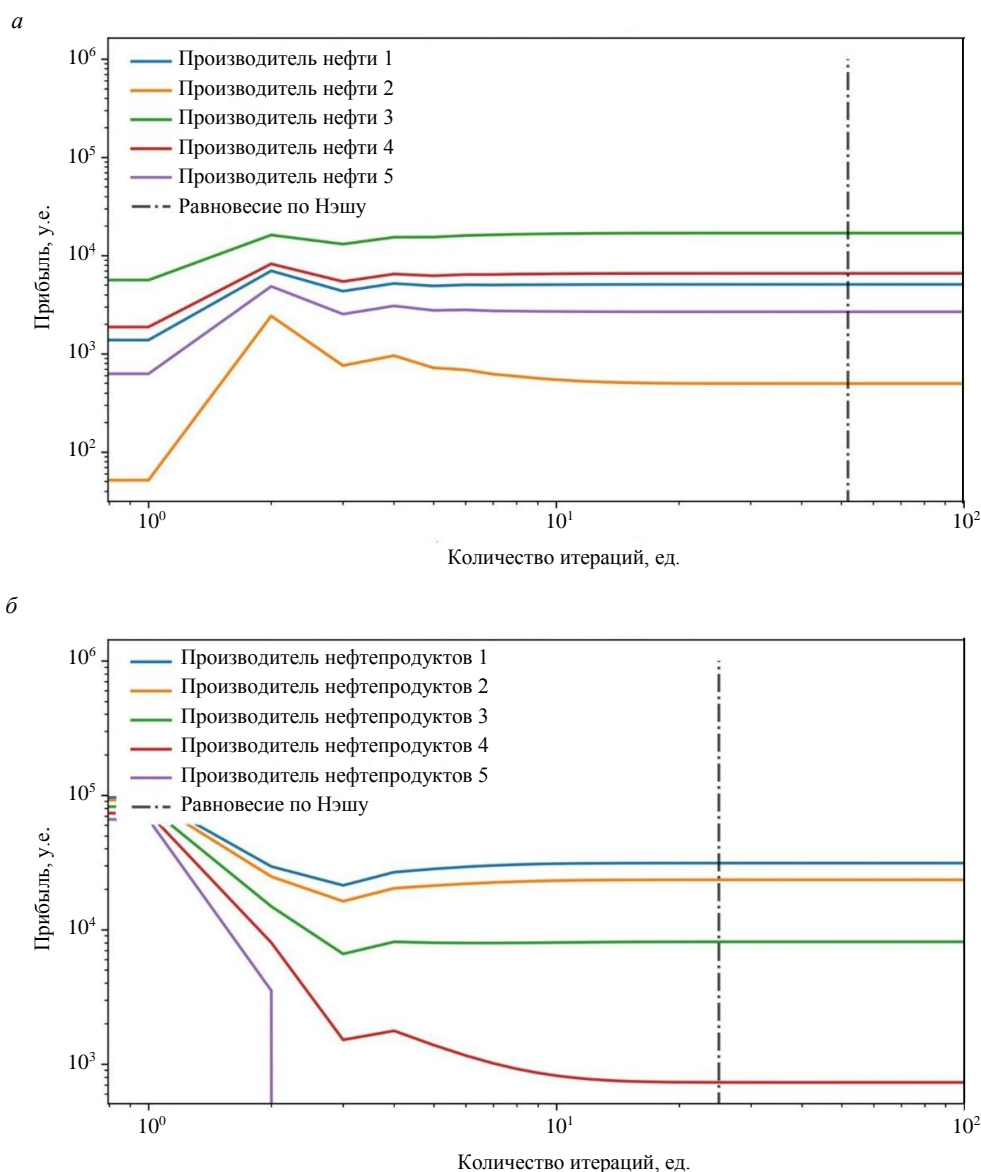


Рис.3. Результаты поиска равновесия по Нэшу для рынка нефти – сырья (а) и рынка нефтепродуктов – продукции (б) для рыночного сценария № 1

каждого производителя нефти и нефтепродуктов при каждом шаге поиска равновесия по Нэшу для соответствующего рынка. Значения рыночных параметров игроков при достижении равновесия по Нэшу на каждом рынке продемонстрированы в табл.3.

Исходя из приведенных результатов (рис.3, табл.3) можно сделать следующие выводы:

- Разница между итоговыми значениями объемов производимой нефти и нефтепродуктов пренебрежительно мала, что позволяет утверждать о достижении равновесного состояния между взаимосвязанными рынками сырья и продукции за одну итерацию алгоритма.

- При данной рыночной конъюнктуре производитель нефтепродуктов 5 оказался неконкурентоспособным по причине повышенных операционных издержек по сравнению с другими производителями, что привело к снижению его объема производства и, соответственно, прибыли до нуля. При этом производитель нефтепродуктов 1, обладающий наиболее эффективным производством с наименьшими операционными издержками, занял лидирующую позицию на рынке как по объемам производства, так и прибыли. Данное наблюдение подтверждает способность алгоритма отражать рыночную динамику, которая соответствует заданной конъюнктуре рынка.

- Метод нащупывания показывает быструю сходимость: равновесие по Нэшу для рынка нефти было достигнуто за 53 итерации, а равновесие по Нэшу для рынка нефтепродуктов – за 26 итераций.



Таблица 3

**Рыночные параметры игроков на рынке нефти и рынке нефтепродуктов
при достижении равновесия по Нэшу для рыночного сценария № 1**

Параметр	Значение				
	Индекс игрока				
	1	2	3	4	5
Рынок сырья					
Прибыль, у.е.	5076,98	497,58	16897,09	6567,85	2670,24
Объем производимой нефти, ед.	139,50	43,67	254,50	158,67	101,17
Объем производимой нефти (всего), ед.	697,52				
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	146,39				
Рынок продукции					
Прибыль, у.е.	31282,49	23472,85	8120,71	730,16	0,00
Объем производимых нефтепродуктов, ед.	278,97	241,65	142,13	42,65	0,00
Объем производимых нефтепродуктов (всего), ед.	705,41				
Удельная стоимость нефтепродуктов, у.е./ед.	283,52				

При аппроксимации функции спроса на сырье гиперболой в результате применения алгоритма объем нефти составил $Q_2 = 640,73$ ед., объем нефтепродуктов $Q_1 = 736,19$ ед., а коэффициент детерминации $R^2 = 0,85784$. Такая разница между итоговыми значениями объемов не позволяет говорить о достижении равновесного состояния между взаимосвязанными рынками сырья и продукции. Точность аппроксимации функции спроса на сырье непосредственно влияет на поиск конечного состояния равновесия рыночной системы.

Для демонстрации практической значимости предложенного подхода рассмотрим ситуацию, когда производитель нефтепродуктов (продукции) 5 выполнил оптимизацию своего производства, что привело к снижению его удельных операционных издержек на 20 %: $c_{15} = 128$ у.е./ед. Обозначим данный набор значений исходных параметров рыночным сценарием № 2.

Для рыночного сценария № 2 выполним все шаги алгоритма поиска равновесного состояния между двумя взаимосвязанными рынками нефти и нефтепродуктов. Результаты расчета объемов спроса на нефть при различной удельной стоимости нефти представлены в табл.4. На рис.4 укажем результат аппроксимации функции спроса на рынке нефти. Значения коэффициентов функции спроса на рынке нефти для рыночного сценария № 2: $A = 1,83 \cdot 10^{-11}$; $B = -1,59 \cdot 10^{-7}$; $C = 5,18 \cdot 10^{-4}$; $D = -7,82 \cdot 10^{-1}$; $E = 4,91 \cdot 10^2$. Результаты поиска равновесия по Нэшу на рынках нефти и нефтепродуктов показаны на рис.5, итоговые рыночные параметры игроков на рынке нефти и нефтепродуктов при достижении равновесия по Нэшу продемонстрированы в табл.5.

Таблица 4

**Результаты расчета объемов спроса на нефть
при различной удельной стоимости нефти для рыночного сценария № 2**

Параметр	Значения				
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	0,00	3,06	6,12	9,18	12,24
Объем спроса на нефть, ед.	3076,65	2811,83	2589,01	2398,89	2234,88
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	15,31	18,37	21,43	24,49	27,55
Объем спроса на нефть, ед.	2095,15	1998,98	1911,26	1830,92	1757,06
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	30,61	33,67	36,73	39,80	42,86
Объем спроса на нефть, ед.	1688,93	1625,88	1567,37	1512,93	1462,14
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	45,92	48,98	52,04	55,10	58,16
Объем спроса на нефть, ед.	1414,65	1370,15	1328,36	1289,05	1252,00
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	61,22	64,29	67,35	70,41	73,47
Объем спроса на нефть, ед.	1217,01	1183,93	1152,60	1122,89	1094,66



Окончание табл.4

Параметр	Значения				
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	76,53	79,59	82,65	85,71	88,78
Объем спроса на нефть, ед.	1067,83	1042,28	1017,92	994,67	972,46
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	91,84	94,90	97,96	101,02	104,08
Объем спроса на нефть, ед.	951,23	930,90	913,47	896,75	880,63
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	107,14	110,20	113,27	116,33	119,39
Объем спроса на нефть, ед.	865,09	850,08	835,58	821,57	808,13
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	122,45	125,51	128,57	131,63	134,69
Объем спроса на нефть, ед.	795,83	783,89	772,31	761,06	750,14
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	137,76	140,82	143,88	146,94	150,00
Объем спроса на нефть, ед.	739,52	729,21	719,17	709,41	699,91

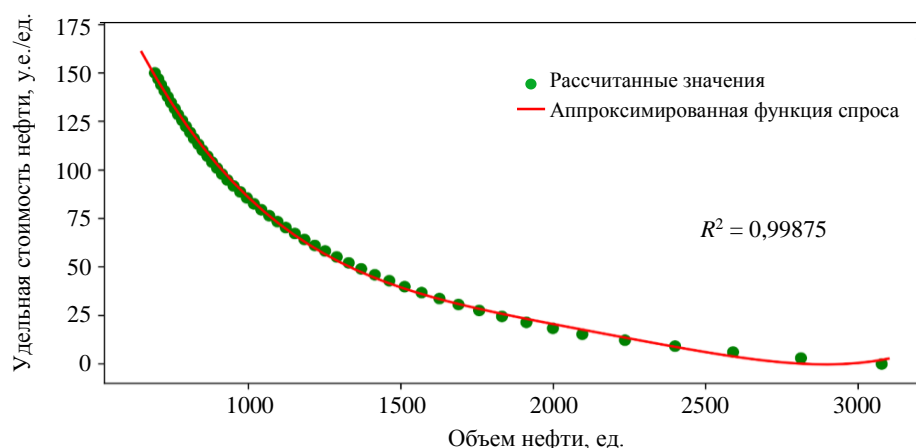


Рис.4. Результат аппроксимации функции спроса на рынке нефти для рыночного сценария № 2

Исходя из приведенных результатов (рис.5, табл.5), можно сделать следующие выводы:

- Разница между итоговыми значениями объемов производимой нефти и нефтепродуктов пренебрежительно мала, что позволяет утверждать о достижении равновесного состояния между взаимосвязанными рынками сырья и продукции за одну итерацию алгоритма.
- Снижение удельных операционных издержек производителя нефтепродуктов 5 привело к повышению его конкурентоспособности, что позволило ему восстановить экономически целесообразное производство, занять долю на рынке и возобновить получение экономической прибыли. Данный результат еще раз демонстрирует способность алгоритма отражать рыночную динамику при заданной рыночной структуре и особенностях каждого из игроков.
- Метод нащупывания показывает быструю сходимость: равновесие по Нэшу для рынка нефти было достигнуто за 79 итераций, а равновесие по Нэшу для рынка нефтепродуктов – за 52 итерации.

Дополнительно рассмотрим ситуацию, когда на рынках представлено неравное количество производителей сырья и продукции: три производителя нефтепродуктов и семь производителей нефти (сценарий № 3). Выполним все шаги алгоритма поиска равновесного состояния между двумя взаимосвязанными рынками нефти и нефтепродуктов. В качестве исходных значений для рыночного сценария примем значения табл.1. При этом на рынках будут присутствовать производители нефтепродуктов под индексами $j = 1, 2, 3$ (см. табл.1), а к производителям нефти с индексами $j = 1, 2, 3, 4, 5$ присоединятся новые производители нефти $j = 6, 7$ и удельными операционными издержками $c_{26} = 90$ у.е./ед., $c_{27} = 75$ у.е./ед. соответственно.

В результате применения алгоритма объем производимой нефти составил $Q_2 = 792,18$ ед., а объем производимых нефтепродуктов – $Q_1 = 787,47$ ед. Разница между итоговыми значениями объемов производимой нефти и нефтепродуктов пренебрежительно мала, что позволяет говорить о достижении равновесного состояния между взаимосвязанными рынками сырья и продукции за одну итерацию алгоритма, а также демонстрирует возможность его применения для рыночных систем с неравным количеством игроков на рынках сырья и продукции.

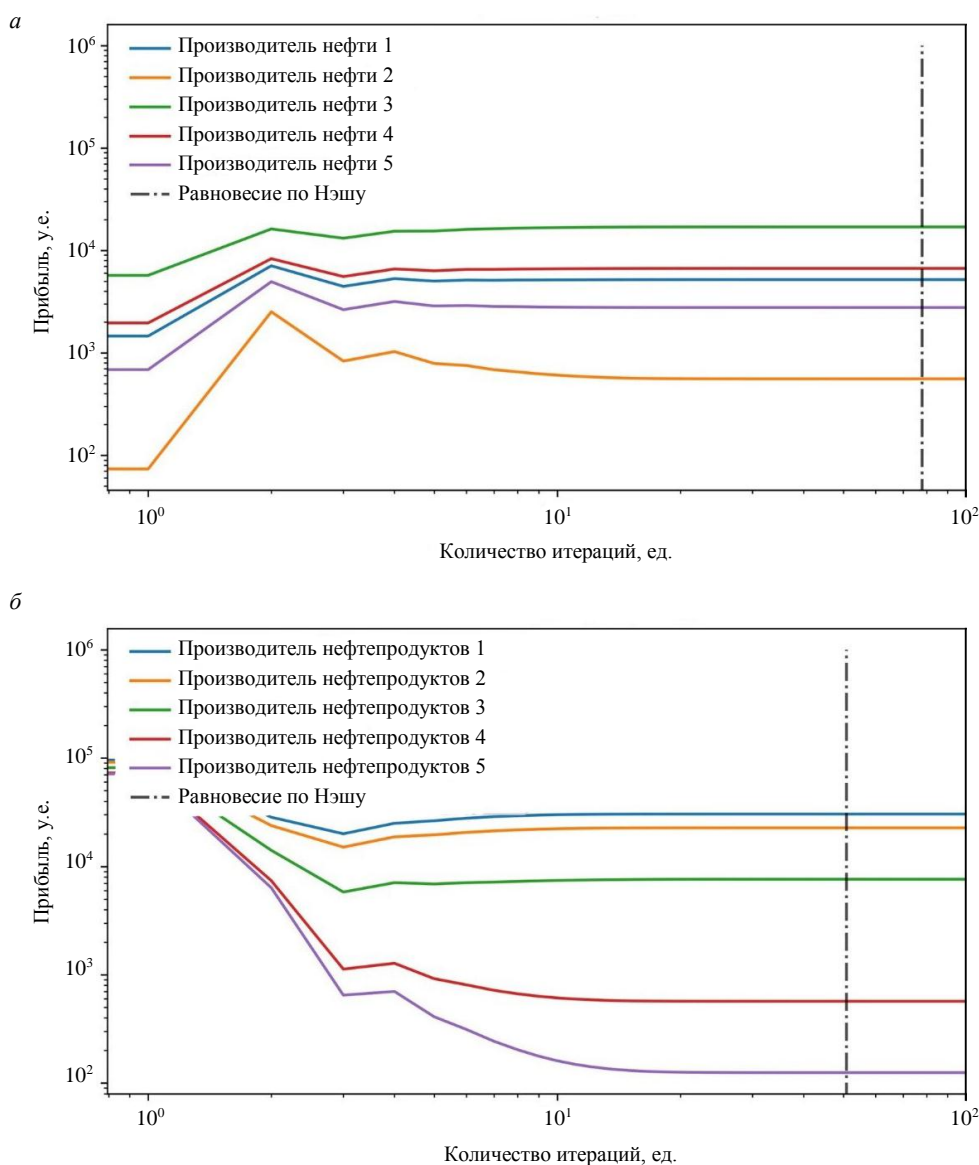


Рис.5. Результаты поиска равновесия по Нэшу для рынка нефти – сырья (а) и рынка нефтепродуктов – продукции (б) для рыночного сценария № 2

Таблица 5

Рыночные параметры игроков на рынке нефти и рынке нефтепродуктов при достижении равновесия по Нэшу для рыночного сценария № 2

Наименование параметра	Значение				
	Индекс игрока				
	1	2	3	4	5
Рынок сырья					
Прибыль, у.е.	5194,07	557,69	16956,02	6684,83	2776,04
Объем производимой нефти, ед.	139,68	45,77	252,38	158,47	102,12
Объем производимой нефти (всего), ед.	698,42				
Удельная стоимость нефти, у.е./ед.	147,18				
Рынок продукции					
Прибыль, у.е.	30406,85	22682,49	7608,08	568,42	124,66
Объем производимых нефтепродуктов, ед.	276,31	238,65	138,21	37,78	17,69
Объем производимых нефтепродуктов (всего), ед.	708,64				
Удельная стоимость нефтепродуктов, у.е./ед.	282,23				



Результаты

Несмотря на неявный вид функции спроса на рынке сырья, а также комплексность рыночной системы, которая заключается в участии производителей продукции сразу на обоих рынках, предложенный алгоритм, включающий в себя применение метода нащупывания для поиска равновесия по Нэшу для каждого рынка и подхода к аппроксимации функции спроса, успешно продемонстрировал свою способность выполнять поиск равновесного состояния в системе из двух взаимосвязанных рынков сырья и продукции. При этом численные эксперименты, представленные в работе, продемонстрировали следующее:

- Рыночная динамика и итоговое положение игроков на рынках соответствует заданной рыночной конъюнктуре.
- Предложенный алгоритм не приводит к неустойчивости системы, несмотря на комплексное взаимодействие рынков и игроков.
- Численные эксперименты демонстрируют быструю сходимость предложенного алгоритма.
- Подход к аппроксимации функции спроса на рынке сырья является достаточно точным для решения поставленной задачи.

Заключение

Поиск равновесного состояния между взаимосвязанными рынками сырья и продукции является важной прикладной задачей, особенно в случаях, когда рассматриваются рынки стратегических товаров, относящихся к минерально-сырьевому и топливно-энергетическому комплексам, которые кроме прочего могут зависеть не только от комплексной рыночной конъюнктуры, но и испытывать влияние со стороны внешних регуляторных органов, геополитических изменений.

Результаты численных экспериментов при различных рыночных сценариях продемонстрировали практическую значимость применения алгоритма для оптимизации рыночных стратегий игроков, планирования различных мероприятий по повышению рыночной конкурентоспособности и эффективности производства, а также снижения операционных издержек. Предложенный алгоритм также позволяет анализировать изменения в системе из двух взаимосвязанных рынков в целом – оценивать влияние рынков друг на друга при изменениях в конъюнктуре на одном и них.

В качестве дальнейшего шага предполагается внедрение в алгоритм возможности учета дополнительных факторов, которые могут влиять на итоговое равновесное состояние рыночной системы, таких как углеродное регулирование, логистика, различные инфраструктурные риски. Данное улучшение позволит точнее учитывать особенности комплексной рыночной конъюнктуры стратегических товаров, которые относятся к минерально-сырьевому и топливно-энергетическому комплексам. Таким образом управленческие решения, определяющие рыночные стратегии игроков, будут более эффективны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nan Shang, Yi Ding, Wenqi Cui. Review of Market Power Assessment and Mitigation in Reshaping of Power Systems // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2022. Vol. 10. P. 1067-1084.
2. Jian-jian Shen, Chun-tian Cheng, Ze-bin Jia et al. Impacts, challenges and suggestions of the electricity market for hydro-dominated power systems in China // Renewable Energy. 2022. Vol. 187. P. 743-759. DOI: [10.1016/j.renene.2022.01.089](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.089)
3. Sharifi R., Anvari-Moghaddam A., Fathi S.H., Vahidinasab V. A bi-level model for strategic bidding of a price-maker retailer with flexible demands in day-ahead electricity market // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 121. № 106065. DOI: [10.1016/j.ijepes.2020.106065](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106065)
4. Eaton J., Jenkins D., Tybout J.R., Daniel Xu. Two-Sided Search in International Markets. National Bureau of Economic Research Working Paper Series, 2022. № 29684.
5. Forrest J.Y.-L., Buttermore J., Wajda T.A. At Nash equilibrium when new market competitions appear? // Kybernetes. 2017. Vol. 46. Iss. 2. P. 256-271. DOI: [10.1108/K-11-2016-0311](https://doi.org/10.1108/K-11-2016-0311)
6. Rajabi N., Mozafari M., Naimi-Sadigh A. Bi-level pricing and inventory strategies for perishable products in a competitive supply chain // RAIRO – Operations Research. 2021. Vol. 55. № 4. P. 2395-2412. DOI: [10.1051/ro/2021106](https://doi.org/10.1051/ro/2021106)
7. Nezarat A., Dastghaibifard G.H. Efficient Nash Equilibrium Resource Allocation Based on Game Theory Mechanism in Cloud Computing by Using Auction // PLOS ONE. 2015. Vol. 10 (10). № e0138424. DOI: [10.1371/journal.pone.0138424](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138424)
8. Azevedo E.M., Gottlieb D. Perfect Competition in Markets with Adverse Selection // Econometrica. 2017. Vol. 85. Iss. 1. P. 67-105. DOI: [10.3982/ECTA13434](https://doi.org/10.3982/ECTA13434)
9. Xiu Ji, Cong Li, Dexin Li, Chenglong Qi. Bidding Strategy of Two-Layer Optimization Model for Electricity Market Considering Renewable Energy Based on Deep Reinforcement Learning // Electronics. 2022. Vol. 11. Iss. 19. № 3107. DOI: [10.3390/electronics11193107](https://doi.org/10.3390/electronics11193107)



10. Liying Yu, Peng Wang, Zhe Chen et al. Finding Nash equilibrium based on reinforcement learning for bidding strategy and distributed algorithm for ISO in imperfect electricity market // *Applied Energy*. 2023. Vol. 350. № 121704. DOI: [10.1016/j.apenergy.2023.121704](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121704)
11. Haibing Wang, Jian Deng, Chengmin Wang et al. Comparing Competition Equilibrium with Nash Equilibrium in Electric Power Market // *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2018. Vol. 4. № 3. P. 299-304. DOI: [10.17775/CSEEJPES.2015.01140](https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2015.01140)
12. Frąckiewicz P., Szopa M., Makowski M., Piotrowski E. Nash Equilibria of Quantum Games in the Special Two-Parameter Strategy Space // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 22. № 11530. DOI: [10.3390/app122211530](https://doi.org/10.3390/app122211530)
13. Zhenxing Lei, Mingbo Liu, Zhijun Shen et al. A Nash-Stackelberg game approach to analyze strategic bidding for multiple DER aggregators in electricity markets // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2023. Vol. 35. № 101111. DOI: [10.1016/j.segan.2023.101111](https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101111)
14. O'Shaughnessy E., Sumner J. The need for better insights into voluntary renewable energy markets // *Frontiers in Sustainable Energy Policy*. 2023. Vol. 2. № 1174427. DOI: [10.3389/fsuep.2023.1174427](https://doi.org/10.3389/fsuep.2023.1174427)
15. Acemoglu D., Kakhbod A., Ozdaglar A. Competition in Electricity Markets with Renewable Energy Sources // *The Energy Journal*. 2017. Vol. 38. Suppl. 1. P. 137-155. DOI: [10.5547/01956574.38.SI1.dace](https://doi.org/10.5547/01956574.38.SI1.dace)
16. Yujing Huang, Yudong Wang, Nian Liu. A two-stage energy management for heat-electricity integrated energy system considering dynamic pricing of Stackelberg game and operation strategy optimization // *Energy*. 2022. Vol. 244. Part A. № 122576. DOI: [10.1016/j.energy.2021.122576](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122576)
17. Yanchang Liang, Chunlin Guo, Zhaohao Ding, Huichun Hua. Agent-Based Modeling in Electricity Market Using Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. Vol. 35. Iss. 6. P. 4180-4192. DOI: [10.1109/TPWRS.2020.2999536](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2999536)
18. Barrett S., Dannenberg A. Tipping Versus Cooperating to Supply a Public Good // *Journal of the European Economic Association*. 2017. Vol. 15. Iss. 4. P. 910-941. DOI: [10.1093/jeea/jvw022](https://doi.org/10.1093/jeea/jvw022)
19. Yujiao Liu, Yan Li, Yiping Rong et al. Benefit allocation of electricity-gas-heat-hydrogen integrated energy system based on Shapley value // *Clean Energy*. 2023. Vol. 7. Iss. 6. P. 1381-1390. DOI: [10.1093/ce/zkad062](https://doi.org/10.1093/ce/zkad062)
20. Pfeifer A., Feijoo F., Duić N. Fast energy transition as a best strategy for all? The nash equilibrium of long-term energy planning strategies in coupled power markets // *Energy*. 2023. Vol. 284. № 129109. DOI: [10.1016/j.energy.2023.129109](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129109)
21. Hannafey K. Modeling the Stock Market Through Game Theory: Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for Honors in Mathematical Science. Georgia Southern University, 2021. № 590. 35 p.
22. Samuelson L. Game Theory in Economics and Beyond // *Journal of Economic Perspectives*. 2016. Vol. 30. № 4. P. 107-130.
23. Dong Xie, Mingbo Liu, Lixin Xu, Wentian Lu. Generalized Nash equilibrium analysis of transmission and distribution coordination in coexistence of centralized and local markets // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 137. № 107762. DOI: [10.1016/j.ijepes.2021.107762](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107762)
24. Michelacakis N.J. Nash versus consistent equilibrium: A comparative perspective on a mixed duopoly location model of spatial price discrimination with delegation // *Regional Science and Urban Economics*. 2023. Vol. 99. № 103860. DOI: [10.1016/j.regsciurbeco.2022.103860](https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2022.103860)
25. Xiangge Luo, Schied A. Nash Equilibrium for Risk-Averse Investors in a Market Impact Game with Transient Price Impact // *Market Microstructure and Liquidity*. 2019. Vol. 5. № 01n04. № 2050001. DOI: [10.1142/S238262662050001X](https://doi.org/10.1142/S238262662050001X)
26. Yongchao Liu, Huifu Xu, Shu-Jung Sunny Yang, Jin Zhang. Distributionally robust equilibrium for continuous games: Nash and Stackelberg models // *European Journal of Operational Research*. 2018. Vol. 265. Iss. 2. P. 631-643. DOI: [10.1016/j.ejor.2017.07.050](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.050)
27. Yongtao Peng, Dan Xu, Yaya Li, Kun Wang. A Product Service Supply Chain Network Equilibrium Model considering Capacity Constraints // *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. Iss. 1. № 295072. DOI: [10.1155/2020/1295072](https://doi.org/10.1155/2020/1295072)
28. Xiao Chen, Choi J.H., Larsen K., Seppi D.J. Price impact in Nash equilibria // *Finance and Stochastics*. 2023. Vol. 27. Iss. 2. P. 305-340. DOI: [10.1007/s00780-023-00499-w](https://doi.org/10.1007/s00780-023-00499-w)
29. Pin-bo Chen, Gui-hua Lin, Weina Xu, Xide Zhu. Supply chain network equilibrium with outsourcing for fresh agricultural products under stochastic demands // *IMA Journal of Management Mathematics*. 2024. № dpae024. DOI: [10.1093/imaman/dpae024](https://doi.org/10.1093/imaman/dpae024)
30. Collard-Wexler A., Gowrisankaran G., Lee R.S. «Nash-in-Nash» Bargaining: A Microfoundation for Applied Work // *Journal of Political Economy*. 2019. Vol. 127. № 1. P. 163-195. DOI: [10.1086/700729](https://doi.org/10.1086/700729)
31. Zhaohua Chen, Xiaotie Deng, Wenhan Huang et al. On tightness of Tsaknakis-Spirakis descent methods for approximate Nash equilibria // *Information and Computation*. 2023. Vol. 293. № 105046. DOI: [10.1016/j.ic.2023.105046](https://doi.org/10.1016/j.ic.2023.105046)
32. Huilin Yao, Rizhao Gong, Zhihui Yuan. Multi-Oligopoly Sequential Pricing Mechanisms and Their Game Analysis in Raw Material Supply Chains // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 23. № 16231. DOI: [10.3390/su142316231](https://doi.org/10.3390/su142316231)
33. Pangallo M., Heinrich T., Farmer J.D. Best reply structure and equilibrium convergence in generic games // *Science Advances*. 2019. Vol. 5. Iss. 2. № eaat1328. DOI: [10.1126/sciadv.aat1328](https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1328)
34. Bosshard V., Bünz B., Lubin B., Seuken S. Computing Bayes-Nash Equilibria in Combinatorial Auctions with Verification // *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2020. Vol. 69. P. 531-570. DOI: [10.1613/jair.1.11525](https://doi.org/10.1613/jair.1.11525)

Авторы: Антон Александрович Мещеряков, аспирант (Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия), anton.meshcheryakov@skoltech.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7614-0621>, Олег Олегович Хамисов, канд. техн. наук, старший преподаватель (Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-9015-9442>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Разработка комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных

В.В.Казанцева^{1,2}, Д.С.Ожигин¹, Н.С.Косарев^{2,3}, А.К.Сатбергенова¹, С.Б.Ожигина¹¹ НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, Республика Казахстан² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия³ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия

Как цитировать эту статью: Казанцева В.В., Ожигин Д.С., Косарев Н.С., Сатбергенова А.К., Ожигина С.Б. Разработка комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 142-156. [EDN OKPFFR](#)

Аннотация

Мониторинг состояния устойчивости техногенных объектов представляет собой критически важный аспект обеспечения безопасности и предупреждения чрезвычайных ситуаций, вызванных горными и геологическими процессами. Комплексное использование различных методов мониторинга позволяет получить всестороннюю информацию о динамике деформационных процессов. Разработана комплексная система геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных, которая была апробирована в условиях угольного разреза «Эдельвейс +» (Республика Казахстан). В основу системы легла поэтапная интеграция методов дистанционного зондирования Земли, спутниковой радарной интерферометрии, аэрофотосъемки с использованием беспилотных воздушных судов (БВС), а также современных инструментальных методов – электронной тахеометрии и ГНСС-измерений. Первый этап – анализ архивных спутниковых снимков для выявления зон значительных смещений поверхности. Второй этап – аэрофотосъемка с применением БВС для создания детализированных 3D-моделей участков поверхности с деформациями. Третий этап включает создание системы геомеханического мониторинга на основе инструментальных методов наблюдений на участках с критическими изменениями. Заключительный этап – создание и обновление базы геопространственных данных, обеспечивающей непрерывный мониторинг состояния объекта. В результате апробации системы геотехнического мониторинга по снимкам со спутников Sentinel-1 и TerraSAR-X/TanDEM-X на северном борту разреза «Эдельвейс +» выявлено оседание поверхности до 25 мм. Аэрофотосъемка разреза позволила построить цифровые 3D-модели местности, сравнение которых подтвердило деформационные процессы на горизонте +556 м. Инструментальные наблюдения с применением современных геодезических методов уточнили вид и динамику деформаций горного массива. Интеграция геопространственных данных в системе геотехнического мониторинга обеспечивает оперативное выявление деформаций, их анализ и прогноз, что позволяет минимизировать риски разрушения и повысить безопасность эксплуатации техногенных объектов.

Ключевые слова

повышение безопасности; критически важные объекты инфраструктуры; высокоточные геопространственные данные; цифровые модели; беспилотное воздушное судно; дистанционное зондирование Земли; деформационные процессы

Финансирование

Исследование выполнено в рамках договора грантового финансирования молодых ученых по научным и научно-техническим проектам Республики Казахстан № 113/КМУ-5-24-26 от 20.06.2024 г. по проекту № AP22788508.

Поступила: 07.10.2024**Принята: 10.04.2025****Онлайн: 05.09.2025****Опубликована: 29.12.2025**

Введение

Современное состояние техногенных объектов на территории Республики Казахстан требует проведения постоянного мониторинга с целью предотвращения возможных аварий и их негативных последствий. Для предотвращения и недопущения аварий существует ряд механизмов – создание нормативно-правовой базы, разработка инструментов анализа, эффективного выявления и контроля рисков [1-3]. В Европейском союзе (ЕС) риски крупных химических аварий регулируются Директивой Севезо¹. Директива требует принятия строгих мер безопасности для предотвращения крупных аварий и, в случае невозможности предотвращения, смягчения последствий для здоровья

¹ Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC // Official Journal of the European Union. 2012. Vol. 55. L 197. P. 1-37. [DOI: 10.3000/19770677.L_2012.197.eng](https://doi.org/10.3000/19770677.L_2012.197.eng)



человека и окружающей среды. В ЕС существуют и другие правовые документы, такие как Европейская директива по критически важной инфраструктуре², Директива по безопасности добычи нефти и газа на шельфе³, Рамочная директива по водным ресурсам, или Директива по наводнениям⁴. Механизм гражданской защиты ЕС включает требование к государствам-членам подготовить национальную оценку основных рисков, включая природные и техногенные [4, 5].

Во Франции и Германии работают программы по предотвращению химических аварий. В некоторых штатах США принято специальное законодательство, в котором проработаны возможные риски, возникающие вследствие стихийных бедствий на опасных производствах, например Калифорнийская программа предотвращения случайных выбросов (CalARP).

В ЕС Объединенный исследовательский центр (JRC) разработал систему RAPID-N быстрого анализа рисков техногенного характера, которая представляет собой веб-систему анализа и поддержки принятия решений для оценки и визуализации с минимальными данными. RAPID-N помогает промышленности и властям выявлять и снижать возможные риски, осуществлять быструю оценку ущерба и последствий этих рисков для обоснования решений по реагированию на чрезвычайные ситуации перед отправкой аварийно-спасательных служб или для оповещения населения, планировать землепользование [6].

На территории Российской Федерации обеспечение безопасности критически важных объектов инфраструктуры, в частности техногенных, осуществляется в рамках Федерального закона от 26.07.2017 г. № 187-ФЗ⁵.

Одним из ключевых элементов системы управления техногенными рисками является геодезический мониторинг, позволяющий эффективно отслеживать динамику деформаций исследуемых объектов, оперативно выявлять потенциальные угрозы и получать прогнозные модели развития выявленных деформаций. При этом традиционные методы геодезического мониторинга (натурное визуальное обследование, высокоточный геодезический инструментальный контроль) зачастую не обеспечивают достаточную оперативность и детализацию объектов изучения [7, 8], что делает необходимым внедрение современных технологий – аэрофотосъемки с использованием беспилотных воздушных судов (БВС), дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для получения всесторонней информации о динамике деформационных процессов.

В 2023 г. ученые из Алжира провели исследование [9], направленное на выявление участков просадки и подъема плотины. В статье описано применение алгоритма P-SBAS (Persistent Scatterer Small Baseline Subset) с использованием данных спутника Sentinel-1 для точного мониторинга деформации грунта на плотине Крамис в Алжире. Исследование выявило зону оседания на левом берегу плотины и скорость подъема в верхней части дамбы, что позволило получить ценную информацию о деформациях плотины.

Спутниковый мониторинг на основе технологии InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) активно применялся на карьерах для обеспечения надежных и безопасных условий ведения горных работ. Этот метод измерения позволяет выявить даже незначительную деформацию земной поверхности, что важно для предотвращения аварий и разрушений. Применение InSAR в Казахстане [10, 11], Узбекистане [12-14] и Германии [15] продемонстрировало его эффективность в мониторинге деформаций и управлении рисками в горнодобывающей отрасли.

Другим методом ДЗЗ, который активно используется для решения мониторинговых задач, является съемка с БВС [16-18]. В настоящее время БВС позволяют получать изображения сложных и труднодоступных областей, которые невозможно наблюдать с земли [19]. Применение БВС на горнодобывающих предприятиях [20-22] незаменимо в труднодоступных районах, где нахождение человека опасно для жизни. В исследованиях [23, 24] БВС демонстрируют высокую эффективность

² Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection // Official Journal of the European Union. 2008. Vol. 51. L 345. P. 75-82.

³ Directive 2013/30/EU of the European Parliament and of the Council of 12 June 2013 on safety of offshore oil and gas operations and amending Directive 2004/35/EC // Official Journal of the European Union. 2013. Vol. 56. L 178. P. 66-106. DOI: [10.3000/19770677.L.2013.178.eng](https://doi.org/10.3000/19770677.L.2013.178.eng)

⁴ Decision No 1313/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 17 December 2013 on a Union Civil Protection Mechanism // Official Journal of the European Union. 2013. Vol. 56. L 347. P. 924-947. DOI: [10.3000/19770677.L.2013.347.eng](https://doi.org/10.3000/19770677.L.2013.347.eng)

⁵ Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 № 187-ФЗ.



для задач пространственного мониторинга, интеграции данных и автоматизации процессов в различных отраслях, включая урбанистику и горнодобывающую промышленность. В работе [25] использование БВС направлено на интеграцию с геомониторинговыми системами для оценки рисков и управления оползнями с акцентом на факторы внедрения технологий, а в работе [26] исследуются возможности высокоточного геодезического мониторинга, что делает методику доступной и практичной для широкого применения. Исследования подчеркивают гибкость и экономическую эффективность использования БВС. В работах [27, 28] показано применение БВС для анализа рельефа карьеров, создание геоморфологических карт и цифровых моделей рельефа, а также изучение антропогенных и природных процессов. Результаты производства аэрофотосъемки (АФС) демонстрируют потенциал применения БВС [29, 30] для детального сбора данных и мониторинга рельефа карьеров [31-33].

Выполненный анализ научно-технических материалов позволяет говорить о том, что в настоящий момент отсутствуют консолидированные подходы к проведению комплексного анализа состояния устойчивости техногенных объектов, инструментов, позволяющих интегрировать традиционные и современные методы геодезического мониторинга в единую систему.

Разработана комплексная система геотехнического мониторинга, в которой поэтапно реализована интеграция методов дистанционного зондирования Земли, спутниковой радарной интерферометрии, аэрофотосъемки с использованием БВС, а также современных инструментальных методов, таких как электронная тахеометрия и ГНСС-измерения. Отличительной особенностью системы является ее гибкость, в зависимости от цели мониторинга может быть использован как один элемент системы, так и все элементы, благодаря чему возникает возможность принятия управленческих решений на каждом этапе ее реализации.

Предлагаемая система геотехнического мониторинга на основе геопространственных данных является уникальной цифровой бесшовной технологией, отвечающей современным тенденциям в области цифровых технологий Республики Казахстан, приведенным в программе «Цифровой Казахстан»⁶, которая позволяет отслеживать динамику деформаций исследуемых объектов, оперативно выявлять потенциальные угрозы и получать прогнозные модели развития выявленных деформаций.

Методы

На рис.1 представлена структурная схема комплексной системы геотехнического мониторинга состояния объектов, демонстрирующая процесс интеграции различных геопространственных данных, полученных как классическими, так и дистанционными методами. Преимуществом предложенной системы является возможность принятия управленческих решений на каждом этапе ее реализации.

На первом этапе геотехнического мониторинга осуществляется сбор и анализ архивных спутниковых данных – снимков Sentinel-1 и TerraSAR-X/TanDEM-X. Эти данные позволяют определить зоны нарушенной территории. Однако несмотря на высокую точность (5-10 мм) определения смещений по высоте, снимки обладают разрешающей способностью 10 м/пиксель, что ограничивает точное выявление участка, подверженного изменениям. Для корректного мониторинга смещений со скоростью до 300 мм/год [34, 35] требуется интервал между снимками не более двух месяцев.

Второй этап включает производство серий аэрофотосъемки с применением БВС для получения более детализированных данных о смещениях (точность 2-5 см) в границах исследуемой зоны, выявленной на первом этапе системы мониторинга по данным спутниковых снимков. Применение БВС является более гибким по временному интервалу и позволяет получать информацию об объекте в кратчайшие сроки на момент съемки.

Данные АФС обрабатываются с использованием специализированного программного обеспечения, что позволяет построить сетки в местах деформаций и создать точную 3D-модель исследуемого участка объекта для анализа геометрии деформаций и дальнейшего мониторинга.

Далее определяются участки объекта с высокой вероятностью обрушения. Если скорость смещения поверхности участка объекта составляет 40-100 мм/мес. [36], то создается система

⁶ Цифровой Казахстан. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/mdai/activities/14764> (дата обращения 07.10.2024).

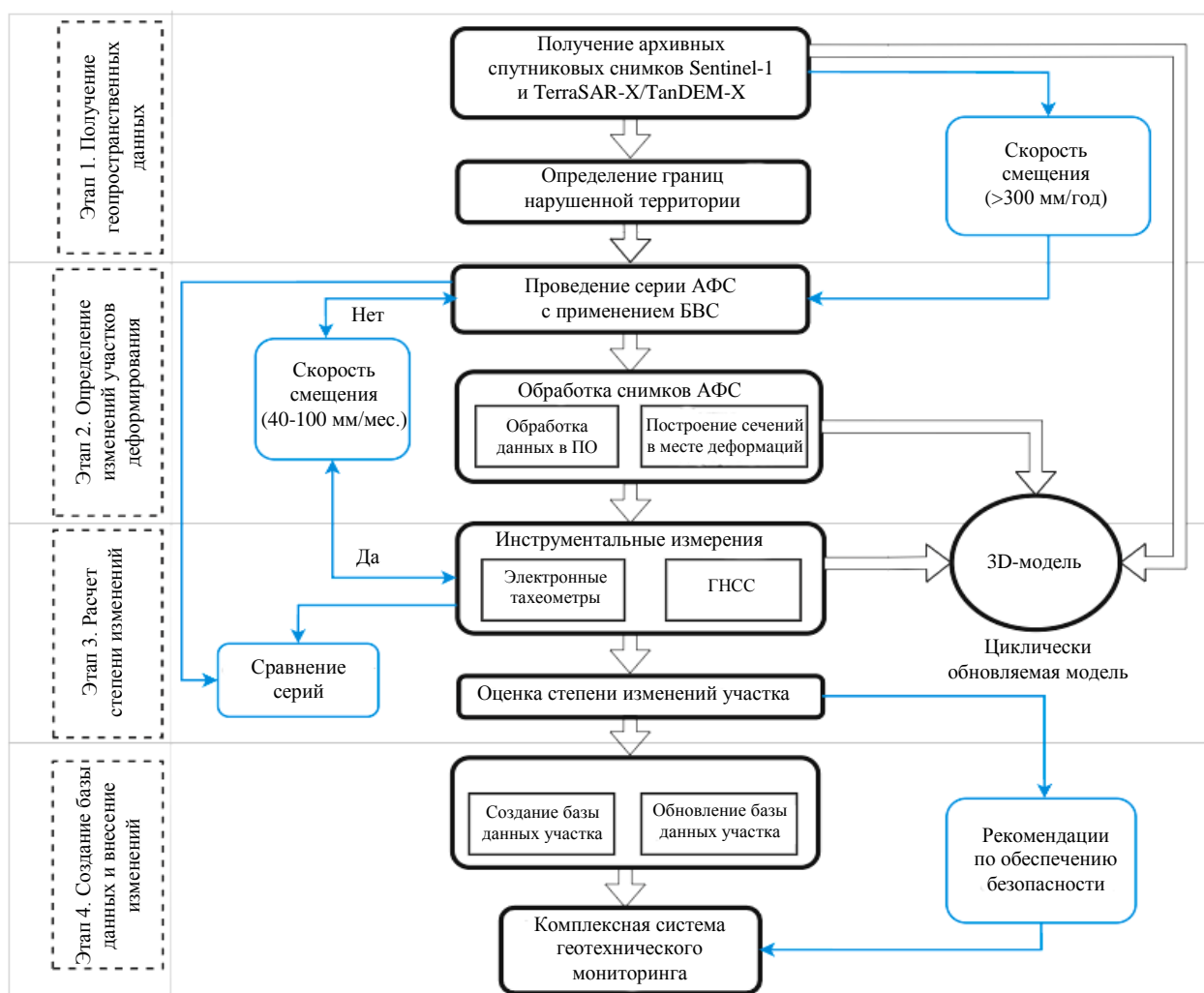


Рис.1. Структурная схема комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных

геомеханического мониторинга состояния устойчивости на основе инструментального контроля (третий этап), включающего электронную тахеометрию и ГНСС-измерения по реперам наблюдательных станций. Для выбора мест закладки наблюдательных станций необходимо учесть современное состояние и направление развития горных работ, участки расположения горнодобывающей техники и рабочих, геологические нарушения и контакты пород, гидрогеологические условия, районы с высокой вероятностью обрушения. Производство серий систематических высокоточных инструментальных геодезических наблюдений по реперам наблюдательных станций и анализ их результатов позволяют определить величину изменений, установить механизм и причины деформаций, спрогнозировать их развитие и разработать мероприятия по устранению причин.

Четвертый этап геотехнического мониторинга направлен на создание геопространственной базы данных, в которой аккумулируется вся собранная информация. База данных постоянно обновляется, что позволяет поддерживать актуальность информации и оперативно реагировать на изменения. Основой данной системы является циклически обновляемая 3D-модель, которая используется для разработки рекомендаций по повышению безопасности при эксплуатации техногенных объектов.

Структурная схема иллюстрирует поэтапный процесс внедрения комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов от предварительного анализа данных дистанционного зондирования Земли до создания геопространственной базы данных и разработки мероприятий по повышению безопасности при эксплуатации техногенных объектов.



Результаты

Апробация предложенной комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных проводилась на угольном разрезе «Эдельвейс +» в Карагандинской обл. Республики Казахстан (рис.2).

Для мониторинга состояния карьерных откосов угольного разреза «Эдельвейс +» применялась многопроходная радарная интерферометрия (InSAR) [37] с использованием данных спутников Sentinel-1 и TerraSAR-X/TanDEM-X. Основным методом обработки данных являлся метод малых базовых линий (SBAS), позволяющий выявлять деформации земной поверхности с высокой точностью на больших территориях.

В период с апреля 2017 г. по октябрь 2021 г. использовался архив радиолокационной съемки, который позволяет получить данные с любого участка земной поверхности, космических аппаратов Sentinel-1A и Sentinel-1B в режиме Interferometric Wide Swath (IW), обеспечивающем покрытие территорий с высоким пространственным разрешением. Из-за сезонных условий, влияющих на точность интерферограмм (например, наличия снежного покрова), снимки с декабря по февраль не использовались, чтобы избежать искажений, вызванных сильной декорреляцией. Интерферометрия проводилась с использованием поляризации VV+VH [38], что улучшило точность определения вертикальных и горизонтальных смещений. В результате получены 72 изображения по нисходящей орбите и 78 – по восходящей орбите движения спутника.

Первоначально все радарные снимки были выровнены относительно эталонного изображения с использованием алгоритмов точной регистрации. Это позволило уменьшить ошибки, связанные с изменениями геометрии орбиты и условиями съемки. Для данных Sentinel-1 применялся алгоритм выравнивания, основанный на пространственной привязке точек между парами кадров, что обеспечивало стабильную геометрию и уменьшало ошибки позиционирования.

Интерферограммы генерировались в программе Sentinels Application Platform (SNAP) (рис.3) для каждой пары снимков с малой базовой линией (менее 200 м). На интерферограммах, которые строились с интервалом в 12 дней, фазовые сдвиги визуализированы с использованием цветовой палитры. Каждый полный цикл фазового изменения (от $-\pi$ до $+\pi$) соответствует смещению порядка 2,8 см. Наиболее активные деформационные процессы были выявлены в период с мая 2020 г. по октябрь 2021 г. на северном борту угольного разреза «Эдельвейс +». В других зонах разреза интерферограмма показывает относительно стабильное состояние карьерных откосов, где фазовые сдвиги минимальны (плавные переходы между цветами). Это указывает на отсутствие значительных смещений в этих зонах.

Были получены радарные снимки высокого разрешения TerraSAR-X/TanDEM-X за период с 11 мая 2019 г. по 20 ноября 2021 г., собранные Немецким аэрокосмическим центром (DLR). Полученные данные обрабатывались при помощи программного обеспечения SARscape, при этом фазовые интерферограммы подвергались фильтрации с использованием алгоритма Голдштейна, который минимизирует фазовый шум, вызванный атмосферными явлениями и многолучевостью.



Рис.2. Расположение угольного разреза «Эдельвейс +» на карте Республики Казахстан

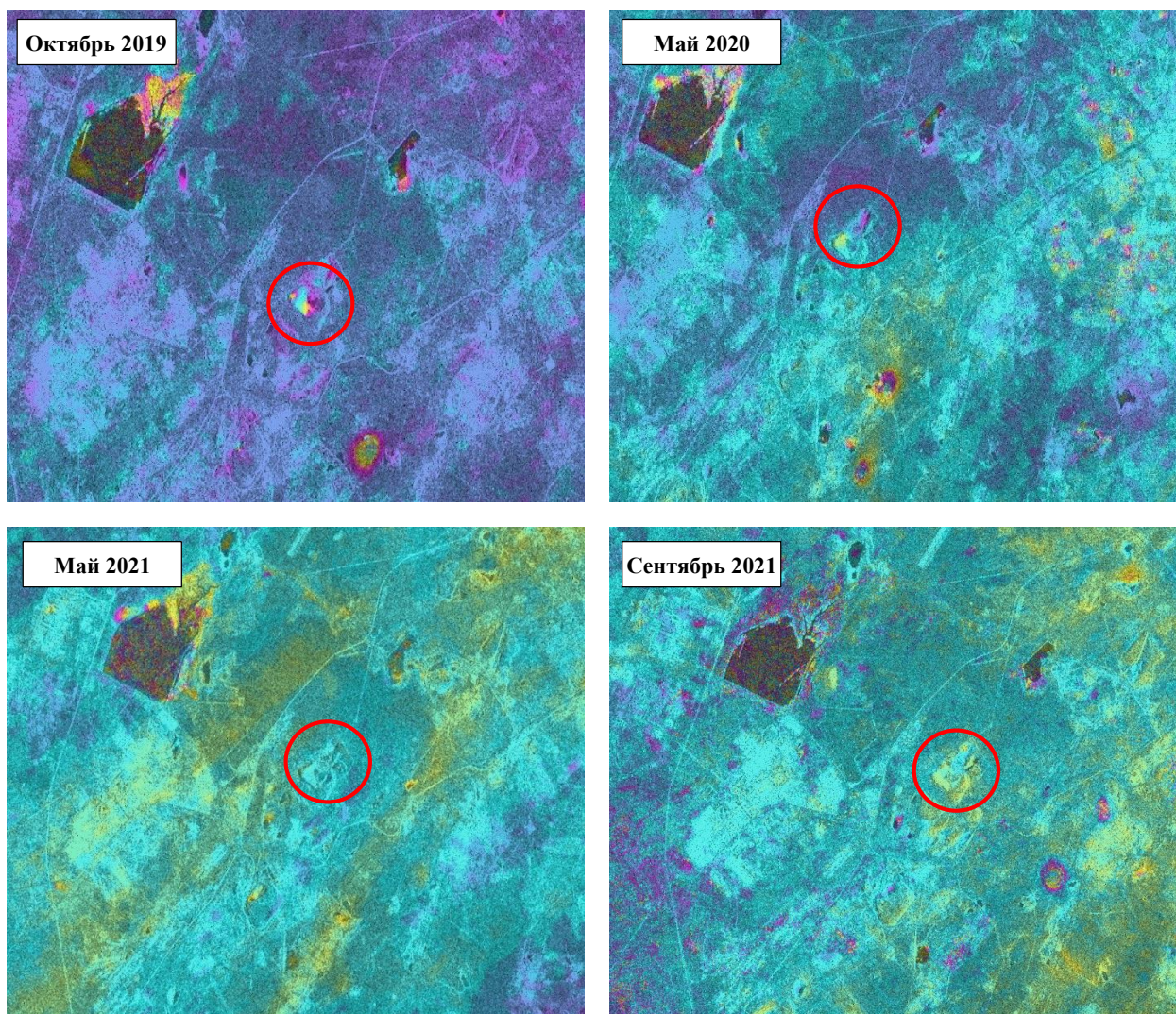


Рис.3. Спутниковые снимки Sentinel-1 Карагандинской обл.
Красный круг – расположение угольного разреза «Эдельвейс +»

Фильтрация позволяет повысить когерентность сигнала и увеличить точность измерений малых смещений. Дополнительно применялась фильтрация для учета влияния водных объектов и растительности, поскольку эти элементы могут вызывать сильную декорреляцию фазового сигнала [39]. Всего было обработано 62 снимка с нисходящей орбиты спутника.

Для преобразования фазовых данных в реальную величину смещений применялся процесс разворачивания фаз [40]. В ходе этого процесса неоднозначности фазового сдвига, связанные с многозначностью фазовой информации, устранены и преобразованы в дискретные значения смещений земной поверхности.

По результатам обработки была построена карта-схема смещений на исследуемом участке с разрешением 10 м/пикс. Для визуализации смещений была использована цветовая шкала, отражающая величину вертикальных смещений. Красные оттенки указывают на значительные опускания поверхности, превышающие 20 мм, а синие оттенки соответствуют зонам стабильности или незначительных изменений (до 2 мм). Зеленые и желтые оттенки отображают промежуточные значения, что помогает выделить зоны со средними уровнями деформации.

Для более полной интерпретации динамики деформационных процессов на северном борту угольного разреза «Эдельвейс +» построен график зависимости вертикальных смещений горного массива от периода наблюдений (с мая 2017 г. по октябрь 2021 г.), который отражает изменение высоты поверхности массива во времени (рис.4). Каждая точка на графике соответствует среднему значению смещения горного массива за один цикл съемки.

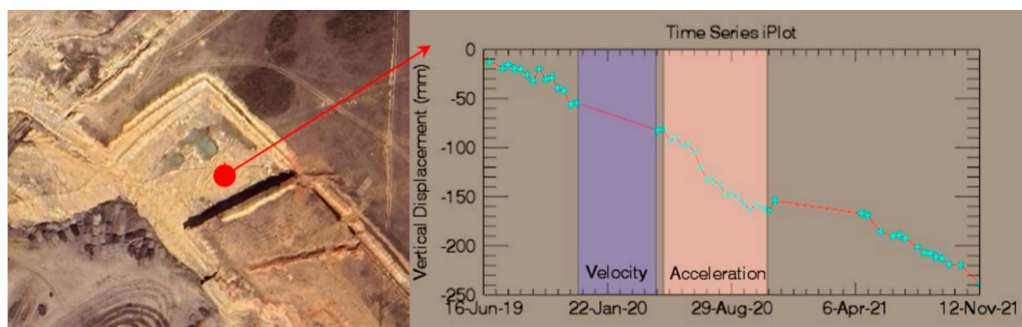


Рис.4. График смещения приборного массива на северном борту угольного разреза «Эдельвейс +»

В период активных деформационных процессов на северном борту разреза наблюдается линейный тренд опускания горного массива с общей величиной смещений до 25 мм. Данный факт подтверждает наличие активных деформационных процессов, вызванных горными работами, горно-геологическими факторами и гидрологическими процессами.

В мае 2020 г. была получена вторая серия архивных спутниковых снимков, произведена первая серия АФС с применением БВС DJI Mavic 2 Pro [41], оснащенного мультисистемным и мультичастотным ГНСС-приемником, который позволяет определять положение судна в воздухе в момент фотографирования с точностью ± 5 мм. В результате обработки первой серии измерений получена цифровая модель местности (ЦММ) со средней квадратической ошибкой (СКО) в двух плоскостях по опорным точкам 1,5 см, а по контрольным – 4,7 см. Вторая серия измерений производилась в ноябре 2021 г. по той же полетной миссии, что и в первой серии, при этом опорные пункты в первой и второй серии измерений были общими. СКО определения ЦММ во второй серии измерений по опорным точкам составила 1,5 см, а по контрольным – 2,2 см. Третья серия измерений выполнена в октябре 2022 г. по той же полетной миссии, что и в первых двух. В отличие от первых двух серий в связи с уничтожением большинства опорных точек пришлось создавать новую опорную сеть с включением максимально сохранившихся пунктов предыдущей сети. СКО определения ЦММ в третьей серии измерений по опорным точкам составила 4,4 см, а по контрольным – 8,2 см. Последняя серия измерений производилась в июне 2023 г. по предыдущей полетной миссии, СКО определения ЦММ по опорным точкам составила 3 см, контрольным – 6,7 см.

С целью определения участков с ярко выраженными изменениями поверхности угольного разреза все ЦММ сопоставлены между собой в программном комплексе Leapfrog GEO. Преобладание одного цвета над другим показывает участки поверхности разреза, на которых выполнялись горные работы либо проявлялись деформационные процессы горного массива. Обнаружены деформационные процессы массива на северном борту разреза, что подтверждает анализ спутниковых снимков по ДЗЗ.

Для определения величины смещения горного массива северного борта разреза на участке с выраженным процессом деформирования построены сечения с твердой координатной привязкой к местности, которые наносятся на все серии аэрофотосъемки в программном комплексе Agisoft Metashape (рис.5). Agisoft Metashape позволяет обрабатывать изображения, преобразовывать их в плотные облака точек, текстурированные полигональные модели, геопривязанные ортофотопланы и цифровые модели рельефа/местности. Функция измерения профиля дает возможность определить на сечении 3D-модели такие параметры, как длина, высота и уклон, провести сравнение и анализ между сериями аэрофотосъемки (рис.6), что позволяет установить форму, величину смещения и механизм деформирования горного массива.

По результатам сравнения построенных сечений сделаны следующие выводы:

- По профильной линии А в период с мая 2020 г. по ноябрь 2021 г. произошло обрушение уступа на горизонте +557/+545 м в виде закола приборного массива на расстоянии 5,99 м от верхней бровки, оседание составило 10,67 м.
- По профильной линии В обрушение происходило в два этапа:
 - в период с мая 2020 г. по ноябрь 2021 г. произошел закол (гор. +556 м) на расстоянии 7,44 м от верхней бровки, оседание составило 3,40 м;
 - в период с ноября 2021 г. по октябрь 2022 г. произошло повторное обрушение на гор. +553 м, расстояние от верхней бровки составило 3,56 м, оседание – 2,65 м.

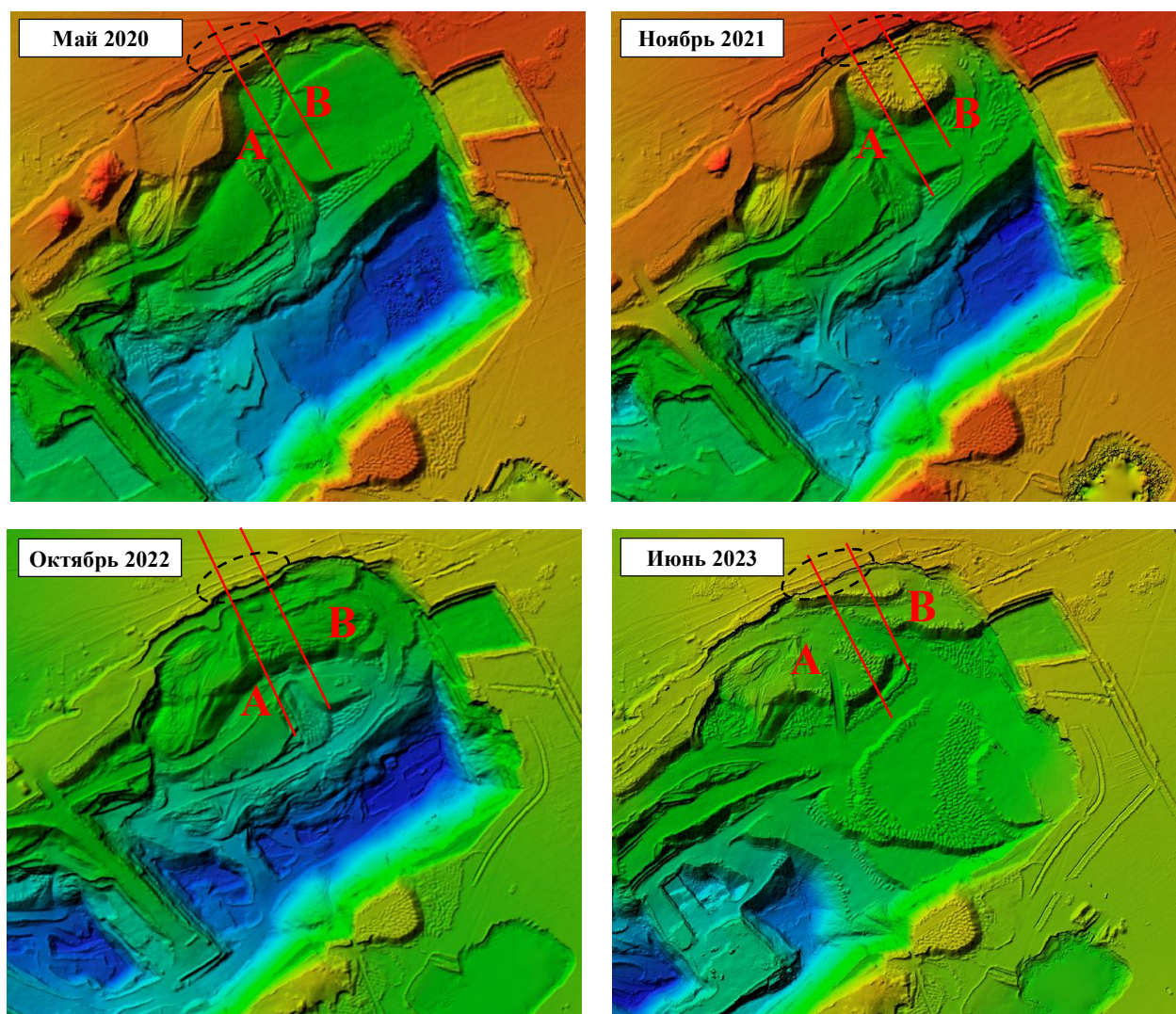


Рис.5. ЦММ по данным АФС за период 2020-2023 гг. Красные линии – профильные сечения А и В; черные пунктирные овалы – зоны, где были зафиксированы наибольшие смещения поверхности горного массива

Отработка угля на данном участке производилась по выходам угольных пластов под наносы, что могло способствовать развитию деформационных процессов. В таких условиях соответствие фактических параметров карьерных откосов разреза параметрам устойчивых откосов становится особенно важным, поскольку несоответствие может привести к усилению нестабильности и повышенному риску возникновения опасных деформаций.

Для определения деформаций, величины которых меньше разрешающей способности аэрофотосъемки (2,5 см/пиксель), использовался классический метод геодезических инструментальных наблюдений [42-44] с применением высокоточного электронного тахеометра Leica MS 50 и ГНСС-приемника Leica GS 14.

Геодезические инструментальные наблюдения выполнялись по реперам профильных линий наблюдательной станции. Место заложения профильных линий наблюдательной станции соответствует сечениям по профильным линиям А и В (рис.7). На рис.7 синим цветом обозначены репера, которые измеряются при помощи тахеометра и ГНСС-оборудования, а зеленым – только при помощи тахеометра.

Наблюдательная станция состоит из 4 опорных и 21 рабочего репера. Опорные реперы располагаются на расстоянии не менее $1,5H$ (H – глубина разреза, м) от верхней бровки разреза, на участке, не подверженном сдвигу массива в результате ведения горных работ.

Выполнено четыре серии высокоточных геодезических инструментальных наблюдений (май 2020 г., ноябрь 2021 г., октябрь 2022 г., июнь 2023 г.). Результаты наблюдений приведены в табл.1-3.

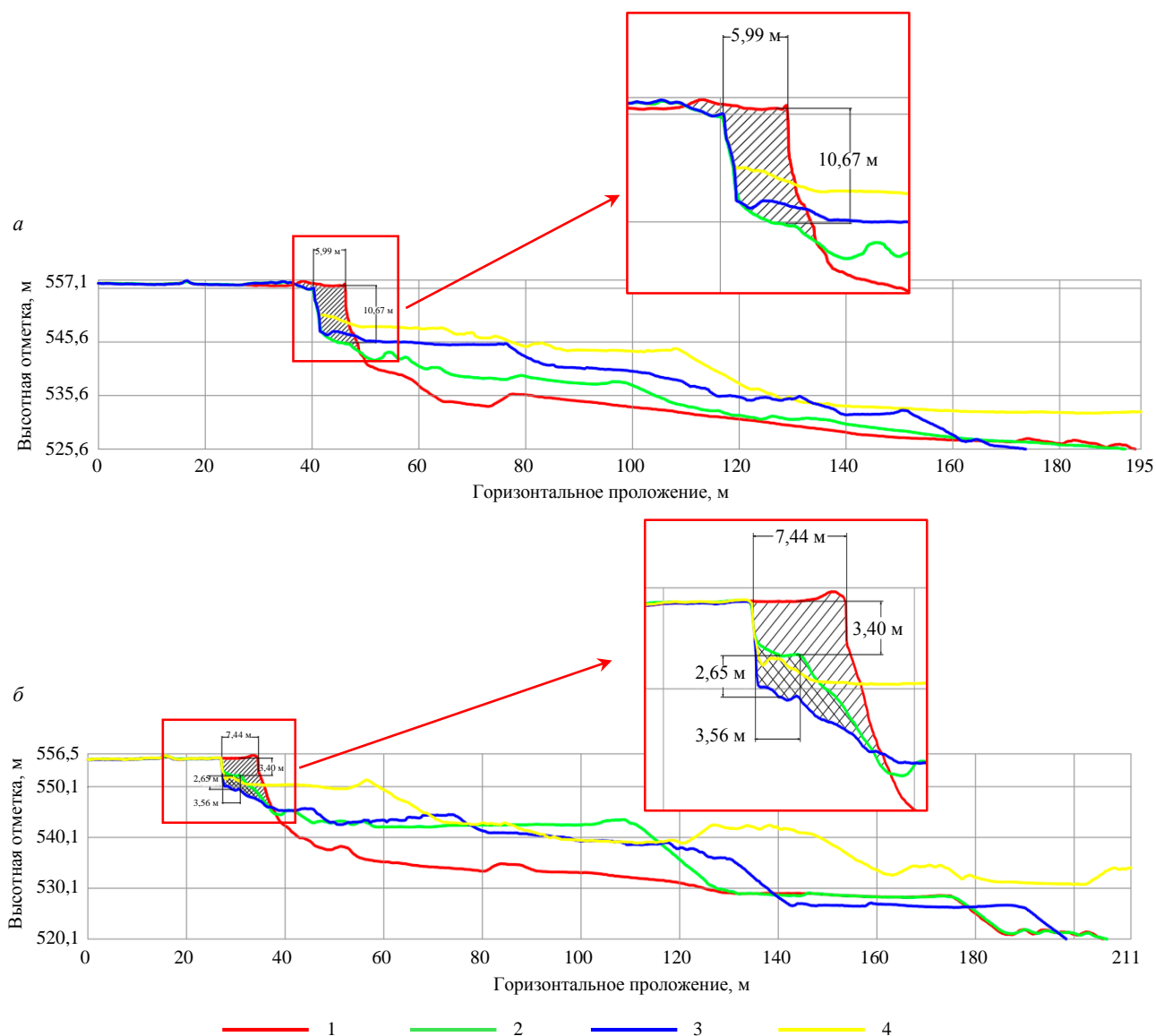


Рис.6. Сечения 3D-модели по профильным линиям А (а) и В (б)

1 – май 2020 г.; 2 – ноябрь 2021 г.; 3 – октябрь 2022 г.; 4 – июнь 2023 г.

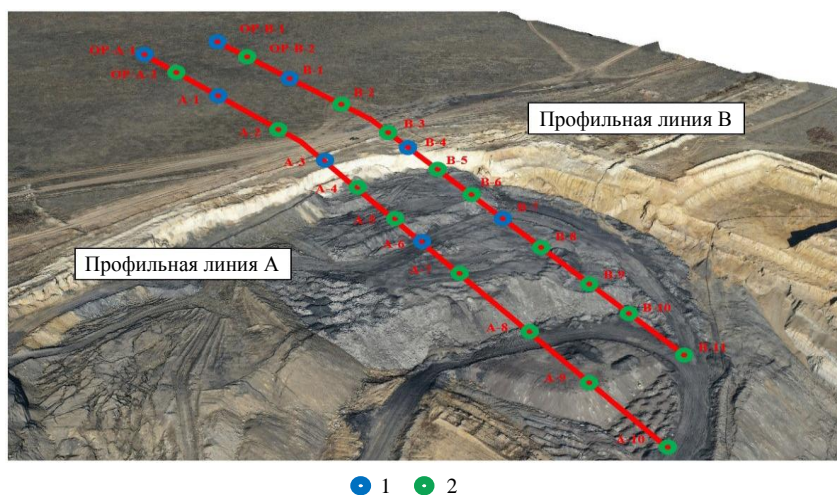


Рис.7. Наблюдательная станция для инструментального мониторинга

1 – точки измерения реперов ГНСС-оборудованием и тахеометром;
2 – точки измерения реперов тахеометром



Таблица 1

Сравнение измерений первой и второй серий

Точка	20.05.2020 г.			15.11.2021 г.			ΔZ , мм	dS , мм	ΔL , мм
	Z, м	S, м	L, м	Z, м	S, м	L, м			
Профильная линия А									
ОР-А-1	550,783			550,780			−3	0	0
ОР-А-2	553,159	58,714	58,714	553,160	58,709	58,709	1	−5	−5
А-1	554,341	34,797	93,439	554,338	34,797	93,435	−3	0	−4
А-2	555,409	33,409	126,845	555,406	33,410	126,842	−3	1	−3
А-3	555,800	40,176	167,016	555,774	40,223	167,060	−26	47	44
А-4	555,953	10,232	177,247	Уничтожен					
Профильная линия В									
ОР-В-1	551,788			551,789			1	0	0
ОР-В-2	553,988	54,172	54,172	553,984	54,173	54,173	−4	1	1
В-1	555,795	34,346	88,478	555,793	34,341	88,473	−2	−5	−4
В-2	556,825	35,966	124,443	556,823	35,972	124,445	−2	6	2
В-3	556,508	34,769	159,209	556,480	34,794	159,236	−28	25	27
В-4	556,320	16,106	175,314	556,443	14,064	173,280	Новый		

Таблица 2

Сравнение измерений второй и третьей серий

Точка	15.11.2021 г.			25.10.2022 г.			ΔZ , мм	dS , мм	ΔL , мм
	Z, м	S, м	L, м	Z, м	S, м	L, м			
Профильная линия А									
ОР-А-1	550,780			550,781			1	0	0
ОР-А-2	553,160	58,709	58,709	553,158	58,711	58,711	−2	2	2
А-1	554,338	34,797	93,435	554,339	34,804	93,444	1	7	9
А-2	555,406	33,410	126,842	555,403	33,417	126,858	−3	7	16
А-3	555,774	40,223	167,060	555,751	40,250	167,103	−23	27	43
А-4	Уничтожен			545,378	18,853	185,867	Новый		
Профильная линия В									
ОР-В-1	551,789			551,787			−2	0	0
ОР-В-2	553,984	54,173	54,176	553,985	54,174	54,178	1	0	2
В-1	555,793	34,341	88,476	555,796	34,341	88,478	3	1	3
В-2	556,823	35,972	124,447	556,821	35,971	124,448	−2	−1	1
В-3	556,480	34,794	159,239	556,464	34,812	159,258	−16	18	19
В-4	556,443	14,044	173,280	556,400	14,054	173,307	−43	10	27

Таблица 3

Сравнение измерений третьей и четвертой серий

Точка	25.10.2022 г.			30.06.2023 г.			ΔZ , мм	dS , мм	ΔL , мм
	Z, м	S, м	L, м	Z, м	S, м	L, м			
Профильная линия А									
ОР-А-1	550,781			550,782			1	0	0
ОР-А-2	553,158	58,711	58,707	553,158	58,715	58,715	0	4	8
А-1	554,339	34,804	93,440	554,345	34,791	93,435	6	−12	−5
А-2	555,403	33,417	126,854	555,418	33,404	126,836	15	−13	−18
А-3	555,751	40,250	167,099	555,742	40,288	167,119	−9	38	20



Окончание табл.3

Точка	25.10.2022 г.			30.06.2023 г.			ΔZ , мм	dS , мм	ΔL , мм
	Z , м	S , м	L , м	Z , м	S , м	L , м			
Профильная линия В									
ОР-В-1	551,787			551,789			2	0	0
ОР-В-2	553,985	54,174	54,174	553,985	54,175	54,175	0	2	2
В-1	555,796	34,341	88,474	555,798	34,339	88,474	2	−2	0
В-2	556,821	35,971	124,444	556,826	35,967	124,440	5	−4	−4
В-3	556,464	34,812	159,253	556,431	34,852	159,289	−33	40	36
В-4	556,400	14,054	173,307	556,389	14,046	173,335	−11	−8	28

Параметры в табл.1-3 – высотная отметка Z репера, горизонтальное расстояние между реперами S и расстояние от опорного репера до измеряемого L . Для каждого репера приведены значения Z , S , L по двум сериям инструментальных наблюдений и значения ΔZ , dS , ΔL между сериями наблюдений, что позволяет определить вертикальные и горизонтальные смещения. Эти параметры необходимы для анализа деформаций горного массива и контроля за стабильностью участка исследуемой территории. Вертикальные изменения ΔZ указывают на оседания или выпоры, а горизонтальные смещения dS , ΔL – на перемещение массива в горизонтальной плоскости.

По результатам инструментальных измерений с применением электронного тахеометра сделаны следующие выводы:

- По профильной линии А в период с мая 2020 г. по октябрь 2022 г. зафиксированы значительные вертикальные смещения репера А-3 (гор. +555 м), оседание составило 26 мм и 23 мм в двух первых сериях соответственно, максимальное горизонтальное смещение в сторону выработанного пространства составило 44 мм.

- По профильной линии В в период с мая 2020 г. по июнь 2023 г. обнаружено смещение реперов В-3 и В-4 (гор. +556 м), максимальное горизонтальное смещение в сторону выработанного пространства составило 36 мм, максимальное оседание – 43 мм.

Это указывает на движение массива на данном участке, что требует повышенного внимания и дальнейшего наблюдения.

Для проведения геодезического контроля на наблюдательной станции были выполнены ГНСС-измерения [45-47] на реперах ОР-А-1, А-1, А-3, А-6, ОР-В-1, В-1, В-4 и В-7. Результаты геодезического контроля (табл.4-6) [48] позволяют сравнить полученные значения измерений с предыдущими тахеометрическими значениями, проверить их корректность и выявить возможные несоответствия.

Таблица 4

Сравнение ГНСС-измерений первой и второй серий

Точка	20.05.2020 г.	15.11.2021 г.	ΔY , мм	ΔX , мм	ΔZ , мм	Векторное смещение, мм	V , мм/сут
	Z , м	Z , м					544 сут
Профильная линия А							
ОР-А-1	550,785	550,783	2	−1	−2	3	0,01
А-1	554,346	554,340	1	−6	−6	9	0,02
А-3	555,806	555,776	42	−36	−30	63	0,12
А-6	534,180	542,484	Новый				
Профильная линия В							
ОР-В-1	551,783	551,786	2	−2	3	4	0,01
В-1	555,791	555,790	2	2	−1	3	0,01
В-4	556,505	556,477	22	−24	−28	43	0,08
В-7		537,594	Новый				



Таблица 5

Сравнение ГНСС-измерений второй и третьей серий

Точка	15.11.2021 г.	25.10.2022 г.	ΔY , мм	ΔX , мм	ΔZ , мм	Векторное смещение, мм	V, мм/сут
	Z, м	Z, м					344 сут
Профильная линия А							
ОР-А-1	550,783	550,784	−8	2	1	8	0,02
А-1	554,340	554,342	−1	−17	2	17	0,05
А-3	555,776	555,754	17	−37	−22	46	0,13
А-6	542,484	542,655	Новый				
Профильная линия В							
ОР-В-1	551,786	551,79	−2	3	4	5	0,02
В-1	555,790	555,799	−3	2	9	10	0,03
В-4	556,477	556,467	11	−11	−10	18	0,05
В-7	537,594	540,997	Новый				

Таблица 6

Сравнение ГНСС-измерений третьей и четвертой серий

Точка	25.10.2022 г.	30.06.2023 г.	ΔY , мм	ΔX , мм	ΔZ , мм	Векторное смещение, мм	V, мм/сут
	Z, м	Z, м					248 сут
Профильная линия А							
ОР-А-1	550,784	550,785	1	−2	1	2	0,01
А-1	554,342	554,348	−8	5	6	11	0,05
А-3	555,754	555,745	11	−16	−9	21	0,09
А-6	542,655	543,113	Новый				
Профильная линия В							
ОР-В-1	551,790	551,792	−5	2	2	6	0,02
В-1	555,799	555,800	−7	2	1	7	0,03
В-4	556,467	556,433	29	−26	−34	52	0,21
В-7	540,997	543,962	Новый				

Анализ данных ГНСС-измерений показывает:

- По профильной линии А репер А-3 (гор. +555 м) демонстрирует наиболее выраженные горизонтальные смещения в сторону выработанного пространства – 63 мм, средняя скорость смещения рабочих реперов в зоне деформации – 0,13 мм/сут.

- По профильной линии В репер В-4 (гор. +556 м) проявляет наиболее значительные изменения, горизонтальное смещение составило 52 мм, а скорость смещения – 0,21 мм/сут. Это указывает на интенсивное воздействие или изменения в горном массиве в этой области.

ГНСС-измерения подтверждают результаты измерений, полученные с применением высокоточного электронного тахеометра Leica MS 50 (реперы А-3 и В-4), что подчеркивает необходимость комплексного подхода к методам измерений в мониторинге состояния техногенных объектов и анализе деформационных процессов для точной оценки их динамики.

Причиной деформационных процессов на северном борту угольного разреза «Эдельвейс +» является несоответствие фактических параметров откосов борта разреза параметрам устойчивых откосов. Расчеты параметров рабочего борта [49] не учитывали множество факторов, негативно влияющих на их устойчивость, таких как процессы выветривания, талые воды, отработка выходов угольных пластов под углом залегания 15-20°.

Заключение

Мониторинг состояния устойчивости техногенных объектов представляет собой критически важный аспект обеспечения безопасности и предупреждения чрезвычайных ситуаций, вызванных горными и геологическими процессами. Комплексное использование различных методов мониторинга,



таких как натурное визуальное обследование, высокоточный геодезический инструментальный контроль и мониторинг состояния техногенных объектов с использованием беспилотных воздушных судов, а также дистанционное зондирование Земли, позволяет получить всестороннюю информацию о динамике деформационных процессов.

В работе приведена разработанная комплексная система геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных, которая апробирована на угольном разрезе «Эдельвейс +». Основа системы – интеграция методов дистанционного зондирования Земли, спутниковой радарной интерферометрии, аэрофотосъемки с использованием беспилотных воздушных судов, а также классических геодезических инструментальных методов контроля – электронной тахеометрической съемки с использованием высокоточного геодезического оборудования и ГНСС-измерений. Интеграция этих методов обеспечивает возможность не только локального выявления изменений исследуемой поверхности объектов, но и определения причин и механизма сдвижения горного массива. Особое внимание следует уделить использованию архивных данных дистанционного зондирования Земли, которые позволяют идентифицировать зоны повышенной опасности, подверженные деформационным процессам.

Применение предложенной методики геотехнического мониторинга эффективно для различных типов техногенных объектов, включая карьеры, отвалы, территории, подработанные подземными горными выработками, а также критически важные объекты инфраструктуры, такие как дамбы и плотины [50]. Разработанная система может быть использована для формирования рекомендаций по обеспечению безопасности эксплуатации техногенных объектов при увеличении частоты мониторинговых измерений и анализа скорости развития деформаций. Таким образом, мониторинг позволяет оперативно выявлять критические деформационные процессы, прогнозировать их развитие и принимать своевременные меры для минимизации последствий, что значительно повышает безопасность эксплуатации объектов.

Авторы выражают благодарность Немецкому аэрокосмическому центру (DLR) за предоставление радарных снимков TerraSAR-X/TanDEM-X по заявке GEO3889.

ЛИТЕРАТУРА

1. Misuri A., Landucci G., Cozzani V. Assessment of risk modification due to safety barrier performance degradation in Natech events // Reliability Engineering & System Safety. 2021. Vol. 212. № 107634. DOI: [10.1016/j.ress.2021.107634](https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107634)
2. Suarez-Paba M.C., Cruz A.M. A paradigm shift in Natech risk management: Development of a rating system framework for evaluating the performance of industry // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 74. № 104615. DOI: [10.1016/j.jlp.2021.104615](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104615)
3. Park H., Cruz A.M. Insights on Chemical and Natech Risk Management in Japan and South Korea: A Review of Current Practices // International Journal of Disaster Risk Science. 2022. Vol. 13. Iss. 3. P. 359-371. DOI: [10.1007/s13753-022-00409-2](https://doi.org/10.1007/s13753-022-00409-2)
4. Misuri A., Antonioni G., Cozzani V. Quantitative risk assessment of domino effect in Natech scenarios triggered by lightning // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 64. № 104095. DOI: [10.1016/j.jlp.2020.104095](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104095)
5. Corritore D., Paolacci F., Caprinuzzi S. A Screening Methodology for the Identification of Critical Units in Major-Hazard Facilities Under Seismic Loading // Frontiers in Built Environment. 2021. Vol. 7. № 780719. DOI: [10.3389/fbuil.2021.780719](https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.780719)
6. Girgin S., Krausmann E. RAPID-N: Rapid natech risk assessment and mapping framework // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013. Vol. 26. Iss. 6. P. 949-960. DOI: [10.1016/j.jlp.2013.10.004](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.10.004)
7. Guanwen Huang, Shi Du, Duo Wang. GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: a review // Satellite Navigation. 2023. Vol. 4. № 5. DOI: [10.1186/s43020-023-00095-5](https://doi.org/10.1186/s43020-023-00095-5)
8. Raufu I.O., Tata H., Olaosegba S. et al. Modelling local geoid undulations using unmanned aerial vehicles (UAVS): A case study of the Federal University of Technology, Akure, Nigeria // Geodesy, cartography, and aerial photography. 2023. Iss. 98. P. 63-75. DOI: [10.23939/istcgcap2023.98.063](https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.063)
9. Hasni Kamel, Bachir Gourine, Mohammed El Amin Larabi. Dam Deformation Monitoring Using Cloud-Based P-SBAS Algorithm: The Kramis Dam Case (Algeria) // Engineering Technology & Applied Science Research. 2023. Vol. 13. № 3. P. 10759-10764. DOI: [10.48084/etasr.5857](https://doi.org/10.48084/etasr.5857)
10. Нурпеисова М.Б., Битимбаев М.Ж., Рысбеков К.Б. и др. Геодезическое обоснование междурудного района Сарыарки // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2020. Т. 6. № 444. С. 194-202 (in English). DOI: [10.32014/2020.2518-170X.147](https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.147)
11. Низаметдинов Ф.К., Барышников В.Д., Оралбай А.О. Оценка устойчивости бортов карьера Кентобе на основе разработанной цифровой геолого-геомеханической модели месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 6. С. 27-34. DOI: [10.15372/FTPRPI20220603](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220603)
12. Khamitov N., Kazakov A., Akramov A. et al. Implementation of satellite monitoring of the sides of the «Kalmakyr» mine // AIP Conference Proceedings. 2024. Vol. 3152. Iss. 1. № 050005. DOI: [10.1063/5.0218943](https://doi.org/10.1063/5.0218943)



13. Markov A., Kazakov A., Haqberdiyev M. et al. Calculation of tectonic stresses in the earth's crust of SouthWestern Uzbekistan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 937. № 4. № 042087. DOI: [10.1088/1755-1315/937/4/042087](https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/4/042087)
14. Fazilova D., Arabov O. Vertical accuracy evaluation free access digital elevation models (DEMs): case Fergana Valley in Uzbekistan // Earth Sciences Research Journal. 2023. Vol. 27. № 2. P. 85-91. DOI: [10.15446/esrj.v27n2.103801](https://doi.org/10.15446/esrj.v27n2.103801)
15. Rudolph T., Goerke-Mallet P., Homölle A. et al. Participatory Geomonitoring for Future Mining–Resilience Management in the Cavern Storage Epe (Germany) // Mining. 2024. Vol. 4. Iss. 2. P. 230-247. DOI: [10.3390/mining4020014](https://doi.org/10.3390/mining4020014)
16. Haske B., Rudolph T., Bernsdorf B., Pawlik M. Innovative Environmental Monitoring Methods Using Multispectral UAV and Satellite Data // First Break. 2024. Vol. 42. Iss. 2. P. 41-47. DOI: [10.3997/1365-2397.fb2024012](https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2024012)
17. Chuangang Gong, Shaogang Lei, Zhengfu Bian et al. Analysis of the Development of an Erosion Gully in an Open-Pit Coal Mine Dump During a Winter Freeze-Thaw Cycle by Using Low-Cost UAVs // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Iss. 11. № 1356. DOI: [10.3390/rs11111356](https://doi.org/10.3390/rs11111356)
18. Bouguettaya A., Zarzour H., Taberkit A.M., Kechida A. A review on early wildfire detection from unmanned aerial vehicles using deep learning-based computer vision algorithms // Signal Processing. 2022. Vol. 190. № 108309. DOI: [10.1016/j.sigpro.2021.108309](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108309)
19. Martín-Béjar S., Claver J., Sebastián M.A., Sevilla L. Graphic Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the Study of Industrial Heritage Assets // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. Iss. 24. № 8821. DOI: [10.3390/app10248821](https://doi.org/10.3390/app10248821)
20. Türk Y., Balaban B., Alkan E. et al. Açık maden sahalarında kazı sonrası zemin değişiminin izlenmesinde İHA-tabanlı RTK/PPK yönteminin kullanımı: Düzce-Tatlıdere taş ocağı örneği // Ormançılık Araştırma Dergisi. 2022. Vol. 9. Special Issue. P. 76-85. DOI: [10.17568/ogmoad.1093694](https://doi.org/10.17568/ogmoad.1093694)
21. He Zhang, Aldana-Jague E., Clapuyt F. et al. Evaluating the potential of post-processing kinematic (PPK) georeferencing for UAV-based structure-from-motion (SfM) photogrammetry and surface change detection // Earth Surface Dynamics. 2019. Vol. 7. Iss. 3. P. 807-827. DOI: [10.5194/esurf-7-807-2019](https://doi.org/10.5194/esurf-7-807-2019)
22. Taddia Y., Stecchi F., Pellegrinelli A. Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode // Drones. 2020. Vol. 4. Iss. 2. № 9. DOI: [10.3390/drones4020009](https://doi.org/10.3390/drones4020009)
23. Lee E., Park S., Jang H. et al. Enhancement of low-cost UAV-based photogrammetric point cloud using MMS point cloud and oblique images for 3D urban reconstruction // Measurement. 2024. Vol. 226. № 114158. DOI: [10.1016/j.measurement.2024.114158](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114158)
24. Carabassa V., Montero P., Crespo M. et al. Unmanned aerial system protocol for quarry restoration and mineral extraction monitoring // Journal of Environmental Management. 2020. Vol. 270. № 110717. DOI: [10.1016/j.jenvman.2020.110717](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110717)
25. Rădulescu A.T., Rădulescu C.M., Kablak N. et al. Impact of Factors That Predict Adoption of Geomonitoring Systems for Landslide Management // Land. 2023. Vol. 12. Iss. 4. № 752. DOI: [10.3390/land12040752](https://doi.org/10.3390/land12040752)
26. Memmolo A., Famiglietti N.A., Moschillo R. et al. UAS-LC-GNSS: Precision Surveying with a Low-Cost GNSS System for Commercial Drones // Rendiconti Online Società Geologica Italiana. 2023. Vol. 60. P. 134-139. DOI: [10.3301/ROL.2023.37](https://doi.org/10.3301/ROL.2023.37)
27. Famiglietti N.A., Cecere G., Grasso C. et al. A Test on the Potential of a Low Cost Unmanned Aerial Vehicle RTK/PPK Solution for Precision Positioning // Sensors. 2023. Vol. 21. Iss. 11. № 3882. DOI: [10.3390/s21113882](https://doi.org/10.3390/s21113882)
28. Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Кучин Л.С. и др. Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 180-193. DOI: [10.31897/PMI.2023.22](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.22)
29. Bailon-Ruiz R., Bit-Monnot A., Lacroix S. Real-time wildfire monitoring with a fleet of UAVs // Robotics and Autonomous Systems. 2022. Vol. 152. № 104071. DOI: [10.1016/j.robot.2022.104071](https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104071)
30. Pitombeira K., Mitishita E. Influence of On-Site Camera Calibration with Sub-Block of Images on the Accuracy of Spatial Data Obtained by PPK-Based UAS Photogrammetry // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 12. № 3126. DOI: [10.3390/rs15123126](https://doi.org/10.3390/rs15123126)
31. Zeybek M., Taşkaya S., Elkhachy I., Tarolli P. Improving the Spatial Accuracy of UAV Platforms Using Direct Georeferencing Methods: An Application for Steep Slopes // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 10. № 2700. DOI: [10.3390/rs15102700](https://doi.org/10.3390/rs15102700)
32. Ocalan T., Turk T., Tunalıoglu N., Gurturk M. Investigation of accuracy of PPP and PPP-AR methods for direct georeferencing in UAV photogrammetry // Earth Science Informatics. 2022. Vol. 15. Iss. 4. P. 2231-2238. DOI: [10.1007/s12145-022-00868-7](https://doi.org/10.1007/s12145-022-00868-7)
33. Косарев Н.С., Колесников А.А., Резник А.В. и др. Использование геопространственных данных для оценки состояния техногенно нарушенных земель // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 6. С. 190-197. DOI: [10.15372/FTPRI20230617](https://doi.org/10.15372/FTPRI20230617)
34. Poggi F., Montalti R., Intrieri E. et al. Spatial and Temporal Characterization of Landslide Deformation Pattern with Sentinel-1 // Progress in Landslide Research and Technology. Springer, 2023. Vol. 2. Iss. 1. P. 321-329. DOI: [10.1007/978-3-031-39012-8_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39012-8_15)
35. Rehman M.U., Yi Zhang, Xingmin Meng et al. Analysis of Landslide Movements Using Interferometric Synthetic Aperture Radar: A Case Study in Hunza-Nagar Valley, Pakistan // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Iss. 12. № 2054. DOI: [10.3390/rs12122054](https://doi.org/10.3390/rs12122054)
36. Carabassa V., Montero P., Crespo M. et al. Unmanned aerial system protocol for quarry restoration and mineral extraction monitoring // Journal of Environmental Management. 2020. Vol. 270. № 110717. DOI: [10.1016/j.jenvman.2020.110717](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110717)
37. Zhiguo Pang, Qingguang Jin, Peng Fan et al. Deformation Monitoring and Analysis of Reservoir Dams Based on SBAS-InSAR Technology–Banqiao Reservoir // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 12. № 3062. DOI: [10.3390/rs15123062](https://doi.org/10.3390/rs15123062)
38. Gao Q., Crosetto M., Monserrat O. et al. Infrastructure monitoring using the interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2022. Vol. XLIII-B3-2022. P. 271-276. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-271-2022](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-271-2022)
39. Villarroja-Carpio A., Lopez-Sanchez J.M., Aguasca A. et al. Decorrelation rate and daily cycle in sub-daily time series of SAR coherence amplitude // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 313. № 114358. DOI: [10.1016/j.rse.2024.114358](https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114358)
40. Baek W.-K., Jung H.-S. Phase unwrapping of SAR interferogram from modified U-net via training data simulation and network structure optimization // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 314. № 114392. DOI: [10.1016/j.rse.2024.114392](https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114392)
41. Velleu E.V., Katonda V., Yapiwa H. et al. Using the Mavic 2 Pro drone for basic water quality assessment // Scientific African. 2021. Vol. 14. № e00979. DOI: [10.1016/j.sciaf.2021.e00979](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00979)
42. Turner D., Lucieer A., de Jong S.M. Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. Iss. 2. P. 1736-1757. DOI: [10.3390/rs70201736](https://doi.org/10.3390/rs70201736)
43. Низаметдинов Ф.К., Низаметдинов Н.Ф., Низаметдинов Р.Ф., Оралбай А.О. Инструментальный контроль устойчивости рудных отвалов на площадке кучного выщелачивания // Горный журнал. 2022. № 2. С. 19-22. DOI: [10.17580/gzh.2022.02.03](https://doi.org/10.17580/gzh.2022.02.03)



44. Golser J., Steiner W. International and European standards for geotechnical monitoring and instrumentation // *Geomechanics and Tunnelling*. 2021. Vol. 14. Iss. 1. P. 63-77. DOI: [10.1002/geot.202000047](https://doi.org/10.1002/geot.202000047)
45. Низаметдинов Н.Ф., Барышников В.Д., Низаметдинов Р.Ф. и др. Исследование процесса сдвижения земной поверхности при повторной разработке Жезказганского месторождения // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021. № 2. С. 11-17. DOI: [10.15372/FTPRP120210202](https://doi.org/10.15372/FTPRP120210202)
46. Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татаринцов 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](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94)
47. Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринцов В.Н. и др. Оценка устойчивости породного массива в районе подземной исследовательской лаборатории (Нижнеканский массив, участок Енисейский) // *Записки Горного института*. 2024. Т. 266. С. 167-178.
48. Мазуров Б.Т., Мустафин М.Г., Панжун А.А. Метод оценки дивергенции векторных полей деформаций земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых // *Записки Горного института*. 2019. Т. 238. С. 376-382. DOI: [10.31897/PMI.2019.4.376](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.376)
49. Анисимов О.А. Параметры рабочих бортов глубоких карьеров при формировании рабочей зоны крутонаклонными слоями // *Збірник наукових праць НГУ*. 2017. № 52. С. 47-56.
50. Бесимбаева О.Г., Хмырова Е.Н., Олейникова Е.А., Касымжанова А.Е. Моделирование устойчивости ограждающих сооружений золоотвала // *Горные науки и технологии*. 2023. Т. 8. № 4. С. 303-312. DOI: [10.17073/2500-0632-2022-11-30](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-30)

Авторы: **Виктория Владимировна Казанцева**, магистр техн. наук, преподаватель (НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, Республика Казахстан), аспирант (Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия), kazantseva.v@kstu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5915-1677>, **Дмитрий Сергеевич Ожигин**, PhD, доцент (НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, Республика Казахстан), <https://orcid.org/0000-0002-2443-3068>, **Николай Сергеевич Косарев**, канд. техн. наук, доцент (Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия), старший научный сотрудник (Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-1806-3651>, **Асель Куандыковна Сатбергенова**, магистр техн. наук, старший преподаватель (НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, Республика Казахстан), <https://orcid.org/0000-0001-5806-2827>, **Светлана Борисовна Ожигина**, канд. техн. наук, доцент (НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, Республика Казахстан), <https://orcid.org/0000-0001-7986-2858>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Минералы группы кричтонита в оолитах оруденелых вулканокластитов Рудногорского железорудного месторождения (Восточная Сибирь)

Н.Р.Аюпова✉, В.В.Масленников, А.С.Целуйко, У.А.Ятимов, С.М.Лебедева

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия

Как цитировать эту статью: Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Целуйко А.С., Ятимов У.А., Лебедева С.М. Минералы группы кричтонита в оолитах оруденелых вулканокластитов Рудногорского железорудного месторождения (Восточная Сибирь) // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 157-171. [EDN VTXHPQ](#)

Аннотация

Отмечено присутствие минералов группы кричтонита (МГК) в оолитах оруденелых вулканокластитов Рудногорского железорудного месторождения (Восточная Сибирь). Для оолитов характерны концентрически-зональное строение обломочной составляющей, выраженное в последовательной смене зон: гематит-сметитовое ядро → сметит-хлоритовая → хлорит-гранатовая → апатит-хлоритовая зоны, и обволакивающая обломок тонкослоистая магнетитовая кайма. Редкие кристаллические агрегаты минералов группы кричтонита в оолитах выявлены в периферийной апатит-хлоритовой зоне обломков перед магнетитовой каймой. По химическому составу и КР-спектрам МГК диагностированы как кричтонит и давидит-Се. В составе кричтонита определены, мас. %: TiO_2 63,73-70,69, FeO 18,03-23,58, SrO 2,24-4,03, CaO 2,22-4,10, MgO 0,33-1,02, Al_2O_3 до 2,01, MnO до 0,54 и Ce_2O_3 до 1,88. Давидит-Се обычно сосредоточен по краям кричтонита и содержит, мас. %: TiO_2 60,54-62,28, FeO 22,67-25,77, Ce_2O_3 3,18-5,20, La_2O_3 2,47-2,74 и SrO 0,58-0,64. В МГК отмечается присутствие UO_2 до 4,69 мас. %. Установлены сложные процессы разрушения МГК и замещения анатазом с выделением собственных минеральных фаз РЗЭ (анзаит-Се) и U (уранинит) и последующего превращения анатаза в рутил. Последовательность минералообразования в обломках свидетельствует, что образование и рост кристаллов МГК являются результатом литификации накопленного титана и элементов-примесей в процессах сметитизации базальтовых обломков. Дальнейшие процессы преобразования минерального вещества связаны с разложением кричтонита на простые оксиды с отложением собственных минералов РЗЭ и U. Титанит является продуктом завершающих скарновых этапов рудообразования.

Ключевые слова

минералы группы кричтонита; анатаз; рутил; титанит; оолиты; магнетитовые руды; Рудногорское месторождение; Восточная Сибирь

Финансирование

Исследования выполнены в рамках проекта РНФ № 22-17-00215. Полевые работы проводились по госбюджетной теме ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 122031600292-6.

Поступила: 26.06.2024

Принята: 10.04.2025

Онлайн: 03.09.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Минералы группы кричтонита (МГК) относятся к сложным оксидам с общей структурной формулой $^{\text{XII}}\text{A}^{\text{VI}}\text{B}^{\text{IV}}\text{T}_2^{\text{VI}}\text{C}_{18}(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_{38}$, где $^{\text{XII}}\text{A} = \text{K}, \text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ca}, \text{Na}, \text{La}, \text{Ce}, \text{Pb}$; $^{\text{VI}}\text{B} = \text{Mn}, \text{Y}, \text{U}, \text{Fe}, \text{Zr}, \text{Sc}$; $^{\text{VI}}\text{C}_{18} = \text{Ti}, \text{Fe}, \text{Cr}, \text{V}, \text{Nb}, \text{Mn}, \text{Al}$; $^{\text{IV}}\text{T}_2 = \text{Fe}, \text{Mg}, \text{Zn}, \text{Mn}$ (римскими цифрами обозначены координационные числа катионов) [1-3]. Систематически в их составе присутствуют только Ti, Fe и O, где атомов Ti приходится от 10 до 16 на формулу [2]. Представлены МГК более чем 16 утвержденными минеральными видами. По преобладанию крупных катионов (позиция А) выделены: кричтонит (Sr), лаверингит (Ca), ландаунит (Na), давидит (U+РЗЭ), сенаит (Pb), линдслейит (Ba), матиасит (K), дессоит (Sr+Pb) [2-4]. Минералы группы кричтонита установлены в виде акцессорных минералов в различных магматических, метаморфических и метасоматических породах [2, 4]. Обычно находки этих необычных минералов, объединяющих различные несовместимые элементы, известны в виде включений в ксенокристаллах граната в кимберлитах [4-6], гранатовых



перидотитах [7] и метапелитах гранулитовой фации метаморфизма [8], генезис которых традиционно связывают с процессами мантийного метасоматоза. Известны также находки МГК в гидротермальных кварцевых жилах в метаосадочных породах [9], колчеданных рудах и метасоматитах протерозойских структур Кольского региона [10, 11]. В осадочных толщах в основном описаны аутигенные оксиды титана – брукит, анатаз и рутил, содержащие различные элементы-примеси [12-14]. Изучение минерального состава руд МГК в ассоциации с анатазом, рутилом и титанитом в оолитах оруденелых вулканокластических пород Рудногорского железорудного месторождения (Восточная Сибирь) расширит знания о генезисе и распространении этой специфической минеральной ассоциации и может послужить индикатором мобилизации Ti при формировании железорудных месторождений.

Геологическая позиция месторождения

Рудногорское месторождение – одно из крупнейших среди Ангаро-Илимских железорудных месторождений в пределах Тунгусской синеклизы Восточной Сибири (рис.1, а). Геологическое строение района характеризуется широким развитием кембрий-ордовикских пород осадочного комплекса и вулканогенно-терригенной толщи триаса [15-17]. Большинство исследователей считает, что оруденение Рудногорского месторождения, как и другие месторождения Ангаро-Илимской железорудной провинции, приурочено к своеобразным «трубчатым» структурам («трубки взрыва», или «диатремы», уходящие на глубину до 700-1200 м), возникшим в период многофазного субщелочного основного вулканизма с фреатическими явлениями, чередующимися с периодами более спокойного истечения газов [18]. Рудоносные трубки «прорывают» все стратиграфические уровни палеозойской осадочной толщи, образуя с поверхности расширенную кольцеобразную рудную зону, сложенную в основном ритмично-слоистой вулканогенно-осадочной толщей [17]. Образование такого крупного прогиба объясняется выбросом больших объемов солей из нижнекембрийских соленосных отложений при вулканизме и поствулканических процессах [15, 19].

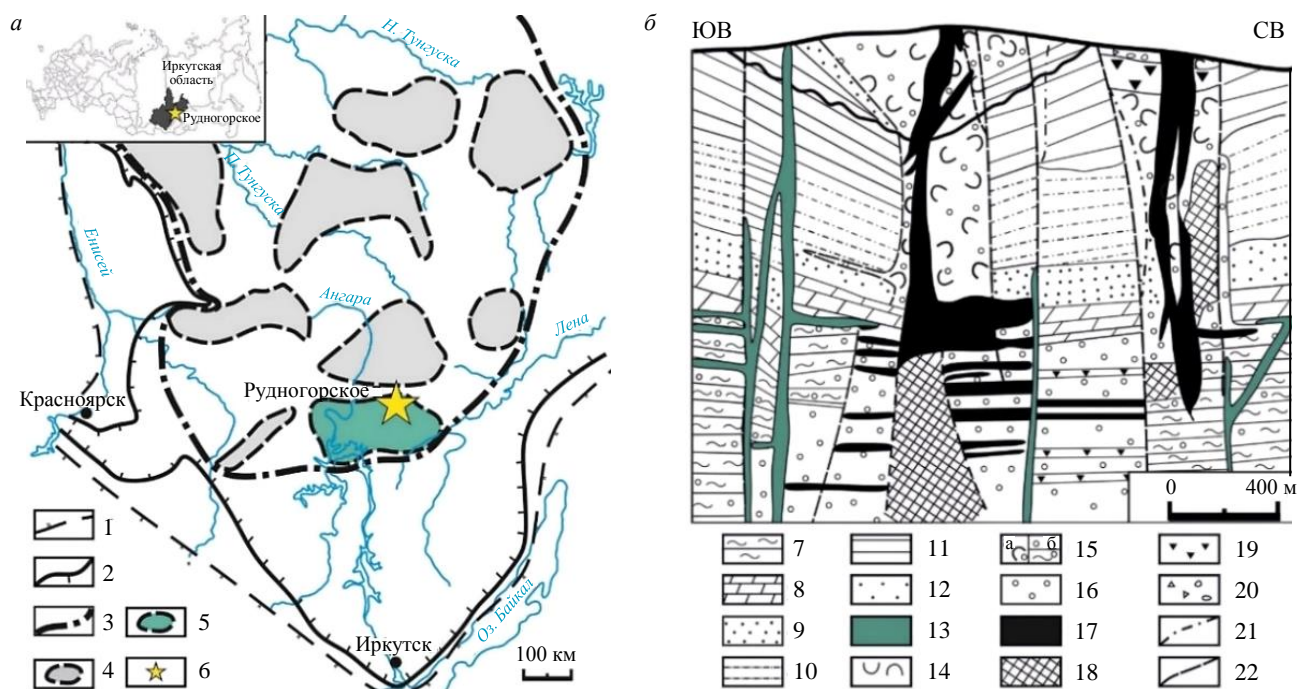


Рис.1. Железорудные месторождения Ангаро-Тунгусской провинции Восточной Сибири (на врезке – район изучаемого месторождения): а – схема размещения месторождений [20] с упрощениями (1-3 – границы: 1 – складчатого обрамления платформы, 2 – отложений чехла платформы, 3 – Ангаро-Тунгусской провинции; 4 – рудные районы; 5 – Ангаро-Илимский район; 6 – местоположение месторождения); б – геологический разрез месторождения [21] (7 – E_{2-3} : алевролиты; 8-10 – O_1-O_3 : 8 – доломиты, 9 – кварцевые песчаники, 10 – аргиллиты, мергели; 11, 12 – S_1 : 11 – аргиллиты, алевролиты, 12 – песчаники; 13-19 – $C-P_1$: 13 – долериты, 14 – вулканокластические породы, 15 – скарнированные вулканокластиты (а) и осадочные породы (б), 16 – скарны, 17, 18 – магнетитовая руда: 17 – $Fe_{руд} > 25\%$, 18 – $Fe_{руд} 14-25\%$, 19 – карбонатные породы с вкрапленным магнетитом; 20, 21 – Q: 20 – аллювий и делювий, 21 – эруптивный контакт; 22 – дизъюнктивные нарушения)



Особенностью месторождения является наличие широтного разлома, где локализована Главная рудная залежь, которая прослежена на расстояние до 3000 м при средней мощности около 40 м (рис.1, б). Залежь пересекает Центральную трубку, продолжается в Западной трубке, а на восточном фланге месторождения прослеживается в осадочных породах ордовика за пределами трубчатых структур.

Магнетитовые рудные тела, представленные в основном массивными и полосчатыми рудами, имеют крутое 60-80° падение до глубины 300-350 м. Затем, образуя раздувы и расщепляясь на более мелкие тела, выходят за пределы трубок и прослеживаются в виде многочисленных маломощных пластообразных тел, разъединенных разломными зонами или дайками долеритов до следующего рудного тела [22]. Рудовмещающими породами являются вулканокластические породы (часто с примесью осадочного обломочного материала), размер обломков которых варьируется от миллиметра до первых сантиметров, реже в несколько десятков сантиметров [23]. В более глубоких горизонтах трубок широко распространены вкрапленные магнетитовые руды. Глубинные каналы труб рассматриваются некоторыми авторами [24] как рудоподводящие структуры, а формирование магнетитовых руд – влияние гидротермальных растворов. По мнению других, не исключается, что магнетитовые тела представляют оруденелые слои вулканогенно-осадочных пород, выведенные из горизонтального положения в результате сдвиговых деформаций [22], или являются продуктами седиментогенеза и диагенеза вулканогенного материала, которые были преобразованы последующими метасоматическими процессами [25].

Рудногорское месторождение открыто в начале 1930-х годов Восточносибирским геологическим управлением. В 1949-1956 гг. Рудногорская геолого-разведочная экспедиция, организованная по заданию Министерства геологии СССР, возобновила прерванные войной разведочные и поисково-оценочные работы и произвела оценку запасов руды (290,4 млн т). В последующие годы до середины 80-х годов работы были направлены на доразведку глубоких горизонтов и флангов месторождения и подготовку месторождения для открытой добычи. С 1982 г. Рудногорское месторождение разрабатывается карьером, глубина которого на сегодняшний день составляет около 250 м. На месторождении выделены различные текстурные разновидности магнетитовых руд (массивные, полосчатые, оолитовые, крустификационные, плейчатые, тонкоплитчатые, сланцеватые, брекчиевые, конгломератовые, почковидные), которые встречаются совместно и находятся в сложных взаимоотношениях [23]. Особый интерес вызывают редкие для эндогенного рудообразования оолитовые магнетитовые руды, образующие мелкие линзовидные тела среди широко распространенных полосчатых магнетитовых руд, залегаая согласно полосчатости (слоистости). Оолитовые структуры также характерны для полосчатых и массивных руд. В данной ситуации выяснение условий образования оолитов в магнетитовых рудах месторождения приобретает важное значение для понимания процесса рудообразования в целом. Изучение и установление ранее неизвестной акцессорной минерализации в оолитах может служить корректирующим фактором при рассмотрении вопросов рудообразования.

Методы исследований

Образцы магнетитовых руд и оруденелых вулканокластитов отобраны в карьере Рудногорского месторождения. Минералого-геохимические исследования руд выполнены в ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Оптико-микроскопические исследования минерального состава оолитов проводились на микроскопе Olympus BX51 с цифровой приставкой. Химический состав минералов установлен с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBU с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act. Пределы обнаружения содержаний химических элементов не превышают 0,1 мас.%. Воспроизводимость определений составляет от 1 до 15 отн. %.

Исследование образцов методом локальной спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) выполнено на рамановском спектрометре iHR320 HORIBA JOBIN Yvon, снабженном микроскопом Olympus BX41, TV камерой и охлаждаемым CCD детектором (He-Ne лазер, $P_{\max} = 20$ мВт, $\lambda = 632,8$ нм). Спектры КР были получены в результате сложения 20 промежуточных спектров со временем накопления 30 с в 180° геометрии в диапазоне 100-2000 см⁻¹. Спектры регистрировались с зон размером 10 мкм. Идентификация МГК, а также других минералов, составляющих оолиты (сапонита, титаномагнетита, гематита, хлорита, анатаза, брукита, рутила), проводилась в сравнении с литературными данными и с использованием интернет-базы данных RRUFF [26].



Для характеристики элементов-примесей в МГК выполнен ЛА-ИСП-МС анализ на масс-спектрометре Agilent 7700х, оборудованном приставкой для лазерной абляции New Wave Research UP-213. Диаметр лазерного пучка составлял 20 мкм со скоростью 10-15 мкм/с, с энергией 3-4 Дж/см² и частотой 7 Гц. Для градуировки и расчета использовались международные стандарты синтетических базальтовых стекол: USGS GSD-1G и NIST SRM 610. Несущий газ – He 0,6 л/мин и Ar 0,95 л/мин.

Результаты исследований

Позиция оруденелых вулканокластических пород. В карьере месторождения вскрыто крутопадающее пластообразное магнетитовое рудное тело мощностью до ~30 м с выдержанным простиранием, контактирующее с субсогласно залегающим по отношению к рудному телу горизонтом вулканокластических пород (рис.2, а). Наблюдается постепенный переход вулканокластических пород в магнетитовые руды. Руды характеризуются массивными, полосчатыми, тонкоплойчатыми и брекчиевидными текстурами, следующими параллельно друг другу без какой-либо закономерности. Мощность таких полос колеблется от нескольких сантиметров до первых метров. Преобладают руды полосчатой текстуры, представляющие чередование выдержанных по простиранию

и падению слоев мощностью от первых миллиметров до 10-20 см, сложенных магнетитом различной зернистости, иногда с незначительным количеством гематита, хлорита, апатита и кальцита. В некоторых интервалах рудного тела хорошо просматривается чередование слоев магнетитовых руд и вулканокластических пород (рис.2, б). Для вулканокластических слоев характерна разная степень замещения магнетитом, вплоть до образования мономинеральных магнетитовых слоев с сохранением лишь редких вулканокластов. Для более мощных полос магнетитовых руд с массивной текстурой без заметных следов обломочного материала отмечается грубополосчатое строение. Часто массивные руды сменяются тонкополосчатыми разностями, напоминающими тонкую слоистость с характерными волнистыми текстурами и прослоями нерудного материала (рис.2, в). Оолитовые руды распространены в виде небольших линзовидных тел (1,0×3,0 м) малой мощности, в которых наблюдается последовательная смена оолитового материала по крупности (рис.2, г). В некоторых интервалах рудного тела массивные и полосчатые руды также сложены магнетитовыми оолитами в магнетитовом цементе (рис.2, д).

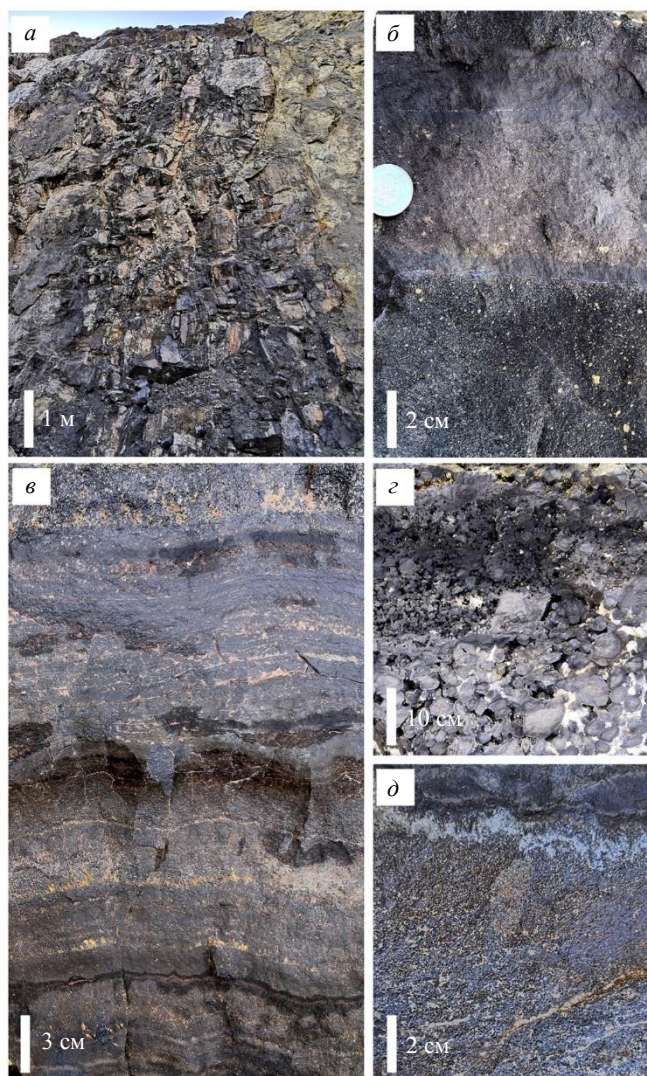


Рис.2. Тектурные типы руд: а – постепенный контакт магнетитовых руд с вулканокластическими породами;

б – полосчатая магнетитовая руда;

в – тонкослоистая магнетитовая руда;

г – градационно-слоистая оолитовая руда;

д – оолитовый слой массивной текстуры. Фото стенки карьера

Оруденелые вулканокластические породы контактируют с рудным телом в северо-западной части карьера. Характерной особенностью вулканокластических пород является ооидная форма обломков: сглаженно-угловатые и угловатые обломки темно-серых, светло-серых и серо-зеленоватых цветов обволакиваются и замещаются магнетитовой



каймой различной мощности (рис.3, а). Толщина магнетитовой каймы обломков разная: от тоненькой (до 1 мм) увеличивается вплоть до образования сплошных магнетитовых оолитов концентрически-зонального строения, часто с сохранением в ядерной части реликтов обломочного материала. Слегка касаясь друг друга, оолиты погружены в цементирующую массу, состоящую из магнетита, кальцита и хлорита. Все стадии преобразования нерудных обломков, от образования магнетитовой каймы до превращения в оолиты магнетитового состава, довольно часто прослеживаются даже в пределах одного образца.

Внутреннее строение оолитов. Обломки в оолитах обычно угловатых форм с изрезанными ограничениями; имеют стекловатый облик и оконтурены магнетитовой каймой (рис.3, а). Их размер

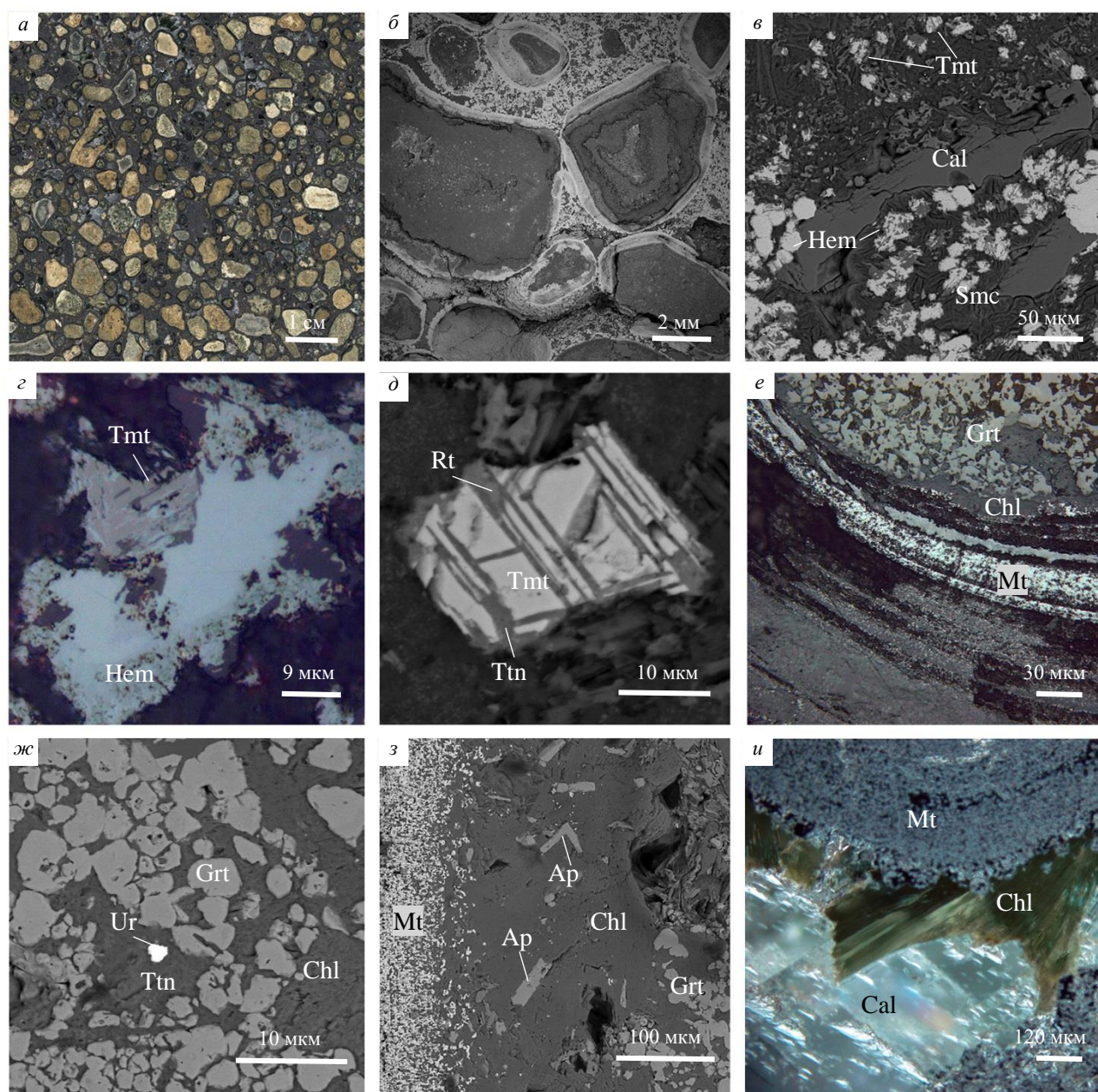


Рис.3. Минеральный состав оолитов вулканокластов: а – вулканокластическая порода; б – концентрически-зональное строение обломков; в – гематит (Hem)-сметитовое (Smc) ядро, Cal – кальцитовые прожилки; з – замещение титаномagnetита (Tmt) гематитом в ядре оолитов; д – разложение титаномagnetита с образованием рутила (Rt) и титанита (Ttn) в сметит-хлоритовой зоне; е – хлорит-гранатовая (Grt), хлоритовая (Chl) и магнетитовая (Mt) зоны; ж – включение уранинита (Ur) в титаните хлорит-гранатовой зоны; з – кристаллы апатита (Ap) в хлоритовой зоне; и – нарастание хлорита на поверхности оолита. Фото полированного образца (а); СЭМ-фото в режиме обратнорассеянных электронов (б, в, д, ж, з); отраженный свет (з, е, и); темнопольное изображение (и)



варьируется от нескольких миллиметров до 1 см. Тонкие обломочные частицы в большинстве случаев превращены в зональные магнетитовые оолиты от почти правильных сферических до эллипсоидальных форм. Цемент, заполняющий пространство между соприкасающимися оолитами, обычно неоднородный и обогащен магнетитом.

Обломки, являющиеся ядрами оолитов, обладают концентрически-зональным строением, выраженным сменой зон в зависимости от минерального состава (рис.3, б). Наиболее полная зональность характеризуется наличием ядра, сложенного гематит-сметитовым агрегатом, вокруг которого расположены последовательно сменяющиеся сметит-хлоритовая, хлорит-гранатовая (андрадит-гроссуляровый ряд), апатит-хлоритовая зоны и обволакивающая обломок магнетитовая оторочка с тонкой внутренней зональностью.

Сметит в ядре оолитов присутствует в виде изогнутых тонкочешуйчатых агрегатов без предпочтительной ориентации и по составу соответствует сапониту – $\text{Ca}_{0,11-0,41}(\text{Fe}^{2+}_{0,50-0,57}\text{Mg}_{2,36-2,67})_{2,9-3,2}(\text{Si}_{3,37-3,63}\text{Al}_{0,39-0,59})_{4,00}\text{O}_{10}(\text{OH})_{2,0} \times n(\text{H}_2\text{O})$. В ассоциации с сапонитом находится титаносодержащий гематит (TiO_2 до 1,15 мас.%), который замещает многочисленные выделения титаномагнетита (рис.3, в, з). Кроме того, определенный интерес представляют округлые (сферолитовые) формы гематита, которые характеризуются концентрически-зональным строением: сплошной гематит в центре сменяется каймой из радиально-волокнистого гематита. С удалением от ядра исчезает гематит, а сметит сменяется смешаннослойными агрегатами сапонит-Mg-хлорит-1, содержащими неравномерную вкрапленность (размер до 30 мкм) полуразложившегося титаномагнетита (рис.3, в). Mg-хлорит-1 ($\text{Mg}_{3,27-5,00}\text{Fe}_{0,35-0,98}\text{Al}_{0,42-0,65}\text{Ca}_{0,04-1,45})_{5,97-6,10}(\text{Si}_{3,26-3,45}\text{Al}_{0,55-0,74})_{4,00}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ представлен клинхлором. Зерна титаномагнетита в хлоритизированной массе имеют неровные очертания, характеризуются закономерно ориентированными пластинчатыми выделениями рутила и развитием титанита по краям (рис.3, д).

Хлорит-гранатовая зона состоит из округлых и угловатых зерен граната андрадит-гроссулярового ряда размером до 0,2-0,3 мм, сцементированных слюдоподобным высокомагнезиальным хлоритом-2 ($\text{Mg}_{5,27-5,61}\text{Fe}_{0,00-0,27}\text{Al}_{0,39-0,59})_{6,03-6,19}(\text{Si}_{3,20-3,25}\text{Al}_{0,75-0,88})_{4,00}\text{O}_{10}(\text{OH})$ (рис.3, е). В этой зоне отмечаются редкие обособления титанита с включениями рутила и уранинита (рис.3, ж). Хлорит-гранатовая зона, постепенно освобождаясь от граната, переходит в узкую хлоритовую зону (Mg-хлорит-2), содержащую многочисленные кристаллы апатита (рис.3, з). Наружная магнетитовая зона является постепенным продолжением хлоритовой зоны и представляет собой ритмичное тонкое переслаивание существенно магнетитовых и хлоритовых (Mg-хлорит-2) слоев (рис.3, е). По мощности наружные хлорит-магнетитовые зоны обычно уступают ядру оолитов и характеризуются развитием секущих прожилков кальцита и Mg-Fe-хлорита-3. Цементом в породе является крупнозернистая карбонат-хлорит-магнетитовая масса, где обычно наблюдается обрассание оолитов крупночешуйчатым Mg-Fe-хлоритом-3 (рис.3, и).

Минералы группы кричтонита. В апатит-хлоритовой зоне оолитов обнаружено присутствие редких кристаллов оксидов титана, размер которых варьируется от 50 до 150 мкм (рис.4, а, з). Часто они теряют кристаллографические грани и приобретают извилистые очертания с заливообразными рваными контурами (рис.4, ж). Такие образования имеют сложное внутреннее строение, выраженное в беспорядочном распределении зерен в титанитовой основной массе, отличающихся друг от друга по цвету в отраженном свете микроскопа (рис.4, б, в, д, е). Минералы серо-голубоватых оттенков в отраженном свете (рис.4, а-з) и не просвечивающие темно-бурого, почти черного, цвета в темнопольном изображении (рис.4, и) отнесены к МГК. Вокруг таких зерен часто просматривается узкая прерывистая краевая зона с более бледной окраской. Минералы группы кричтонита тесно ассоциируют с анатазовыми агрегатами ярко-голубого цвета и рутилом серого оттенка в отраженном свете и оранжево-желтых тонах в темнопольном изображении (рис.4, и). В некоторых образцах четко проявлено развитие анатаза по МГК, а рутила по анатазу (рис.4, е, и). В анатазе присутствуют реликтовые включения кричтонита и уранинита. Во многих случаях в оолитах сохраняется лишь титанит с реликтовыми включениями рутила (рис.4, к). В обломках оолитов существенно гранат-хлоритового состава наблюдается замещение МГК Ti-содержащим гранатом (TiO_2 до 3-4 мас.%) (рис.4, л, м).

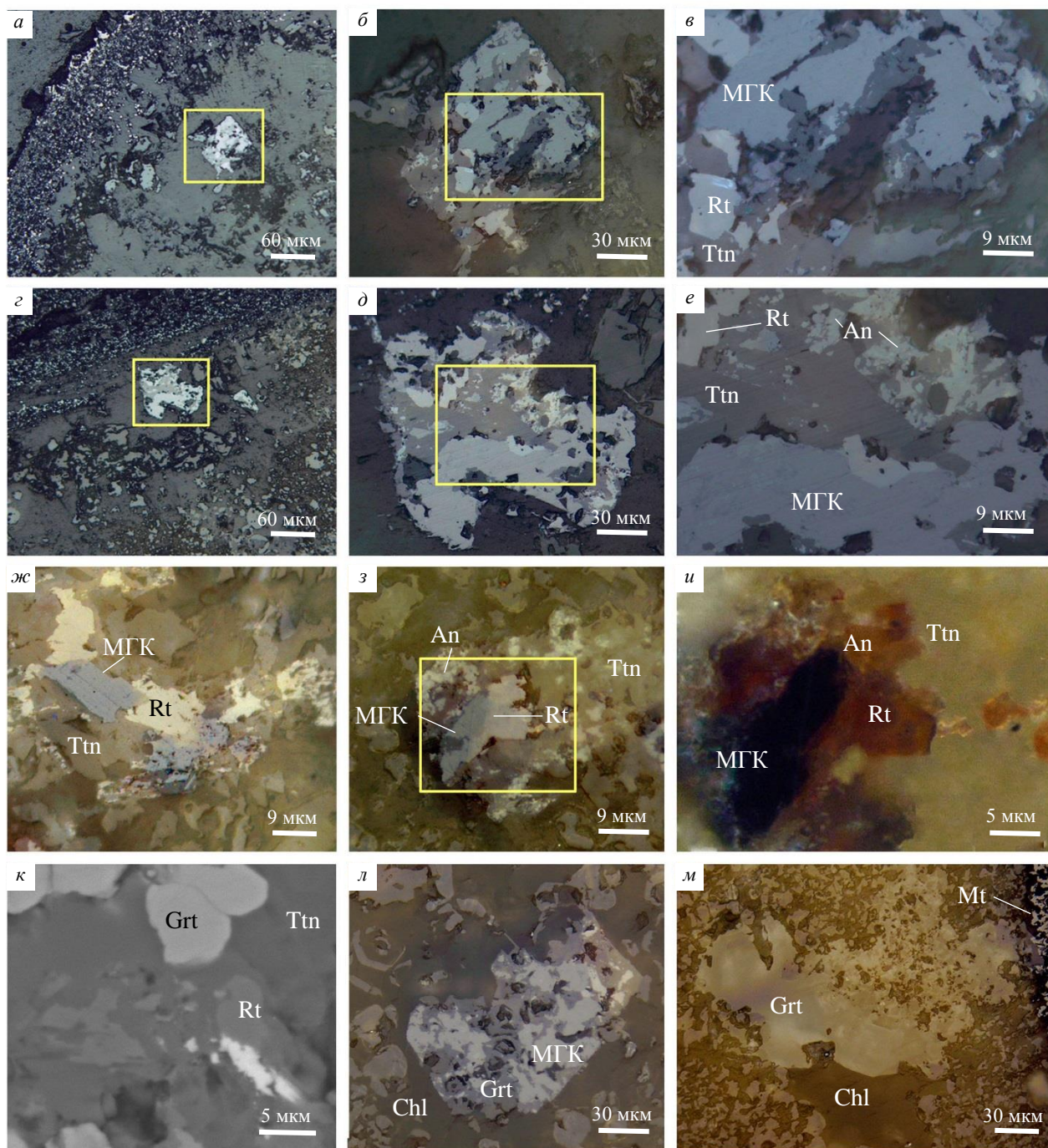


Рис.4. Минералы группы кричтонита в оолитах: а, з – позиция кристаллов МГК в хлоритовой зоне; б, в, д, е – детали рис. а и з: неоднородное внутреннее строение кристаллических агрегатов и замещение МГК анатазом (An) (голубой) и рутилом (серый); ж – взаимоотношение МГК и рутиловых агрегатов в титаните с неровными контурами; з – замещение МГК анатаз-рутиловыми агрегатами; и – темнопольное изображение рис. з; к – реликты рутила с включениями недиагностированного Се-минерала (белый) в титаните; л – замещение МГК+рутил-агрегатов гранатом; м – псевдоморфоза титансодержащего граната по МГК в хлоритовой массе; а, и, л, м – отраженный свет (и – темнопольное изображение); к – СЭМ-фото в режиме обратнорассеянных электронов
 Условные обозначения минералов см. на рис.3

Химический состав МГК. Содержание TiO_2 в МГК охватывает практически весь диапазон концентраций, варьируясь от 60,54 до 70,59 мас.%. Основными компонентами в их составе являются SrO , CaO , MnO , Ce_2O_3 , La_2O_3 и UO_2 (рис.5, табл.1). Также повсеместно присутствуют MgO и Al_2O_3 , изредка SiO_2 . По оптическим признакам и химическому составу выделены три группы сложных оксидов титана.

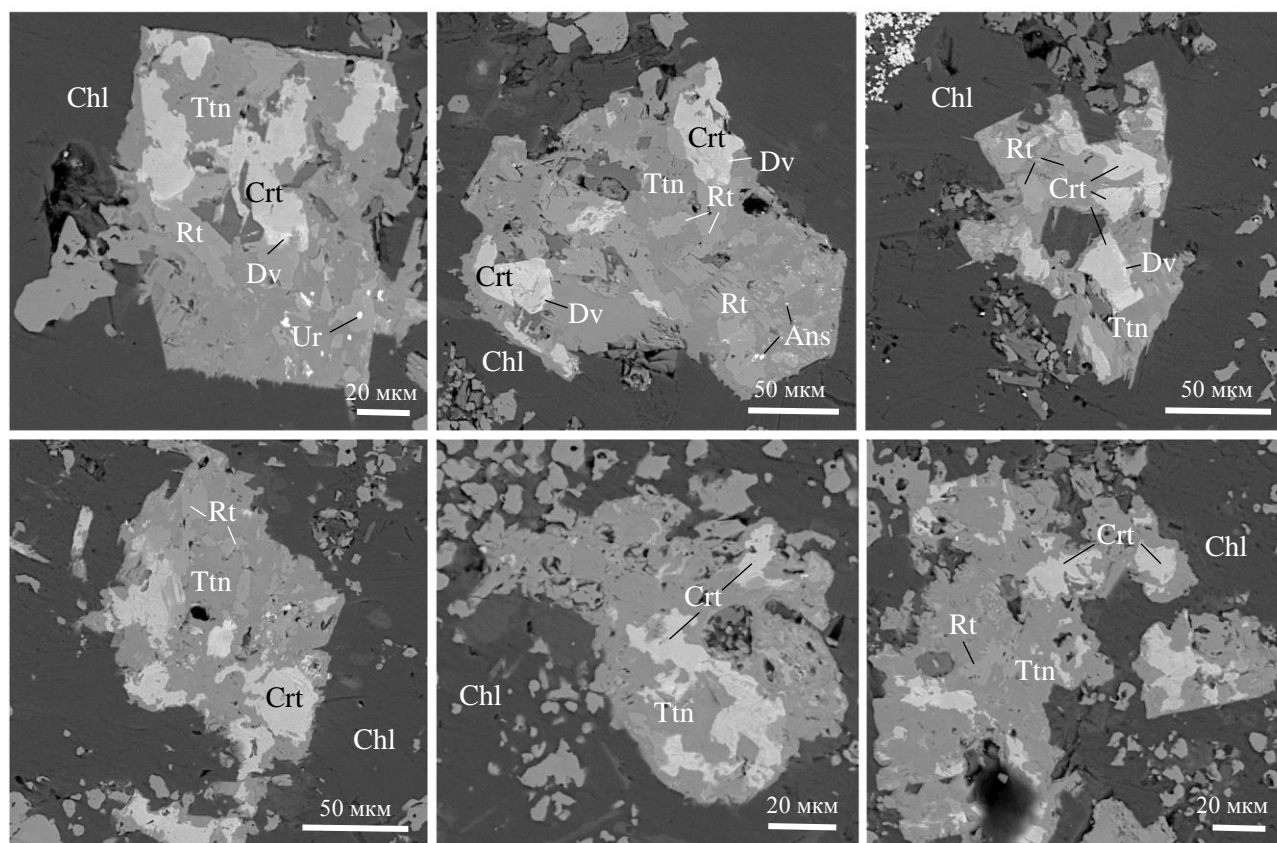


Рис.5. Минералы группы кричтонита: Crt – кричтонит; Dv – давидит-Ce; Ans – анзаит-Ce; Ur – уранинит; Rt – рутил; Ttn – титанит; Chl – хлорит. Фото в отраженных электронах

К первой группе отнесены минералы серо-голубоватого оттенка в отраженном свете оптического микроскопа, для которых характерны содержания, мас. %: TiO_2 63,73-70,69, FeO 18,03-23,58, SrO 2,24-4,03, CaO 2,22-4,10, MgO 0,33-1,02, в некоторых случаях присутствуют Al_2O_3 до 2,01, MnO до 0,54, Ce_2O_3 до 1,88, иногда La_2O_3 до 1,21 и UO_2 до 0,94 (табл.1). Изменение цвета минерала связано с вариацией содержаний MnO и Ce_2O_3 вплоть до полного их исчезновения. Структурная формула минерала, рассчитанная на 38 атомов кислорода, имеет вид $(\text{Sr}_{0,34-0,48}\text{Ca}_{0,26-0,45}\text{Ce}_{0-0,20}\text{La}_{0-0,13})_{1,00}(\text{Ca}_{0-0,79}\text{U}_{0-0,06})\text{Fe}_{2,00-2,87}(\text{Ti}_{3,92-15,04}\text{Fe}_{1,88-3,12}\text{Mg}_{0,14-0,43}\text{Mn}_{0-0,13}\text{Al}_{0-0,67}\text{Si}_{0-0,34})_{17,14-17,99}\text{O}_{38}$, что позволяет отнести минерал к кричтониту. Полученные составы кричтонита указывают, что в структуре минерала «крупные катионы» Sr и Ce вместе с второстепенным Ca полностью занимают позицию А (M0), а U с Ca входят в позицию В (M1).

На рис.6, а показаны КР спектры МГК, накопленные в интервале от 100 до 1400 cm^{-1} , которые также позволяют идентифицировать минерал как кричтонит. Главные пики кричтонита локализованы в интервалах 710-720, 130-200, 300-315, 410-440 cm^{-1} . Несмотря на весьма похожую форму спектров изученных фаз имеются небольшие расхождения в расположении главных пиков, обусловленных различиями в составе элементов-примесей в кричтоните.

Ко второй группе минералов отнесены минеральные фазы, образующие узкие краевые зоны или линзочки вокруг кричтонита с тонкими включениями уранинита. По сравнению с кричтонитом, в их химическом составе наблюдается снижение содержаний, мас. %: TiO_2 60,54-62,28 и SrO 0,58-0,64, увеличение FeO 22,67-25,77, Ce_2O_3 3,18-5,20 и отмечается постоянное присутствие La_2O_3 2,47-2,74, иногда UO_2 до 4,69. Формула минерала, рассчитанная на 38 атомов кислорода, имеет вид $(\text{Ce}_{0,35-0,56}\text{La}_{0,26-0,31}\text{Sr}_{0,07-0,10}\text{Ca}_{0,08-0,19})\text{Ca}_{0,39-0,71}\text{Fe}_{2,00}(\text{Ti}_{13,44-13,92}\text{Fe}_{3,07-3,72}\text{Mg}_{0,20-0,27}\text{Si}_{0-0,21}\text{Al}_{0-0,41}\text{Si}_{0-0,21})_{17,38-17,77}\text{O}_{38}$, что характерно для давидита-Ce. Качественные спектры КР давидита-Ce не получились из-за присутствия в нем многочисленных включений уранинита.



Таблица 1

Химический состав минералов титана, мас. %

TiO ₂	FeO*	CaO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SrO	Nb ₂ O ₅	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	UO ₂	Σ	Структурные формулы
Кричтонит													
70,69	18,21	4,10	0,39	0,42	—	—	2,95	—	—	1,03	—	97,79	(Sr _{0,44} Ce _{0,11} Ca _{0,45}) _{1,00} Ca _{0,79} Fe _{2,00} (Ti _{15,04} Fe _{1,88} Mg _{0,16} Mn _{0,10}) _{17,18} O ₃₈
66,85	18,03	3,48	0,53	0,54	—	1,16	2,83	—	0,84	1,78	0,89	96,93	(Sr _{0,43} Ce _{0,19} La _{0,09} Ca _{0,29}) _{1,00} (Ca _{0,79} U _{0,06}) _{0,85} Fe _{2,00} (Ti _{14,52} Fe _{1,92} Si _{0,34} Mg _{0,23} Mn _{0,13}) _{17,14} O ₃₈
63,73	23,37	2,22	0,66	0,40	0,58	—	3,10	0,23	1,11	1,30	0,94	97,64	(Sr _{0,48} Ce _{0,14} La _{0,12} Ca _{0,26}) _{1,00} (Ca _{0,43} U _{0,06} Nb _{0,02}) _{0,51} Fe _{2,00} (Ti _{13,96} Fe _{3,12} Mg _{0,29} Al _{0,20} Mn _{0,10}) _{17,66} O ₃₈
66,12	22,82	2,66	1,02	0,34	0,97	—	2,98	—	—	1,32	—	98,23	(Sr _{0,45} Ce _{0,14} Ca _{0,41}) _{1,00} Ca _{0,40} Fe _{2,00} (Ti _{14,11} Fe _{2,87} Mg _{0,43} Al _{0,32} Mn _{0,08}) _{17,85} O ₃₈
66,84	21,88	1,37	0,49	0,75	0,23	—	4,03	0,28	—	1,41	0,92	98,20	(Sr _{0,61} Ce _{0,15} Ca _{0,24}) _{1,00} (Ca _{0,18} U _{0,08} Nb _{0,03}) _{0,29} Fe _{2,00} (Ti _{14,47} Fe _{2,74} Mg _{0,21} Mn _{0,18} Al _{0,08}) _{17,68} O ₃₈
65,04	21,91	2,72	0,86	0,37	2,01	—	2,26	—	1,21	1,88	—	98,26	(Sr _{0,34} Ce _{0,20} La _{0,13} Ca _{0,33}) _{1,00} Ca _{0,50} Fe _{2,00} (Ti _{13,92} Fe _{2,69} Al _{0,67} Mg _{0,36} Mn _{0,09}) _{17,74} O ₃₈
67,56	21,83	3,47	0,54	—	0,55	0,42	2,59	—	—	0,90	—	97,25	(Sr _{0,39} Ce _{0,09} Ca _{0,52}) _{1,00} Ca _{0,53} Fe _{2,00} (Ti _{14,36} Fe _{2,64} Mg _{0,23} Al _{0,18} Si _{0,12}) _{17,53} O ₃₈
66,93	22,10	3,11	0,77	—	1,12	—	2,24	—	—	0,85	—	97,12	(Sr _{0,34} Ce _{0,09} Ca _{0,57}) _{1,00} Ca _{0,38} Fe _{2,00} (Ti _{14,30} Fe _{2,73} Al _{0,38} Mg _{0,33}) _{17,73} O ₃₈
68,93	19,98	3,74	0,41	—	0,46	—	2,78	—	—	0,99	0,42	97,77	(Sr _{0,42} Ce _{0,10} Ca _{0,48}) _{1,00} (Ca _{0,66} U _{0,03}) _{0,66} Fe _{2,00} (Ti _{14,71} Fe _{2,27} Mg _{0,17} Al _{0,15}) _{17,31} O ₃₈
69,22	20,59	3,53	0,33	—	0,32	—	2,80	—	—	—	—	96,79	(Sr _{0,42} Ca _{0,48}) _{1,00} Ca _{0,50} Fe _{2,00} (Ti _{14,80} Fe _{2,40} Mg _{0,14} Al _{0,11}) _{17,45} O ₃₈
69,28	21,45	3,86	0,49	—	0,44	—	2,63	—	—	—	—	98,14	(Sr _{0,39} Ca _{0,61}) _{1,00} Ca _{0,55} Fe _{2,00} (Ti _{14,62} Fe _{2,53} Mg _{0,20} Al _{0,15}) _{17,50} O ₃₈
67,05	23,58	2,32	0,64	—	1,76	—	2,49	—	—	—	—	97,85	(Sr _{0,39} Ca _{0,70}) _{1,07} Fe _{2,00} (Ti _{14,16} Fe _{2,98} Al _{0,58} Mg _{0,27}) _{17,99} O ₃₈
Давидит-Се													
60,71	23,91	2,5	0,61	0,32	0,56	0,71	0,64	—	2,38	5,2	—	97,54	(Ce _{0,56} La _{0,26} Sr _{0,10} Ca _{0,08}) _{1,00} Ca _{0,71} Fe _{2,00} (Ti _{13,44} Fe _{3,30} Mg _{0,27} Si _{0,21} Al _{0,19} Mn _{0,08}) _{17,49} O ₃₈
60,54	25,77	1,87	0,50	—	1,17	—	0,65	—	2,47	3,95	—	96,91	(Ce _{0,43} La _{0,27} Sr _{0,10} Ca _{0,08}) _{1,00} Ca _{0,39} Fe _{2,00} (Ti _{13,43} Fe _{3,72} Al _{0,41} Mg _{0,22}) _{17,77} O ₃₈
60,97	23,30	2,70	0,57	—	—	—	0,58	—	2,74	3,69	0,86	95,42	(Ce _{0,41} La _{0,31} Sr _{0,09} Ca _{0,19}) _{1,00} (Ca _{0,68} U _{0,06}) _{0,74} Fe _{2,00} (Ti _{13,83} Fe _{3,29} Mg _{0,26}) _{17,38} O ₃₈
62,28	22,67	2,25	0,45	—	0,84	—	0,44	—	—	3,18	4,69	96,71	(Ce _{0,35} Sr _{0,07} Ca _{0,58}) _{1,00} (U _{0,31} Ca _{0,14}) _{0,45} Fe _{2,00} (Ti _{13,92} Fe _{3,07} Al _{0,29} Mg _{0,20}) _{17,48} O ₃₈
Анагаз													
88,67	5,30	1,25	—	—	—	0,68	0,08	—	—	—	0,62	96,60	(Ti _{0,94} Fe _{0,06} Ca _{0,02} Si _{0,01} Sr _{0,001} U _{0,002}) _{1,02} O ₂
Рутил													
96,20	2,62	0,79	—	—	—	—	—	0,46	—	—	—	100,07	(Ti _{0,97} Fe _{0,03} Ca _{0,01} Nb _{0,002}) _{1,01} O ₂
98,34	0,51	0,55	—	—	—	—	—	0,56	—	—	—	99,97	(Ti _{0,99} Fe _{0,01} Ca _{0,01} Nb _{0,002}) _{1,01} O ₂
Титанит													
35,7	0,75	28,23	—	—	2,81	31,69	—	—	—	1,16	—	100,35	(Ca _{0,98} Ce _{0,01}) _{0,99} (Ti _{0,87} Al _{0,11} Fe _{0,02}) _{1,00} Si _{1,03} O ₅
34,42	0,67	28,83	—	—	3,74	32,23	—	—	—	—	—	99,88	Ca _{1,00} (Ti _{0,84} Al _{0,14} Fe _{0,02}) _{1,00} Si _{1,04} O ₅
37,18	1,23	28,99	—	—	0,97	31,82	—	—	—	—	—	100,2	Ca _{1,01} (Ti _{0,91} Al _{0,04} Fe _{0,03}) _{0,98} Si _{1,03} O ₅
37,84	0,76	28,52	—	—	2,64	31,95	—	—	—	—	—	101,7	Ca _{0,97} (Ti _{0,91} Al _{0,10} Fe _{0,02}) _{1,03} Si _{1,02} O ₅

Примечание. Структурные формулы рассчитаны на основе: 2 – атома кислорода для анагаза и рутила, 5 – титанита и 38 – кричтонита и давидита-Се; * – железо условно принято как Fe³⁺.

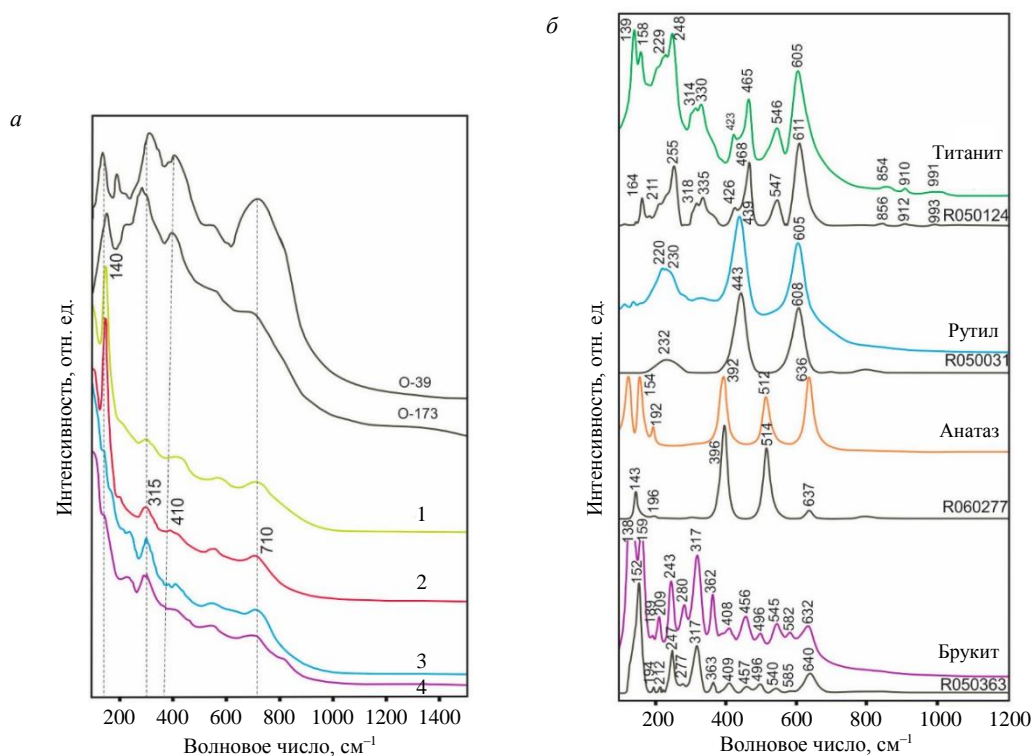


Рис.6. Спектры КР минералов титана в оолитах:

а – кричтонита (1-4) в сравнении со спектрами кричтонита (О-39, О-173) из работы [6];

б – рутила, анатаза, брукита и титанита в сравнении со спектрами из базы данных RRUFF [26]

Третья группа минералов представлена в виде тонких включений (до 3-5 мкм) в анатазе, рутиле и иногда в титаните. Химический состав, мас. %: Ce_2O_3 21,82, La_2O_3 8,33, Pr_2O_3 2,01, Nd_2O_3 5,04, TiO_2 36,99 – близок к составу анзаита-Се и дает формулу, рассчитанную на основе 18 атомов кислорода и двух групп OH : $(\text{Ce}_{2,18}\text{Nd}_{0,85}\text{La}_{0,41}\text{Pr}_{0,26})_{4,15}\text{Ti}_{5,68}\text{O}_{18}(\text{OH})_2$. Разложение кричтонита происходит с образованием анатаза и в дальнейшем с превращением анатаза в рутил (табл.2). В рутиле обнаружены примеси, мас. %: CaO 0,55-0,79, FeO 0,51-2,62, редко Nb_2O_5 0,46-0,56. КР спектры простых оксидов титана показывают присутствие не только анатаза, но и брукита (рис.6, б). Химический состав титанита неоднородный из-за вариации в содержаниях FeO и Al_2O_3 , в редких случаях отмечаются примеси Ce_2O_3 (см. табл.1).

Таблица 2

Элементы-примеси в кричтонит-анатаз-рутиловых агрегатах, г/т

Элементы	Содержание					Элементы	Содержание				
Ti	28,7	27,25	13,91	28,5	21,97	Nb	890	857	290	713	952
Fe	5,45	2,13	7,28	10,25	1,1	Ba	1410	626	340	1760	220
Si	8,38	10,06	13,5	13	10,77	Th	202	104	54,5	322	245
Ca	9,15	11,58	16,8	10,24	16,52	U	3520	1630	636	3390	757
Na	350	336	92	521	174	La	3940	573	401	2860	638
Mg	830	2040	3240	3060	2040	Ce	5250	2030	1203	5340	2180
Al	3030	8060	18200	2860	6130	Pr	442	365	153,6	590	335
V	382	481	714	325	318	Nd	1418	1580	545	1990	1478
Cr	16	12	83	22	25	Sm	245	301	105	271	260
Mn	1549	249	265	1754	60	Eu	88	87,8	39,9	108	93,1
Co	2,9	1,98	0,88	37,9	2,4	Gd	203	239	82	246	223
Ni	0,7	2,9	1	6,8	0,6	Tb	32,7	31,1	10,7	30,7	28,1
Zn	168	133	29	315	34	Dy	144	156	75	149	148,3
Ga	21,6	11,8	9,8	25,1	15,9	Ho	24,4	22,7	12,2	24,8	22,2
Sr	8300	670	341	13030	268	Er	67,9	51,3	29,2	50,2	35,2
Y	459	419	276	426	366	Tm	5,9	4,9	4,12	4,83	2,96
Zr	881	779	996	207	349	Yb	24,4	23,4	26,5	16,8	17,7
						Lu	2,86	1,75	2,87	1,83	1,25

Примечание. Результаты ЛА-ИСП-МС анализов; Ti, Fe, Si, Ca – в мас. %.



ЛА-ИСП-МС исследования. В кричтонит-анатаз-рутиловых агрегатах установлены аномально высокие, но сильно варьирующие содержания, г/т: Sr 268-13030, U 757-3520, Mn 60-1754, V 318-714, Zr 207-996, Y 276-459, Nb 290-952, Ba 220-1760, Zn 29-315, Na 92-521 и Th 54,5-322 (табл.2). Выявленные высокие содержания, мас. %: Si 8,38-13,50 и Ca 9,15-16,80, вероятно, связаны с захватом титанита в точках анализа. Также для кричтонит-рутиловых агрегатов определены высокие содержания РЗЭ (Σ РЗЭ 2678-12832 г/т), среди которых аномально высокими являются, г/т: La 401-3940, Ce 1203-5340, Nd 545-1990 и Pr 154-590 (табл.2).

Обсуждение результатов исследований

Источник вещества для оолитов. Происхождение оолитовых руд Ангаро-Илимского рудного района в научной литературе объясняется различными способами их образования: путем метасоматического замещения карбонатных оолитов и их обломков с унаследованием концентрически-зонального строения; известняков с массивной, полосчатой и иными текстурами; силикатных обломков и в результате кристаллизационного отложения вещества оолитов непосредственно из гидротермального раствора [23, 27]. Отметим, что многие вопросы формирования, не только оолитов, но и магнетитовых руд района исследований, приуроченных к зоне внутриконтинентального рифта [22], до сих пор продолжают оспариваться и переосмысливаться в связи с накоплением нового фактического материала. Полученный нами материал отражает представления о доскарновом (осадочном) и скарновом этапах рудообразования [23-25]. Представленные текстурные типы руд свидетельствуют, что магнетитовые руды сформировались в результате преобразований вулканокластических пород с накоплением железа, подобно некоторым осадочным железорудным месторождениям [28]. Горизонтально-слоистое строение, иногда асимметричное градиционное сложение рудных слоев, постепенные или резкие переходы к смежным нерудным слоям являются одним из важнейших морфологических аргументов осадочного вулканокластического и рудного ила в водном бассейне. Крутое залегание рудного тела может рассматриваться как сползание или опускание вулканогенно-осадочных отложений и рудных тел вовнутрь трубчатых структур, образуя крутые складки, нарушая их горизонтальное залегание [22]. Превращение гематитовых руд в магнетитовые связано с более поздними гидротермальными растворами при скарновых процессах [23]. Однако авторы не отрицают наличия здесь руд, образование которых связано с иными формами проявления метасоматоза и отложения рудного вещества.

Изученный нами обломочный материал в оолитах по структурно-текстурным особенностям и минеральному составу соответствует смектитизированным обломкам базальтов, состоящим из продуктов разложившегося вулканического стекла с редкой вкрапленностью основного плагиоклаза и интерстиционного титаномagnetита, характеризующимся повышенными значениями железистости ($\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ до 20 мас.%) и титанистости (TiO_2 2,0-2,5 мас.%) [22, 23]. Центральное сапонит-гематитовое ядро оолитов напоминает минеральные ассоциации, образующиеся при трансформации вулканического стекла базальтов в сапонит с выделением Fe-фаз в низкотемпературных изменениях при взаимодействии с морской водой [29]. Обнаруженный гематит в виде ступчатых обособлений коллоидного типа в ассоциации с сапонитом в ядре оолитов может служить важным свидетельством в пользу первичности оксигидроксидов железа при их образовании. Специфику образования зональных магнетитовых и хлорит-магнетитовых зон вокруг обломочных зерен, часто протекавших с их замещением, можно объяснить с точки зрения роста оолитов за счет адсорбирования накопленного железистого и глинистого материала (вследствие гидролиза и растворения вулканогенного) на тонкодисперсных и высокопористых продуктах разложения вулканического стекла в условиях локального изолированного сильносоленого бассейна при часто повторяющемся взмучивании осадков, благодаря пульсирующим выходам газов. Наличие деформированных оолитов является доказательством их размягченного состояния в момент захоронения и, следовательно, первичного образования. Сходный минеральный состав оолитов и цемента в вулканокластитах свидетельствует, что состав флюидов с образования оолитов и до осадения цемента оставался постоянным.

Стадиальный характер процессов аутигенных преобразований, выраженный в последовательной смене глинистых минералов от ядра (сапонит) к периферии обломочного материала (хлорит),



свидетельствует об изменениях, связанных с более поздними гидротермальными флюидами. В одних случаях изменения охватили периферии обломков, а в других – обломки разлагаются на большую глубину, вплоть до их центральных частей замещаясь хлоритом и гранатом. Наблюдаемый эволюционный ряд превращений Mg-хлоритов близкого состава $Al_{общ} < 2,2$ и $K_{Fe} = 0-0,30$, где $Al_{общ} = Al_{IV} + Al_{VI}$, $K_{Fe} = Fe/(Fe + Mg)$ характерен для хлоритов соленосных бассейнов [30], что согласуется с участием газонасыщенных рассольных хлор-магниевого вод, поступающих из нижнекембрийских соленосных толщ, в рудообразовании [24]. Появление магнетит-хлоритовой оторочки и в целом магнетитизация обломков отражают процессы завершающих скарновых этапов рудообразования.

Последовательность образования минералов титана. В обломках оолитов титаномagnetит представляет реликтовый минерал, который находится в слабоизмененной (сметитизированной) основной стекловатой массе ядра и замещается гематитом, где отмечается примесь TiO_2 до 1,15 мас.% (см. рис.3, г). Наличие решетчатых ламелей в титаномagnetите может указывать на ранний магматический процесс окисления ильменита в исходном веществе базальтовых обломков. Замещение титаномagnetита гематитом объясняется низкотемпературным окислением двухвалентного железа до трехвалентного и его частичным выносом в окислительно-щелочных условиях преобразования обломков толеитовых базальтов. В научной литературе отмечается, что на начальных стадиях низкотемпературного взаимодействия базальт – морская вода, когда силикатная часть породы еще слабо реагирует на воздействие морской воды, наблюдается переход титаномagnetита в титаномagnetит, а затем в титаногематит [31, 32].

Под воздействием агрессивных щелочных вод высвобожденный титан в процессах сметитизации базальтов, в связи с малой его подвижностью, мог накапливаться в виде гетерогенного коллоидного геля $TiO_2 \cdot nH_2O$ и удерживаться в сметитизированном аморфном веществе. Считается, что процессы изменения базальтовых стекол происходят с выносом большинства элементов-примесей и накоплением Fe и Ti на поверхности стекла [30, 33]. Известно, например, выделение Ti из поровых флюидов в виде $Ti(OH)_4$ и его осаждение в виде тонкодисперсного TiO_2 при дегидратации осадков [34]. Предполагается, что накопленный гель TiO_2 в оолитах явился превосходным сорбентом, способствуя избирательной фиксации элементов-примесей разложившегося базальтового стекла. Например, по данным статьи [35] сорбционная емкость водного гидроксида титана вида $TiO_2 \cdot 9H_2O$ к уранил-иону UO_2^{2+} составляет $2,43 \cdot 10^{-4}$ моль/г, что в пересчете на концентрацию урана получается 5,88 мас.% U.

В процессах литификации сметитизированного материала происходила собирательная кристаллизация обогащенных элементами-примесями метастабильных тонкодисперсных агрегатов TiO_2 в поровом пространстве, между обломочной составляющей и аутигенной железистой каймой до исчерпания его запаса. Кроме того, оксигидроксидная железистая кайма вокруг обломков могла препятствовать выносу элементов-примесей за пределы оолитов [36]. Присутствие рассольных вод способствовало быстрой кристаллизации аутигенных оксидов титана более сложного состава и их росту в слабоконсолидированном окружении [37]. Таким образом, МГК является результатом перекристаллизации сформировавшихся сгустков тонкодисперсных агрегатов TiO_2 , обогащенных элементами-примесями. Считается, что высокие содержания Sr отражают конечные продукты взаимодействия морской воды с базальтом при достаточно низких (<50) отношениях вода – порода и обогащение Sr гелеобразных Ti-фаз [38]. Выделение избыточных компонентов в виде собственных минеральных фаз (анзаит-Се, уранинит) связано замещением МГК анатазом и в последующих процессах наиболее устойчивым рутилом. Известно, что переход от анатаза к рутилу термодинамически выгоден при всех температурах, а для образования анатаза необходимы низкотемпературные щелочные среды, контролируемые химией поровых вод [39]. Присутствие оксидов редкоземельных элементов, по-видимому, облегчает кристаллизацию анатаза, по сравнению с рутилом [40]. Наличие псевдоморфоз граната по МГК свидетельствует об образовании кричтонита до процессов скарнирования. Замещение кричтонит-рутиловой ассоциации титанитом относится к более поздним этапам рудообразования, связанным с дальнейшим концентрированием рассолов, которые приобретают свойства гидротермальных растворов, приведших к метасоматическим изменениям [15, 20-22].



МГК из различных условий минералообразования. Минералы группы кричтонита являются наиболее распространенными и достаточно изученными в метаморфических породах сверхвысоких давлений, мантийных перидотитах и пироксенитах [4, 7, 8]. Кричтонит в мантийных гранатах этих пород отнесен к титанатам хрома (16 мас.% Cr_2O_3 , 58 мас.% TiO_2), обогащенным ZrO_2 (до 5 мас.%), а также К, Ва, Са и РЗЭ (до 5 мас.% оксидов) [4, 7, 8, 41]. Минералы группы кричтонита, богатые Al (1,1-4,5 мас.% Al_2O_3), умеренно обогащенные Zr (1,3-4,3 мас.% ZrO_2), являющиеся Са-, Sr- и иногда Ва-доминантными с точки зрения занятости А-позиции и содержащие значительные количества Na и легких РЗЭ, описаны в гранатах кимберлитовых трубок как стабильные минералы в условиях литосферной мантии [5, 6].

Известны многочисленные минералы группы кричтонита в линзах доломитизированных известняков барит-гематитовых руд месторождения Бука делла Вена (Италия), локализованного среди филлитовых сланцев (метаморфизм фаций зеленых сланцев, 250-340 °С) [2, 9, 42]. Минералы группы кричтонита, представленные в виде мелких, уплощенных ромбоэдрических кристаллов в доломите, по химическому составу соответствуют дессоиту, который можно охарактеризовать как промежуточный член между Y, U-кричтонитом, мас. %: UO_2 2,63-8,74, Y_2O_3 1,37-2,64 и Sr, Pb-давидитом, мас. %: SrO 2,19-2,45, PbO 2,90-3,39 [2, 3]. В кварц-хлорит-сульфидных жилах вулканогенно-осадочных пород Альп на западе Швейцарии установлен клейсонит $(\text{Pb}, \text{Sr})(\text{U}^{4+}, \text{U}^{6+})(\text{Fe}^{2+}, \text{Zn})_2(\text{Ti}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_{18}(\text{O}, \text{OH})_{38}$ – урановый представитель кричтонита, мас. %: UO_2 10,07, UO_3 4,12, PbO 9,34 [42]. Широкое распространение и видовое разнообразие МГК (кричтонит, сенаит, давидит, ловеренгит, линдслейит) в тесных сростаниях друг с другом обнаружены в узкой зоне контакта колчеданных рудных тел с метасоматически измененными породами, часто со скарновой минеральной ассоциацией, в протерозойских структурах Кольского региона (Россия) [10, 11]. Считается, что особенностью химического состава указанных минералов являются высокие содержания Sc_2O_3 до 2,4 и V_2O_5 до 20 мас. % [10]. Таким образом, индикаторными признаками для МГК в отложениях низкотемпературных гидротермальных флюидов являются крайне низкие содержания Cr_2O_3 и присутствие халькофильных элементов (Pb, Zn).

Источник титана и происхождение минералов Ti (анатаз, рутил, брукит, титансодержащие силикаты) в осадочных средах являются предметом споров. Сложные оксиды Ti в них пока не установлены. Однако в научной литературе имеется информация об образовании кристаллов анатаза как результат раскристаллизации TiO_2 -аморфных фаз, затем слиянии их в глобулы и скопления, что отражает ближнюю мобилизацию Ti, высвобожденного в субмаринных низкотемпературных процессах преобразования вулканического стекла с образованием оксигидроксидов железа как в современных [43], так и древних [44] окисно-железистых отложениях. В составе анатаза из элементов-примесей выявлены V, U, Pb, Th (десятки-сотни граммов на тонну), также наблюдается присутствие включений аутигенных апатита и фосфатов РЗЭ в периферийных частях анатазовых обособлений [44].

Несмотря на многолетнюю историю изучения железорудных месторождений Ангаро-Илимского района, минералогия Ti в рудах недостаточно исследована. Из минералов титана в большинстве случаев указывается на присутствие титаномагнетита, ильменита и рутила как реликтов рудовмещающих вулканокластитов и титанита как скарнового минерала [20-24]. Процессы минеральных преобразований Ti при формировании магнетитовых руд не рассмотрены и МГК не охарактеризованы. Находка МГК в магнетитовых рудах Рудногорского месторождения является первой не только в железорудных месторождениях Ангаро-Илимского района, но и в целом для железорудных формаций.

Заключение

Источником вещества для образования оолитов являются обломки толеитовых базальтов, богатые элементами-примесями. Выявлен эволюционный ряд последовательного преобразования вулканокластов в оолитах от сапонита до высокомагнезиального хлорита. Образование минералов Ti связано с разложением вулканического стекла и титаномагнетита вулканокластического материала при взаимодействии с газонасыщенными рассольными водами мелководного бассейна и накоплением тонкодисперсных агрегатов TiO_2 в смектитизированном аморфном веществе



с последующей кристаллизацией в виде сложных оксидов титана в процессах литификации обломочных пород. Минералы группы кричтонита представлены кричтонитом и давидитом-Се, характеризуются сложным и изменчивым химическим составом. В дальнейших процессах дегидратации происходили замещение МГК промежуточным метастабильным анатазом, а затем рутилом и отложение собственных минеральных включений элементов-примесей – анзаита-Се и уранинита. Появление титанита в оолитах обусловлено последующими метасоматическими преобразованиями под действием рассольных вод, приобретавших качество гидротермальных растворов при внедрении базальтовых интрузий. Приведенный материал отражает геохимическое поведение Ti, выраженное в эволюционном изменении форм его нахождения в преобразовании первичного субстрата в железообразующих процессах. Рассмотренный сценарий образования минеральных ассоциаций оксидов титана может быть применим с небольшими изменениями к другим оолитовым железорудным месторождениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Grey I.E., Lloyd D.J. The crystal structure of senaite // Acta Crystallographica Section B: Structural Science, Crystal Engineering, and Materials. 1976. Vol. B32. Part 5. P. 1509-1513. DOI: [10.1107/S0567740876012478](https://doi.org/10.1107/S0567740876012478)
2. Orlandi P., Pasero M., Duchi G., Olmi F. Dessauite, (Sr,Pb) (Y,U) (Ti,Fe³⁺)₂₀O₃₈, a new mineral of the crichtonite group from Buca della Vena Mine, Tuscany, Italy // American Mineralogist. 1997. Vol. 82. Iss. 7-8. P. 807-811. DOI: [10.2138/am-1997-7-819](https://doi.org/10.2138/am-1997-7-819)
3. Расцветаева П.К. Кричтонит и его семейство: история открытия двух новых минералов // Природа. 2020. С. 39-47. DOI: [10.7868/S0032874X20080049](https://doi.org/10.7868/S0032874X20080049)
4. Haggerty S.E. The mineral chemistry of new titanates from the jagersfontein kimberlite, South Africa: Implications for metasomatism in the upper mantle // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1983. Vol. 47. Iss. 11. P. 1833-1854.
5. Rezvukhin D.I., Malkovets V.G., Sharygin I.S. et al. Inclusions of crichtonite-group minerals in Cr-pyropes from the International kimberlite pipe, Siberian Craton: Crystal chemistry, parageneses and relationships to mantle metasomatism // Lithos. 2018. Vol. 308-309. P. 181-195. DOI: [10.1016/j.lithos.2018.02.026](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.02.026)
6. Alifirova T., Rezvukhin D., Nikolenko E. et al. Micro-Raman study of crichtonite group minerals enclosed into mantle garnet // Journal of Raman Spectroscopy. 2018. Vol. 51. Iss. 9. P. 1493-1512. DOI: [10.1002/jrs.5979](https://doi.org/10.1002/jrs.5979)
7. Vrána S. Mineral inclusions in pyrope from garnet peridotites, Kolín area, central Czech Republic // Journal of Geosciences. 2008. Vol. 53. Iss. 1. P. 17-30. DOI: [10.3190/jgeosci.018](https://doi.org/10.3190/jgeosci.018)
8. Ague J.J., Eckert J.O. Precipitation of rutile and ilmenite needles in garnet: Implications for extreme metamorphic conditions in the Acadian Orogen, U.S.A. // American Mineralogist. 2012. Vol. 97. Iss. 5-6. P. 840-855. DOI: [10.2138/am.2012.4015](https://doi.org/10.2138/am.2012.4015)
9. Mario Luiz de Sá Carneiro Chaves, Luiz Alberto Dias Menezes Filho. Minerais do grupo da crichtonita em veios de quartzo da Serra do Espinhaço (Minas Gerais e Bahia) // Geologia USP. Série Científica. 2017. Vol. 17. № 1. P. 31-40. DOI: [10.11606/issn.2316-9095.v17-392](https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v17-392)
10. Карпов С.М., Волошин А.В., Компанченко А.А. и др. Минералы группы кричтонита в колчеданных рудах и рудных метасоматитах протерозойских структур Кольского региона // Записки Российского минералогического общества. 2016. Т. 145. № 5. С. 39-56.
11. Компанченко А.А., Волошин А.В., Базай А.В. Минеральный состав палеопротерозойских метаморфизованных колчеданных руд Кольского региона (на примере проявления Брагино, Южная Печенга) // Записки Российского минералогического общества. 2019. Т. 148. № 5. С. 74-88. DOI: [10.30695/zrmo/2019.1485.04](https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1485.04)
12. Parnell J. Titanium mobilization by hydrocarbon fluids related to sill intrusion in a sedimentary sequence, Scotland // Ore Geology Reviews. 2004. Vol. 24. Iss. 1-2. P. 155-167. DOI: [10.1016/j.oregeorev.2003.08.010](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.010)
13. Schulz H.-M., Wirth R., Schreiber A. Nano-Crystal Formation of TiO₂ Polymorphs Brookite and Anatase Due To Organic – Inorganic Rock–Fluid Interactions // Journal of Sedimentary Research. 2016. Vol. 86. № 2. P. 59-72. DOI: [10.2110/jsr.2016.1](https://doi.org/10.2110/jsr.2016.1)
14. Чайковский И.И., Чайковская Е.В., Коротченко О.В. и др. Аутигенные минералы титана и циркония Верхнекамского месторождения солей // Геохимия. 2019. Т. 64. № 2. С. 182-194. DOI: [10.31857/S0016-7525642182-194](https://doi.org/10.31857/S0016-7525642182-194)
15. Вахрушев В.А. Галит-магнетитовые руды Сибирской платформы // Геология рудных месторождений. 1981. № 6. С. 100-104.
16. Никулин В.И., Фон-дер-Флаасс Г.С., Барышев А.С. Эксплозивно-вулканическая базальтоидная рудообразующая система (Ангарская железорудная провинция) // Геология рудных месторождений. 1991. № 3. С. 26-40.
17. Фон-дер-Флаасс Г.С., Пермяков А.А., Спешлов В.М. Рудногорское магнетитовое месторождение – магматизм, структура, рудоносность // Геология рудных месторождений. 1992. № 2. С. 51-67.
18. Калугин И.А., Третьяков Г.А., Фон-дер-Флаасс Г.С. Происхождение железных руд в траппах: образование рудоносной диаатры с корневой зоной взаимодействия между базальтовой магмой и эвапоритами. Новосибирск: Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН, 1994. Препринт № 4. 45 с.
19. Polozov A.G., Svensen H.H., Planke S. et al. The basalt pipes of the Tunguska Basin (Siberia, Russia): High temperature processes and volatile degassing into the end-Permian atmosphere // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2016. Vol. 441. Part 1. P. 51-64. DOI: [10.1016/j.palaeo.2015.06.035](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.06.035)
20. Пухнаревич М.М., Наумов В.Б., Банникова Л.А. и др. Генезис минералообразующих флюидов Коршуновского железорудного месторождения // Геология рудных месторождений. 1985. № 6. С. 51-59.



21. Калугин А.С., Калугина Т.С., Иванов В.И. и др. Железорудные месторождения Сибири. Новосибирск: Наука, 1981. 238 с.
22. Платформенная магномагнетитовая формация (на примере Ангарской железорудной провинции) / Под ред. Г.С.Момджи. М.: Недра, 1976. 204 с.
23. Жук-Почекутов К.А. Магнетитовые оолиты Рудногорского железорудного месторождения // Геология рудных месторождений. 1986. № 4. С. 72-83.
24. Мазуров М.П., Гришина С.Н., Титов А.Т., Шихова А.В. Эволюция рудно-метасоматических процессов в крупных скарновых железорудных месторождениях трапповой формации Сибирской платформы // Петрология. 2018. Т. 26. № 3. С. 265-281. DOI: [10.7868/S0869590318030044](https://doi.org/10.7868/S0869590318030044)
25. Корабельникова В.В., Фон-дер-Флаасс Г.С. Об осадочной природе «чашечных» магнетитовых руд Нерюндинского и Капаевского месторождений (Ангарская железорудная провинция) // Геология и геофизика. 1979. № 2. С. 98-107.
26. Highlights in Mineralogical Crystallography / Ed. by T. Armbruster, R.M. Danisi. De Gruyter, 2016. 201 p. DOI: [10.1515/9783110417104](https://doi.org/10.1515/9783110417104)
27. Вахрушев В.А., Воронцов А.Е. Минералогия и геохимия железорудных месторождений юга Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1976. 199 с.
28. Калугин А.С. Атлас текстур и структур вулканогенно-осадочных железных руд Алтая (источники вещества, условия и механизм отложения, явления диагенеза, эпигенеза и метаморфизма руд). Л.: Недра, 1970. 176 с.
29. Коссовская А.Г., Петрова В.В., Шутов В.Д. Минеральные ассоциации палагонитизации океанических базальтов и проблемы экстракции рудных компонентов // Литология и полезные ископаемые. 1982. № 4. С. 10-31.
30. Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: слюды, хлориты. М.: Наука, 1991. 176 с.
31. Bleil U., Petersen N. Variations in magnetization intensity and low-temperature titanomagnetite oxidation of ocean floor basalts // Nature. 1983. Vol. 301. Iss. 5899. P. 384-388. DOI: [10.1038/301384a0](https://doi.org/10.1038/301384a0)
32. Swanson-Hysell N.L., Feinberg J.M., Berquó T.S., Maloof A.C. Self-reversed magnetization held by martite in basalt flows from the 1.1-billion-year-old Keweenawan rift, Canada // Earth and Planetary Science Letters. 2011. Vol. 305. Iss. 1-2. P. 171-184. DOI: [10.1016/j.epsl.2011.02.053](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.053)
33. Walton A.W., Schiffman P., Macpherson G.L. Alteration of hyaloclastites in the HSDP 2 Phase 1 Drill Core: 2. Mass balance of the conversion of sideromelane to palagonite and chabazite // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2005. Vol. 6. № 9. № Q09G19. DOI: [10.1029/2004GC000903](https://doi.org/10.1029/2004GC000903)
34. Banfield J.F., Jones B.F., Veblen D.R. An AEM-TEM study of weathering and diagenesis, Abert Lake, Oregon: I. Weathering reactions in the volcanics // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1991. Vol. 55. Iss. 10. P. 2781-2793. DOI: [10.1016/0016-7037\(91\)90444-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90444-A)
35. Кузнецов В.А., Генералова В.А. Радионуклиды и коллоидные соединения титана в ландшафтах // Литасфера. 1999. № 10-11. С. 118-125.
36. Cornell R.M., Schwertmann U. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses. Wiley-VCH, 2003. 703 p.
37. Hanlie Hong, Kaipeng Ji, Chen Liu et al. Authigenic anatase nanoparticles as a proxy for sedimentary environment and porewater pH // American Mineralogist. 2022. Vol. 107. Iss. 12. P. 2176-2187. DOI: [10.2138/am-2022-8330](https://doi.org/10.2138/am-2022-8330)
38. Menzies M., Seyfried Jr. W.E. Basalt-seawater interaction: trace element and strontium isotopic variations in experimentally altered glassy basalt // Earth and Planetary Science Letters. 1979. Vol. 44. Iss. 3. P. 463-472. DOI: [10.1016/0012-821X\(79\)90084-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(79)90084-0)
39. Smith S.J., Stevens R., Shengfeng Liu et al. Heat capacities and thermodynamic functions of TiO₂ anatase and rutile: Analysis of phase stability // American Mineralogist. 2009. Vol. 94. Iss. 2-3. P. 236-243. DOI: [10.2138/am.2009.3050](https://doi.org/10.2138/am.2009.3050)
40. Hishita S., Mutoh I., Koumoto K., Yanagida H. Inhibition mechanism of the anatase-rutile phase transformation by rare earth oxides // Ceramics International. 1983. Vol. 9. Iss. 2. P. 61-67. DOI: [10.1016/0272-8842\(83\)90025-1](https://doi.org/10.1016/0272-8842(83)90025-1)
41. Liping Wang, Essene E.J., Youxue Zhang. Mineral inclusions in pyrope crystals from Garnet Ridge, Arizona, USA: implications for processes in the upper mantle // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1999. Vol. 135. Iss. 2-3. P. 164-178. DOI: [10.1007/s004100050504](https://doi.org/10.1007/s004100050504)
42. Wülser P.-A., Brugger J., Meisser N. The crichtonite group of minerals: a review of the classification // Bull. Liaison S.F.M.C. 2004. Vol. 16. P. 76-77.
43. Dekov V., Scholten J., Garbe-Schönberg C.-D. et al. Hydrothermal sediment alteration at a seafloor vent field: Grimsey Graben, Tjörnes Fracture Zone, north of Iceland // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2008. Vol. 113. Iss. B11. № B11101. DOI: [10.1029/2007JB005526](https://doi.org/10.1029/2007JB005526)
44. Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Мекекестева И.Ю. et al. The Fate of «Immobile» Ti in Hyaloclastites: An Evidence from Silica-Iron-Rich Sedimentary Rocks of the Urals Paleozoic Massive Sulfide Deposits // Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 9. № 939. DOI: [10.3390/min14090939](https://doi.org/10.3390/min14090939)

Авторы: Нурия Радитовна Аюпова, канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник (Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия), ayupova@mineralogy.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0792-1876>, Валерий Владимирович Масленников, д-р геол.-минерал. наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник (Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-1999-2324>, Александр Сергеевич Целуйко, младший научный сотрудник (Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-4524-0337>, Умед Абдурозикович Ятимов, младший научный сотрудник (Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6354-0264>, Светлана Михайловна Лебедева, канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник (Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-7250-5978>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Гидрохимическая эволюция подземных вод в результате десятилетней разработки месторождения апатит-нефелиновых руд в юго-восточной части Хибинского щелочного массива

В.А.Даувальтер¹✉, М.В.Даувальтер², З.И.Слуковский¹¹ Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия² Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

Как цитировать эту статью: Даувальтер В.А., Даувальтер М.В., Слуковский З.И. Гидрохимическая эволюция подземных вод в результате десятилетней разработки месторождения апатит-нефелиновых руд в юго-восточной части Хибинского щелочного массива // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 172-186. [EDN LYZOIE](#)

Аннотация

Подземные воды являются одним из ключевых природных ресурсов, поэтому сохранение их высокого качества – основная проблема при добыче полезных ископаемых. Цель статьи – исследование динамики уровня и гидрохимического режима подземных вод в зоне влияния добычи апатит-нефелиновых руд в юго-восточной части Хибинского щелочного горного массива. За десятилетнюю историю деятельности ГОК «Олений Ручей» АО «Северо-Западная Фосфорная Компания» произошли существенные изменения химического состава исследуемых подземных вод водоносных комплексов верхнечетвертичного ошашковского водно-ледникового горизонта f,lgQshos и палеозойских интрузий yPz. Содержание главных ионов увеличилось от 2 до 20 раз, нитратов до 50 раз (превышая предельно допустимую концентрацию – 45 мг/л), и NO_3^- вошел в разряд главных ионов подземных вод. Источником повышения минерализации и поступления основных ионов в подземные воды являются выветривание и выщелачивание главных рудных минералов – апатита и его разновидностей, нефелина, сульфидных минералов, а также использование взрывчатых веществ, содержащих азотные соединения. В результате гидрохимической эволюции подземных вод изменилось соотношение главных ионов – природная вода гидрокарбонатно-натриевого состава с нейтральными значениями pH в настоящее время стала гидрокарбонатно-кальциевой, на втором месте среди анионов стоят NO_3^- , среди катионов – Na^+ . В гидродинамическом режиме подземных вод месторождения Олений Ручей четко выражены весенние и осенние максимумы уровней подземных вод. Во время снижения уровня к скважинам подтягиваются загрязненные более минерализованные рудничные воды, а во время повышения уровня в водоносные горизонты инфильтруются низкоминерализованные воды атмосферных осадков. Установлено снижение среднегодовых уровней подземных вод, что связано с увеличением глубины карьера и водозабором подземных вод для водоснабжения рудника.

Ключевые слова

подземные воды; горно-рудное предприятие; гидрохимическая эволюция; хвостохранилища; карьеры

Финансирование

Работа выполнена в рамках тем научно-исследовательских работ КНЦ РАН № FMEZ-2024-0014 и FMEZ-2024-0004.

Поступила: 01.11.2024

Принята: 10.04.2025

Онлайн: 12.09.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Подземные воды являются одним из основных источников водоснабжения населения и промышленных предприятий, а также играют жизненно важную роль в экономическом развитии многих стран мира [1-3]. Вследствие лучшего качества по сравнению с поверхностными водами для водоснабжения предпочтительнее использовать подземные воды [4]. В Мурманской обл. подземные воды применяются для водоснабжения г. Кировск и пос. Коашва, а также горно-рудных предприятий АО «Апатит», АО «СЗФК» и др. Однако для урбанизированных территорий и площадок



размещения промышленных предприятий, в том числе горно-рудных и энергетических, характерно значительное негативное преобразование подземных вод [5].

Проведение горно-рудных работ всегда сопряжено с влиянием на прилегающий ландшафт и геоэкологическое состояние звеньев окружающей среды. При добыче полезных ископаемых на поверхность ежегодно извлекаются миллиарды тонн горных пород, что приводит к изменению геохимических процессов, усилению миграции химических элементов в сферах Земли и ухудшению качества природных вод, в том числе подземных [6-8]. Загрязненные стоки с горно-рудных предприятий представляют серьезную проблему для качества воды, с которой сталкиваются страны, разрабатывающие месторождения полезных ископаемых [9-11]. Гидрохимическая эволюция подземных вод происходит в результате нарушения природного гидродинамического и гидрохимического режима в прилегающих ландшафтах [12, 13]. Под гидрохимической эволюцией понимаются необратимые в условиях разработки месторождения гидрохимические преобразования и качественные изменения состава подземных вод в зоне влияния деятельности горно-рудного предприятия, возникающие из-за поступления загрязняющих веществ в процессе технологического цикла добычи и обогащения рудных минералов, а также растворения и выщелачивания вмещающих горных пород. По итогу этих преобразований происходят изменение соотношения главных ионов и повышение минерализации подземных вод [14]. Загрязненные рудничные воды становятся источником поступления высокотоксичных соединений в поверхностные воды территорий, прилегающих к горно-рудным предприятиям [15]. Загрязняющие вещества, накопленные в хвостохранилищах горно-обогатительных комбинатов, способны оказывать отрицательное воздействие на здоровье населения, в том числе детского [16, 17]. Актуальным аспектом влияния горнодобывающей промышленности на качество поверхностных и подземных вод является загрязнение соединениями азота, особенно нитратами [18] и сульфатами, вследствие окисления сульфидных минералов, входящих в состав рудных и второстепенных минералов разрабатываемых месторождений полезных ископаемых (угольных, медно-никелевых, свинцово-цинковых и т.д.) [12, 19, 20]. Для характеристики гидрохимической эволюции особо эффективен анализ гидрохимических и гидродинамических параметров подземных вод [21-23]. Гидрохимические методы, такие как соотношение главных ионов и изотопов элементов, математическая статистика, гидрохимическое моделирование, широко используются для анализа гидрохимической эволюции [24-26]. В гидрохимической эволюции подземных вод доминируют процессы выщелачивания и растворения минералов, ионный обмен и изменение параметров потока подземных вод [27, 28].

В горнодобывающей промышленности для обеспечения безопасности проведения работ необходим постоянный дренаж горных выработок, что неизбежно приводит к снижению уровня подземных вод [29, 30]. Уровенный режим на территории горно-рудных предприятий влияет на гидрохимический состав вод [31, 32]. Для выявления механизма гидрохимической эволюции, связанного с горнодобывающей деятельностью, необходимо проведение совместных гидрохимического и гидродинамического анализов, как в ранее проведенных исследованиях [18, 21, 28].

Целью работы является исследование динамики уровенного и гидрохимического режимов, а также гидрохимической эволюции подземных вод в зоне добычи апатит-нефелиновых руд в юго-восточной части Хибинского щелочного массива.

Методы

Изменения химического состава, уровня подземных вод рассматривались за период 2009-2023 гг. в наблюдательных скважинах 43 и 59, расположенных в карьере и около хвостохранилища обогатительной фабрики, оборудованных на водоносный комплекс палеозойских интрузий уРз, а также в наблюдательных скважинах 51 и 6э, расположенных около хвостохранилища и на водозаборе ГОК, оборудованных на водоносный верхнечетвертичный осташковский водно-ледниковый горизонт f,lgQ_{шос} (рис.1). Пробы подземных вод в скважинах отбирались сотрудниками АО «СЗФК» четыре раза в год – в конце зимы, в половодье, в летнюю межень, в начале зимнего периода. Замер уровней воды производился раз в неделю. В пробах определялись значения pH, содержания ионов HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , F^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ и микроэлементов Al, Fe, Mn, Sr, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Cd, Pb. Химический анализ подземных вод выполнялся в лаборатории Кольского геологического информационно-лабораторного центра (Апатиты), имеющей аттестат аккредитации.

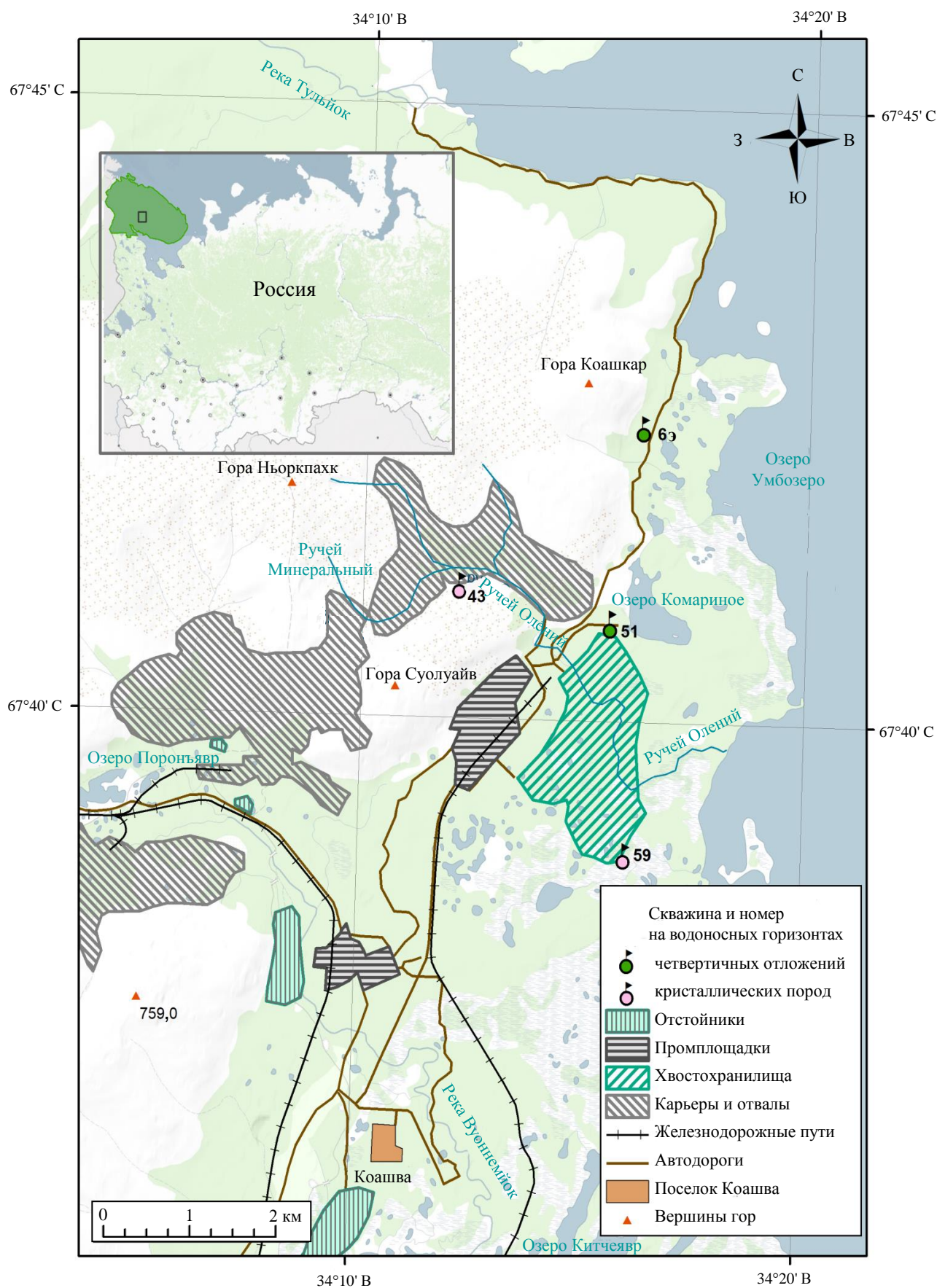


Рис.1. Карта-схема расположения промплощадки ГОК «Олений Ручей» и гидрогеологических скважин



Обсуждение результатов

Акционерное общество «СЗФК» производит разработку месторождения апатит-нефелиновых руд Олений Ручей с 2012 г., когда было завершено строительство первой очереди горно-обогатительного комбината, выполнены пусконаладочные работы обогатительной фабрики и получены первые тонны апатитового концентрата. Водозабор горно-обогатительного комбината (ГОК) «Олений Ручей» (рис.1, скв. 6э) расположен в 3 км на северо-восток от рудника, в 1 км на запад от берега Умбозера и снабжает водой административно-бытовой комплекс с 2012 г. Количество извлеченной из водоносного верхнечетвертичного осташковского водно-ледникового горизонта $f,lgQ_{шос}$ двумя эксплуатационными скважинами на водозаборе воды за последние 10 лет находится в диапазоне 220-260 тыс $m^3/год$ (0,6-0,7 тыс $m^3/сут$). История освоения и результаты исследований поверхностных вод в зоне влияния разработки месторождения Олений Ручей описаны в публикациях авторов [33-35].

В геологическом строении месторождения Олений Ручей принимают участие интрузивные породы Хибинского щелочного массива и вмещающие ультраметаморфизованные и интрузивные образования архея, на большей части исследуемой территории перекрытые чехлом четвертичных отложений. Хибинский массив представляет собой сложную многофазную палеозойскую интрузию центрального типа. Контакты интрузивного массива с вмещающими породами вертикальные или крутопадающие ($65-80^\circ$) к центру. Массив обладает автономной тектоникой, не сопряженной со структурой вмещающих пород, и в плане характеризуется кольцевым расположением слагающих интрузивных комплексов.

Преобладающие в Хибинском массиве породы – это нефелиновые сиениты, представленные хибинитами и фойяитами. Массивные и трахитоидные хибиниты, относящиеся к двум разным фазам внедрения, слагают внешние зоны Хибин, а арфведсонитовые трахитоидные и эгирино-арфведсонитовые трахитоидные фойяиты приурочены к внутренним частям. Кроме того, в строении массива участвуют эгириновые и гнейсовидные рихториты, занимающие второе место по распространению. На северо-восточном фланге месторождения Олений Ручей хибиниты прослеживаются вблизи контакта с фойяитами. Гнейсовидные рихториты и хибиниты пространственно приурочены к Эвслогчоррской тектонической зоне смятия, проходящей через восточный фланг месторождения. Породы йиолит-уртитовой серии, с которыми пространственно и генетически связаны все известные апатит-нефелиновые месторождения Хибин, включая месторождение Олений Ручей, представлены урритами полевошпатовыми, пегматоидными, массивными; йиолитами трахитоидными и полевошпатовыми трахитоидными; малиньитами трахитоидными.

Четвертичные отложения в пределах изучаемого района, представленные ледниковыми ($g_{шос}$) и водно-ледниковыми ($f,lgQ_{шос}$) отложениями осташковского времени, развиты весьма широко в виде прерывистого чехла мощностью от 5 до 50 м, отсутствуют лишь на обрывистых склонах гор. Мощность четвертичных отложений заметно возрастает на участках холмисто-моренного, конечно-моренного и водно-ледникового рельефа.

В гидрогеологическом отношении месторождение Олений Ручей характеризуется хорошо расчлененным эрозионным рельефом, отчетливо выраженными водораздельными границами, неустойчивым сезонно изменяющимся уровнем-расходным режимом вод, сравнительно малой мощностью четвертичных отложений и неравномерной тектонической трещиноватостью кристаллических пород.

Разрез четвертичных и палеозойских водоносных пород представлен проницаемыми песчаными, гравийно-галечными ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями с тонкими прослоями пылеватой супеси и трещиноватыми породами нефелиновых сиенитов. Тесная связь режима подземных вод с атмосферными осадками определяет эти воды, как воды местного происхождения, у которых совпадают области питания и распространения. Базисами поверхностного и подземного стока служат ближайшие к месторождению озера, залегающие на различных уровнях. Разгрузка водоносных горизонтов четвертичных отложений и трещиноватых кристаллических пород осуществляется долинами ручьев Минеральный и Олений в приозерную низменность Умбозера (рис.2). Наиболее низкий урез воды в Умбозере достигает отметки 150 м. Ближайшее к месторождению Олений Ручей оз. Комариное имеет отметку водного зеркала 174 м. Амплитуда колебания уровня в течение года для грунтового водоносного горизонта четвертичных отложений составляет 15-30 м; для горизонта кристаллических пород – 20-30 м (в долинах ручьев), 40-90 м (на склонах гор).

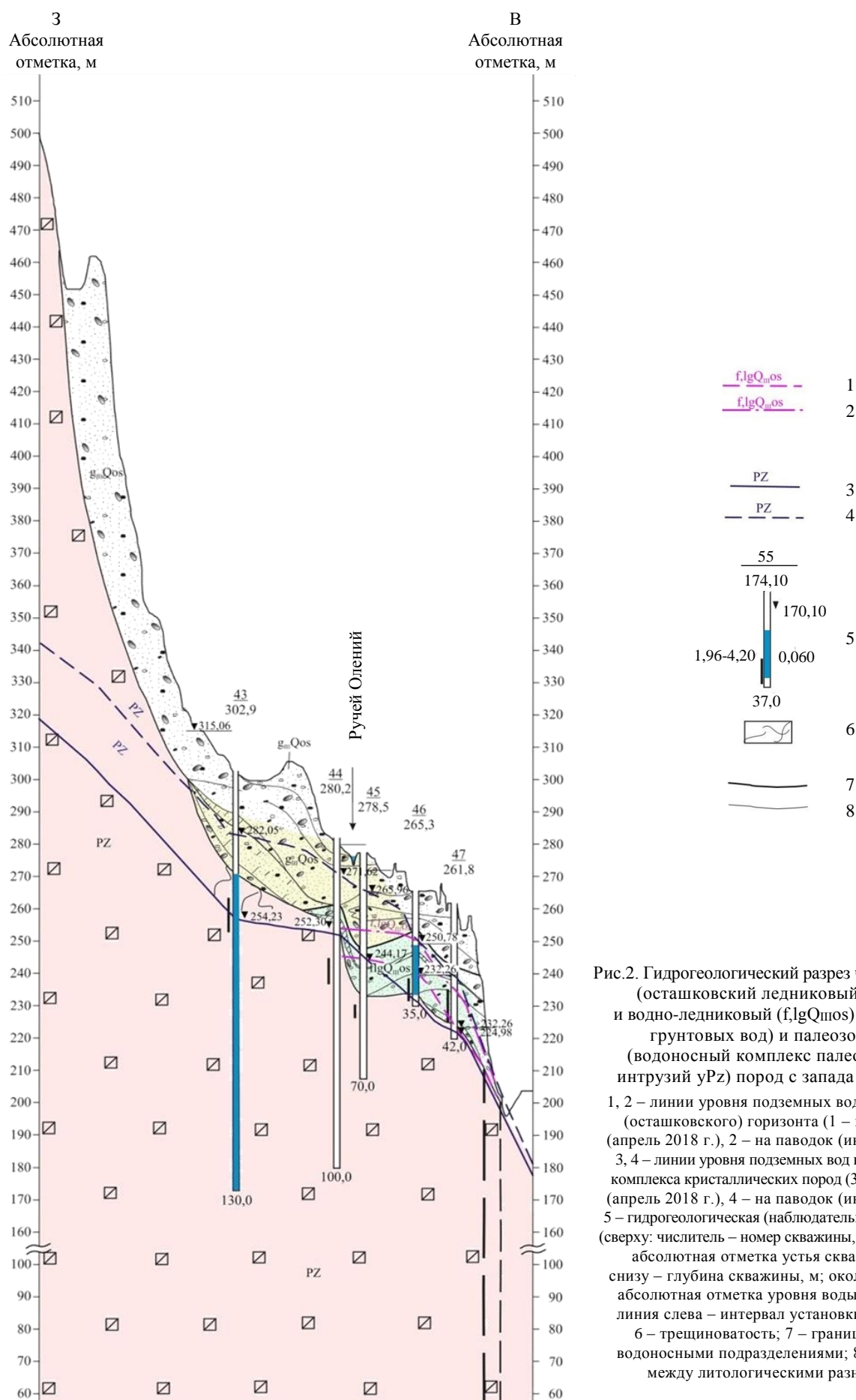


Рис.2. Гидрогеологический разрез четвертичных (осташковский ледниковый ($g_m Qos$) и водно-ледниковый ($f_{lg} Q_m os$) горизонты грунтовых вод) и палеозойских (водоносный комплекс палеозойских интрузий uPz) пород с запада на восток

1, 2 – линии уровня подземных вод грунтового (осташковского) горизонта (1 – на межень (апрель 2018 г.), 2 – на паводок (июнь 2018 г.); 3, 4 – линии уровня подземных вод водоносного комплекса кристаллических пород (3 – на межень (апрель 2018 г.), 4 – на паводок (июнь 2018 г.); 5 – гидрогеологическая (наблюдательная) скважина (сверху: числитель – номер скважины, знаменатель – абсолютная отметка устья скважины, м; снизу – глубина скважины, м; около стрелки – абсолютная отметка уровня воды, м; черная линия слева – интервал установки фильтра); 6 – трещиноватость; 7 – граница между водоносными подразделениями; 8 – граница между литологическими разностями



Водоносный верхнечетвертичный осташковский водно-ледниковый горизонт грунтовых вод $f,lgQ_{шос}$ и водоносный комплекс палеозойских интрузий yPz имеют гидравлическую связь между собой, с атмосферными осадками и поверхностными водами. Изменение уровней воды в скважинах происходит в соответствии с сезонами года и выпадением осадков. Во время снеготаяния и дождей уровень подземных вод резко поднимается, а в меженное зимнее и летнее время без осадков снижается (рис.3). В скважинах 43 и 6э за более чем десятилетнюю добычу апатит-нефелинового сырья установлено достоверное снижение среднегодовых уровней воды на 10 и 2 м соответственно, связанное с увеличением глубины карьера и сработкой уровня при откачке воды из карьера, а также при водозаборе подземных вод комплекса палеозойских интрузий и осташковского горизонта. В скважинах 43 и 6э прослеживаются наиболее четкие сезонные колебания и наибольшая амплитуда уровня подземных вод – до 40 и 7 м соответственно (рис.3). В скважинах 51 и 59 сезонные колебания не столь заметны (особенно в скв. 59), так как они находятся рядом с хвостохранилищем обогатительной фабрики, где уровень пульпы и сточных вод не подвержен значительным изменениям, а колебания не зависят от режима поверхностных вод.

Подземные воды Хибинского щелочного массива по химическому составу относятся к низкоминерализованным водам с нейтральными значениями pH, гидрокарбонатного класса и натриевой группы [36].

Скважина 43 пробурена в 2008 г., отбор проб воды производился еще до начала эксплуатации месторождения, поэтому результаты химического анализа пробы, отобранной в 2009 г., принимаются за фон (табл.1). В скв. 43, расположенной рядом с карьером и оборудованной на водоносный комплекс палеозойских интрузий yPz , до начала разработки месторождения (ноябрь 2009 г.) вода характеризовалась гидрокарбонатно-натриевым составом (рис.4, а), невысокой минерализацией (47 мг/л) и значением pH на границе между слабокислым и нейтральным (6,51). В настоящее время минерализация воды увеличилась в четыре раза до 186 мг/л, величина pH до 8,89, что соответствует щелочному значению. При добыче апатит-нефелиновых руд используют азотсодержащие взрывчатые вещества, которые, попадая в подземные воды, растворяются и увеличивают содержание азотсодержащих ионов, главным образом NO_3^- . Содержание нитратов в воде скв. 43 увеличилось более чем в 50 раз, превышая предельно допустимые концентрации (ПДК) – 45 мг/л, согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (табл.1). Увеличение содержания NO_3^- с начала разработки месторождения зафиксировано в воде всех скважин (рис.5). Графики динамики содержания NO_3^- в исследуемых скважинах аппроксимируются степенной зависимостью. До разработки месторождения основным источником соединений азотной группы были поверхностные воды с небольшими (десятые доли мг/л) содержаниями [33]. После начала деятельности рудника растворимые формы соединений азота (главным образом NO_3^-) взрывчатых веществ стали поступать в подземные воды в больших количествах, увеличиваясь. Это связано с ростом добычи апатит-нефелиновой руды и увеличением массы применяемых взрывчатых веществ.

Нитрат-ион, как и другие минеральные соединения азота, является хорошо растворимым в воде, и его чрезвычайно трудно удалить из рудничных сточных вод с помощью сорбционных фильтров, в отличие, например, от соединений тяжелых металлов. Для удаления нитрат-иона применяются относительно молодые, но крайне перспективные методы биологической очистки [37]. Их суть заключается в использовании микроорганизмов для очистки воды от нежелательных компонентов. Загрязнители (нитрат-ион), которые необходимо удалить, выступают в роли питательного субстрата для жизнедеятельности микроорганизмов. Разработана технология CW (Constructed wetlands – искусственно созданные водно-болотные угодья), которая заключается в сооружении бассейнов произвольной формы с расположенной внутри фильтрующей загрузкой из различных субстратов, в их роли могут выступать песок и щебень. В фильтрующую загрузку высаживают водные



растения, в корневой части которых находятся микроорганизмы. Растения могут покрывать водоем целиком или только определенную часть. Загрязненная вода в процессе прохождения через заросли, корневой слой, загрузку из песка и щебня, очищается до нормативных показателей без негативного воздействия на окружающую среду.

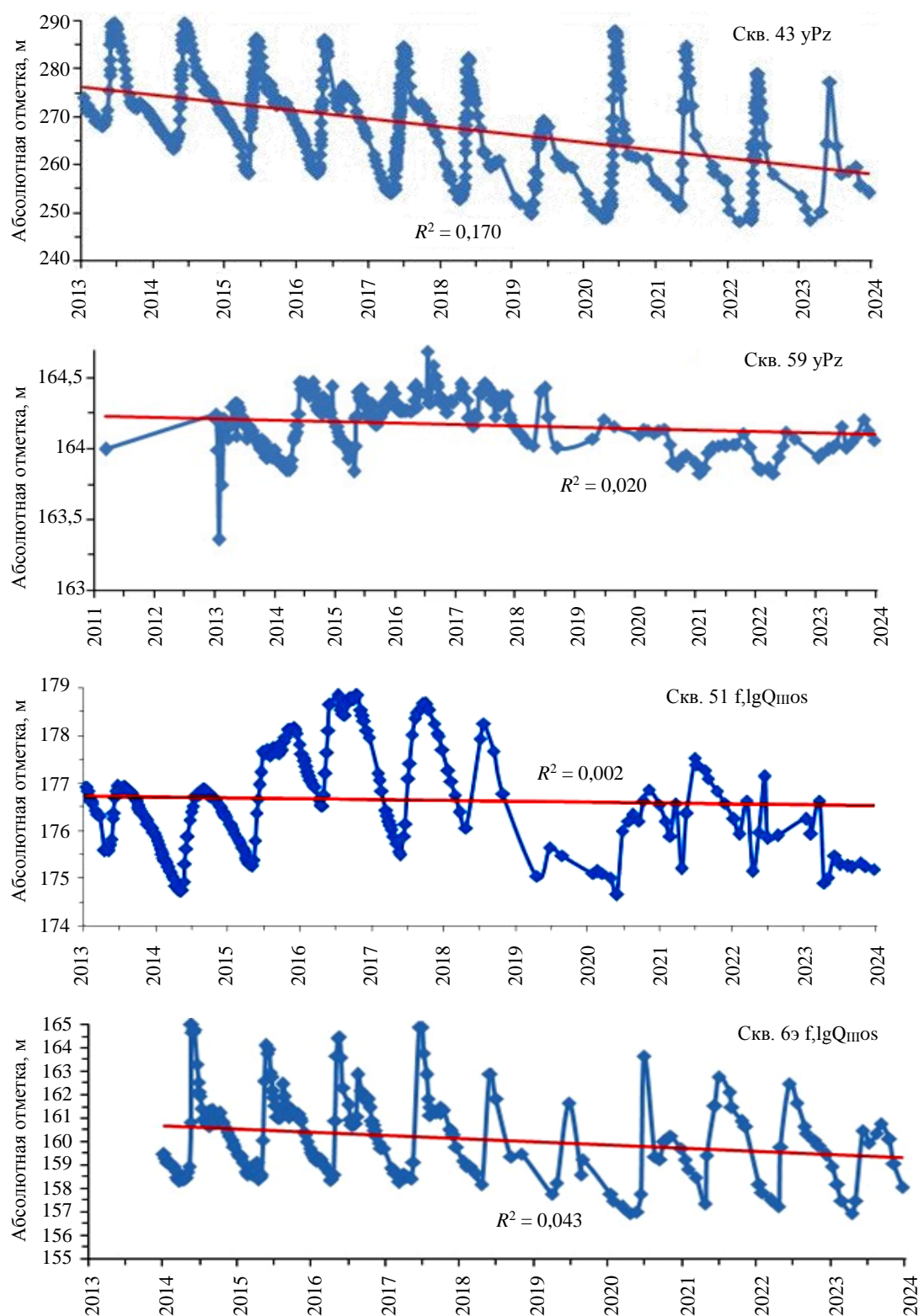


Рис.3. Динамика уровней воды в гидрогеологических скважинах за период деятельности ГОК «Олений Ручей»



Таблица 1

**Значения уровня воды, величины pH, содержания главных ионов и минерализации М
в скв. 43 ГОК «Олений Ручей» за период 2009-2020 гг.**

Дата	Уровень, м	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	М, мг/л
13.11.09	272,37	6,51	2,6	0,24	8,6	2,9	26,8	4,9	0,18	1,1	47
28.03.13	268,90	9,10	4,0	0,48	9,4	3,1	22,6	4,9	0,18	12,2	57
09.04.14	263,72	8,90	5,8	0,24	12,2	3,8	23,8	4,5	1,33	18,3	70
17.06.14	289,38	8,84	14,0	0,73	16,9	5,7	21,4	29,8	1,77	35,6	126
27.08.14	278,77	9,07	12,0	1,45	15,3	5,6	20,7	31,4	1,90	27,5	116
23.10.14	275,33	6,22	12,2	0,48	16,0	7,1	24,4	31,9	2,16	23,4	118
02.04.15	261,97	8,05	4,6	0,36	7,5	2,2	25,6	2,8	2,13	6,9	52
16.06.15	285,93	5,50	18,4	0,97	20,7	7,5	22,0	38,1	2,67	52,4	163
20.08.15	276,64	9,15	21,2	0,97	21,5	9,9	17,1	53,7	2,54	46,2	173
29.10.15	272,69	8,69	10,8	0,36	14,2	4,8	21,4	25,0	1,79	19,6	98
07.04.16	258,64	6,40	9,8	0,48	14,4	4,7	37,2	5,2	2,40	28,7	103
06.07.16	274,69	8,61	12,2	0,61	16,6	5,5	21,4	24,1	2,25	35,1	118
01.09.16	276,38	5,75	19,2	0,48	18,8	6,6	21,4	36,9	2,72	46,5	152
26.10.16	273,36	9,12	11,8	0,48	16,3	5,7	23,2	26,3	2,00	28,4	114
22.06.17	278,75	9,05	12,2	0,85	16,2	5,5	37,8	9,2	2,41	33,7	118
01.11.17	269,92	8,94	7,2	0,36	12,0	4,2	36,6	6,3	2,06	10,8	80
13.09.18	259,53	8,91	19,2	1,94	19,6	7,0	64,7	10,7	2,97	43,3	169
01.11.18	261,02	8,74	18,2	1,57	21,0	7,4	68,3	9,4	2,57	39,0	167
27.06.19	268,21	8,83	17,2	0,12	18,7	6,4	47,6	6,6	2,90	49,6	149
29.08.19	261,48	8,89	22,6	0,97	22,4	7,5	63,4	10,3	3,10	55,6	186
25.06.20	281,27	8,81	9,8	0,48	15,9	5,0	42,7	10,6	2,00	20,7	107
20.08.20	262,24	8,72	13,0	1,45	17,1	5,3	40,9	11,9	2,20	37,9	130

Источником поступления Ca²⁺ в подземные воды является выветривание основного рудного минерала, фторапатита (Ca₅(PO₄)₃F), а ионов щелочных металлов Na⁺ и K⁺ – другой рудный минерал – нефелин (Na, K)AlSiO₄. В апатит-нефелиновых породах встречаются разновидности апатита – карбонат-фторапатит Ca₅[PO₄,CO₃(OH)]₃F, хлорапатит (Ca₅(PO₄)₃Cl) и стронциоapatит Sr₃Ca₂[PO₄]₃F [35]. Сульфидные минералы, содержащиеся в рудных телах месторождения Олений Ручей, например сфалерит ZnS, халькопирит CuFeS₂, халькозин Cu₂S и др., являются источником поступления ионов SO₄²⁻ в поверхностные и подземные воды [35]. Поэтому в процессе выветривания и выщелачивания этих минералов в повышенных содержаниях в воду поступают главные ионы. Содержание Ca²⁺ в воде скв. 43 увеличилось на порядок, Cl⁻ – почти в 20 раз, щелочноземельного Sr – в 5 раз, других главных ионов (HCO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺ и K⁺) – более чем в 2 раза. В результате гидрохимической эволюции по преобладающим ионам вода стала гидрокарбонатно-кальциевой, на втором месте среди анионов стоит NO₃⁻, а среди катионов – Na⁺ (см. рис.4, б).

В Хибинских малых горных озерах, расположенных на абсолютных отметках более 400 м, отношение эквивалентных концентраций главных анионов [HCO₃⁻]/[SO₄²⁻] в среднем равно 2,4; [HCO₃⁻]/[Cl⁻] – 6,3; сумм ионов щелочноземельных и щелочных металлов [Ca²⁺ + Mg²⁺]/[Na⁺ + K⁺] – 0,13 [33]. В пробах подземных вод, отобранных из скв. 43 до начала разработки месторождения Олений Ручей, соотношения между главными ионами были выше – 4,3; 89 и 0,33 соответственно, что связано с большим временем контакта с горными породами, а также большим влиянием процессов выщелачивания и растворения на формирование химического состава подземных вод по сравнению с поверхностными. В настоящее время соотношения между главными ионами в воде скв. 43 равны 4,9; 12; 1,04, что также говорит о большом участии выщелачивания, растворения разновидностей апатита и примесей в формировании химического состава подземных вод после начала разработки месторождения.

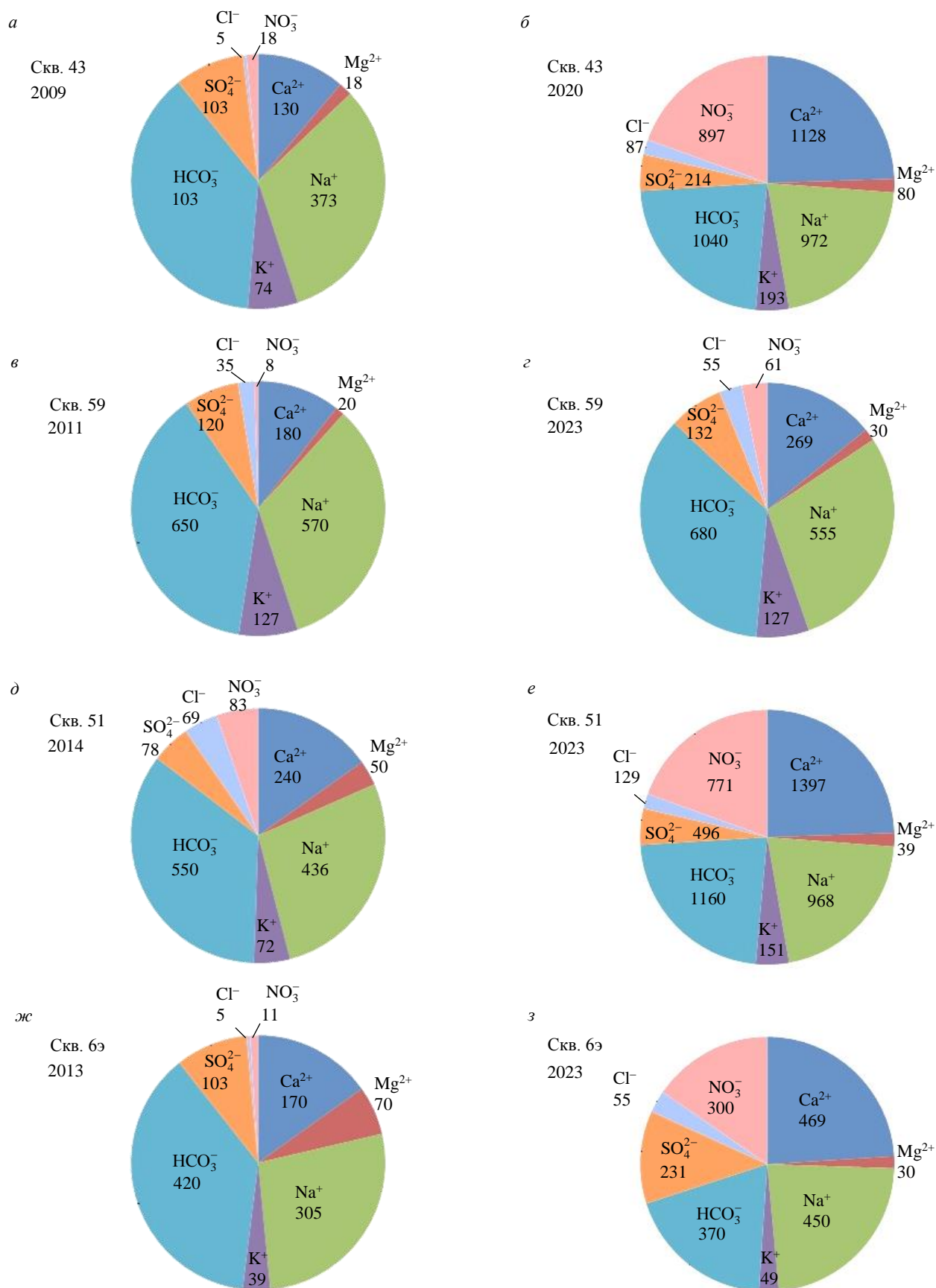


Рис.4. Динамика эквивалентных концентраций (мкг-экв/л) главных ионов в подземных водах за период деятельности ГОК «Олений Ручей»

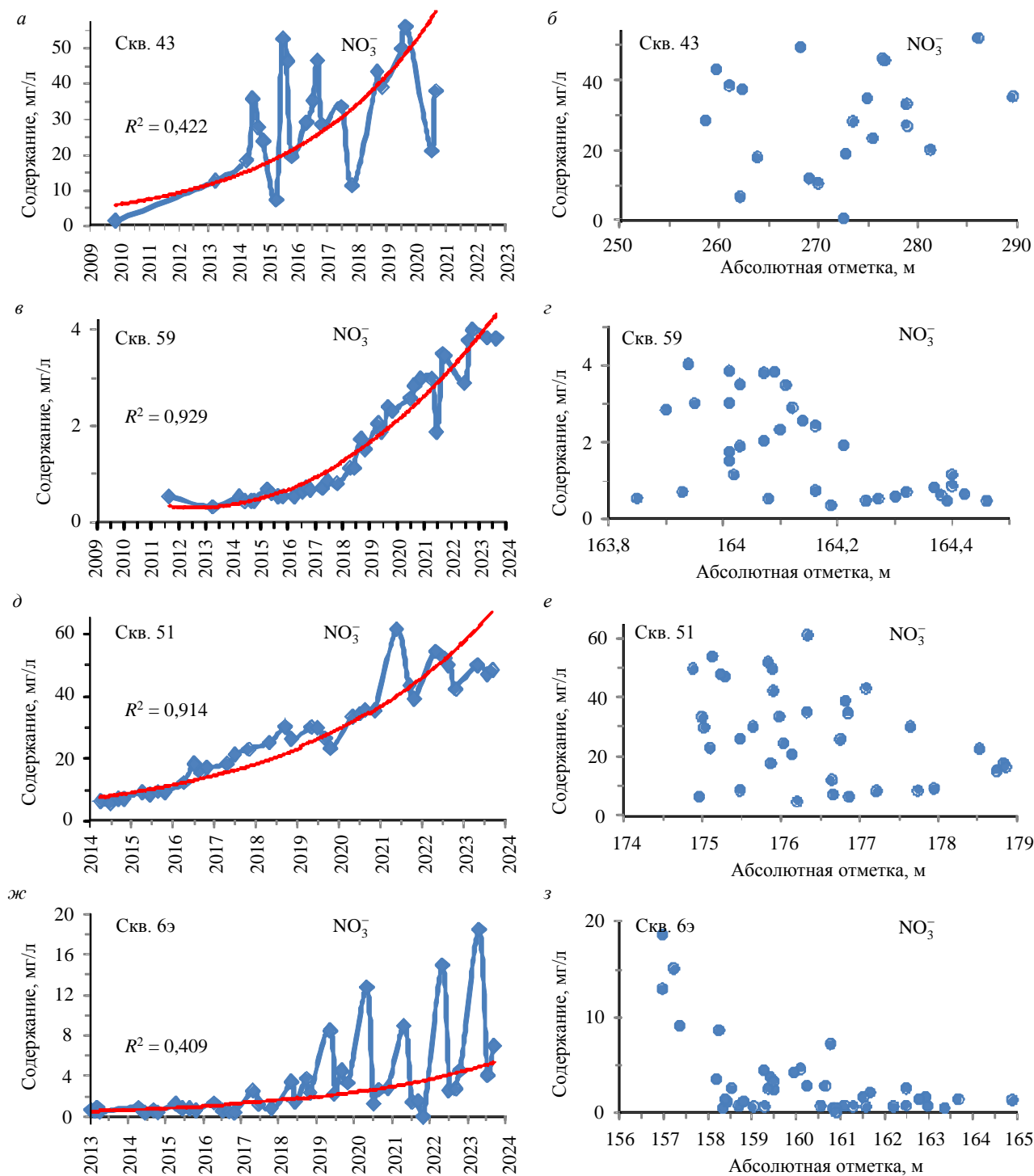


Рис.5. Динамика (а, в, д, ж) и зависимость содержания нитратов от уровня воды (б, г, е, з) в исследуемых скважинах

Сточные воды подземного рудника и карьера ГОК «Олений Ручей» имеют гидрокарбонатно-натриевый состав с большой долей нитрат-иона, который стоит на втором месте среди анионов [35]. Отношения эквивалентных концентраций главных ионов $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ равны 1,9 и 1,4; $[\text{HCO}_3^-]/[\text{Cl}^-]$ – 8,7 и 9,4; $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{Na}^+ + \text{K}^+]$ – 0,19 и 0,60 в водах подземного рудника и карьера соответственно. Это свидетельствует уже о большем участии процессов выщелачивания и растворения нефелина и сульфидов при образовании сточных вод горно-рудного предприятия.

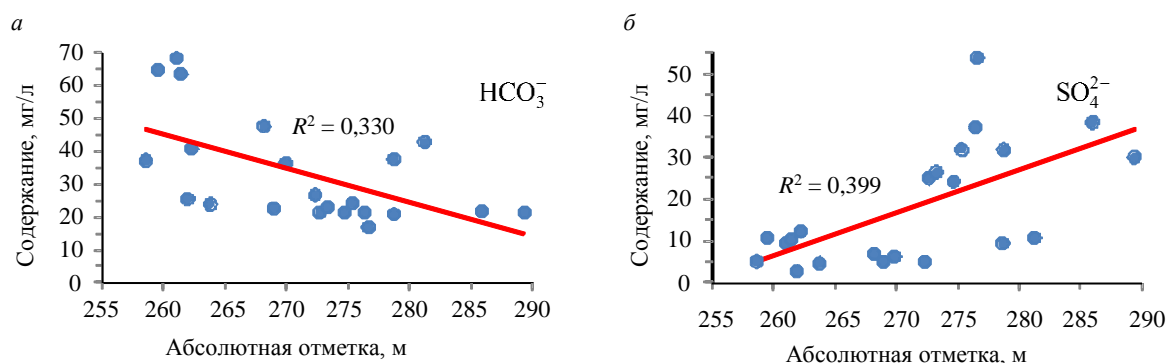


Рис.6. Зависимость содержания гидрокарбонатов и сульфатов от уровня воды в скважине 43

Подземный апатит-нефелиновый Расвумчоррский рудник АО «Апатит», расположенный в юго-западной части Хибинского горного массива и функционирующий с середины 1950-х годов, сбрасывает минерализованные сточные воды (минерализация 840 мг/л приближается к солоноватым водам) в р. Юкспоррйок водосбора оз. Большой Вудъявр и характеризуется сульфатно-натриевым составом с высоким содержанием ионов HCO_3^- и K^+ , которые находятся на втором месте среди анионов и катионов [35]. Отношения эквивалентных концентраций главных ионов $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$, $[\text{HCO}_3^-]/[\text{Cl}^-]$ и $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{Na}^+ + \text{K}^+]$ в сточных водах этого рудника, функционирующего почти 70 лет, отличаются и равны 0,57; 16,6 и 0,09, что говорит о еще большем участии выщелачивания и растворения нефелина и сульфидов в формировании химического состава сточных вод.

Достоверные разнонаправленные зависимости изменения концентраций главных ионов от положения уровня воды в скв. 43 зафиксированы для анионов HCO_3^- и SO_4^{2-} (рис.6). При повышении уровня воды в водоносном горизонте за счет инфильтрации растаявшего снега и выпавших атмосферных осадков, содержащих незначительные концентрации гидрокарбонатов, происходит снижение содержания анионов за счет разбавления. Для сульфатов, возможно, работает другой механизм. При понижении уровня подземных вод в зоне аэрации происходит окисление сульфидных минералов до сульфатов при наличии пленочной воды, кислорода, активном участии серобактерий, и при повышении уровня содержание образовавшихся сульфатов увеличивается.

Из двух скважин, расположенных около хвостохранилища обогащательной фабрики, наибольшие преобразования химического состава произошли в скв. 51, оборудованной на ошашковский водно-ледниковый горизонт грунтовых вод f₁lgQшос (табл.2). В этой скважине отмечаются более заметные сезонные колебания, чем в скв. 59 (см. рис.3). За годы работы обогащательной фабрики минерализация воды увеличилась более чем в три раза (с 63 до 203 мг/л), содержание нитратов – на порядок (до 48 мг/л в 2023 г., что больше величины ПДК воды питьевого назначения 45 мг/л, согласно СанПиН 1.2.3685-21), Ca^{2+} – в шесть раз, Sr – на порядок, а вода, как и в скв. 43, стала гидрокарбонатно-кальциевой по составу со значительной долей нитратов и натрия. Скважина находится недалеко от оз. Комариное, которое в настоящее время выполняет роль отстойника ГОК «Олений Ручей». Вода озера за время работы ГОК претерпела значительные качественные изменения и по содержанию главных ионов близка к воде из скв. 51, что говорит об их вероятной гидравлической связи [35]. Вода оз. Комариное гидрокарбонатно-натриевая, но Ca^{2+} практически вплотную приблизился к Na^+ , а SO_4^{2-} к HCO_3^- . Соотношение главных ионов в скв. 51 и оз. Комариное несколько отличается, что говорит о разных механизмах формирования химического состава в поверхностных и подземных водах. Соотношение $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{Na}^+ + \text{K}^+]$ в скв. 51 и оз. Комариное равно 1,28 и 0,83, а $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ – 2,3 и 1,2, что свидетельствует о большем обогащении продуктами растворения и выщелачивания минералов, входящих в состав горных пород разрабатываемого месторождения, в воде скв. 51, чем в оз. Комариное. Большая минерализация воды скв. 51 по сравнению с оз. Комариное (153 мг/л) подтверждает это предположение. В оз. Комариное также поступают менее минерализованные воды поверхностного стока с незначительным периодом контакта с горными породами.



Таблица 2

Средние (в числителе), минимальные и максимальные (в знаменателе) значения величины pH, содержания главных ионов и минерализации М в воде скважин ГОК «Олений Ручей» за период наблюдений 2009-2023 гг.

Скважина	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	М, мг/л
43	$\frac{8,22}{5,5-9,15}$	$\frac{12,6}{2,6-22,6}$	$\frac{0,73}{0,12-1,9}$	$\frac{16,0}{7,5-22,4}$	$\frac{5,6}{2,2-9,9}$	$\frac{33,2}{17,1-68}$	$\frac{17,9}{2,8-54}$	$\frac{2,1}{0,2-3,1}$	$\frac{30,6}{1,1-56}$	$\frac{119}{47-186}$
59	$\frac{8,41}{6,26-9,2}$	$\frac{4,5}{2,6-8,6}$	$\frac{0,65}{0,12-1,9}$	$\frac{12,6}{10,7-14}$	$\frac{5,2}{4,6-6,0}$	$\frac{43,3}{37,2-48}$	$\frac{5,2}{3,3-9,5}$	$\frac{1,9}{0,2-5,2}$	$\frac{1,7}{0,3-4,0}$	$\frac{75}{68-84}$
51	$\frac{7,59}{6,07-8,5}$	$\frac{18,3}{4,6-43,2}$	$\frac{1,48}{0,24-3,6}$	$\frac{19,3}{9,4-37,8}$	$\frac{5,4}{2,7-10,2}$	$\frac{61,9}{31,7-112}$	$\frac{21,0}{2,9-82,1}$	$\frac{3,9}{1,8-6,7}$	$\frac{27,6}{5,2-61,1}$	$\frac{159}{61-304}$
бэ	$\frac{7,97}{5,65-8,6}$	$\frac{4,3}{2,8-9,4}$	$\frac{0,59}{0,12-1,7}$	$\frac{7,8}{6,4-11,7}$	$\frac{1,6}{1,1-2,7}$	$\frac{25,6}{18,3-31}$	$\frac{4,1}{0,5-11,1}$	$\frac{1,5}{0,2-3,0}$	$\frac{3,2}{0,1-18,6}$	$\frac{49}{39-76}$

В скважине 59, оборудованной на водоносный комплекс палеозойских интрузий уРз, не произошло заметных изменений химического состава воды, сохраняется природное соотношение главных ионов, среда остается гидрокарбонатно-натриевой, только увеличилось содержание нитратов (с 0,5 до 3,8 мг/л). Минерализация, а вместе с ней и содержание главных ионов, увеличились незначительно – с 69 до 77 мг/л. Меньшая гидравлическая связь палеозойского водоносного комплекса с водами хвостохранилища, по сравнению с водно-ледниковым горизонтом грунтовых вод в скв. 51, вероятно связана с меньшей трещиноватостью коренных пород в южной части хвостохранилища. Это подтверждается подобным соотношением главных ионов в воде скв. 43, отобранной до начала разработки в 2009 г., и воде скв. 59, отобранной в 2023 г.: $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[Na^{+} + K^{+}] - 0,33$ и $0,44$; $[HCO_3^{-}]/[SO_4^{2-}] - 4,3$ и $5,2$ соответственно (см. рис.4, а, з), а также незначительными колебаниями уровня воды в скв. 59 по сравнению со скв. 51 (см. рис.3).

Вода наблюдательной скважины на подземном водозаборе бэ первоначального гидрокарбонатно-натриевого состава за годы деятельности ГОК «Олений Ручей» преобразовалась в гидрокарбонатно-кальциевую со значительной долей NO_3^{-} и Na^{+} , которые немного меньше по содержанию преобладающих ионов (370 и 300 мкг-экв/л – HCO_3^{-} и NO_3^{-} ; 470 и 450 мкг-экв/л – Ca^{2+} и Na^{+}). Содержание хлоридов увеличилось на порядок – с 0,18 до 2,0 мг/л, содержание сульфатов – более чем в два раза, а минерализация воды – почти в два раза (с 44 до 76 мг/л). До начала деятельности ГОК «Олений Ручей» химический состав воды в скв. бэ был подобен составу недалеко расположенного ручья Теплый (с минерализацией 40 мг/л), в который не поступают прямые стоки комбината [35]. Отношение эквивалентных концентраций $[HCO_3^{-}]/[SO_4^{2-}]$ в скв. бэ и ручье Теплый было равно 4,1 и 5,3, а $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[Na^{+} + K^{+}] - 0,70$ и $0,45$. В настоящее время, спустя десятилетие разработки месторождения Олений Ручей, увеличилась доля SO_4^{2-} и Ca^{2+} , а соотношения $[HCO_3^{-}]/[SO_4^{2-}]$ и $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[Na^{+} + K^{+}]$ стали 1,6 и 1,0. Это говорит об увеличении доли загрязненных рудничных вод в питании подземных вод остатков водно-ледникового горизонта. В скв. бэ установлена тенденция снижения содержания главных ионов (HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} и Na^{+}), а также минерализации, Sr и NO_3^{-} с повышением уровня воды (рис.7 и 5, з). Значения коэффициента корреляции между гидрохимическими показателями (за исключением Sr) и уровнем воды в скв. бэ больше критического ($r > 0,39$ при уровне значимости $\alpha = 0,01$ и выборке $n = 42$) и находятся в диапазоне от $-0,51$ до $-0,69$. Во время снижения уровня к скважине подтягиваются загрязненные рудничные воды, а в период таяния снега и выпадения дождей происходит разбавление низкоминерализованными водами за счет инфильтрации атмосферных осадков в первый от поверхности водоносный горизонт. Об увеличении роли рудничных вод в формировании химического состава подземных вод в скв. бэ свидетельствует также увеличение доли нитратов – соотношение между $[HCO_3^{-}]/[NO_3^{-}]$ за десять лет разработки месторождения уменьшилось с 37 до 1,2 (см. рис.4, ж, з).

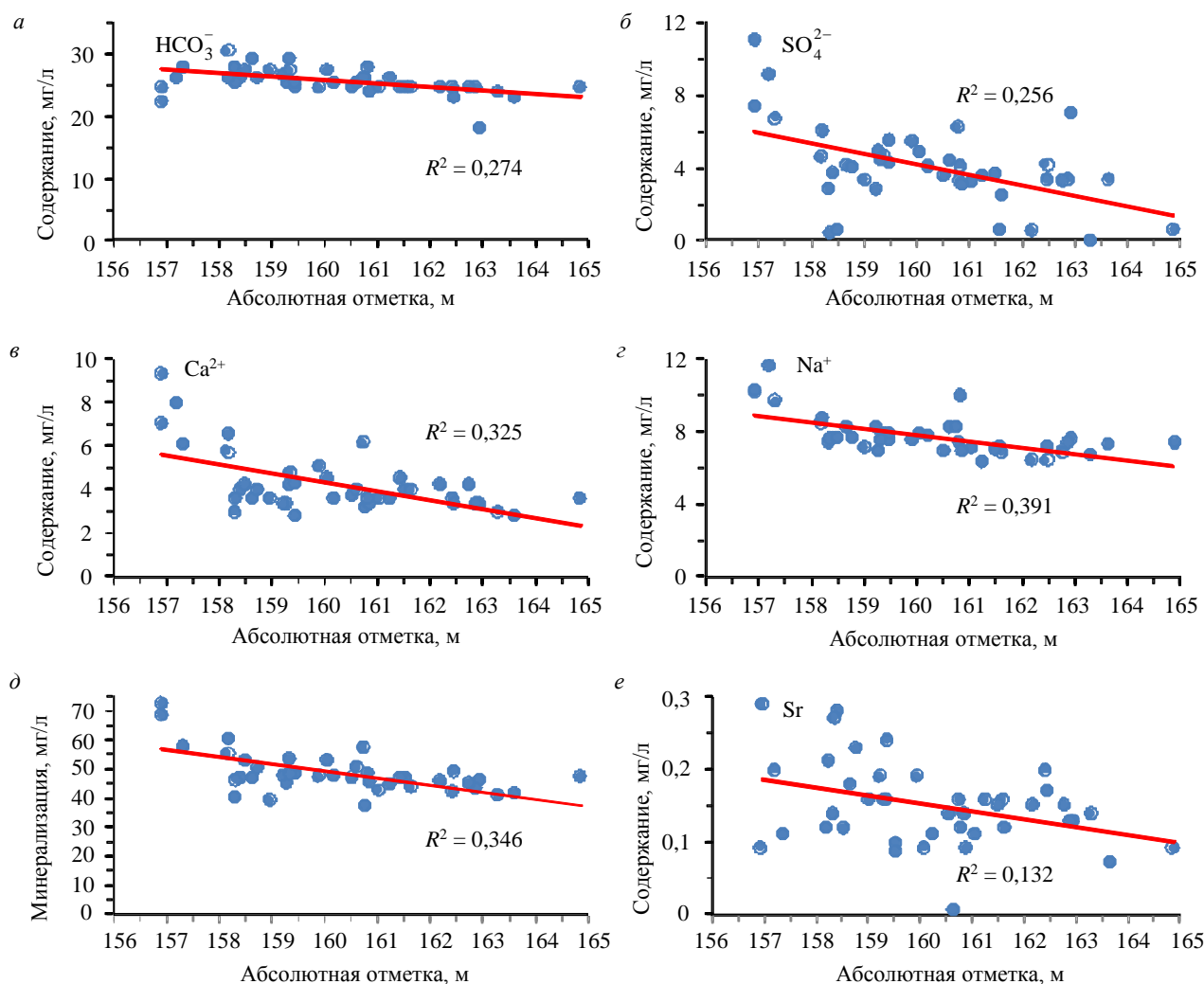


Рис.7. Зависимость главных ионов (а, б, в, г), минерализации (д) и стронция (е) от уровня воды в скважине б3

Исследуемые микроэлементы не показали значительных сезонных или годовых изменений и зависимостей содержания от уровня подземных вод, а концентрации многих оказались ниже пределов определения аналитическими приборами, поэтому в данной работе они не обсуждаются.

Заключение

В результате исследований химического состава и уровней подземных вод в наблюдательных скважинах на территории деятельности апатит-нефелинового рудника «Олений Ручей» установлена гидрохимическая эволюция подземных вод. В настоящее время, спустя десятилетие разработки месторождения Олений Ручей, изменилось качество подземных вод и соотношение главных ионов, увеличилась минерализация. Состав вод в основном контролируется выветриванием и выщелачиванием главных рудных минералов: апатита и его разновидностей, нефелина, сульфидных минералов, а также использованием взрывчатых веществ, содержащих азотные соединения, и изменением уровней подземных вод в результате увеличения глубины горных выработок, откачки подземных вод для водоснабжения рудника. Рост гидрохимических показателей (минерализация, величина pH и содержание главных ионов) в результате десятилетних исследований отмечается непосредственно в пределах проведения горных работ на руднике «Олений Ручей» и на расстоянии первых километров (карьер, хвостохранилище, водозабор). Необходимо дальнейшее изучение химического состава и уровня режима подземных вод как в зоне влияния деятельности горно-рудного предприятия на наблюдательных скважинах, по которым приводятся результаты в данной статье, так и на удалении, для установления границ распространения и динамики гидрохимической эволюции подземных вод. Например, на Коашвинском водозаборе, расположенном около



пос. Коашва (7 км от ГОК «Олений Ручей» и в 5 км от Восточного рудника АО «Апатит») и эксплуатирующем с 1978 г. ошашковский водно-ледниковый горизонт грунтовых вод f₁lgQ_{шос}. Подземные воды Коашвинского водозабора по качеству соответствуют нормам вод хозяйственно-питьевого водоснабжения с диапазоном минерализации от 30 до 190 мг/л в зависимости от сезонов года. Нефелиновые сиениты Хибинского щелочного массива характеризуются большим количеством минералов с высоким содержанием микроэлементов (Rb, Sr, других щелочных и щелочно-земельных металлов, F, Mo, других тяжелых металлов в составе сульфидов, редкоземельных элементов, Ti, Nb, Ta), поэтому для детальных исследований гидрохимической эволюции подземных вод в зоне влияния апатит-нефелиновых горно-рудных предприятий необходимо определение содержания микроэлементов точными аналитическими приборами, например масс-спектрометрами с индуктивно-связанной плазмой, которые есть в приборной аналитической базе Федерального исследовательского центра КНЦ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Паишевич Н.В., Головина Е.И. Актуальные проблемы управления добычей подземных вод на территории Российской Федерации // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 99-107.
2. Bierkens M.F.P., Wada Y. Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review // Environmental Research Letter. 2019. Vol. 14. № 6. № 063002. DOI: [10.1088/1748-9326/ab1a5f](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f)
3. Tarasenko I., Kholodov A., Zinkov A., Chekryzhov I. Chemical composition of groundwater in abandoned coal mines: Evidence of hydrogeochemical evolution // Applied Geochemistry. 2022. Vol. 137. № 105210. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2022.105210](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105210)
4. Головина Е.И., Гребнева А.В. Управление ресурсами подземных вод на трансграничных территориях (на примере Российской Федерации и Эстонской Республики) // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 788-800. DOI: [10.31897/PMI.2021.6.2](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.2)
5. Ерзова В.А., Румынин В.Г., Никуленков А.М. и др. Прогноз миграции радионуклидов в подземных водах в зоне влияния строительного дренажа Ленинградской АЭС-2 // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 194-211. DOI: [10.31897/PMI.2022.27](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.27)
6. Семячков А.И., Почечун В.А., Семячков К.А. Гидрогеоэкологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 168-179. DOI: [10.31897/PMI.2023.24](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24)
7. Паишевич М.А., Алексеенко А.В., Нуреев Р.Р. Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 155-167. DOI: [10.31897/PMI.2023.32](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.32)
8. Плюснин А.М., Воронина Ю.С., Украинцев А.В. и др. Загрязнение атмосферы от хранилищ отходов добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд // Геохимия. 2023. Т. 68. № 12. С. 1295-1311. DOI: [10.31857/S0016752523110092](https://doi.org/10.31857/S0016752523110092)
9. Легостаева Я.Б., Гололобова А.Г., Попов В.Ф., Макаров В.С. Геохимические свойства и трансформация микроэлементного состава почв при разработке коренных месторождений алмазов в Якутии // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 212-225. DOI: [10.31897/PMI.2023.35](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.35)
10. Chunlu Jiang, Ming Li, Chang Li et al. Combining hydrochemistry and ¹³C analysis to reveal the sources and contributions of dissolved inorganic carbon in the groundwater of coal mining areas, in East China // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45. Iss. 10. P. 7065-7080. DOI: [10.1007/s10653-023-01726-1](https://doi.org/10.1007/s10653-023-01726-1)
11. Fengxia Liu, Guangcai Wang, Xiangyang Liang et al. Temporal variation of groundwater hydrochemistry and water stable isotopes under long-term mining disturbance in a coal mine, northwest China // Applied Geochemistry. 2023. Vol. 158. № 105802. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2023.105802](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105802)
12. Di Chen, Qiyang Feng, Min Gong. Contamination Characteristics and Source Identification of Groundwater in Xishan Coal Mining Area of Taiyuan Based on Hydrochemistry and Sulfur–Oxygen Isotopes // Water. 2023. Vol. 15. Iss. 6. № 1169. DOI: [10.3390/w15061169](https://doi.org/10.3390/w15061169)
13. Shen Qu, Guangcai Wang, Zheming Shi et al. Impact of Mining Activities on Groundwater Level, Hydrochemistry, and Aquifer Parameters in a Coalfield's Overburden Aquifer // Mine Water and the Environment. 2022. Vol. 41. Iss. 3. P. 640-653. DOI: [10.1007/s10230-022-00875-6](https://doi.org/10.1007/s10230-022-00875-6)
14. Yanan Li, Qianqian Wang, Chunlu Jiang et al. Spatial characteristics and controlling indicators of major hydrochemical ions in rivers within coal-grain composite areas via multivariate statistical and isotope analysis methods // Ecological Indicators. 2024. Vol. 158. № 111352. DOI: [10.1016/j.ecolind.2023.111352](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111352)
15. Shaji E., Sarath K.V., Santosh M. et al. Fluoride contamination in groundwater: A global review of the status, processes, challenges, and remedial measures // Geoscience Frontiers. 2024. Vol. 15. Iss. 2. № 101734. DOI: [10.1016/j.gsf.2023.101734](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101734)
16. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreva F.R., Shevchenko A.A. Long-term impact of the Tyryauz tungsten–molybdenum mining and processing factory waste on environmental pollution and children's population // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 44. Iss. 12. P. 4557-4568. DOI: [10.1007/s10653-022-01221-z](https://doi.org/10.1007/s10653-022-01221-z)
17. Qifa Sun, Guohui Lang, Tao Liu et al. Health risk analysis of nitrate in groundwater in Shanxi Province, China: A case study of the Datong Basin // Journal of Water and Health. 2024. Vol. 22. Iss. 4. P. 701-716. DOI: [10.2166/wh.2024.320](https://doi.org/10.2166/wh.2024.320)
18. Obasi P.N., Okolo C.M., Edene E.N. Hydrochemistry and structural control of groundwater flow in the mining areas of Abakaliki, southeast Nigeria // Sustainable Water Resources Management. 2023. Vol. 9. Iss. 1. № 32. DOI: [10.1007/s40899-022-00798-8](https://doi.org/10.1007/s40899-022-00798-8)
19. Mykrä H., Aroviita J., Tolonen K. et al. Detecting mining impacts on freshwater ecosystems using replicated sampling before and after the impact // Environmental Monitoring and Assessment. 2024. Vol. 196. Iss. 7. № 635. DOI: [10.1007/s10661-024-12812-x](https://doi.org/10.1007/s10661-024-12812-x)



20. *Chen Li, Herong Gui, Yan Guo et al.* Study on the Influence of Mining Activities on the Quality of Deep Karst Groundwater Based on Multivariate Statistical Analysis and Hydrochemical Analysis // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. Iss. 24. № 17042. DOI: [10.3390/ijerph192417042](https://doi.org/10.3390/ijerph192417042)
21. *Yong Xiao, Jingli Shao, Frappe S.K. et al.* Groundwater origin, flow regime and geochemical evolution in arid endorheic watersheds: a case study from the Qaidam Basin, northwestern China // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22. Iss. 8. P. 4381-4400. DOI: [10.5194/hess-22-4381-2018](https://doi.org/10.5194/hess-22-4381-2018)
22. *Liang Guo, Guangcai Wang, Yizhi Sheng et al.* Groundwater microbial communities and their connection to hydrochemical environment in Golmud, Northwest China // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 695. № 133848. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.133848](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133848)
23. *Nuan Yang, Pengpeng Zhou, Guangcai Wang et al.* Hydrochemical and isotopic interpretation of interactions between surface water and groundwater in Delingha, Northwest China // *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 598. № 126243. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.126243](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126243)
24. *Haitao Zhang, Guangquan Xu, Hongbin Zhan et al.* Identification of hydrogeochemical processes and transport paths of a multi-aquifer system in closed mining regions // *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 589. № 125344. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2020.125344](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125344)
25. *Xiaobo Zhang, Xue Li, Xubo Gao.* Hydrochemistry and coal mining activity induced karst water quality degradation in the Niangziguan karst water system, China // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. Iss. 7. P. 6286-6299. DOI: [10.1007/s11356-015-5838-z](https://doi.org/10.1007/s11356-015-5838-z)
26. *Shen Qu, Guangcai Wang, Zheming Shi et al.* Using stable isotopes (δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{34}S$ and $^{87}Sr/^{86}Sr$) to identify sources of water in abandoned mines in the Fengfeng coal mining district, northern China // *Hydrogeology Journal*. 2018. Vol. 26. Iss. 5. P. 1443-1453. DOI: [10.1007/s10040-018-1803-5](https://doi.org/10.1007/s10040-018-1803-5)
27. *Yan Guo, Jiuchuan Wei, Herong Gui et al.* Evaluation of changes in groundwater quality caused by a water inrush event in Taoyuan coal mine, China // *Environmental Earth Sciences*. 2020. Vol. 79. Iss. 24. № 528. DOI: [10.1007/s12665-020-09243-5](https://doi.org/10.1007/s12665-020-09243-5)
28. *Shen Qu, Fu Liao, Guangcai Wang et al.* Hydrochemical evolution of groundwater in overburden aquifers under the influence of mining activity: combining hydrochemistry and groundwater dynamics analysis // *Environmental Earth Sciences*. 2023. Vol. 82. Iss. 6. № 135. DOI: [10.1007/s12665-023-10817-2](https://doi.org/10.1007/s12665-023-10817-2)
29. *David K., Timms W.A., Barbour S.L., Mitra R.* Tracking changes in the specific storage of overburden rock during longwall coal mining // *Journal of Hydrology*. 2017. Vol. 553. P. 304-320. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2017.07.057](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.057)
30. *Post D.A., Crosbie R.S., Viney N.R. et al.* Impacts of coal mining and coal seam gas extraction on groundwater and surface water // *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 591. № 125281. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2020.125281](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125281)
31. *Pu Liu, Hoth N., Drebenstedt C. et al.* Hydro-geochemical paths of multi-layer groundwater system in coal mining regions – Using multivariate statistics and geochemical modeling approaches // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 601-602. P. 1-14. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.05.146](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.146)
32. *Ge Zhu, Xiong Wu, Jianping Ge et al.* Influence of mining activities on groundwater hydrochemistry and heavy metal migration using a self-organizing map (SOM) // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 257. № 120664. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.120664](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120664)
33. Даувальтер В.А., Денисов Д.Б., Дину М.И., Слуковский З.И. Биогеохимические особенности функционирования малых арктических озер Хибинского горного массива в условиях изменения климата и окружающей среды // *Геохимия*. 2022. Т. 67. № 6. С. 559-575. DOI: [10.31857/S0016752522050053](https://doi.org/10.31857/S0016752522050053)
34. Даувальтер В.А., Сандимиров С.С., Денисов Д.Б. и др. Эколого-геохимическая оценка снежного покрова в районе воздействия апатит-нефелинового производства Кольского полуострова // *Геохимия*. 2023. Т. 68. № 12. С. 1312-1328. DOI: [10.31857/S0016752523120026](https://doi.org/10.31857/S0016752523120026)
35. Даувальтер В.А., Сандимиров С.С., Денисов Д.Б. и др. Геохимическая модификация поверхностных вод Хибинского горного массива с начала деятельности нового горнодобывающего предприятия // *Геохимия*. 2024. Т. 69. № 5. С. 477-494. DOI: [10.31857/S0016752524050057](https://doi.org/10.31857/S0016752524050057)
36. Даувальтер В.А., Даувальтер М.В. Экологическое состояние подземных вод Восточного рудника АО «Апатит» // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2019. № 16. С. 131-135. DOI: [10.31241/FNS.2019.16.027](https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.027)
37. *Mo Wang, Dong Qing Zhang, Jian Wen Dong, Soon Keat Tan.* Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate – A review // *Journal of Environmental Sciences*. 2017. Vol. 57. P. 293-311. DOI: [10.1016/j.jes.2016.12.019](https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.019)

Авторы: Владимир Андреевич Даувальтер, д-р геогр. наук, главный научный сотрудник (Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия), v.dauvalter@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0372-5088>, Маргарита Васильевна Даувальтер, канд. техн. наук, главный специалист (Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия), <https://orcid.org/0009-0007-5599-4275>, Захар Иванович Слуковский, канд. биол. наук, заведующий научно-исследовательским сектором (Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-4238-1617>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.