

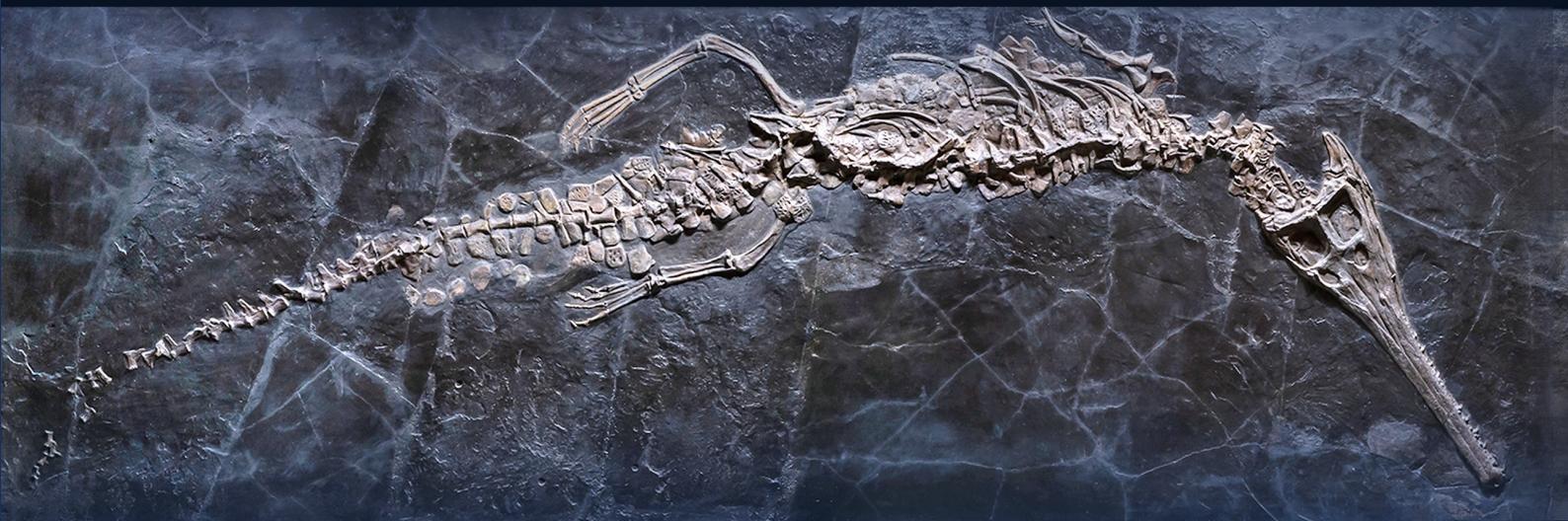
Издаётся Санкт-Петербургским горным
университетом императрицы Екатерины II

С 1907 ГОДА

ISSN 2411-3336
E-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



ТОМ 276 Выпуск 2

№ 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 К1).

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 макроспондила (*Macrospondylus bollensis* Cuvier, 1824) в сланце. Нижняя юра (тоарский ярус) Германии. Недостающие части скелета доработаны гипсовыми вставками. Макроспондилы были крупными хищниками, благодаря узкой передней части морды напоминали современного гавиала, были приспособлены к обитанию в водной среде и сохраняли способность к передвижению на суше.

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

Издается с 1907 года

ISSN 2411-3336
e-ISSN 2541-9404

Том 276
Выпуск 2
№ 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, РАН, 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.Баряя, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, директор (Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь, Россия)

В.Н.Бричким, 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 РАН, зав. кафедрой безопасности производства (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 РАН, проректор по научной деятельности (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

А.Г.Протосения, 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 РАН, директор (ООО «Кинеф», Кирши, Россия)

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

В.Л.Трушин, д-р техн. наук, профессор, академик Международной академии наук высшей школы, РАН, 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 Аннушкин, профессор (Технологический университет, Лuleo, Швеция)

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

Хал Гургенчи, профессор (Школа горного машиностроения Квиинспенского 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)

Чжоу 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. 42.
Тираж 100 экз. Заказ 720. 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

Логвинова А.М., Угальева С.С., Николенко Е.И., Серебрянников А.О., Афанасьев В.П. Полигенность алмазов из отложений карнийского яруса Булкурской антиклинали северо-востока Сибирской платформы.....	3
Мельник И.А. Гранулометрия в рамках кинематической теории преобразования открытых систем.....	18
Абрамов Т.А., Индрupский И.М. Особенности и информативные возможности ранне-радиального режима на КВД в горизонтальных скважинах с близко расположенными трещинами МГРП.....	29
Чантурия В.А., Миненко В.Г., Самусев А.Л. Сорбция золота на модифицированном сапоните.....	49
Строкова В.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н., Неровная С.В. О возможности утилизации карбонатсодержащих отходов добычи полезных ископаемых путем получения фотокаталитических композиционных материалов	58
Меренкова С.И., Карпова Е.В., Пузик А.Ю., Литвинский В.А., Шувалова Ю.В., Волкова М.А., Медведков А.А. Литолого-геохимическая специфика и особенности генезиса терригенно-карбонатных пород нижнеэвенкийской подсвиты (средний кембрий, запад Сибирской платформы)	71
Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Вахромеев А.Г., Коротков С.Б., Данилова М.А., Карташева Е.В., Кузьмина А.А., Назарова М.А. Условия кристаллизации хлоридов при скважинной эксплуатации предельно насыщенных литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы	89
Протосеня А.Г., Карасев М.А., Беляков Н.А., Тулин П.К. Прогноз предельного состояния и дилатансии пород вокруг горных выработок	107
Андиани Дж.Ф. Результаты исследования петрофизических свойств, механических и прочностных характеристик калькариновых пород	123
Агашиева Е.В., Губанов Н.В., Зедгенизов Д.А. Алмазоносный гранатовый лерцолит из кимберлитовой трубы им. В.Гриба: взаимосвязь субдукции, мантийного метасоматоза и образования алмаза	140
Козловский Е.Я., Журавков М.А., Богдан С.И. О необходимости совершенствования методов трехосных испытаний при исследовании механического поведения соляных пород и геоматериалов.....	157
Алексеев В.И., Марин Ю.Б., Бакшеев И.А. Ассоциация грейзенов (цвиттеров) и турмалинитов в гранитах plutona Северный (Чукотка, Россия)	170
Саврей Д.Ю., Чупров И.Ф. Исследование применения осадкообразующих составов с целью выравнивания профиля приемистости паронагнетательных скважин	184



Полигенность алмазов из отложений карнийского яруса Булкурской антиклинали северо-востока Сибирской платформы

А.М.Логвинова¹✉, С.С.Угальева², Е.И.Николенко³, А.О.Серебрянников¹, В.П.Афанасьев¹

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

² Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

³ ALROSA (Zimbabwe) Limited, Хараре, Зимбабве

Как цитировать эту статью: Логвинова А.М., Угальева С.С., Николенко Е.И., Серебрянников А.О., Афанасьев В.П. Полигенность алмазов из отложений карнийского яруса Булкурской антиклинали северо-востока Сибирской платформы // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 3-17. [EDN NRMNKP](#)

Аннотация

Проведены комплексные исследования алмазов карнийского яруса Булкурской антиклинали северо-востока Сибирского кратона. Выделены два наиболее распространенных на участке Булкур типа алмазов: додекаэдроиды со шрамами и кристаллы V-VII разновидностей по классификации Ю.Л.Орлова. Эти группы характеризуются облегченным изотопным составом углерода $\delta^{13}\text{C}$ от $-19,6$ до $-24,7\text{‰}$, различаясь между собой по морфологии, концентрации и формам агрегирования азота, а также составу расплавных включений. Впервые изучены субмикроскопические включения в алмазах этих групп. Такие включения в додекаэдроидах по сравнению с алмазами V-VII разновидностей менее железистые (в среднем 12 и 31 мас.% FeO), а также более обогащены калием (в среднем 5,5 и 1,7 мас.% K₂O). Сделан вывод, что изученные додекаэдроиды со шрамами из карнийских отложений Булкурской антиклинали представляют отдельный тип алмазов, характерных для северо-востока Сибирской платформы. Предполагается докембрийский возраст коренных источников и попадание алмазов в триасовые и более молодые россыпи в результате размыва протерозойских прибрежно-морских отложений в пределах выступов докембра, в частности на Оленекском поднятии.

Ключевые слова

алмаз; примесь азота; микровключения; расплав; изотопия; россыпь; карнийский ярус; Сибирский кратон

Финансирование

Работа выполнена по Государственному заданию ИГМ СО РАН № 122041400157-9 и ИГАБМ СО РАН FUFG-2024-0007.

Поступила: 21.08.2024 Принята: 10.04.2025 Онлайн: 30.09.2025 Опубликована: 29.12.2025

Введение

Алмазоносность отложений карнийского яруса верхнетриасового возраста в пределах Булкурской антиклинали по левобережью р. Лена в нижнем ее течении обнаружена в 1970-е годы и интенсивно изучалась [1] (рис.1). Алмазоносность карнийского яруса изменяется по латерали. Наиболее высокими концентрациями выделяется нижнелененский район, где ураганной алмазоносностью отличаются россыпи Булкурской антиклинали, а на запад и восток от нее их продуктивность падает [2]. Пласт представлен терригенными породами с обильной морской фауной, мощность пласта изменяется от 10 до 100 см. На дневную поверхность пласт выходит торцом и погружается на запад в Предверхоянский прогиб под углом до 30° и более.

Содержания алмазов в пределах пласта колеблются и достигают 13 кар./м³ [3, 4]. Обильно представлены индикаторные минералы кимберлитов без признаков механического износа и гипергенной коррозии, что свидетельствует о близости коренного источника [5, 6]. Среди пиропов присутствуют в незначительном количестве зерна алмазной ассоциации [1]. Это позволило предположить существование близко расположенного кимберлитового тела (тел) с высокой алмазоносностью. Но поисковая обстановка, в первую очередь быстрое погружение пласта в западном направлении под отложения Предверхоянского прогиба, не позволила обнаружить коренной

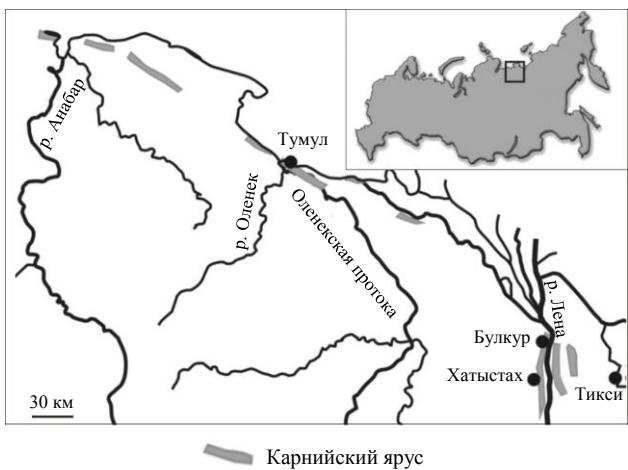


Рис.1. Схематическая карта расположения выхода алмазоносных пород карнийского яруса в пределах северо-востока Сибирского кратона.
Квадрат на врезке – расположение района.
Схема построена по статье [19]

но и типам коренных источников. Предполагается, что отложения карнийского яруса являются позднетриасовыми туффитами и с ними связывают алмазоносность [12]. Однако и здесь, и в других местах Сибирской платформы не найдены вулканические источники этих туфов. В результате ситуация с алмазоносностью карнийского яруса остается неясной.

Предпринято дополнительное изучение алмазов карнийского яруса Булкурской антиклинали для определения их происхождения и путей попадания в данные отложения. Важным является применение комплексного подхода к изучению алмаза – минерала с широким комплексом физико-химических, морфологических и других особенностей, которые в совокупности могут определить его типоморфизм. Общепринято, что минеральные включения в природных алмазах, захваченные ими в процессе роста, отражают геохимические особенности состава силикатного субстрата верхней мантии [13-16]. Однако принципиальную генетическую информацию о составе алмазообразующей среды можно получить на основании результатов исследования субмикроскопических и наноразмерных включений, захваченных алмазом на начальном этапе кристаллизации алмазоматрицы [17, 18].

С целью выяснения особенностей среды кристаллизации и эволюционных изменений в процессе роста алмазов, представленных в отложениях карнийского яруса, в данной работе впервые изучены множественные субмикроскопические полифазные включения в этих алмазах. Такие исследования особенно необходимы для алмазов, в которых видимые в оптическом диапазоне увеличений минеральные включения встречаются редко. Изучен также изотопный состав углерода алмазов, концентрация и формы структурной примеси азота.

Образцы и методы исследования

Изучено 97 кристаллов алмаза размером от 1 до 4 мм из отложений карнийского яруса Булкурской антиклинали (низовья р. Лена, участок Булкур) (рис.1). Характерной морфологической особенностью алмазов этого участка является преобладание типичных додекаэдроидов (51,7 %), часто скрытослоистых и со споновидной штриховкой, реже с шагренью и полосами пластической деформации. На поверхности таких кристаллов, как правило, присутствуют шрамы, заполненные вторичным материалом, являющиеся признаком магматического травления. Из общей совокупности кристаллов 35 % отнесены к V и VII разновидностям по классификации Ю.Л.Орлова [20]. Такие кристаллы имеют серую, до черной, окраску из-за наличия многочисленных флюидных включений с аморфным углеродом на их стенках (рис.2, к, л) [21, 22]. Ламинарные кристаллы октаэдрического и переходного октаэдр – ромбододекаэдр габитуса встречаются редко (около 13 %) (рис.2, а-в). Они обладают размером до 1 мм и представлены острореберными октаэдрами. Два образца – это осколки кристаллов кубического габитуса желтого цвета (II разновидность по классификации Ю.Л.Орлова).

источник алмазов. Поисковые критерии на алмаз по его минералам-спутникам широко используются как в пределах Якутской алмазоносной провинции, так и на других территориях, перспективных на алмазоносность [7, 8].

Большое количество алмазов, найденных на Булкурской антиклинали, было изучено в Амакинской экспедиции АК «АЛРОСА» и описано в работах [9, 10]. Показана необычность ассоциации алмазов, до 80 % которых имеют облегченный изотопный состав углерода, и делается вывод о неизвестном типе коренного источника. Такая ситуация типична для россыпей Прианабарья (Эбеляхской, Маятской и др.), где, как и на Булкуре, с кимберлитовыми минералами ассоциируют алмазы, совершенно не характерные для кимберлитовых тел. Это противоречие рассмотрено авторами в работе [11], где аргументируется полигенез алмазов не только по типоморфизму, но и типам коренных источников.

Предпринято дополнительное изучение алмазов карнийского яруса Булкурской антиклинали для определения их происхождения и путей попадания в данные отложения. Важным является применение комплексного подхода к изучению алмаза – минерала с широким комплексом физико-химических, морфологических и других особенностей, которые в совокупности могут определить его типоморфизм. Общепринято, что минеральные включения в природных алмазах, захваченные ими в процессе роста, отражают геохимические особенности состава силикатного субстрата верхней мантии [13-16]. Однако принципиальную генетическую информацию о составе алмазообразующей среды можно получить на основании результатов исследования субмикроскопических и наноразмерных включений, захваченных алмазом на начальном этапе кристаллизации алмазоматрицы [17, 18].

С целью выяснения особенностей среды кристаллизации и эволюционных изменений в про-

цессе роста алмазов, представленных в отложениях карнийского яруса, в данной работе впервые изучены множественные субмикроскопические полифазные включения в этих алмазах. Такие ис-

следования особенно необходимы для алмазов, в которых видимые в оптическом диапазоне уве-

личений минеральные включения встречаются редко. Изучен также изотопный состав углерода алмазов, концентрация и формы структурной примеси азота.



Рис.2. Типичные кристаллы алмазов изученной коллекции

а-в – алмазы I разновидности по Ю.Л.Орлову: *а, в* – бесцветный октаэдр с полицентрически растущими гранями, *б* – кривогранный додекаэдроид; *г-и* – кривогранный додекаэдроид с глубокими шрамами на поверхности, заполненными продуктами окжелезнения; *к, л* – алмазы V-VII разновидностей с множественными черными включениями

Такие кристаллы часто встречаются в алмазоносных россыпях Якутии и Урала [23]. Важной характеристикой изученной коллекции является высокое содержание (более 50 %) целых и в незначительной степени поврежденных кристаллов, но для большинства из них отмечается повышенная трещиноватость с продуктами экзогенного окжелезнения.

В настоящей работе для детальных исследований микровключений подобраны кристаллы наиболее распространенных на участке Булкур типов алмазов: додекаэдроиды со шрамами и многочисленными темноцветными включениями (рис.2, *г-и*), а также алмазы V-VII разновидностей (рис.2, *к, л*). Внутреннее строение алмазов и характер распределения структурных примесей в них исследованы на плоскопараллельных пластинках толщиной 90-170 мкм, вырезанных преимущественно по плоскости (110).

Распределение примесей азота и водорода определены по спектрам. Спектры с апертурой 50 мкм регистрировались в диапазоне 750-7500 см⁻¹ при разрешении 2 см⁻¹ на ИК-Фурье спектрометре (FT-IR) VERTEX 70 (фирма Bruker), оснащенном микроскопом HYPERION 2000. Отдельные зоны роста исследованных алмазов, а также зоны с преимущественным расположением включений выявлены методом катодолюминесценции (КЛ) с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO-1430VP с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром. Изотопный состав углерода определяли масс-спектрометром Finnigan-MAT Delta в режиме двойного напуска после окисления образца в чистом кислороде по методике [24]. Погрешность измерения отношения изотопов не превышала ±0,02 %. Изотопные данные приведены относительно международного стандарта PDB.

Для исследования минеральных включений кристаллы были пришлифованы до выведения включения на поверхность алмаза-матрицы. Идентификация некоторых минеральных фаз проведена методом рамановской спектроскопии на приборе Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800. Химический состав включений определялся с помощью сканирующего микроскопа MIRA 3 (TESCAN, Чехия). Фазовый состав наноразмерных полифазных включений изучен методом просвечивающей



электронной микроскопии (ПЭМ) на приборе Philips CM200 (LaB₆) при ускоряющем напряжении 200 кВ [25, 26].

Основная часть аналитических работ выполнена в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии проведены в Центре наук о Земле им. Гельмгольца (Потсдам, Германия).

Результаты исследования и обсуждение

ИК-спектроскопия. Согласно классификации алмазов [27, 28], все изученные образцы относятся к типу 1aAB с примесным азотом в форме A и B1. В ИК-спектрах фиксируются также полосы поглощения с максимумами 1370 и 1430 см⁻¹, обусловленные присутствием в алмазах дефекта B2 [29], и часто наблюдается пик 3107 см⁻¹, вызванный примесью водорода [30].

По содержанию и распределению структурной примеси азота с учетом морфологии алмазов выделены четыре группы (табл.1). Первую группу изученных алмазов по морфологии кристаллов, диапазону содержания азота и степени его агрегирования с высокой долей вероятности можно отнести к кимберлитовым. Вторая группа, представленная желтым кубоидом, соответствует алмазам II разновидности по классификации Ю.Л.Орлова [20]. В третью группу попадают округлые бесцветные додекаэроиды со шрамами, заполненными вторичными продуктами. Алмазы этой группы преобладают в рассматриваемой россыпи. Они имеют высокое содержание примеси азота с достаточно высокой степенью агрегирования. Четвертая группа представлена типичными алмазами V-VII разновидностей по классификации Ю.Л.Орлова [20]. Группы значительно отличаются между собой как по общему содержанию примеси азота (от 47 до 1956 ppm), так и степени его агрегирования, что, наряду с различиями морфологии, прямо указывает на полигенность алмазов россыпи.

Таблица 1

Дефектно-примесный состав изученных алмазов

Номер образца	Зона	N(A), ppm	N(B), ppm	N _{tot} , ppm	B, %	Описание алмаза
Кар-80	Центр	64	7	71	10	Бесцветный додекаэроид
	Край	45	3	47	5	
Кар-19	Центр	290	185	474	39	Бесцветный октаэдр
	Край	413	307	720	43	
	Край	503	346	849	41	
	Край	437	272	709	38	
Кар-21	Центр	287	312	599	52	Бесцветный додекаэроид
	Край	376	541	917	59	
	Край	404	523	928	56	
Кар-78	Край	239	157	397	40	Бесцветный октаэдр
	Центр	302	235	536	44	
Кар-101	Край	427	80	507	16	Бесцветный додекаэроид
	Центр	396	94	490	19	
Кар-16	Край	100	0	100	0	Желтый кубоид
	Центр	96	0	96	0	
	Центр	106	0	106	0	
Кар-2	Центр	866	300	1167	26	Додекаэроид со шрамом
	Край	776	429	1205	36	
Кар-15А	Центр	776	398	1173	34	Додекаэроид со шрамом
	Край	809	389	1197	32	
	Край	766	389	1155	34	
Кар-74	Край	771	447	1218	37	Додекаэроид со шрамом
	Край	766	443	1209	37	
	Центр	807	355	1162	31	
Кар-87	Центр	825	315	1140	28	Додекаэроид со шрамом
	Край	833	315	1148	27	
Кар-88	Край	540	332	871	38	Додекаэроид со шрамом
	Центр	535	337	872	39	
Кар-34	Край	1667	286	1953	15	V разновидность
	Край	1642	315	1956	16	
	Центр	1609	329	1938	17	
	Центр	1543	286	1829	16	



Окончание табл.1

Номер образца	Зона	N(A), ppm	N(B), ppm	N _{tot} , ppm	B, %	Описание алмаза
Кар-38	Край	1328	315	1643	19	V разновидность
	Край	1345	372	1717	22	
	Центр	1180	472	1652	29	
Кар-38а	Край	1490	272	1762	15	V разновидность
	Край	1302	269	1571	17	
	Центр	1289	409	1698	24	

Дефекты кристаллической структуры в алмазе являются индикатором кристаллогенеза [31]. В статье [32] изучен дефектно-примесный состав алмазов Булкурской антиклинали, где все описанные додекаэдроиды отнесены к I разновидности по классификации Ю.Л.Орлова [20].

Включения в алмазах. Исследованы минеральные и расплавные включения в додекаэдрических алмазах со шрамами и в алмазах V разновидности, выделенных нами в отложениях карнийского яруса. Визуально они представлены в основном графитом, сульфидами или темноцветным материалом. Как правило, такие включения отражают состав алмазообразующего субстрата [33].

Додекаэдроиды со шрамами. В центральной ростовой зоне додекаэдрического кристалла алмаза Кар-15 зафиксированы множественные силикатные включения моноклинного пироксена и граната (рис.3, *а*, *б*) в ассоциации с наноразмерными полифазными кристаллофлюидными включениями. Эти включения имеют чрезвычайно мелкие размеры, не превышающие 5 мкм, округлую форму, иногда проявляется кристаллографическая огранка. По химическому составу они представлены моноклинным пироксеном, гранатом, слюдой и полифазными образованиями. Частично они изменены, о чем свидетельствует присутствие хлорита и других недиагностированных фаз (табл.2). Химический состав гранатов и пироксенов варьируется в незначительных пределах. Включения альмандин-пиропового граната относятся к лерцолитовому парагенезису и характеризуются низким содержанием, мас.-%: Cr₂O₃ 1,5, типичным для этой ассоциации количеством CaO около 4,43, FeO 15,5 и MgO 14,9 [10]. Пироксены по химическому составу разделены на две группы по содержанию Na₂O. К первой отнесены пироксены, характеризующиеся относительно высоким содержанием жадеитового минала Na₂O 3,6-4,8 мас.-%, повышенным содержанием FeO и устойчивой примесью Cr₂O₃ около 1 мас.% (табл.2). В составе второй группы пироксенов содержание Na₂O не превышает 1 мас.%. В ассоциации с гранатом и клинопироксеном идентифицированы ильменит, мас.-%: TiO₂ 49,1; FeO 42,1; Cr₂O₃ 0,98; MnO 4,89; MgO 2,87 и слюда с примесью бария BaO 3,0-4,1. Это является первой находкой слюды в алмазе с высоким содержанием бария. Устойчивое присутствие бария в алмазообразующей среде подтверждается составом полифазных наноразмерных включений, зафиксированных в центральной части этого образца алмаза и исследованных методом ПЭМ (рис.3).

В девяти образцах додекаэдроидов со шрамами изучен химический состав темноцветного вещества (по-видимому, закристаллизованный расплав), заполняющего многочисленные микротрещины, развитые по всему объему образца (рис.4). Это вещество представляет собой гетерогенный материал, обогащенный глиноземом, железом и калием (табл.3), а также титаном. Идентифицировать отдельные фазы этого изначально гомогенного, вероятно расплавного, вещества в

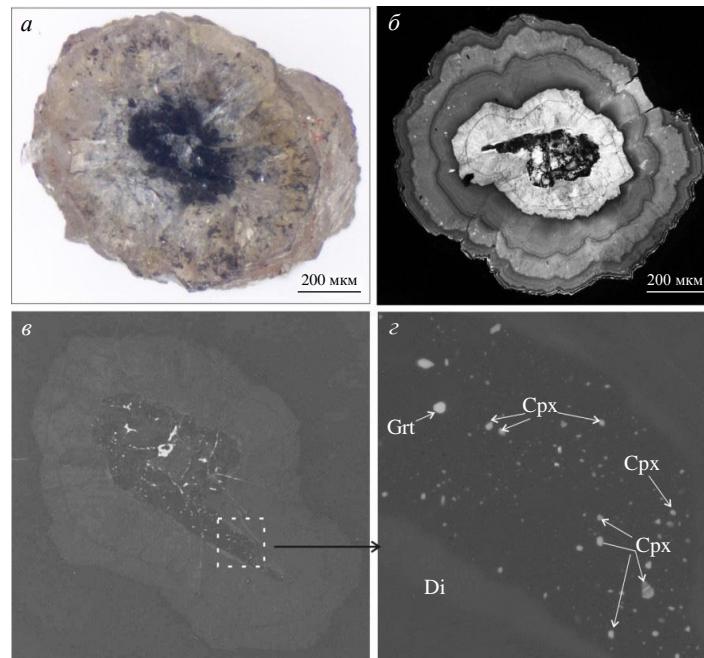


Рис.3. Общий вид (*а*) пришлифованного кристалла алмаза Кар-15 (участок Булкур, низовья р. Лена); изображение в катодолюминесцентном излучении (*б*); изображение центральной части кристалла в излучении обратнорассеянных электронов (*в*); зона концентрации включений (*в*) в увеличенном фрагменте (*г*)

Cpx – клинопироксен; Grt – гранат; Di – алмаз

данной работе не представилось возможным. Однако приведенный в табл.3 валовый состав включений в алмазах этой группы позволяет оценить химизм захваченного во время кристаллизации расплава. В целом его можно охарактеризовать как обогащенный железом и калием алюмосиликатный расплав, содержащий воду и летучие компоненты и имеющий следующий средний химический состав, мас.%: SiO_2 48-52; Al_2O_3 27-30; FeO 7-10; MgO около 2, CaO менее 1, K_2O в среднем 5,8-7,0. В образце Кар-4 во всех включениях зафиксировано более 10 мас.% калия (рис.5, табл.3). Присутствие большого количества флюидных включений в додекаэдроидах «северного» типа, особенно в кристаллах алмаза V-VII разновидностей, показано в работах [21, 34].

Таблица 2

Состав микровключений клинопироксена и граната из алмаза Кар-15 участка Булкур, мас.%

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	Сумма	#Mg
Cpx									
50,6	0,69	3,01	1,82	8,04	14,3	20,6	0,67	99,73	75,98
52,0	0,48	2,58	0,84	8,69	12,5	22,1	0,78	100	72,00
51,1	0,56	2,84	0,89	9,49	12,5	20,9	0,87	99,19	70,19
52,1	0,48	3,08	1,78	7,61	12,7	20,9	1,02	99,56	74,82
55,4	0,41	8,21	1,28	6,63	8,17	16,4	2,33	98,8	68,71
56,1	0,46	6,33	1,58	4,98	11,57	15,0	3,97	99,94	80,55
54,7	0,47	6,70	1,54	5,19	12,7	14,1	4,7	100,01	81,35
55,0	0,56	5,98	1,31	5,73	12,1	15,2	4,13	100,04	79,03
56,3	0,54	6,20	1,60	4,46	11,5	15,2	4,01	99,86	82,18
54,2	0,36	6,82	1,44	4,86	13,9	12,9	5,48	99,99	83,55
54,6	0,66	5,49	1,13	6,03	12,7	15,8	3,53	99,97	78,99
55,3	0,67	5,51	1,03	5,74	12,3	15,7	3,37	99,6	79,19
54,6	0,36	6,93	1,13	4,79	14,1	12,7	5,77	100,3	83,96
54,5	0,48	6,48	1,45	5,18	12,7	14,2	4,70	99,7	81,41
53,8	0,66	5,1	1,21	6,19	13,7	15,4	3,84	99,92	79,79
55,1	0,61	5,56	0,97	5,82	12,7	15,6	3,64	99,91	79,52
54,7	0,37	7,03	1,31	4,51	13,7	12,7	5,62	100	84,41
54,9	0,21	6,72	1,51	5,03	12,6	14,2	4,75	99,92	81,69
55,0	0,18	6,92	1,34	4,27	14,1	12,7	5,71	100,2	85,47
55,1	0,51	6,37	1,42	5,23	12,1	14,5	4,48	99,68	80,41
54,6	0,56	5,9	1,11	5,95	13,1	14,6	4,07	99,92	79,71
55,1	0,39	6,75	1,36	5,07	13,2	13,2	4,94	99,95	82,22
51,6	0,52	3,94	1,54	7,87	16,7	17,1	0,72	99,99	79,07
51,5	0,51	3,73	1,77	7,74	15,4	18,6	0,83	100	77,99
51,7	0,53	3,77	1,58	7,37	15,3	19,0	0,65	99,99	78,76
51,7	0,62	3,76	1,55	7,46	15,1	19,1	0,79	100	78,28
51,5	0,59	4,34	1,15	7,49	14,6	19,7	0,63	100	77,65
52,0	0,56	3,8	1,27	8,02	17,3	16,2	0,80	99,99	79,37
50,5	0,45	3,08	1,46	10,7	14,7	18,1	0,95	99,99	71,08
51,2	0,76	3,97	1,63	7,23	15,1	19,3	0,77	99,98	78,82
51,2	0,92	4,12	1,69	7,85	15,0	18,4	0,76	99,86	77,25
53,3	0,41	6,12	1,22	9,26	12,0	13,4	4,23	100	69,83
52,0	0,33	3,69	1,63	8,23	18,4	14,9	0,78	99,99	79,90
51,3	0,45	3,52	1,24	9,12	15,3	18,9	0,54	100,3	74,91
Grt									
42,3	0,25	21,1	1,5	15,5	14,9	4,43		99,99	63,2

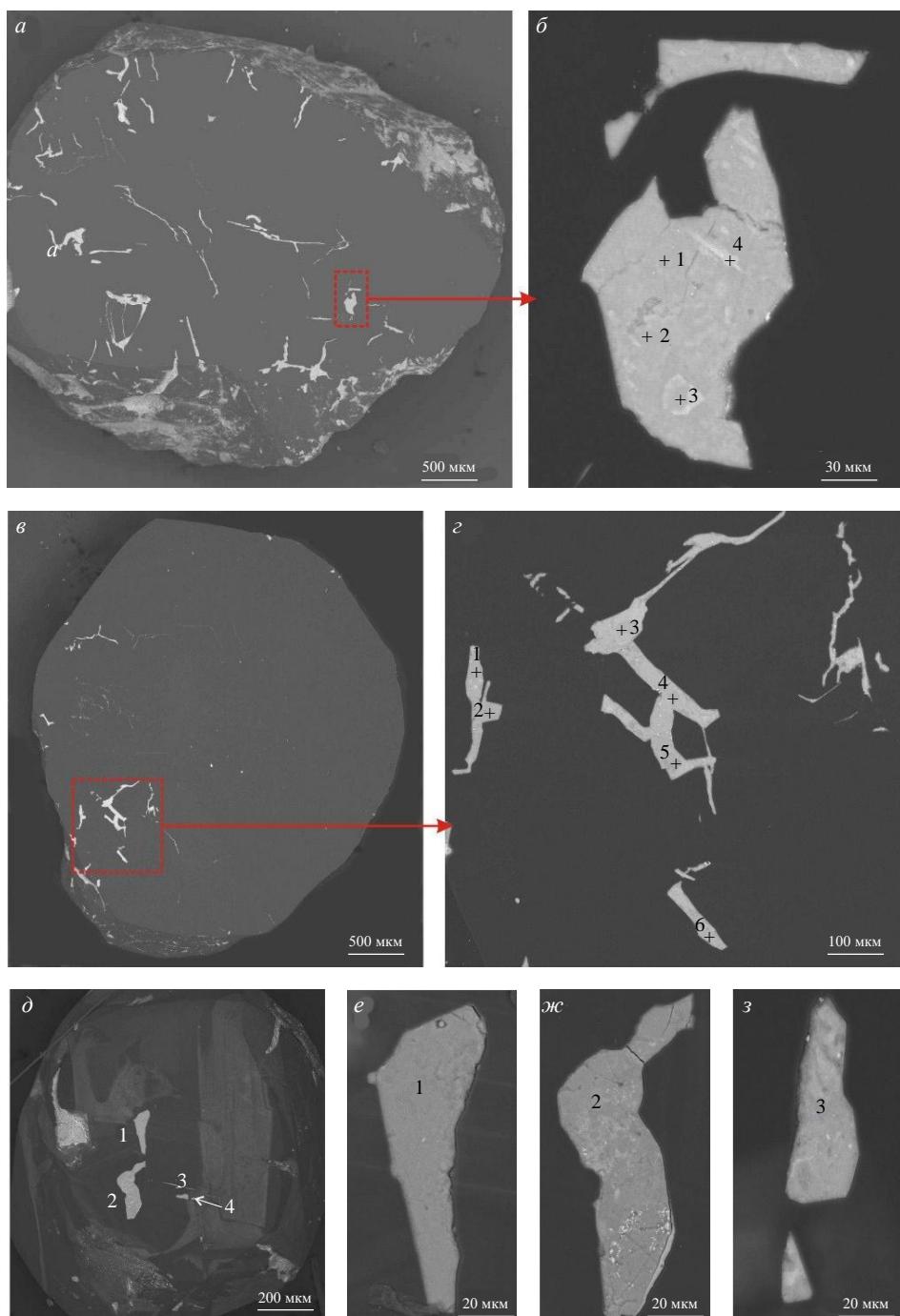


Рис.4. Микрофотографии кристаллов алмаза додекаэдрического габитуса со шрамами и включениями частично раскристаллизованного расплава: образец Кар-34 в излучении обратнорассеянных электронов (а), увеличенный фрагмент включения (б); образец Кар-30 в излучении обратнорассеянных электронов (с), увеличенный фрагмент включений (д); образец Кар-11 в катодолюминесцентном излучении (е-з). Цифрами обозначены соответствующие точкам химические анализы в табл.3

В условиях понижения температуры из расплава выделяются фазы разного состава. В образце Кар-111 отчетливо фиксируются множественные обособления Ti-содержащих фаз, включая рутил (рис.5, табл.3). Также выявлена неоднородность в образце Кар-30. В табл.3 показаны две группы составов. В первом случае (точки 2, 5, 6) состав обогащен SiO_2 , Al_2O_3 и K_2O ; во втором (1, 3, 4) наблюдается уменьшение содержания SiO_2 , Al_2O_3 и K_2O при существенном возрастании железа.



Таблица 3

Химический состав расплавленного вещества в окружных алмазах со шрамами участка Булкур, мас. %

Компоненты	Кар-34				Кар-30				Кар-11				Кар-17-5								
	1	2	3	4	2	5	6	1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4			
SiO ₂	48,7	47,8	47,8	43,6	44,7	49,1	47,0	35,7	36,5	36,4	48,2	47,8	50,6	48,9	49,9	52,5	50,3	48,1	49,3		
TiO ₂	0,15	0,03	0,01	0,03	1,16	0,70	2,51	0,92	12,3	0,31	0,10	н/о	н/о	0,38	0,23	н/о	н/о	н/о	48,7		
Al ₂ O ₃	27,1	28,2	27,4	26,5	27,7	29,4	28,0	23,1	23,0	24,0	29,2	28,9	29,8	29,1	28,3	30,3	29,8	27,9	29,2		
FeO	8,8	10,5	11,4	15,7	17,8	10,6	12,6	23,4	22,0	25,5	9,72	10,6	6,38	9,36	6,88	6,30	7,26	10,7	7,70		
MgO	4,05	2,36	2,36	2,27	2,53	2,04	2,50	2,61	2,55	3,23	2,14	2,08	2,1	2,34	3,94	3,86	1,98	2,44	2,13		
CaO	0,9	0,81	0,81	0,78	0,53	0,61	0,46	0,60	0,62	0,55	0,84	0,93	0,87	0,77	1,08	1,00	0,78	0,21	0,24		
K ₂ O	5,84	5,83	5,61	5,19	5,38	5,93	6,68	3,64	3,00	3,09	5,12	4,85	5,81	5,1	5,02	5,61	5,43	6,31	6,86		
Сумма	95,54	95,5	95,38	94,04	99,8	98,38	99,8	99,97	99,97	99,08	95,22	95,16	95,56	95,57	95,5	99,8	95,55	95,45	95,49		
Кар-111																					
Компоненты	Кар-4				К-содержание силикатные фазы				Рутил				Fe, Ти-оксиды								
	18	22	23	24	1	2	3	4	5	6	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO ₂	50,1	47,1	42,6	44,6	52,9	51,0	50,5	50,1	50,3	51,4	53,4	52,6	49,2	48,7	1,33	1,67	3,92	1,93	5,15	7,68	6,91
TiO ₂	1,12	0,67	2,31	1,80	0,10	0,41	0,27	0,10	0,95	0,25	0,12	0,10	1,52	0,91	92,9	91,6	89,3	89,0	75,5	68,9	60,7
Al ₂ O ₃	28,0	26,4	23,4	25,6	28,7	27,1	27,6	27,3	27,1	27,8	28,1	27,3	27,8	27,2	1,84	1,76	3,16	1,84	4,19	5,62	5,16
FeO	6,70	11,6	14,2	11,5	9,09	6,63	7,97	8,46	8,43	8,34	8,70	8,82	6,53	9,05	2,65	3,21	1,82	5,28	13,4	20,3	24,8
MgO	1,53	1,32	5,41	3,44	1,86	2,73	1,93	2,31	2,40	2,38	1,79	3,68	1,67	2,23	—	—	—	—	—	—	—
CaO	1,92	2,08	1,49	1,84	0,78	0,73	0,73	0,94	0,90	0,92	0,96	0,69	0,66	0,86	0,46	0,45	0,49	0,45	0,69	0,85	0,65
K ₂ O	10,4	10,3	10,7	11,2	6,55	6,16	6,30	6,36	6,02	6,41	7,04	6,42	6,78	5,78	0,10	0,15	0,66	0,17	0,69	1,02	0,76
Сумма	99,72	99,47	100,1	99,98	99,88	94,8	95,3	95,47	96,1	97,5	100,1	99,51	94,2	94,7	99,18	98,85	99,35	98,67	99,62	104,4	99,0

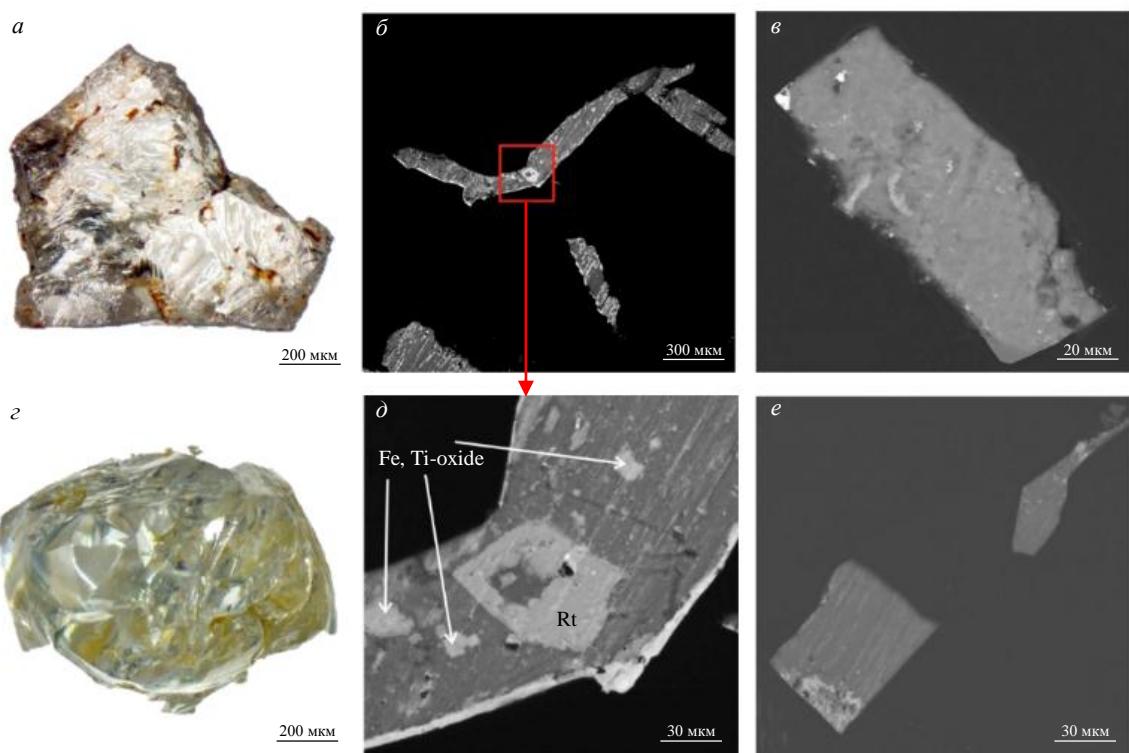


Рис.5. Микрофотографии округлых алмазов, содержащих включения частично раскристаллизованного расплава, обогащенного титаном, железом и алюминием: *а* – общий вид образца Кар-111; *б, в* – изображения включений в излучении обратнорассеянных электронов; *г, е* – общий вид образца Кар-4 и включения расплава в нем; *д* – увеличенный фрагмент включения *б*; Rt – рутил; Fe, Ti-oxide – оксиды железа и титана. Составы отдельных фаз представлены в табл.3

Наиболее четко процесс преобразования алюмосиликатного расплава показан на примере двух типов алмазов: додекаэдроид со шрамами Кар-10-17 и алмазов V разновидности Кар-81 и Кар-82 (рис.6). Все выделившиеся фазы в излучении обратнорассеянных электронов отличаются по цвету (более светлые и темные). В первом случае образовавшиеся фазы по химическому составу подразделяются на три группы. Темная часть в приведенных включениях имеет однотипный химический состав, мас.%: SiO_2 42,0-44,1; Al_2O_3 26-27,1; FeO 14,2-16,9; MgO 2,15-2,54; K_2O 4,73-5,46. Светлые зоны характеризуются средним 2,03-2,17 мас.% и низким 0,50-0,87 мас.% содержаниями K_2O . В них наблюдается резкое увеличение FeO , в среднем до 40 мас.% (табл.4).

Алмазы V-VII по классификации Ю.Л.Орлова. Расплавные включения в алмазах V-VII разновидности (рис.6, *г, д*) характеризуются невысоким содержанием калия, не превышающим 2 мас.% K_2O , и большим обогащением железа от 25,2 до 34,6 мас.% FeO (табл.4). Отличительной чертой их состава является устойчивое присутствие сульфатов и хлора (возможно, хлоридов). Основные различия в химическом составе расплавных включений рассматриваемых типов алмазов показаны на рис.7. Расплавные включения в алмазах додекаэдрического габитуса со шрамами более обогащены калием, кремнеземом и алюминием, а в алмазах V-VII разновидностей такие включения отличаются большим содержанием железа в составе.

В алмазе V-VII разновидностей Кар-2 методом ПЭМ зафиксированы карбонатитовые полифазные наноразмерные включения низкомагнезиального состава, представленные фазами SiO_2 , апатита, Ba, Sr-карбоната, Mg, Fe, K-силиката (не диагностирован) и множественными вакуолями флюида. В этом образце также отмечен аморфный кремнезем. Подобные включения в аллювиальных алмазах этого типа северо-востока Сибирского кратона описаны в статье [34].

Источником таких низкомагнезиальных карбонатитовых расплавов-растворов могли быть субдуцированные породы океанической и частично континентальной земной коры. Обогащение таких включений некогерентными элементами может свидетельствовать о просачивании солевых флюидов, обогащенных Ba, Sr, P, Ti, K, Cl, через карбонатизированные эклогиты.

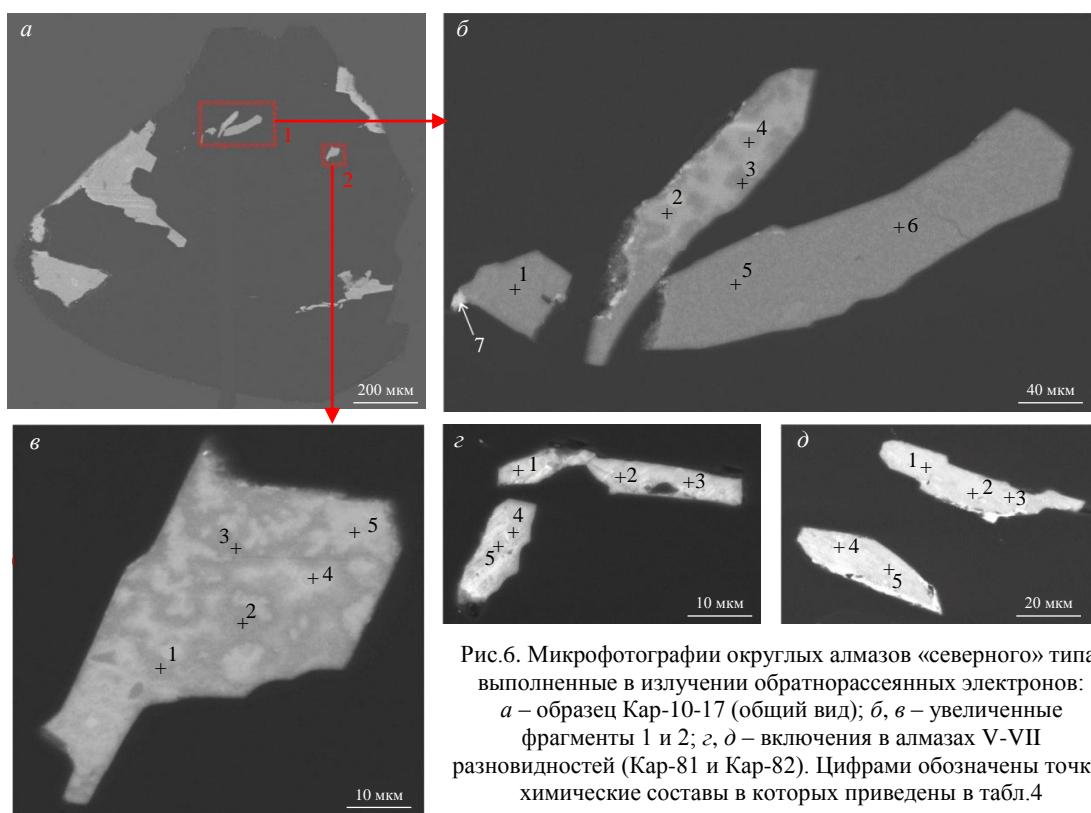


Рис.6. Микрофотографии окружных алмазов «северного» типа, выполненные в излучении обратнорассеянных электронов: *а* – образец Кар-10-17 (общий вид); *б, в* – увеличенные фрагменты 1 и 2; *г, д* – включения в алмазах V-VII разновидностей (Кар-81 и Кар-82). Цифрами обозначены точки, химические составы которых приведены в табл.4

Таблица 4

Химический состав расплавного вещества в окружном алмазе со шрамами и алмазах V-VII разновидностей участка Булкур, мас.%

Компо-ненты	Кар-10-17 (окружный алмаз со шрамами)											
	Включение (фрагмент) 1						Включение (фрагмент) 2					
	Темная часть				Светлая часть			Темная часть			Светлая часть	
	1	3	5	6	2	4	7	1	2	3	4	5
SiO ₂	42,3	42,0	42,8	44,1	27,5	26,6	20,1	42,9	42,2	51,8	32,2	34,2
Al ₂ O ₃	26,0	26,2	26,9	27,1	19,5	19,3	11,3	26,4	26,7	21,5	23,1	23,6
FeO	16,8	16,9	15,7	14,2	36,7	37,7	63,6	16,3	16,6	16,2	31,8	29,2
MgO	2,54	2,45	2,28	2,15	3,14	3,19	н/о	2,32	2,39	1,86	3,26	3,49
CaO	0,33	0,34	0,32	0,30	0,31	0,38	н/о	0,42	0,43	н/о	0,31	0,35
K ₂ O	4,95	4,91	5,02	5,46	0,87	0,50	2,11	4,83	4,73	8,62	2,03	2,17
ZrO ₂	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	2,95	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Сумма	92,9	92,8	93,02	93,31	88,02	87,67	100,1	93,2	93,05	99,98	92,7	93,01
Компо-ненты	Алмазы V-VII разновидностей											
	Кар-81					Кар-82						
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	
SiO ₂	37,3	37,5	39,2	37,9	40,9	32,7	30,9	30,3	34,9	37,3	40,0	
Al ₂ O ₃	23,2	24,4	24,6	24,0	25,7	21,5	20,6	21,5	22,0	23,2	25,2	
FeO	34,8	33,1	31,4	31,4	27,9	25,2	23,8	28,7	31,4	34,6	29,1	
MgO	2,39	2,71	2,81	2,23	3,03	4,51	4,84	4,44	2,23	2,39	3,03	
CaO	–	–	–	–	–	0,85	2,67	0,62	–	–	0,19	
K ₂ O	1,85	1,50	1,10	1,84	2,07	2,00	1,93	1,79	1,84	1,85	1,47	
SO ₃	0,61	0,70	0,70	0,54	0,41	0,44	0,91	0,27	0,54	0,61	0,92	
Cl	0,10	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,08	0,10	0,09	0,11	0,08	
Сумма	100,25	100	99,81	98,0	100,1	87,2	85,8	87,72	93,0	100,06	99,91	

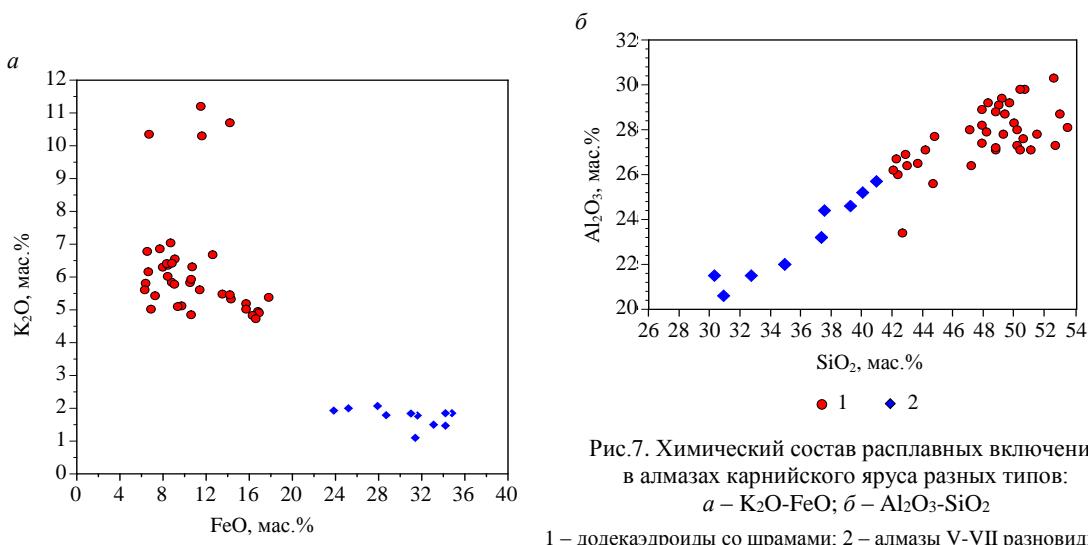


Рис.7. Химический состав расплавных включений в алмазах карнийского яруса разных типов:

a – K_2O - FeO ; b – Al_2O_3 - SiO_2

1 – додекаэроиды со шрамами; 2 – алмазы V-VII разновидностей

Изотопный состав углерода алмазов. Изучен изотопный состав углерода десяти алмазов: семи округлых додекаэроидов со шрамами и трех кристаллов кимберлитового типа – двух октаэдров и одного кристалла переходной формы от октаэдра к додекаэдру с ламинарным строением граней. Все додекаэроиды со шрамами показали легкий изотопный состав углерода, тогда как три последних – тяжелый изотопный состав (табл.5). Это свидетельствует о различиях источников углерода для формирования алмазов и, следовательно, о различных условиях образования.

Таблица 5

Изотопный состав углерода алмазов из отложений карнийского яруса

Номер образца	Форма кристалла	Цвет	$\delta^{13}C$, ‰
Кар-72	Округлый додекаэроид (шрамы)	Бесцветный	-19,55
Кар-85	Округлый додекаэроид (шрамы)	Бесцветный	-20,36
Кар-86	Округлый додекаэроид (шрамы)	Бесцветный	-21,93
Кар-87	Округлый додекаэроид (шрамы)	Бесцветный	-22,33
Кар-88	Округлый додекаэроид (шрамы)	Бесцветный	-24,65
Кар-96	Округлый додекаэроид (шрамы)	Бесцветный	-23,25
Кар-100	Округлый додекаэроид (шрамы)	Бесцветный	-21,27
Кар-78	Октаэдр	Бесцветный	-2,34
Кар-6А	Переходная форма	Бесцветный	-8,82
Кар-40	Октаэроид	Бесцветный	-10,21

Обсуждение результатов исследования

Изученные алмазы (97 кристаллов) представляют полигенную смесь, в целом характерную для северо-востока Сибирской платформы [11]. Среди изученных алмазов выделяются: алмазы кимберлитового типа; округлые додекаэроиды со шрамами; кубоиды II разновидности: алмазы V-VII разновидностей.

Додекаэроиды со шрамами имеют отличия от других групп алмазов. Если алмазы V-VII и II разновидностей типичны для всего северо-востока платформы и распространены на площади до 400 тыс. km^2 [11], то описанные округлые додекаэроиды в карнийских отложениях Булкура отличаются от додекаэроидов остальной территории. В первую очередь это касается высокой дефектности булкурских кристаллов, наличия внутренних трещин, выполненных недиагностируемым материалом, возможно эпигенетическим. В процессе вскрытия этих трещин при растворении по ним образуются шрамы. Аналогичные включения и шрамы отмечаются на алмазах V-VII разновидностей, близок и перечень микровключений в них (см. табл.2). Изучение изотопного состава углерода рассматриваемых алмазов показал облегченный изотопный состав углерода $\delta^{13}C$ от -19,6 до -24,7 ‰.

Изотопный состав углерода алмазов является одним из важнейших показателей источника вещества в генетических вопросах алмазообразования [35]. Для большинства кимберлитовых алмазов $\delta^{13}\text{C}$ составляет от -4 до -8‰ . Считается, что перидотитовые алмазы и близкие к ним по изотопному составу эклогитовые образовались при участии мантийного углерода [36]. Облегченный изотопный состав углерода свидетельствует о более сложных субдукционных процессах. Отметим, что алмазы из офиолитов также обогащены легким изотопом углерода. Изотопный состав углерода характеризовался величинами $\delta^{13}\text{C}$ от $-18,8$ до $-28,4\text{‰}$ [37].

В россыпях процент алмазов, обогащенных легким изотопом углерода, значительно выше. Аллювиальные алмазы V-VII разновидностей характеризуются $\delta^{13}\text{C}_{\text{сред}}$ от -20 до -24‰ [38]. Можно было бы предположить, что додекаэдроиды со шрамами представляют собой результат глубокого растворения алмазов V-VII разновидностей, тем более по изотопному составу углерода они полностью схожи (табл.5) [39]. Однако по концентрации и формам агрегирования азота они различаются (см. табл.1). Этот тип отличается и по химическому составу заключенных в алмазе расплавных включений. Такие включения в додекаэдроидах по сравнению с алмазами V-VII разновидности менее железистые (в среднем 12 и 31 мас.% FeO), а также более обогащены калием (в среднем 5,5 и 1,7 мас.% K₂O). Кроме того, додекаэдроиды лучше окристаллизованы, у них отмечаются двойниковые вrostки, чего не может быть у алмазов V-VII разновидностей, характеризующихся балласовым строением [40]. Катодолюминесценция микроскопия позволяет выявить зональные неоднородности в природных кристаллах алмаза и получить информацию об условиях роста и постростовых изменениях [41, 42]. Картина катодолюминесценции на рис.3 показывает ростовую зональность кристалла, конформную его поверхности, что свидетельствует о низкой степени растворения. Поэтому додекаэдрическая форма, вероятно, близка к ростовой и формируется в процессе быстрого дефектного роста. Мы полагаем, что изученные додекаэдроиды со шрамами из карнийских отложений Булкурской антиклинали представляют отдельный тип алмазов, характерных для северо-востока платформы. Этот тип алмазов наиболее близок к алмазам V-VII разновидностей, отличаясь несколько более качественной структурой. В генетическом плане обе разновидности близки и связаны наиболее вероятно с субдукцией. Додекаэдроиды в других россыпях данного региона имеют более совершенное строение. Так, додекаэдроиды из россыпи р. Куойка (левый приток р. Оленек) характеризуются ювелирным качеством [10].

Для алмазов из россыпей северо-востока Сибирской платформы авторы настоящей статьи разработали схему деления на группы по типам коренных источников [11]: алмазы из кимберлитов фанерозойского возраста; округлые додекаэдроиды из источников докембрийского возраста (предположительно, лампроитов); желто-оранжевые кубоиды II разновидности из источников докембрийского возраста неизвестного типа; алмазы V-VII разновидностей из докембрийских источников неизвестного типа; «якутиты» – алмазы Попигайской астроблемы, присутствующие в неоген-четвертичных россыпях. Только алмазы из кимберлитов фанерозойского возраста сопровождаются индикаторными минералами, алмазы из докембрийских источников индикаторами не сопровождаются, по крайней мере они надежно не диагностированы, потому затруднительно определение типов их коренных источников. Тот же подход мы применяем для характеристики алмазов из карния Булкурской антиклизы. Из общей совокупности алмазов около 13 % соответствуют кимберлитовым, 51 % – додекаэдроиды со шрамами, около 35 % – алмазы V-VII разновидностей, остальное – кубоиды. Кимберлитовые алмазы, судя по характеру сопровождающих их индикаторных минералов кимберлитов, происходят наиболее вероятно из кимберлитов раннетриасового возраста [11, 43]. Для остальных алмазов авторы настоящей статьи предполагают происхождение из коренных источников неизвестного типа докембрийского возраста.

Кимберлиты, судя по полному отсутствию механического износа индикаторных минералов, разнообразной гранулометрии и их изобилию в карнийских отложениях, располагаются в непосредственной близости от изученной площади [11]. Но найти их крайне сложно из-за погружения карнийского пласта в западных румбах. Попадание докембрийских алмазов объясняется геологическим развитием региона. С конца перми началось активное развитие Оленекского поднятия, вследствие чего обнажились и активно эродировались в его пределах докембрийские отложения, в частности обломочные отложения венда, которые являются наиболее реальным промежуточным



коллектором для докембрийских алмазов по всей Сибирской платформе [11]. На тот период еще не существовал Предверхоянский прогиб и осуществлялся прямой снос обломочного материала, включая алмазы, с Оленекского поднятия на район Булкурской антиклинали [7]. В пределах Оленекского поднятия алмазы из рэтских отложений верхнего триаса, по проведенным нами исследованиям, аналогичны булкурским [3]. Геологическая перестройка региона началась в конце мезозоя с формированием Верхоянской складчатой системы, вследствие чего район Булкура был отделен от Оленекского поднятия Предверхоянским прогибом. Вероятно, в районе Булкура существовала геоморфологическая ловушка, благодаря которой именно здесь накопилось большое количество алмазов, тогда как на продолжении карния в обе стороны от Булкура количество алмазов уменьшается.

По мнению некоторых исследователей [4], источником алмазов карнийского яруса являются триасовые кимберлиты. Триасовые датировки получены для цирконов кимберлитового типа [44], но этот факт не несет каких-либо доказательств алмазоносности кимберлитов. В настоящей статье предполагается докембрийский возраст коренных источников и попадание их в триасовые и более молодые россыпи в результате размыва протерозойских прибрежно-морских отложений в пределах выступов докембра, в частности на Оленекском поднятии [11]. Предложенная интерпретация алмазоносности карнийского яруса в пределах Булкурской антиклинали полностью вписывается в общую картину алмазоносности Сибирской платформы [11]. В практическом плане в районе Булкурской антиклинали реальна как россыпная алмазоносность незначительного масштаба, так и коренная. Но ее реализация крайне осложнена характером поисковой обстановки, обусловленным погружением продуктивного пласта в западных румбах.

Заключение

Для алмазов карнийского яруса предложена полигенность по типоморфизму и типам коренных источников. Выделен тип кимберлитовых алмазов, которые связываются с фанерозойскими кимберлитовыми телами, и три типа алмазов, не характерных для кимберлитовых тел и связанных с докембрийскими источниками неизвестного типа. Тип источников установить не удается, поскольку алмазы не сопровождаются соответствующими индикаторными минералами и выводы можно делать только по самим алмазам. Большинство из них имеет легкий изотопный состав углерода, что указывает на возможность связи их коренных источников с процессами субдукции.

На основе комплексных исследований алмазов из карнийских отложений Булкурской антиклинали выделен новый тип – округлые додекаэдроиды со шрамами, которые отличаются от додекаэдроидов остальной территории проявления россыпной алмазоносности. Этот отдельный тип аллювиальных алмазов, вероятно, характерен для северо-востока Сибирского кратона.

Предполагается, что коренные источники изученных алмазов додекаэдрического габитуса имели докембрийский возраст, а их попадание в триасовые и более молодые россыпи можно объяснить как результат размыва протерозойских прибрежно-морских отложений в пределах выступов докембра, в частности на Оленекском поднятии. Такая интерпретация алмазоносности карнийского яруса в пределах Булкурской антиклинали не противоречит общим представлениям об алмазоносности Сибирской платформы [11].

Авторы выражают глубокую благодарность д-ру Рихарду Вирту (Центр наук о Земле им. Гельмгольца, Потсдам, Германия) за проведенные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- Селиванова В.В. Типоморфизм алмаза и его минералов-спутников из прибрежно-морских триасовых россыпей северного Верхоянья: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: Московский ордена Трудового Красного Знамени геологоразведочный институт им. С.Орджоникидзе, 1991. 20 с.
- Граханов С.А., Голубурдина М.Н., Иванов А.С., Ащепков И.В. Минералого-петрографическая характеристика алмазоносных образований Булкурской антиклинали, Республика Саха (Якутия) // Региональная геология и металлогенез. № 98. С. 41-63. DOI: [10.52349/0869-7892_2024_98_41-63](https://doi.org/10.52349/0869-7892_2024_98_41-63)
- Граханов С.А., Коптиль В.И. Триасовые палеороссыпи алмазов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 11. С. 1191-1201.
- Граханов С.А., Голубурдина М.Н. Древние россыпи алмазов Российской Федерации // Региональная геология и металлогенез. 2024. № 99. С. 68-106. DOI: [10.52349/0869-7892_2024_96_68-106](https://doi.org/10.52349/0869-7892_2024_96_68-106)
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похilenko Н.П. Поисковая минералогия алмаза. Новосибирск: Гео, 2010. 650 с.

6. Голобурдина М.Н., Граханов С.А., Проскурин В.Ф. Особенности петрографического состава алмазоносных карнийских образований Булкурской антиклинали северо-востока Сибирской платформы // Литосфера. 2023. Т. 23. № 4. С. 654-671. [DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-4-654-671](https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-654-671)
7. Соболев Н.В. О минералогических критериях алмазоносности кимберлитов // Геология и геофизика. 1971. № 3. С. 70-80.
8. Устинов В.Н., Микоев И.И., Пивень Г.Ф. Поисковые модели коренных месторождений алмазов севера Восточно-Европейской платформы // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318. [DOI: 10.31897/PMI.2022.49](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.49)
9. Зинчук Н.Н., Контиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003. 603 с.
10. Зинчук Н.Н., Контиль В.И. Особенности алмазов из древних осадочных толщ на площадях влияния кристаллических массивов // Отечественная геология. 2020. № 3. С. 75-88. [DOI: 10.24411/0869-7175-2020-1001](https://doi.org/10.24411/0869-7175-2020-1001)
11. Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P. Approaches to the diamond potential of the Siberian craton: A new paradigm // Ore Geology Reviews. 2022. Vol. 147. № 104980. [DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104980](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104980)
12. Граханов С.А., Проскурин В.Ф., Петров О.В., Соболев Н.В. Алмазоносные туфогенно-осадочные породы триаса арктической зоны Сибири // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 4. С. 550-578. [DOI: 10.15372/GiG2021195](https://doi.org/10.15372/GiG2021195)
13. Harris J.W., Smit K.V., Fedortchouk Y., Moore M. Morphology of Monocrystalline Diamond and its Inclusions // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. Р. 119-166. [DOI: 10.2138/rmg.2022.88.02](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.02)
14. Walter M.J., Kohn S.C., Araujo D. et al. Deep Mantle Cycling of Oceanic Crust: Evidence from Diamonds and Their Mineral Inclusions // Science. 2011. Vol. 334. Iss. 6052. P. 54-57. [DOI: 10.1126/science.1209300](https://doi.org/10.1126/science.1209300)
15. Stachel T., Harris J.W. The origin of cratonic diamonds – Constraints from mineral inclusions // Ore Geology Reviews. 2008. Vol. 34. Iss. 1-2. P. 5-32. [DOI: 10.1016/j.oregeorev.2007.05.002](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.05.002)
16. Stachel T., Luth R.W. Diamond formation – Where, when and how? // Lithos. 2015. Vol. 220-223. P. 200-220. [DOI: 10.1016/j.lithos.2015.01.028](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.01.028)
17. Klein-BenDavid O., Izraeli E.S., Hauri E., Navon O. Mantle fluid evolution – a tale of one diamond // Lithos. 2004. Vol. 77. Iss. 1-4. P. 243-253. [DOI: 10.1016/j.lithos.2004.04.003](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.003)
18. Klein-BenDavid O., Izraeli E.S., Hauri E., Navon O. Fluid inclusions in diamonds from the Diavik mine, Canada and the evolution of diamond-forming fluids // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2007. Vol. 71. Iss. 3. P. 723-744. [DOI: 10.1016/j.gca.2006.10.008](https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.10.008)
19. Летникова Е.Ф., Лобанов С.С., Похilenko Н.П. и др. Источники поступления обломочного материала в карнийский алмазоносный горизонт северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 2013. Т. 451. № 2. С. 193-196. [DOI: 10.7868/S0869565213200218](https://doi.org/10.7868/S0869565213200218)
20. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1984. 170 с.
21. Smith E.M., Kopylova M.G., Frezzotti M.L., Afanasiev V.P. Fluid inclusions in Ebelyakh diamonds: Evidence of CO₂ liberation in eclogite and the effect of H₂O on diamond habit // Lithos. 2015. Vol. 216-217. P. 106-117. [DOI: 10.1016/j.lithos.2014.12.010](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.12.010)
22. Stachel T., Aulbach S., Harris J.W. Mineral Inclusions in Lithospheric Diamonds // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. Р. 307-391. [DOI: 10.2138/rmg.2022.88.06](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.06)
23. Губанов Н.В., Зедгенизов Д.А., Васильев Е.А., Наумов В.А. Новые данные о составе среды кристаллизации волокнистых алмазов из россыпей Западного Урала // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 645-656.
24. Reutsky V.N., Borzakov Yu.M., Palyanov Yu.N. Effect of diamond growth rate on carbon isotope fractionation in Fe–Ni–C system // Diamond and Related Materials. 2012. Vol. 21. P. 7-10. [DOI: 10.1016/j.diamond.2011.10.001](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.10.001)
25. Wirth R. Focused Ion Beam (FIB): A novel technology for advanced application of micro- and nanoanalysis in geosciences and applied mineralogy // European Journal of Mineralogy. 2004. Vol. 16. № 6. P. 863-876. [DOI: 10.1127/0935-1221/2004/0016-0863](https://doi.org/10.1127/0935-1221/2004/0016-0863)
26. Wirth R. Focused Ion Beam (FIB) combined with SEM and TEM: Advanced analytical tools for studies of chemical composition, microstructure and crystal structure in geomaterials on a nanometre scale // Chemical Geology. 2009. Vol. 261. Iss. 3-4. P. 217-229. [DOI: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.019](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.05.019)
27. Green B.L., Collins A.T., Breeding C.M. Diamond Spectroscopy, Defect Centers, Color, and Treatments // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. P. 637-688. [DOI: 10.2138/rmg.2022.88.12](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.12)
28. Ashfold M.N.R., Goss J.P., Green B.L. et al. Nitrogen in Diamond // Chemical Reviews. 2020. Vol. 120. Iss. 12. P. 5745-5794. [DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00518](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00518)
29. Speich L., Kohn S.C., Bulanova G.P., Smith C.B. The behaviour of platelets in natural diamonds and the development of a new mantle thermometer // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2018. Vol. 173. Iss. 5. № 39. [DOI: 10.1007/s00410-018-1463-4](https://doi.org/10.1007/s00410-018-1463-4)
30. Goss J.P., Briddon P.R., Hill V. et al. Identification of the structure of the 3107 cm⁻¹ H-related defect in diamond // Journal of Physics: Condensed Matter. 2014. Vol. 26. № 14. № 145801. [DOI: 10.1088/0953-8984/26/14/145801](https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/14/145801)
31. Васильев Е.А. Дефекты кристаллической структуры в алмазе как индикатор кристаллогенеза // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 481-491. [DOI: 10.31897/PMI.2021.4.1](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.1)
32. Молотков А.Е., Павловин А.Д., Смелов А.П. и др. Дефектно-примесный состав кристаллов алмаза из отложений карнийского яруса северо-востока сибирской платформы // Отечественная геология. 2014. № 5. С. 74-79.
33. Weiss Y., Czas J., Navon O. Fluid Inclusions in Fibrous Diamonds // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. Р. 475-532. [DOI: 10.2138/rmg.2022.88.09](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.09)
34. Логвинова А.М., Вирт Р., Томиленко А.А. и др. Особенности фазового состава наноразмерных кристаллофлюидных включений в аллювиальных алмазах северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 11. С. 1634-1648.
35. Galimov E.M. Isotope fractionation related to kimberlite magmatism and diamond formation // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1991. Vol. 55. N 6. P. 1706-1708. [DOI: 10.1016/0016-7037\(91\)90140-Z](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90140-Z)
36. Kan Li, Long Li, Pearson D.G., Stachel T. Diamond isotope compositions indicate altered igneous oceanic crust dominates deep carbon recycling // Earth and Planetary Science Letters. 2019. Vol. 516. P. 190-201. [DOI: 10.1016/j.epsl.2019.03.041](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.03.041)
37. Weiwei Wu, Jingsui Yang, Wirth R. et al. Carbon and nitrogen isotopes and mineral inclusions in diamonds from chromitites of the Mirdita ophiolite (Albania) demonstrate recycling of oceanic crust into the mantle // American Mineralogist. 2019. Vol. 104. Iss. 4. P. 485-500. [DOI: 10.2138/am-2019-6751](https://doi.org/10.2138/am-2019-6751)



38. Рагозин А.Л., Шацкий В.С., Зедгенизов Д.А. Новые данные о составе среды кристаллизации алмазов V разновидности из россыпей северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 2009. Т. 425. № 4. С. 527-531.
39. Ragozin A.L., Zedgenizov D.A., Kuper K.E., Shatsky V.S. Radial mosaic internal structure of rounded diamond crystals from alluvial placers of Siberian platform // Mineralogy and Petrology. 2016. Vol. 110. Iss. 6. P. 861-875. DOI: [10.1007/s00710-016-0456-0](https://doi.org/10.1007/s00710-016-0456-0)
40. Pavlushin A., Zedgenizov D., Vasilev E., Kuper K. Morphology and Genesis of Ballas and Ballas-Like Diamonds // Crystals. 2021. Vol. 11. Iss. 1. № 17. DOI: [10.3390/cryst11010017](https://doi.org/10.3390/cryst11010017)
41. Wiggers de Vries D.F., Drury M.R., de Winter D.A.M. et al. Three-dimensional cathodoluminescence imaging and electron backscatter diffraction: tools for studying the genetic nature of diamond inclusions // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2011. Vol. 161. Iss. 4. P. 565-579. DOI: [10.1007/s00410-010-0550-y](https://doi.org/10.1007/s00410-010-0550-y)
42. Vasilev E., Zedgenizov D., Zamyatin D. et al. Cathodoluminescence of Diamond: Features of Visualization // Crystals. 2021. Vol. 11. Iss. 12. № 1522. DOI: [10.3390/cryst11121522](https://doi.org/10.3390/cryst11121522)
43. Николенко Е.И., Логвинова А.М., Изох А.Э. и др. Ассоциация хромшпинелидов из верхнетриасовых гравелитов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 10. С. 1680-1700. DOI: [10.15372/GiG20181011](https://doi.org/10.15372/GiG20181011)
44. Agashev A.M., Cheryyakovskaya M.V., Serov I.V. et al. Source rejuvenation vs. re-heating: Constraints on Siberian kimberlite origin from U-Pb and Lu-Hf isotope compositions and geochemistry of mantle zircons // Lithos. 2020. Vol. 364-365. № 105508. DOI: [10.1016/j.lithos.2020.105508](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105508)

Авторы: Алла Михайловна Логвинова, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), logv@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3343-6540>, Саргылана Семеновна Угальева, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник (Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-3999-0270>, Евгений Игоревич Николенко, канд. геол.-минерал. наук, главный геолог (ALROSA (Zimbabwe) Limited, Хараре, Зимбабве), <https://orcid.org/0000-0003-1556-6026>, Алексей Олегович Серебрянников, младший научный сотрудник (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-7723-2366>, Валентин Петрович Афанасьев, д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-9768-4685>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Гранулометрия в рамках кинематической теории преобразования открытых систем

И.А.Мельник

Томский политехнический университет, Томск, Россия

Как цитировать эту статью: Мельник И.А. Гранулометрия в рамках кинематической теории преобразования открытых систем // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 18-28. [EDN КООРАС](#)

Аннотация

Образование полимодальных распределений частоты встречаемости размеров песчаных фракций обусловлено изменением кинетической энергии водной среды в процессе отложения осадков в открытых системах-фациях. Повышение релевантности информации о палеоусловиях осадконакопления имеет большое значение в интерпретации результатов гранулометрического анализа. В качестве материалов исследований были взяты результаты гранулометрического анализа песчано-алевритовых отложений различных пластов в скважинах, находящихся на территориях нефтегазовых месторождений п-ва Ямал. На основе кинематической теории преобразования открытых систем определено уравнение зависимости размеров отложенных фракций от их кинематических параметров – периода времени и расстояния отложения. Это позволяет вычислить их в исследуемой фациальной системе по данным размеров и процентного содержания фракций в диапазоне диаметров 0,001-1 мм. Целью работы является представление результатов выявления фаций на основе вычислений кинематических параметров потока зерен песка и мелкодисперсных частиц с использованием уравнения интенсивности процессов преобразования открытых систем в рамках универсальной кинематической теории. Параметром, обладающим наибольшей информативностью, является расстояние переноса частиц при отложении, которое контролируется размером осаждающихся зерен. Изменение величины данного параметра зависит от перемены угла наклона поверхности дна, размеров частиц, глубины отложения. Сопоставляя величину вычисленного параметра с диаметром фракций, можно провести идентификацию исследуемой зоны с ее фациальной принадлежностью.

Ключевые слова

гранулометрия; фациальный анализ; открытая система; кинематические параметры; нефтегазовые месторождения; палеоусловия осадконакопления

Финансирование

Работа подготовлена в рамках программы развития Томского политехнического университета.

Поступила: 08.05.2024

Принята: 02.07.2025

Онлайн: 03.10.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Любая открытая система структурируется/деструктурируется под внешним динамическим воздействием, обмениваясь веществом и энергией с внешней средой. Внешнее воздействие передает энергию, импульс элементам открытой системы, тем самым меняя их состояния. Но меняется не только состояние среды, сами элементы систем могут преобразоваться в качественно иные элементы, предполагая проявление нелинейного диссипативного процесса преобразования [1, 2]. Если в результате трансформации систем происходит некая структуризация среды (являющаяся аттрактором в фазовом пространстве), то данный процесс преобразования «несет в себе информацию» о закономерностях изменений состояний структурных элементов, т.е. происходит воплощение состояния самого процесса-аттрактора [3].

Согласно универсальной кинематической теории процесса преобразования открытых систем, каждое состояние процесса преобразования дискретно и связано с константой – «золотой» пропорцией [3]. Формы статистических распределений интенсивностей процессов преобразования различных (геологических, геохимических, географических, геофизических, биологических и др.) открытых динамических систем почти всегда полимодальны [4-6]. Проведенные исследования показали, что величины мод плотностей распределений интенсивностей не только геохимических [3, 5], но и речных (стоки расхода воды) [4] систем подчиняются уравнениям данной универсальной кинематической теории.



Очевидно, что полимодальность плотностей статистических распределений различных систем будет являться маркером их открытости к внешним влияниям с различными режимами.

Еще с середины XX в. определены причины возникновения полимодальных распределений размеров осадка в различных фациях [7-9]. Исследования показали, что виды переноса песка (взвесь, сальтация и волочение) и унаследования результатов динамической эрозии обломочных материалов являются причинами формирования двух- либо трехмодальных статистических плотностей распределения размеров песчаных гранул.

В работе [10] экспериментальные исследования динамических характеристик оборудования грануляции микрокристаллической целлюлозы и моногидрата α -лактозы выявили, что степень грануляции и размеры гранул сильно зависят от отношения скорости подачи порошка (сырья) к скорости крутящего момента шнека. Увеличение мод в распределении размеров гранул происходит при уменьшении скорости подачи порошка, что является косвенным подтверждением зависимости появления мод от режимов воздействия.

В статье [11] авторы подтвердили, что формы гистограмм большинства выборок плотности вероятностей распределения размеров зерен осадочной породы в системе река – озеро полимодальны – с тремя модами, обусловленными внешним водо-климатическим воздействием. В свою очередь проведенное исследование гранулометрического состава песка (на о-ве Фишер) выявило его бимодальное распределение размеров, а именно крупного и среднего диаметра песчинок [12]. Размер песка соответствовал фациям, т.е. условиям осадконакопления.

Как правило, в разведке и добыче нефти и газа гранулометрический анализ песчаников проводится с целью определения фаций для выявления пластов с наилучшими коллекторскими свойствами. Образование полимодальных гистограмм распределений размеров гранул песка связывают с изменениями кинетической энергии транспортирующей водной среды и процессов осадконакопления [13, 14]. Чем меньше размер (масса) гранул, тем значительней транспортирующее расстояние от места их генезиса [15]. В работе [16] проведен гранулометрический анализ фаций песчаников формации Исе. Песчинки имеют низкую сферичность и варьируются от угловатых до субкруглых. Гистограммы распределений размеров зерен демонстрируют как унимодальные, так и бимодальные формы. Плотности вероятностей распределений размеров частиц (фракций) в основном асимметричны, с различным модами, проявления которых также обусловлены изменением скорости потока транспортирующей среды.

Согласно приведенным работам, образование полимодальных распределений песчаных фракций обусловлено изменением кинетической энергии водной среды в процессе отложения осадков. В этом случае плотность вероятности фракционирования (содержания размеров гранул) будет эквивалентна интенсивности процессов отложения на исследуемой территории. В кинематической теории преобразования открытых систем определено уравнение интенсивности процессов трансформации, которое есть функция отношения временных периодов внутренней трансформации к внешнему воздействию [3]. Преобразуя данное уравнение определенным образом, можно получить зависимость размеров (диаметра) гранул от их кинематических параметров (скорости отложения гранул, периода времени отложения), являющихся следствием внешнего воздействия. Таким образом, определив гранулометрический состав песчано-пелитовой фракции и вычислив кинематические параметры каждой усредненной фракции, можно использовать их в качестве дополнительных факторов при анализе фаций. Данные величины параметров будут отражать последний условный этап палеоотложений, зафиксированный в керне.

Целью данной работы является иллюстрирование результатов выявления динамики среды осадконакопления на основе вычислений кинематических параметров потока зерен песка и мелкодисперсных частиц с использованием уравнения интенсивности процессов преобразования открытых систем в рамках универсальной кинематической теории. Выявление фаций (обстановок осадконакопления) на основе кинематических параметров возможно только при условии однородности источников осадочного вещества и при условии, что все фракции подвергаются переносу.

Методы

В качестве материалов исследований были взяты результаты гранулометрического анализа песчано-алевритовых отложений различных пластов в скважинах, находящихся на территориях нефтегазовых месторождений п-ва Ямал – участки Тамбейского, Малыгинского и Тасийского



месторождений (см. таблицу). Для гранулометрического изучения осадочного материала применили метод лазерной дифрактометрии, основанный на рассеянии света с целью определения размеров исследуемых зерен.

Содержание фракций песчаных пород в пластах нефтегазовых участков п-ва Ямал, %

Участок отбора керна	Пласт	Размер частиц, мм*											
		Песчаная фракция							Алеврит			Пелит	
		0,8-0,5 (0,65)	0,5-0,4 (0,45)	0,4-0,315 (0,357)	0,315-0,25 (0,28)	0,25-0,2 (0,22)	0,2-0,16 (0,18)	0,16-0,1 (0,13)	0,1-0,05 (0,075)	0,05-0,01 (0,03)	0,01-0,005 (0,0075)	0,005-0,001 (0,003)	<0,001 (0,001)
Тасийский	ТП22	1,02	1,27	2,5	3,8	6,1	19,8	27,1	18,7	7,3	1,3	2,5	2,3
Западно-Тамбейский	ТП22	0	0	0	0	1	1,5	13,8	52,2	17,2	1	3,45	6,9
Западно-Тамбейский	ТП1	0	0	1,24	7,13	10,0	36,7	22,9	11,2	5,2	3,4	2,2	0
Малыгинский	ТП15	0	0	0	1	2,73	11,4	30,5	28,7	14,3	2,2	4,7	3

* В скобках указаны средние величины частиц.

Согласно универсальной кинематической теории преобразования открытых систем, интенсивность преобразования эквивалентна процентному (долевому) содержанию преобразованных элементов данной системы. Это могут быть содержания вторичных минералов либо химических элементов во флюидопроницаемых породах, пласти которых представляют собой открытые геологические системы [3, 5], расход воды в стоках речных систем [4] и т.д. В нашем случае фациальная обстановка, определяемая локальным условием гранулярной седиментации, будет представлять собой открытую систему с внешним гидродинамическим воздействием. Процентное, долевое содержание гранул соответствует интенсивности процесса гранулярного отложения осадков. Поэтому, используя основное уравнение кинематической теории с дальнейшим его преобразованием, можно вывести зависимости таких кинематических параметров, как скорость и период гранулярных отложений, характеризующие степени влияния внешних факторов на размеры зерен.

Интенсивность процесса преобразования определяется согласно уравнению [3]

$$I = q \frac{t_0}{\tau_0} \frac{\Delta\tau}{\Delta t}, \quad (1)$$

где q – коэффициент пропорциональности; $\Delta\tau$ – период потенциального преобразования элементов систем, являющийся внутренней характеристикой данных элементов, $\Delta\tau = \pm(\tau - \tau_0)$; Δt – период внешнего влияния, при котором элементы систем успевают начать свое преобразование, $\Delta t = \pm(t - t_0)$; τ_0, t_0 – начальные временные параметры.

В данной работе вместо процесса преобразования анализируется процесс отложения зерен в рамках кинематической модели.

При изучении динамики осадконакопления в береговой зоне (на основе гранулометрического исследования поверхностных отложений и экстраполяции различных гранулометрических индексов) выявляется соответствие между распределением энергии волн и эволюцией береговой линии, где сочетание полученных результатов и гранулометрического анализа объясняет закономерности распределения классов осадочных пород [17]. Исследования других авторов показали, что осадки, собранные вдоль береговой линии, как правило, являются крупно- и среднезернистыми песками, а осадки, собранные вблизи бордюра субаквальных дюн – средне- и мелкозернистые [18]. Для объяснения гранулометрических явлений были разработаны различные модели на основе действующих на частицу сил, таких как сопротивление, турбулентность, кажущаяся гравитация, силы Ван-дер-Ваальса и подъемная сила, с целью прогнозирования переходов между движущимися/стационарными дюнами и движущимся/неподвижным дном [19].

Также представлены уравнения для прогнозирования скорости песчаной эрозии и скорости осаждения песка [20], построены модели критических значений скоростей транспортировки песка, на основании которых устойчивое состояние возможно при условии, когда размытый с верхней



части пласта песок, заменяется новым песком, добытым вверх по течению. При более высоких скоростях песчаная дюна (вал) начинает распадаться на серию медленно движущихся дюн, при этом частицы песка переносятся от верхней по течению части дюны к нижней. По мере дальнейшего увеличения скорости потока дюны полностью разрушаются, и песок образует движущийся слой вдоль дна [21]. Направление эволюции наносов в открытых донных системах (на глубинах до 2,5 м) в первую очередь связано с изменением скорости волновой переработки и направления течений [22, 23].

Результаты исследований показали, что устойчивые состояния процессов отложения мелкодисперсных фракций могут реализоваться и при внешнем гидродинамическом воздействии, но с определенной кинетической энергией, соответствующей массам и размерам гранул. При введении условия постоянной и одинаковой плотности исследуемых гранул с соответствующим эквивалентом размера частиц их массе можно рассмотреть модель воздействия потока воды на частицы на основе использования кинематических зависимостей.

Из таблицы известны параметры размеров фракций и их процентная доля. В уравнении (1) размер фракции очевидно связан с транспортировкой, т.е. с одним из временных параметров. Для определения данной связи исследуем возможности стандартного приема. Используя уравнение Стокса для погружения частиц в спокойной воде, в рамках кинематической концепции получим зависимость скорости погружения от размера частиц d :

$$v_n = c \frac{gd^2}{\mu}, \quad c = \text{const}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; μ – кинематическая вязкость воды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для определения палеоусловий осадконакопления применить формулу (2) не представляется возможным, поскольку необходимо не только знать вязкость воды, зависящую от температуры среды, но и, самое главное, необходимо учесть влияние скорости внешнего потока на частицы с различным типом переноса – взвесь алевро-пелитов и сальтация песка. От этого зависит и высота подъема гранул в толще воды.

В случае исследования внешнего гидродинамического влияния при окончательном периоде отложения начальное время отложения осадка необходимо заменить на интервал времени последнего переноса от места размыва до верхней точки «зависания». Величина этого параметра зависит от глубины водоема (т.е. от средней высоты зависания относительно дна), динамических характеристик потока и диаметра частиц. В рамках кинематической модели осаждения для определенной по размеру группы частиц данный параметр может являться усредненной постоянной величиной. В уравнении (1) для гранулометрического распределения временной параметр t интерпретируется как время течения потока воды при его воздействии на зерна. Причем основным фактором влияния на процесс отложения частиц будет гидродинамическое воздействие, где расстояние переноса фракций в последнем периоде транспортировки до их отложения как для водного потока, так и для частиц будут равны. В этом случае время течения водного потока будет меньше времени переноса гранул вследствие большей скорости воды относительно скоростей переноса песчано-пелитовых фракций.

Процесс окончательной седиментации частиц в большей степени зависит от внешних факторов. Поэтому вероятность (интенсивность) накопления фракций обусловлена влиянием только внешнего потока при условии $\tau = 0$. В первом приближении для исследуемых фракций в уравнении (1) введем постоянный параметр, характеризующий интенсивность начального процесса накопления, $Q = q \frac{\Delta \tau}{\tau_0} = q = \text{const}$. Тогда интенсивность отложения частиц (прямая пропорциональная вероятности) трансформируется в следующую зависимость:

$$I = Q \frac{t_0}{|t_0 - t|}; \quad Q < I; \quad t_0 \neq t; \quad |t_0 - t| < t_0. \quad (3)$$



Введем следующие кинематические параметры: среднюю скорость течения воды v ; скорость отложения v ; окончательный период времени отложения гранул $t_{\text{от}}$. Основное условие отложения – $L = v t_{\text{от}} = vt$. Тогда после преобразования зависимости (3) и применения основного условия отложения получим связь скорости течения воды с временем переноса гранул при транспортировке гранул до их отложения:

$$v(t_{\text{от}}) = \frac{vt_{\text{от}}}{t_0 \left(1 - \frac{Q}{I}\right)}.$$

Известно, что размер переносимой песчано-алевритовой фракции связан со скоростью потока воды, причем с увеличением скорости воды повышается и критическая величина размера переносимых частиц. Производная d (размер/диаметр фракций) относительно времени переноса частиц будет соответствовать скорости течения воды как функции времени переноса гранул:

$$\frac{\partial d}{\partial t_{\text{от}}} = av(t_{\text{от}}), \quad a = \text{const} \leq 1.$$

Возьмем неопределенный интеграл от функции $v(t_{\text{от}})$ по времени переноса зерен и определим диаметр фракции:

$$d = a \int v(t_{\text{от}}) dt_{\text{от}} = \frac{avt_{\text{от}}^2}{2t_0 \left(1 - \frac{Q}{I}\right)} + c, \quad c = \text{const.} \quad (4)$$

Скорость и период отложения частиц зависят от их размера (диаметра). На основании известных экспериментальных данных, представленных в работе [24], зависимости отложения осадка от скорости течения воды и размера отложенных частиц (рис.1) была определена полиномиальная зависимость граничной скорости процесса отложения частиц (по модулю) от их размера:

$$v = \left| -0,0215d^2 + 0,2306d - 0,0162 \right|. \quad (5)$$

При установлении постоянной величины параметра t_0 и использовании данных размеров фракций (см. таблицу), а также уже полученной зависимости скорости отложения частиц от диаметра гранул (5) (рис.1) можно по формуле (4) вычислить период отложения.

Определим начальный параметр t_0 , являющийся усредненным периодом времени последнего переноса от отрыва до верхней точки «зависания» в процессе последнего периода отложения фракций при условии $a = 1$. Следовательно данный параметр должен быть связан со средней начальной

скоростью отрыва гранул $\langle v_{\text{кр}} \rangle$ и средним путем переноса от места отрыва до верхней точки L_0 . Средняя скорость переноса водой для каждой фракции от места отрыва до отложения частицы – величина постоянная.

Анализ таблицы указывает на то, что средний диаметр фракций с наибольшим содержанием (четыре усредненных значения с общей долей более 70 %) 0,1 мм, что совпадает с критической скоростью срыва Хьюльстрема. Средняя критическая величина скорости отрыва (размыва) этих фракций $\approx 0,1-0,15$ м/с. В свою очередь, согласно зависимости Г.И.Шамова, средняя скорость размыва пропорциональна средней глубине потока [25]:

$$\langle v_{\text{кр}} \rangle = 4,4d^{1/3} \langle h \rangle^{1/6}.$$

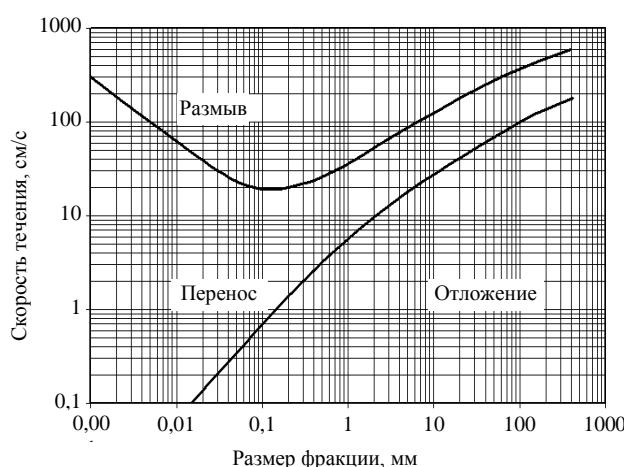


Рис.1. Зависимости Ф.Хьюльстрема, показывающие связи процессов переноса, размыва, отложения с размерами фракций и скоростями течения водного потока



На рис.2 показана условная схема отрыва и переноса пели-тово-песчаных фракций, где максимальная высота подъема частиц соответствует средней глубине потока. На основании формулы Г.И.Шамова средняя высота подъема частиц относительно максимальной и минимальной критических величин скоростей отрыва рассчитывается: $\langle h \rangle = 1/2(h_{\min} + h_{\max}) \approx 0,1$ м. Согласно экспериментальным данным, в состоянии покоя воды и при температуре 15-20 °С средняя скорость $\langle v_h \rangle$ падения частиц ($d \sim 0,1$ мм) в неподвижной воде приблизительно равна 0,007 м/с [9]. В этом случае, определив $\sin \alpha$ (рис.2) как отношение векторов скоростей падения частиц к минимальному значению критической величины $\sin \alpha = v_h/v_{kp} = 0,07$, можно вычислить среднюю величину постоянной пути отложения: $L_0 = \langle h \rangle / \sin \alpha = 1,43$ м. Далее вычисляем постоянную величину параметра времени начального гидродинамического влияния: $t_0 = L_0 / \langle v_{kp} \rangle \approx 14,3$ с.

При значительном отличии диаметров исследуемых частиц от 0,1 мм величина постоянной начального времени будет отличаться от заданной t_0 .

Рассмотрим еще две константы. Постоянная Q должна быть меньше интенсивности I , поэтому при минимальной величине $I_{\min} = 0,01$ д.ед. с точки зрения 5 %-ного отклонения устанавливаем константу $Q = 0,0095$ д.ед. Константа c в уравнении (4) должна быть меньше минимального диаметра исследуемых фракций. По таблице выбираем наименьшее значение ($\varnothing 0,001$ мм) и с 5 %-ным отклонением определяем константу $c = 0,00095$ мм.

Таким образом, выявленные величины констант уравнения (4) релевантны изучаемым выборкам таблицы, следовательно их использование позволит определять время последнего этапа отложения осадков. Очевидно, что использование вычисленных констант ограничено диаметром фракций от 0,001 до 1 мм, а уравнение (4) можно применять только для водной среды при переносе зерен в результате сальтации и взвеси.

В данном случае возникает необходимость в подтверждении валидности вычисленного временного параметра. Она определяется «правильными» зависимостями – соответственно тренда полученных при сопоставлении эмпирических данных уравнения (размер фракции и их долевое содержание) вычисленным параметрам. Достоверность уравнения (4) подтверждается в следующих регрессиях. Во-первых, противоположными трендами для песчаной и пелитовой фракций в зависимостях скорости и времени осаждения (в последнем периоде) от размера частиц. Это показано в работах [26, 27], где экспериментально и теоретически подтверждено, что с увеличением скорости течения смеси мелкая фракция перемещается вверх в виде взвеси, а более крупная (песок) оседает, перемещаясь в нижних слоях, что и приводит к противоположным зависимостям. Во-вторых, с увеличением времени осаждения гранул должно пропорционально увеличиваться их долевое содержание, но с различным трендом в зависимости от размера фракции. При соблюдении указанных пунктов валидность уравнения (4) можно считать доказанной.

С практической точки зрения уравнение (4) можно использовать для гранулометрического фациального анализа в качестве дополнительного источника информации. В таблице представлены результаты исследования керна в пластах, в которых был проведен традиционный фациальный анализ, для которого применялась стандартная методика фациальной интерпретации отложений по данным стандартного каротажа, разработанная В.С.Муромцевым [28]. Каротажные кривые «привязываются» к интервалам отбора керна и проводится корреляция между физическими характеристиками разреза и литогенетическими типами отложений. Определяются формы каротажных кривых, устанавливается последовательность их смены по разрезу, осуществляется сравнение каротажных характеристик выбранных интервалов разреза с электрометрическими моделями известных фаций [29-31]. Проводится анализ керна различными методами – литолого-петрографическими, геохимическими и палеонтологическими. При сопоставлении полученной информации

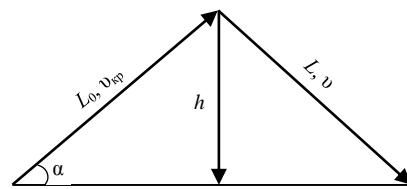


Рис.2. Условная схема последнего периода переноса и отложения гранул в результате сальтации и взвеси в водной среде

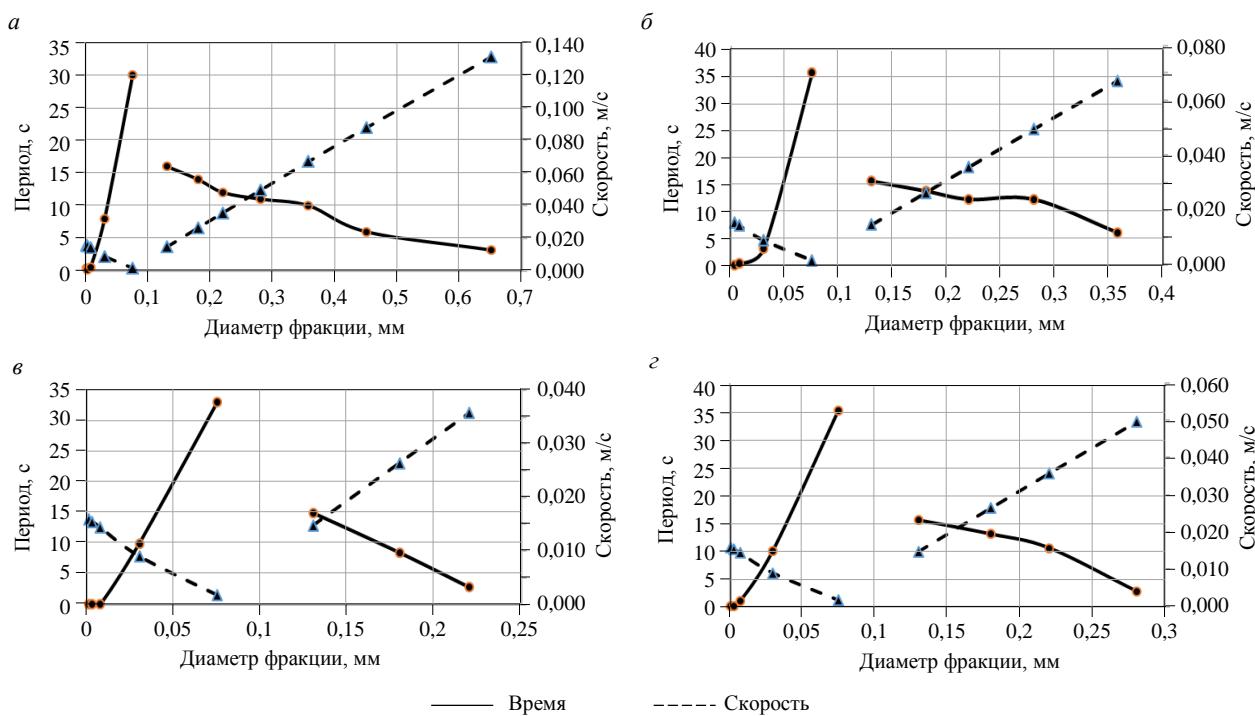


Рис.3. Зависимости скорости и времени осаждения частиц от усредненных диаметров фракций исследуемых участков: Тасийский – ТП22 (а); Западно-Тамбейский – ТП1 (б); Западно-Тамбейский – ТП22 (в); Малыгинский – ТП15 (г)

устанавливаются условия осадконакопления. В этом случае появляется возможность сравнения полученных данных между собой и их сопоставления с результатами исследований предложенной кинематической теории.

Результаты

Кинематические параметры нелинейно зависят от размеров оседающих частиц. Применение уравнений (4) и (5) позволяет вычислить периоды осаждения частиц и сопоставить их величины с размером фракций (рис.3); тренды периодов отложения и их скорости обратно пропорциональны, и, главное, для алеврито-пелитовой и песчаной фракций данные параметры имеют противоположные направления трендов.

С точки зрения динамических процессов алеврито-пелитовая фракция подчиняется мезодинамике – на скорость осаждения частиц влияет площадь их поверхности, т.е. чем больше площадь (размер), тем значительней сила сопротивления молекул воды. Для песчаной фракции

более значимую роль играет сила гравитации, т.е. скорость осаждения зерен пропорциональна их массе – размеру с учетом влияния классических сил гидродинамики. В рамках кинематической модели уравнения (4) данные фракционные различия динамических функций формируют правильно подобранные константы – Q , a , c .

На рис.4 (Тасийский участок) отображены три прямо пропорциональные зависимости долевого содержания фракций от времени. Каждая регрессия представляет собой группу фракций определенных размеров, где группа песчаных гранул $\varnothing 0,13-0,28$ мм выделяется наибольшим углом наклона к оси абсцисс ($\sim 78,5^\circ$). Остальные зависимости трех исследуемых выборок, не приведенных на рис.4 (ТП1, ТП22, ТП15), формируют по две положительные регрессии – для пелитовых и песчаных фракций.

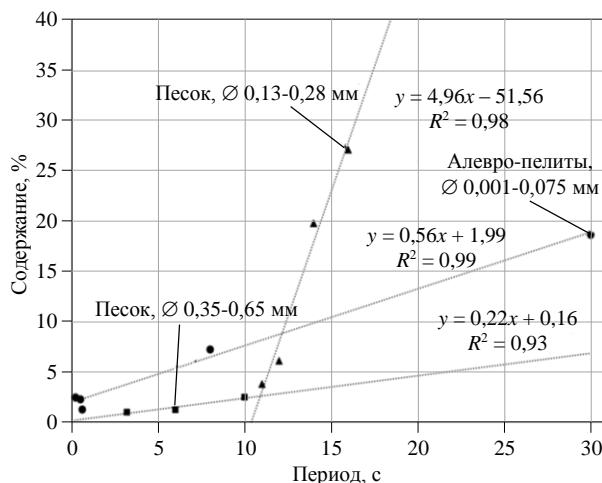


Рис.4. Зависимости долевого содержания частиц от периодов времени их осаждения для фракций с различными групповыми размерами (Тасийский участок – ТП22)



Очевидно, что мелкодисперсный песок (диаметром до 0,3 мм) пласта ТП22 Тасийского участка осаждается с большой вероятностью в границах особого режима отложения $t_{\text{от}} = 11\text{--}20$ с, что возможно связано со снижением гидродинамической активности.

Рассмотрим фациальную принадлежность изучаемых зон на основе краткого изложения результатов традиционных исследований.

Изучаемая зона пласта ТП22 скважины Тасийского участка относится к фации *погруженных* частей регressiveного бара. В качестве обоснования приведем итоги литологического описания керна. В фациальном анализе используют параметр α -диаграммы каротажа собственной поляризации: $\alpha\text{ПС} = (U_{\text{max}} - U)/(U_{\text{max}} - U_{\text{min}})$, где U – измеряемое напряжение, мВ. Песчаники мелкозернистые и алевролиты с разной сортировкой ($\alpha\text{ПС} = 0,5\text{--}0,6$). Развита тонкая и редкая мелкая полого-наклонная, горизонтальная и пологоволнистая слоистость. Породы содержат мелкий растительный детрит, редкие следы зарывающихся организмов. Для этой фации характерно устойчивое снижение гидродинамической активности до среднего уровня.

Зона пласта ТП1 Западно-Тамбейской скважины относится к фации песчано-алевритовых осадков *подножий баров* прибрежной полосы моря. Пласт подстилается однородными аргиллитами с прослойями песчаника, на отдельных участках до их неравномерного переслаивания. Формирование отложений осуществлялось в условиях от средней, снижающейся с течением времени, до низкой и очень низкой динамики водной среды, возможно, обусловленной возрастанием глубины бассейна седиментации.

Зона пласта ТП22 Западно-Тамбейской скважины относится к фации алевритов и мелкозернистых песков *склоновых частей подводных баров* прибрежной полосы моря. Разрез представлен переслаиванием черных алевролитов и светло-серых мелкозернистых песчаников с тонкими горизонтальными прослойками алевролитов. Алевролиты плотные, с включениями растительного детрита. Стабильность обстановок осадконакопления проявилась в литологической выдержанности накопившихся осадков, их толщин и значительной песчанистости разрезов. Волновой характер движения водной среды устанавливается преимущественно по волнистым типам слоистости, особенно по наличию разнонаправленной косоволнистой слоистости, а также по зигзагообразным формам аномалий диаграмм каротажа собственной поляризации (ПС), отражающим частую смену гидродинамической активности вод, в которых осаждались осадки. Накопление отложений пласта ТП22 осуществлялось в мелководном морском бассейне на фоне регрессии моря. На морской режим осадкообразования указывает наличие ихнофоссилий.

Зона пласта ТП15 Малыгинской скважины относится к фации песчаных осадков *стремневых* частей русел ограниченно меандрирующих рек аллювиально-озерной равнины. Песчаные осадки формировались в водной среде с очень высокой гидродинамической активностью, что выразилось в высоких значениях $\alpha\text{ПС}$ (0,8-1). Аномалии ПС располагаются в зоне отрицательных отклонений, имеют форму четырехугольника с осложненной и сильно осложненной зубчатостью боковой стороной, отражающей непостоянный водный режим – неоднократный спад и усиление гидродинамической активности, характерный для русел рек меандрирующего типа.

Одним из кинематических параметров является расстояние переноса при окончательном отложении частиц L . Следует отметить, что данный параметр переноса выражает не весь путь движения, а только его часть – последний – окончательный этап отложения. На рис.5 показаны зависимости данного параметра от средних размеров осаждающих фракций в каждой исследуемой зоне. Согласно полученным результатам можно сделать два вывода:

- величины экстремумов точек перегиба (экстремум 2) для каждой изучаемой зоны отличаются и зависят от размеров фракций и исследуемых фаций;
- для исследуемой зоны ТП1 отсутствует экстремум 1, в других зонах данный экстремум контролируется фракцией одного диаметра – 0,03 мм.

Обсуждение результатов

Повышение степени соответствия действительности при определении палеоусловий осадконакопления, как правило, основано на комплексировании различных методов анализа, где гранулометрия (диаграммы Р.Пассега, Г.Ф.Рожкова) в сочетании с другими методами фациального анализа способствует получению более достоверных фациальных реконструкций [32, 33]. В этом случае (в фациальном анализе) развитие возможностей гранулометрического метода должно

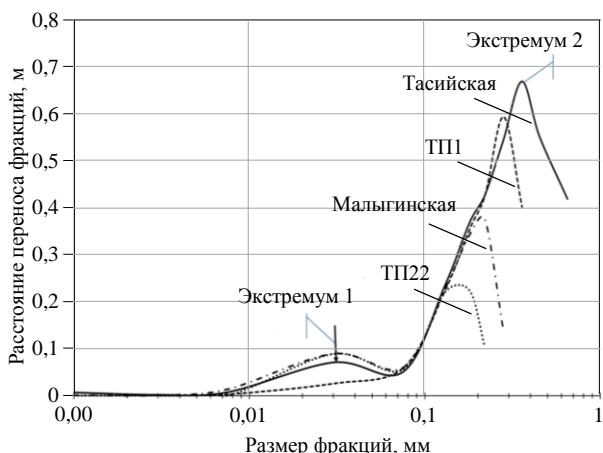


Рис.5. Зависимость расстояния переноса частиц при их отложении от логарифма диаметра зерен

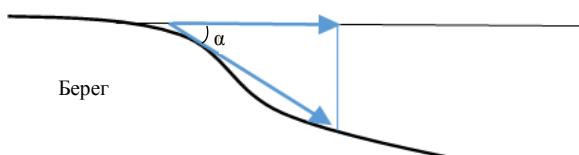


Рис.6. Схема угла наклона дна моря возле береговой линии

с максимумом на гребне к уменьшению диаметра частиц вниз по склону (основанные на эмпирических знаниях) можно использовать для анализа полученных зависимостей (рис.5).

Если под углом наклона дна (гипотенузы прямоугольного треугольника) понимать угол α между нормалью к береговой линии, лежащими параллельно поверхности воды и дну (рис.6), а прилежащий к углу катет треугольника направлен в сторону моря, то гипотенуза прямоугольного треугольника будет соответствовать расстоянию переноса гранул в процессе отложений в результате сальтации [25]. С увеличением угла наклона дна α при неизменном месте начала процесса переноса относительно береговой линии будут увеличиваться расстояние переноса при отложении (относительно косинуса угла) и размер осаждающих фракций. На рис.5 данное явление представлено в диапазоне фракций диаметром от 0,075 мм до точки экстремума 2 различных диаметров частиц в зависимости от фаций. Дальнейшее уменьшение расстояния при увеличении размера частиц (т.е. увеличении α) может быть обусловлено уменьшением глубины осаждения (регрессия, образование песчаного бара).

В свою очередь, мелкодисперсная фракция (взвесь) оседает в более спокойных условиях и, начиная с размера частиц 0,03 мм происходит резкое увеличение долевого содержания отложений до размера 0,13-0,18 мм (см. таблицу). Отправная точка $\varnothing 0,03$ мм на рис.5 выделяется экстремумом 1 только у трех фаций. Возможно, это связано с началом массового вертикального отложения частиц, когда кроме основной вертикальной компоненты еще присутствует незначительная величина горизонтальной компоненты скорости, и время осаждения увеличено в сравнении с временем осаждения частиц в условиях более глубоководной фации (с одной вертикальной компонентой), например пласта ТП1.

Заключение

Полученные кинематические зависимости позволяют сделать следующие выводы:

- Участок Тасийской скважины пласта ТП22 формировался в условиях периодического гидродинамического воздействия при значительном наклоне поверхности морского дна с образованием песчаного вала типа бара. Наибольший экстремум 2 – расстояния переноса при отложении наибольшей фракции (в сравнении с двумя исследуемыми морскими отложениями) – свидетельствует о сильном гидродинамическом влиянии.

повысить информативность и точность установления условий седиментаций. Например, для вычисления расхода влекомых наносов используют отдельные из восьми альтернативных групп формул в зависимости от типа доминирующего влияния динамики воды [34].

Анализ полученных зависимостей (см. рис.3, 4), выполненных на основании применения уравнений (4), (5), позволяет удостовериться в релевантности использования данных формул в гранулометрии. Основная практическая значимость полученных уравнений и констант заключена в возможности их применения для анализа фаций в пределах диаметров гранул 0,001-1 мм.

В работе [9] указаны три базовые причины зависимостей размеров осаждающих гранул от пространственной морфологии прибрежно-морских фаций. Во-первых, крупность наносов определяется уклоном дна, т.е. с увеличением угла наклона поверхности дна диаметр осаждающих фракций увеличивается. Во-вторых, при удалении от уреза в любую сторону увеличивается размер осаждающих частиц. В-третьих, размер фракций песчаного вала распределяется от максимума на гребне к уменьшению диаметра частиц вниз по склону. Перечисленные утверждения



• Участок Западно-Тамбейской скважины пласта ТП1 формировался в морских условиях в наиболее глубоководной зоне (подножий бара со стороны моря), что подтверждается отсутствием экстремума 1 и относительно значимой величиной экстремума 2.

• Участок Малыгинской скважины пласта ТП15 формировался в водной среде при периодическом гидродинамическом воздействии. Определив альтернативно-традиционными методами то, что формирование среды происходило в континентальных условиях, можно отнести данную фацию к стрежневой части русел, потому что проявляется сильная фракционная периодичность со средней величиной экстремума 2 (см. рис.5), и наличие экстремума 1 подтверждает сезонное изменение глубины.

• Участок Западно-Тамбейской скважины пласта ТП22 формировался в прибрежно-морских условиях недалеко от береговой линии (наименьшая величина экстремума 2) при волновом воздействии с дальнейшим образованием бара.

Расстояние переноса зерен при их отложении в диапазоне 0,1-0,5 мм является индикатором интенсивности гидродинамического влияния, а диапазон 0,03-0,04 мм отражает присутствие/отсутствие горизонтальной компоненты вектора скорости, косвенно обусловленного глубиной отложения.

Таким образом, вычисляемые кинематические параметры зерен при их отложении на качественном уровне позволяют уточнять и дополнять палеообстановку осадконакоплений, уже определенную традиционным способом.

Применение полученных уравнений (4) и (5) при фациальном анализе песчано-алевритовых отложений позволяет определять такие кинематические параметры как скорость, период времени и расстояние перемещения при отложении частиц. Вычисление данных параметров исследуемых фаций даже не в абсолютных, а в условных единицах может послужить дополнительным, уточняющим, источником информации гидродинамических палеоусловий седиментации. В этом случае наибольшей информативностью обладает параметр «расстояние переноса частиц при отложении», который контролируется размером осаждающихся гранул. Изменение его величины зависит от перемены угла наклона поверхности дна, размеров частиц, глубины отложения. Сопоставляя величину вычисленного параметра с диаметром фракций, можно провести идентификацию исследуемой зоны с ее фациальной принадлежностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Ю.С., Волкова В.Н., Козлов В.Н. Концепция открытой системы: история, состояние, перспективы развития // Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции, 10-11 июня 2019. Политех-Пресс, 2019. Ч. 1. С. 5-17.
2. Haddad W.M., Somers L. Partial stability of nonlinear dissipative feedback systems // International Journal of Control. 2024. Vol. 97. Iss. 6. P. 1432-1443. [DOI: 10.1080/00207179.2023.2208690](https://doi.org/10.1080/00207179.2023.2208690)
3. Мельник И.А. Полимодальность распределения вторичных каолинитов в открытых системах песчаных коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 8. С. 17-29. [DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4163](https://doi.org/10.18799/24131830/2023/8/4163)
4. Мельник И.А. Полимодальное распределение вероятности расхода воды в речных системах // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 1. С. 46-56. [DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4411](https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4411)
5. Мельник И.А., Недоливко Н.М. Экстремумы дискретного распределения содержания бора как показатели гидродинамики осадконакопления // Нефтяное хозяйство. 2022. № 10. С. 14-18. [DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-14-18](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-10-14-18)
6. Суханов В.В., Иванов О.А. О полимодальном распределении Курильского эпипелагического нектона по массе тела особей // Известия Тихоокеанского научно-исследовательского рыбхозяйственного центра. 2001. Т. 128. С. 390-408.
7. Weltje G.J., Prins M.A. Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate from size distributions of deep-sea clastics // Sedimentary Geology. 2003. Vol. 162. Iss. 1-2. P. 39-62. [DOI: 10.1016/S0037-0738\(03\)00235-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(03)00235-5)
8. Doeglas D.J. Interpretation of the results of mechanical analyses // Journal of Sedimentary Petrology. 1946. Vol. 16. № 1. P. 19-40. [DOI: 10.1306/D426924C-2B26-11D7-8648000102C1865D](https://doi.org/10.1306/D426924C-2B26-11D7-8648000102C1865D)
9. Котельников Б.Н. Реконструкция генезиса песков. Гранулометрический состав и анализ эмпирических полигонов распределения. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1989. 132 с.
10. Mendez Torrecillas C., Halbert G.W., Lamprou D.A. A novel methodology to study polymodal particle size distributions produced during continuous wet granulation // International Journal of Pharmaceutics. 2017. Vol. 519. Iss. 1-2. P. 230-239. [DOI: 10.1016/j.ijpharm.2017.01.023](https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.01.023)
11. Ashley G.M. Interpretation of Polymodal Sediments // The Journal of Geology. 1978. Vol. 86. № 4. P. 411-421. [DOI: 10.1086/649710](https://doi.org/10.1086/649710)
12. Asthana R., Shrivastava P.K., Srivastava H.B. et al. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Brookes Peninsula, East Antarctica // Advances in Polar Science. 2013. Vol. 24. № 4. P. 281-295. [DOI: 10.3724/SP.J.1085.2013.00281](https://doi.org/10.3724/SP.J.1085.2013.00281)



13. *Myo Min Htun, Sugeng Sapto Surjono, Jarot Setyowiyoto*. Granulometry analysis of Ngrayong sandstone, Tempuran Area, Rembang Zone, North East Java Basin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 451. № 012082. DOI: [10.1088/1755-1315/451/1/012082](https://doi.org/10.1088/1755-1315/451/1/012082)
14. *San Yee Khaing, Yuichi Sugai, Myo Min Tun et al.* Textural Characteristics and Depositional Environment of Ngrayong Sandstone (Middle Miocene) from Rembang Area, Northeast Java, Indonesia // Open Journal of Geology. 2022. Vol. 12. № 12. P. 1102-1119. DOI: [10.4236/ojg.2022.1212052](https://doi.org/10.4236/ojg.2022.1212052)
15. *Ikhane P.R., Akintola A.I., Bankole S.I. et al.* Granulometric analysis and heavy mineral studies of the sandstone facies exposed near Igble, southwestern Nigeria // International Research Journal of Geology and Mining. 2013. Vol. 3. № 4. P. 158-178.
16. *Madukwe H.Y.* Granulometric Analysis Of The Sandstone Facies Of The Ise Formation, Southwestern Nigeria // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology. 2016. Vol. 3. Iss. 2. P. 3909-3919.
17. *Remmache K., Nour El Islam Bachari, Nacef L., Houma F.* Granulometric Indices Mapping in Relation to Hydrodynamic Factors for Beach Characterization and Monitoring with Very High Spatial Resolution // Data Science and Application. 2020. Vol. 3. № 1. P. 5-12.
18. *Das G.K.* Granulometry of Beach Sands // Coastal Environments of India. Springer, 2022. P. 79-94. DOI: [10.1007/978-3-031-18846-6_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-18846-6_5)
19. *Dabirian R., Mohan R.S., Shoham O.* Mechanistic modeling of critical sand deposition velocity in gas-liquid stratified flow // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2017. Vol. 156. P. 721-731. DOI: [10.1016/j.petrol.2017.06.006](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.006)
20. *Salama M.M.* Sand Production Management // Journal of Energy Resources Technology. 2000. Vol. 122. Iss. 1. P. 29-33. DOI: [10.1115/1.483158](https://doi.org/10.1115/1.483158)
21. *Danielson T.J.* Sand Transport Modeling in Multiphase Pipelines // Offshore Technology Conference, 30 April – 3 May 2007, Houston, TX, USA. OnePetro, 2007. № OTC-18691-MS. DOI: [10.4043/18691-MS](https://doi.org/10.4043/18691-MS)
22. Чечко В.А., Топчая В.Ю. Многолетние данные гранулометрических параметров донных осадков как индикатор устойчивости обстановки осадконакопления // Успехи современного естествознания. 2021. № 3. С. 86-91. DOI: [10.17513/use.37598](https://doi.org/10.17513/use.37598)
23. Крыленко М.В., Крыленко В.В. Исследование гранулометрического состава пляжевых и донных отложений Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 40-49. DOI: [10.22449/2413-5577-2018-4-40-49](https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-40-49)
24. *Hjulström F.* Transportation of Detritus by Moving Water // Recent Marine Sediments. A Symposium. The American Association of Petroleum Geologists, 1955. Special Publication № 4. P. 5-31. DOI: [10.2110/pec.55.04.0005](https://doi.org/10.2110/pec.55.04.0005)
25. Белолипецкий В.М., Генова С.Н. Вычислительный алгоритм для определения динамики взвешенных и донных наносов в речном русле // Вычислительные технологии. 2004. Т. 9. № 2. С. 9-25.
26. Сальников С.Н., Карандаев Г.З. Анализ распределения концентрации песка по фракциям, их средневзвешенной крупности и скорости течения гидросмеси по высоте сечения гидротранспортной трубы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». 2016. Т. 16. № 1. С. 26-34.
27. Иванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И. Кинетика взвесей в прибрежной области моря // Морской гидрофизический журнал. 2006. № 4. С. 49-61.
28. Муромцев В.С. Электрометрическая геология песчаных тел – литологических ловушек нефти и газа. Л.: Недра, 1984. 260 с.
29. Чудинова Д.Ю., Чубисов А.В., Махныткин Е.М., Минниахметова Р.М. Оценка влияния литолого-фациальных особенностей отложений на эффективность выработки запасов нефти // Вестник Евразийской науки. 2022. Т. 14. № 6. № 45NZVN622.
30. Белозеров Б.В. Роль седиментационных моделей в электрофациальном анализе терригенных отложений // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 1. С. 116-123.
31. Кислухин И.В. Особенности геологического строения и нефтегазоносность юрско-неокомских отложений полуострова Ямал. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2012. 116 с.
32. Хуснуллина Г.Р., Биркле Е.А., Лебедев А.И. Гранулометрический анализ песчаников викуловской свиты (апт, нижний мел) Красноленинского месторождения (Западная Сибирь) // Литосфера. 2012. № 6. С. 90-99.
33. Вакуленко Л.Г., Предтеченская Е.А., Чернова Л.С. Опыт применения гранулометрического анализа для реконструкции условий формирования песчаников продуктивных пластов васюганского горизонта (Западная Сибирь) // Литосфера. 2003. № 3. С. 99-108.
34. Поздняков Ш.Р., Шмакова М.В. Расчет расхода влекомых наносов на реках с крупнофракционными донными отложениями // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. № 45. С. 20-27.

Автор Игорь Анатольевич Мельник, д-р геол.-минерал. наук, профессор (Томский политехнический университет, Томск, Россия), melnik@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2198-0370>.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.



Особенности и информативные возможности раннерадиального режима на КВД в горизонтальных скважинах с близко расположенными трещинами МГРП

Т.А.Абрамов✉, И.М.Индрупский

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Абрамов Т.А., Индрупский И.М. Особенности и информативные возможности раннерадиального режима на КВД в горизонтальных скважинах с близко расположенными трещинами МГРП // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 29-48. [EDN GOYQFR](#)

Аннотация

Бурение горизонтальных скважин (ГС) с многостадийным гидроразрывом пласта (МГРП) является одним из наиболее частых решений при разработке низкопроницаемых нефтяных и газовых коллекторов. При этом осложнена оценка параметров системы пласт – скважина по данным гидродинамических исследований (ГДИ) ввиду нереалистичных времен получения отклика на радиальный режим течения. Устранить эту неопределенность возможно, используя данные раннерадиального режима, возникающего на начальном этапе записи криевой восстановления давления (КВД). Однако для его проявления необходимо, чтобы расстояние между трещинами вдоль горизонтального ствола было достаточно большим по сравнению с полудиаметром трещин. На практике это условие обычно не выполняется, что делает невозможным такой способ оценки гидропроводности пласта. В то же время ГС с МГРП характеризуются сложным характером КВД, что связано с особенностью взаимодействия трещин. Поведение КВД на раннем периоде замера зависит от длительности отработки скважины перед остановкой, подобно КВД в скважине вблизи непроницаемой границы пласта. Впервые выявлено, что для достаточно коротких времен отработки на раннем этапе КВД может проявляться радиально подобный режим, вызванный формированием эллиптического течения вокруг трещин. Доказана устойчивость данного режима и взаимосвязь положения графика производной давления с параметрами формируемого эллиптического течения. Получена эмпирическая формула, обеспечивающая оценку коэффициента гидропроводности пласта по данному режиму с достаточной точностью для часто встречающегося на практике диапазона параметров геометрии ГС с МГРП. Результаты работы расширяют возможности достоверной оценки параметров системы пласт – скважина для ГС с МГРП в низкопроницаемых коллекторах по данным ГДИ, включая исследования новых скважин в процессе освоения или при запуске после длительного простоя.

Ключевые слова

гидродинамические исследования; кривая восстановления давления; горизонтальная скважина; многостадийный гидроразрыв пласта; гидропроводность; проницаемость; раннерадиальный режим; эллиптический режим; низкопроницаемый коллектор

Финансирование

Работа подготовлена в рамках выполнения Государственного задания ИПНГ РАН по теме «Создание новых технологий эффективного экологически чистого извлечения углеводородов в сложных горно-геологических условиях на основе системного подхода к изучению и моделированию полного жизненного цикла нефтегазовых месторождений» (125020501405-1).

Поступила: 12.08.2024

Принята: 02.07.2025

Онлайн: 13.10.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Бурение горизонтальных скважин (ГС) с многостадийным гидроразрывом пласта (МГРП) на сегодняшний день – один из основных способов вскрытия пласта при разработке низкопроницаемых нефтяных и газовых объектов [1, 2]. Оценка параметров системы пласт – скважина для ГС с МГРП при проведении различных промысловых исследований осложнена рядом причин:

- Снижение достоверности оценки фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пласта при проведении геофизических исследований (ГИС) в горизонтальном стволе и необходимость привлечения дорогостоящего комплекса исследований для уточненной оценки ФЕС [3, 4].

- Наличие неопределенности по дренируемым толщинам:
 - отсутствие прямой оценки по ГИС, так как скважины с ГС зачастую не пересекают подошву пласта;
 - при вскрытии расчлененных коллекторов – неясность по охвату дренированием толщин, вскрытых трещинами ГРП, в связи с косвенными оценками закрепленной высоты трещины.
- Неравномерность распределения добычи по работающим портам МГРП – по данным промыслового-геофизических исследований преимущественная доля добычи (>60 %) зачастую приходится на один-два порта, в то время как часть портов показывает долю от 5 % и менее [5, 6].
- Длительные сроки выхода на радиальный (позднерадиальный) режим при проведении гидродинамического исследования (ГДИ) [7, 8].

При интерпретации данных ГДИ первично определяемым параметром является гидропроводность пласта kh/μ , по значению которой при известной вязкости флюида μ и работающей толщине h определяется проницаемость пласта k . По значению проницаемости пласта рассчитываются остальные параметры системы пласт – скважина: геометрические характеристики скважины (полудлина трещины X_f , проводимость трещины F_c , длина ГС и др.) и различные составляющие скин-фактора (полный, геометрический, механический), расстояние до границ и др.

Наличие значительного числа влияющих параметров осложняет их независимую оценку и требует комплексирования ГДИ с промыслово-геофизическими исследованиями [9-11]. Авторы работ [12, 13] вводят понятие инвариантов – комплексных параметров, определяющих поведение давления при определенном режиме течения. В исследованиях [14, 15] предложено использовать «фильтрационную и емкостную составляющие потока». Чтобы разделить влияние различных параметров пласта и скважины и выполнить их индивидуальную оценку, необходима достоверная оценка гидропроводности (и связанной с ней проницаемости) пласта. В статье [16] представлен анализ поведения давления ГС с кластерным ГРП, отмечаяшимся более сложным характером отклика.

С точки зрения гидродинамических исследований ГС с МГРП являются не единственными сложными системами пласт – скважина. Длительными сроками выхода на радиальный режим могут характеризоваться и вертикальные скважины (ВС) со сверхдлинными трещинами ГРП, эксплуатирующиеся в коллекторах со сверхнизкой проницаемостью. Оценка свойств системы в таком случае может успешно решаться за счет применения алгоритмов деконволюции [17] или анализа динамики добычи (АДД) [18]. Не менее сложным является и случай трещиноватых карбонатных коллекторов, особенно в условиях их вскрытия горизонтальными стволами или ВС с ГРП. Оценка фильтрационных параметров таких коллекторов осуществляется как за счет комплексирования ГДИ с микросейсмикой [19], так и использования многомерных статистических моделей [20].

Таким образом, проблема определения истинной гидропроводности является критически важной с точки зрения достоверности получаемых результатов ГДИ и их дальнейшего применения при проектировании и мониторинге разработки месторождения.

Методы

Широко используются такие методы, как деконволюция и АДД, разработка которых направлена на решение проблемы недостаточной длительности КВД. Применение таких методов на ГС с МГРП в большинстве случаев не решает задачу получения отклика на позднерадиальный режим, так как для этого все равно требуется значительное время, также недостижимое и при использовании указанных методов. Рассмотрим данную проблему более подробно.

Режимы течений, характерные для скважин с МГРП. Длительные сроки выхода на радиальный режим для скважин с МГРП обусловлены наличием комплекса различного вида течений, возникающих на соответствующих этапах ГДИ [10, 21, 22]:

- билинейный с наклоном (тангенсом угла наклона) производной давления $i = 1/4$;
- ранний линейный к трещине с $i = 1/2$;
- раннерадиальный вокруг трещин с горизонтальным участком производной;
- поздний линейный к стволу ГС с $i = 1/2$;
- позднерадиальный, формирующийся вокруг ствола ГС на позднем этапе записи кривых стабилизации давления (КСД).



Выход на позднерадиальный режим может характеризоваться длительными сроками (до нескольких десятков лет), что определяет невозможность его получения на практике [8]. Время достижения позднерадиального режима зависит от параметров, определяющих пьезопроводность пласта и конструкцию скважины. Но для типично эксплуатируемых ГС с МГРП низкопроницаемых пластов описанный порядок является характерным. Невозможность достижения позднерадиального режима вносит значительную неопределенность в результаты интерпретации исследований таких скважин.

Оценка гидропроводности пласта возможна и по данным раннерадиального режима. Вертикальное положение горизонтального участка («полки») производной для него обратно пропорционально произведению Nkh/μ , где N – количество трещин [22, 23]. Однако для возникновения раннерадиального режима должен выполняться критерий отсутствия интерференции между трещинами на соответствующем временном интервале, что достижимо при относительно малых полудлинах трещин X_f и больших расстояниях между трещинами L с соотношением не менее L/X_f от 3 до 5 [23]. С учетом тенденции к увеличению числа стадий МГРП и полудлин трещин, на залежах с трудноизвлекаемыми запасами критерий проявления раннерадиального режима часто не выполняется.

При плотном расположении трещин после раннего линейного режима может проявляться другое характерное течение, контролируемое сильной интерференцией трещин с псевдоуставившимся распределением давления между ними [24]. Такое поведение схоже с псевдостационарным режимом в ограниченном пласте. Отличие в том, что нестационарное возмущение давления продолжает распространяться за пределами ограниченного трещинами объема. В литературе не встречается однозначного названия для данного вида течения. Однако наиболее подходящим, на наш взгляд, является термин «псевдоограниченное течение» [25]. Его характерный признак на диагностическом графике КСД – проявление наклона, близкого к 1, аналогично «классическому» псевдостационарному течению.

На рис.1 сопоставлены диагностические графики синтетических КСД с параметрами, представленными в табл.1, с вариацией длины горизонтального ствола hw . Расчеты выполнены в программном пакете планирования и интерпретации ГДИ Kappa Saphir с использованием аналитической модели ГС с МГРП. Для варианта с $hw = 400$ м (с соотношением $L/X_f = 2$) выход на раннерадиальный режим не происходит, вместо него наблюдается переходный режим между ранним и поздним линейными течениями в интервале 2-30 ч. Для вариантов с длиной ГС 25 и 100 м, характеризующихся близким расположением трещин, отмечается упомянутый рост производной давления с наклоном $i = 1$, соответствующий псевдоограниченному течению, с последующим выходом на поздний линейный режим. При этом для варианта с $hw = 25$ м выход на псевдоограниченный режим наблюдается сразу после билинейного течения, без проявления раннего линейного режима.

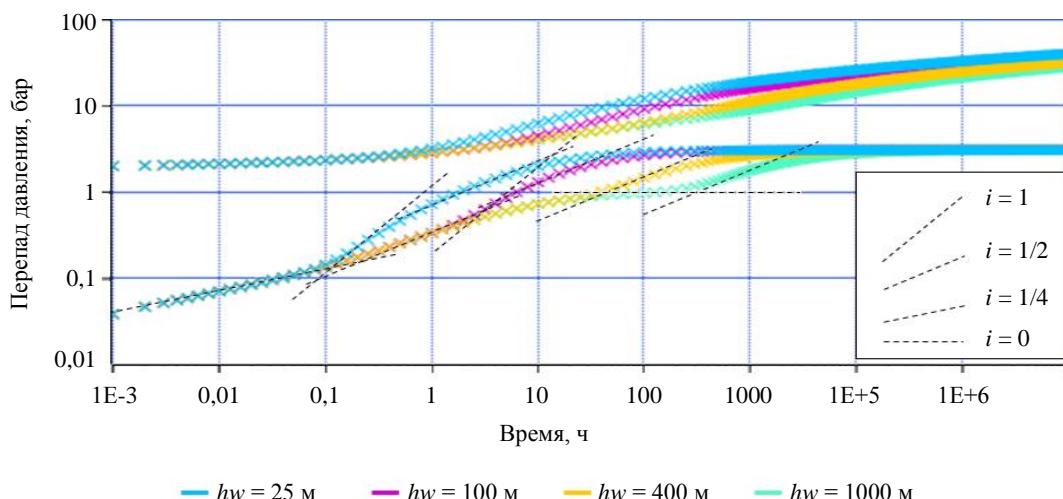


Рис.1. Пример проявления псевдоограниченного течения для скважины с МГРП



Таблица 1

Параметры скважины с МГРП

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Проницаемость k , мД	1	Пластовое давление P_i , бар	300
Пористость m , д.ед.	0,1	Количество трещин N	3
Толщина h , м	30	Полудлина трещин X_f , м	50
Полная сжимаемость $c_t \cdot 10^{-5}$, бар $^{-1}$	3,6	Проводимость трещин F_c , мД·м	300
Вязкость μ , мПа·с	1	Дебит скважины q , м 3 /сут	10
Объемный коэффициент B	1	Скин-фактор S	0,3
Радиус скважины, мм	99,4		

Особенности проявления режимов на КВД. Наличие комплекса режимов течения, а также режимов, аналогичных работе скважины в ограниченном пласте, вызывают зависимость поведения КВД в ГС с МГРП от длительности ее отработки перед закрытием. Такие процессы также отмечаются при исследовании скважин в областях с наличием незамкнутых границ пласта. В случае кратковременной отработки этих скважин, при последующей записи КВД в начальный период реакции на границу наблюдается отличный от КСД характер поведения производной. Такое поведение обусловлено особенностями суперпозиции реакций давления на непроницаемую границу, возникших при отработке и последующем закрытии [24, 26]. Аналогичным образом ведут себя производные давления для примеров, представленных на рис.1, причем наиболее сильному «искажению» подвержены варианты с проявлением псевдоограниченного течения. Изменение поведения происходит в определенном диапазоне длительности отработки $T_{\text{отр}}$, индивидуальном в зависимости от представленных значений параметров системы пласт – скважина.

Такие особенности поведения производной характеризуются одним интересным явлением, возникающим для значений $T_{\text{отр}}$ из определенного интервала, при котором отмечается отличие формы КВД от КСД. На рис.2 показано сопоставление КСД и КВД для представленных ранее вариантов hw , где КВД построены для разных значений $T_{\text{отр}}$ и hw . Для всех четырех вариантов hw на производной КВД отмечается формирование горизонтального участка с последующим незначительным «провалом». При этом наблюдается близость между «полкой» раннерадиального режима КСД и формирующейся «полкой» КВД при кратковременной отработке (рис.2, ε). Можно предположить, что и для остальных вариантов проявление горизонтального участка на КВД после кратковременной отработки может являться характерным признаком, позволяющим оценивать гидропроводность пласта без достижения позднерадиального режима.

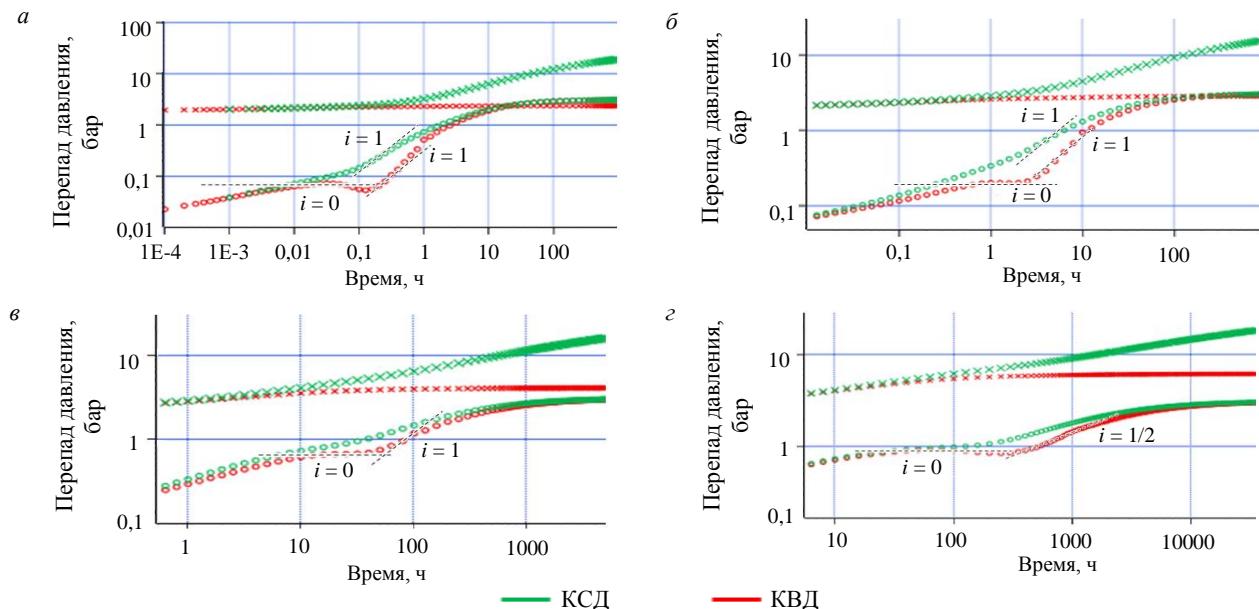


Рис.2. Увеличенный масштаб периода формирования горизонтального участка при кратковременной отработке для различных вариантов длины ГС: $a - hw = 25$ м, $T_{\text{отр}} = 0,1$ ч; $b - hw = 100$ м, $T_{\text{отр}} = 1$ ч; $c - hw = 400$ м, $T_{\text{отр}} = 10$ ч; $d - hw = 1000$ м, $T_{\text{отр}} = 100$ ч



В табл.2 сопоставлены значения кажущейся проводимости kh_T , определенной по горизонтальному участку производной КВД после кратковременной отработки, с исходной проводимостью пласта $kh_{\text{исх}}$. Из таблицы видно, что соотношения $kh_T/kh_{\text{исх}}$ не характеризуются однозначной зависимостью. Только для варианта $hw = 1000$ м с наличием раннерадиального участка на КСД это соотношение приближается к ожидаемой величине – количеству трещин $N = 3$, хотя и превышает его более чем на 10 %. В остальных вариантах значения существенно выше, что указывает на иной характер течения, формирующего «полку» на производной КВД. В отличие от классического раннерадиального режима, такая «полка» формируется и при малых значениях L/Xf , но только на КВД после кратковременной отработки.

Таблица 2

Сопоставление кажущейся проводимости с исходной величиной

hw , м	kh_T , мД·м	$kh_{\text{исх}}$, мД·м	$kh_T/kh_{\text{исх}}$
25	1283,7	30,0	42,8
100	459,4	30,0	15,3
400	140,3	30,0	4,7
1000	101,9	30,0	3,4

Зависимость формирующегося горизонтального участка на КВД от продолжительности переходных режимов. Если выявленная «полка» на КВД действительно связана с проявлением радиально подобного режима течения, а не возникает из-за наложения переходных режимов, то ее вертикальное положение не должно зависеть от таких параметров, как время отработки $T_{\text{отр}}$ и сжимаемость системы c_t . Для анализа влияния $T_{\text{отр}}$ построено семейство синтетических КВД для значений $T_{\text{отр}}$ от 1 до 1000 ч с параметрами системы пласт – скважина, представленными в табл.3 (рис.3, а). Как видно, КВД демонстрируют выявленную ранее зависимость формы производной от длительности отработки. При этом наблюдается явное формирование горизонтального участка на одном и том же вертикальном уровне. Признаки образования горизонтального участка наблюдаются при $T_{\text{отр}} = 5$ ч и прекращаются при $T_{\text{отр}} = 500$ ч. Можно отметить одинаковое время начала выхода на горизонтальный участок. Изменение $T_{\text{отр}}$ влияет на продолжительность доминирования горизонтального участка.

Таблица 3

Параметры скважины с МГРП для оценки режима кратковременной отработки

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Проницаемость k , мД	1	Пластовое давление P_i , бар	112
Пористость m , д.ед.	0,25	Количество трещин N	3
Толщина h , м	25	Расстояние между краевыми трещинами (длина ГС) hw , м	450
Полная сжимаемость $c_t \cdot 10^{-5}$, бар $^{-1}$	4,3	Полудлина трещин Xf , м	200
Вязкость μ , мПа·с	1	Проводимость трещин F_c , мД·м	500
Объемный коэффициент B	1	Дебит скважины q , м 3 /сут	10
Радиус скважины, мм	70	Скин-фактор S	0,1

Для оценки влияния сжимаемости системы c_t в качестве базового принят вариант с параметрами согласно табл.3 при длительности отработки $T_{\text{отр}} = 100$ ч. Вариация сжимаемости при построении синтетических кривых производилась до полного прекращения признаков проявления горизонтального участка. Охваченный диапазон значений составил $1 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-3}$ бар $^{-1}$ (рис.3, б). Как и в случае с длительностью отработки, изменение сжимаемости не оказывает влияния на вертикальное положение горизонтального участка, формирование которого наблюдается на одном и том же уровне. Вариация c_t влияет на все временные характеристики КВД, поэтому изменяется не только продолжительность горизонтального участка, но и время начала выхода на него.

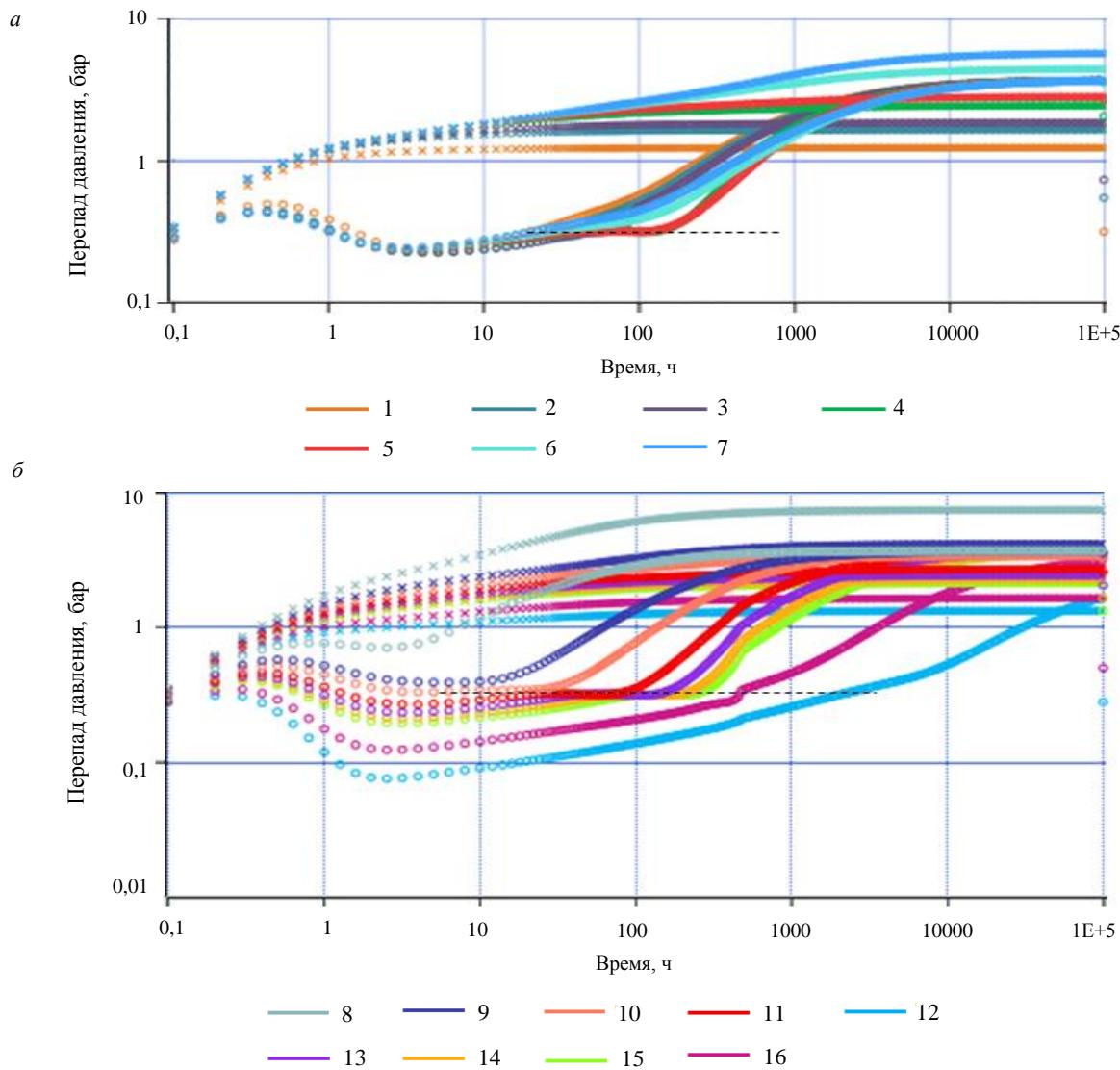


Рис.3. Семейство КВД для различных значений $T_{\text{отр}}$ (a) и c_t (б)

1 – $T_{\text{отр}} = 1$ ч; 2 – $T_{\text{отр}} = 5$ ч; 3 – $T_{\text{отр}} = 10$ ч; 4 – $T_{\text{отр}} = 50$ ч; 5 – $T_{\text{отр}} = 100$ ч; 6 – $T_{\text{отр}} = 500$ ч; 7 – $T_{\text{отр}} = 1000$ ч;
 8 – $c_t = 1 \cdot 10^{-6}$ бар $^{-1}$; 9 – $c_t = 5 \cdot 10^{-6}$ бар $^{-1}$; 10 – $c_t = 1 \cdot 10^{-5}$ бар $^{-1}$; 11 – $c_t = 2,5 \cdot 10^{-5}$ бар $^{-1}$; 12 – $c_t = 3 \cdot 10^{-3}$ бар $^{-1}$;
 13 – $c_t = 4,3 \cdot 10^{-5}$ бар $^{-1}$; 14 – $c_t = 6,5 \cdot 10^{-5}$ бар $^{-1}$; 15 – $c_t = 9 \cdot 10^{-5}$ бар $^{-1}$; 16 – $c_t = 5 \cdot 10^{-4}$ бар $^{-1}$

Таким образом, одинаковое вертикальное положение горизонтального участка на КВД при различных значениях $T_{\text{отр}}$ и c_t указывает на то, что формируемая «полка» характеризует определенный радиально подобный режим течения, для которого следует найти соответствующие зависимости от параметров пласта и скважины.

Анализ формирующихся режимов течения по данным численного моделирования. Для выявления особенностей режима течения, связанного с формирующейся «полкой» на графике производной КВД после кратковременной отработки, рассмотрим характер изменения распределений пластового давления (формирования областей дренирования) по данным численного моделирования КВД. С этой целью выполнен расчет с использованием 2D-численной модели в Карра Saphir для параметров скважины с МГРП, представленных в табл.3, при отработке длительностью $T_{\text{отр}} = 100$ ч. С целью выявления возможных различий в поведении КВД расчет производился для трещин с бесконечной и конечной проводимостью.

На диагностическом графике смоделированной КВД (рис.4) выявляются следующие характерные режимы:

1. Замеры для трещины бесконечной проводимости – линейное течение с наклоном производной $i = 1/2$, для трещины конечной проводимости – билинейное течение с $i = 1/4$ (1 ч).
2. Переходный режим (20 ч).

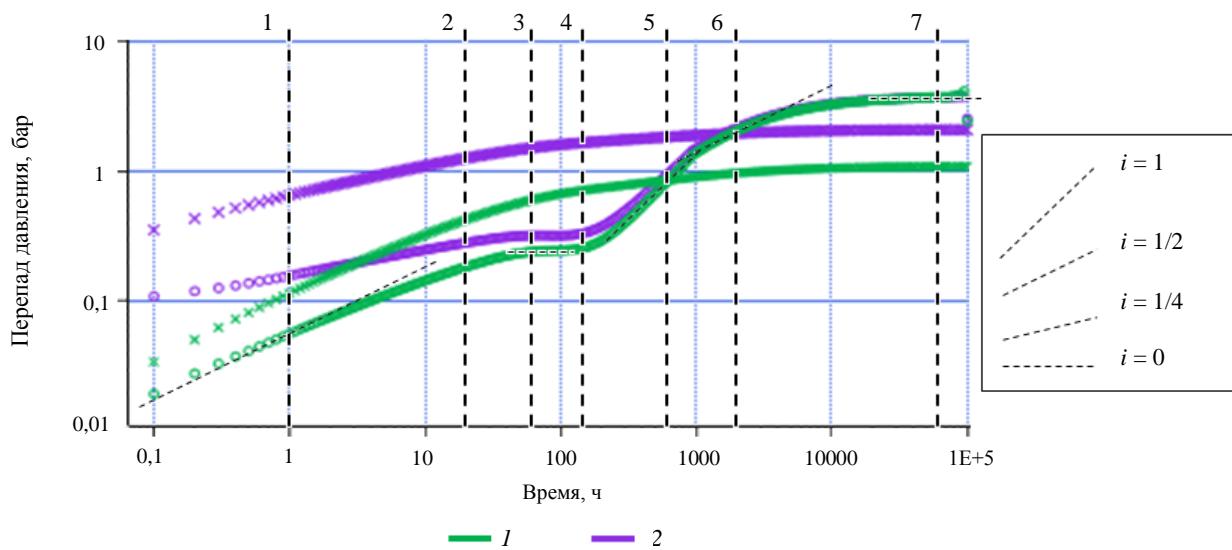


Рис.4. Диагностический график КВД при кратковременной отработке скважины с МГРП по данным табл.3.
Трещины бесконечной (1) и конечной (2) проводимости

3. Ранний горизонтальный участок, $i = 0$ (60 ч).
4. Незначительный прогиб производной (120 ч).
5. Псевдоограниченное течение, $i = 1$ (500 ч).
6. Позднее линейное течение, $i = 1/2$ (2000 ч).
7. Позднее радиальное течение, $i = 0$ ($6 \cdot 10^4$ ч).

Как видно, за исключением периода 1, представленные периоды КВД для обоих вариантов проводимости трещин характеризуются аналогичными режимами течения. При этом для трещин бесконечной проводимости ранний горизонтальный участок на графике производной располагается ниже, чем для трещин конечной проводимости. С момента начала доминирования псевдоограниченного режима 5 наблюдается тенденция к сближению кривых производных давления, которые полностью совпадают по окончании позднего линейного режима.

В рассматриваемом случае по окончании билинейного режима для трещины конечной проводимости не происходит формирование раннего линейного течения, а наблюдается переходный период и образование горизонтального участка. Отсутствие линейного течения объясняется значением безразмерного коэффициента проводимости $C_{fD} = Fc / (kXf) = 2,5$. Известно, что при значениях C_{fD} , близких к 1,6, наблюдается наибольшая длительность билинейного режима [26]. Это объясняет получение длительно доминирующего билинейного режима в представленном примере, маскирующего участок линейного течения перед формированием раннего горизонтального участка.

На рис.5 представлены распределения давления в окрестности скважины, полученные по результатам расчета КВД для трещин бесконечной проводимости, на характерные моменты времени, отмеченные цифрами на рис.4:

- в период доминирования линейного течения наблюдается формирование областей сниженного давления вокруг трещин;
- во время переходного периода отмечаются признаки слабой интерференции между трещинами;
- при формировании раннего горизонтального участка наблюдается образование эллипсов вокруг трещин;
- в период провала производной происходит смыкание эллипсов, образованных вокруг соседних трещин (сильная интерференция);
- этап доминирования псевдоограниченного течения характеризуется распространением областей интерференции до концов трещин;
- в период проявления поздних линейного (6) и радиального (7) режимов наблюдается формирование соответствующих прямоугольных и круглых областей дренирования вокруг ГС.

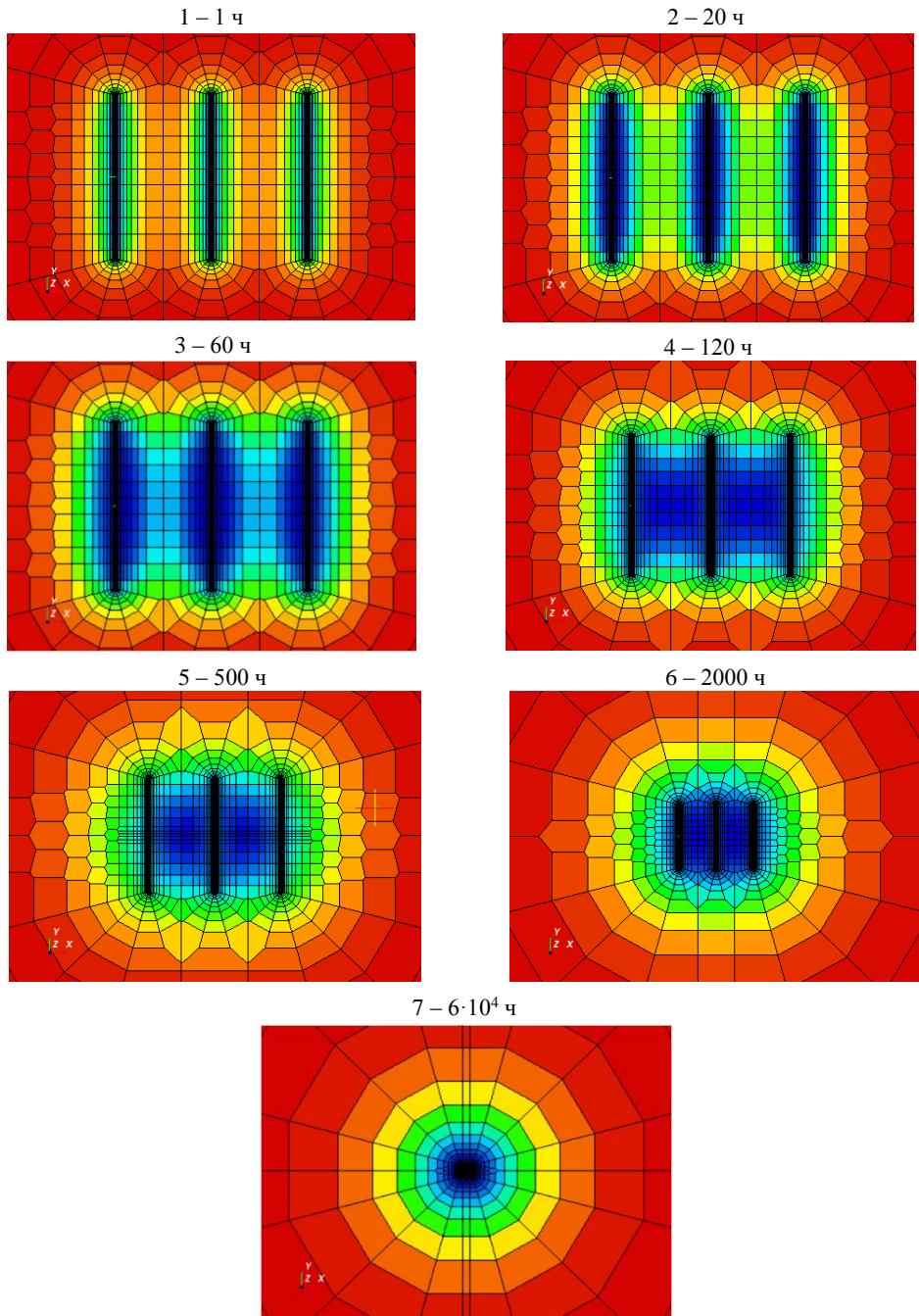


Рис.5. Распределения давления на моменты доминирования характерных режимов.

Трещины бесконечной проводимости

Синий цвет соответствует областям минимального давления, красный – максимального

На рис.6 представлены аналогичные распределения давления для трещин конечной проводимости. В период проявления раннего горизонтального участка 3 вокруг трещин также наблюдается формирование эллипсов с последующим их смыканием в интервале времени 4. При этом для трещин конечной проводимости происходит формирование более сжатых по вертикали эллипсов, частично охватывающих поверхность трещины. Причиной этому является формирование областей сниженного давления вокруг центральной части трещин в момент доминирования билинейного режима 1, что обусловлено наличием градиента давления внутри трещины конечной проводимости. Последующее развитие эллипса на этапе 3 происходит напрямую из области сниженного давления, образованной в период доминирования билинейного режима 1, поэтому его геометрия связана с проводимостью трещины.

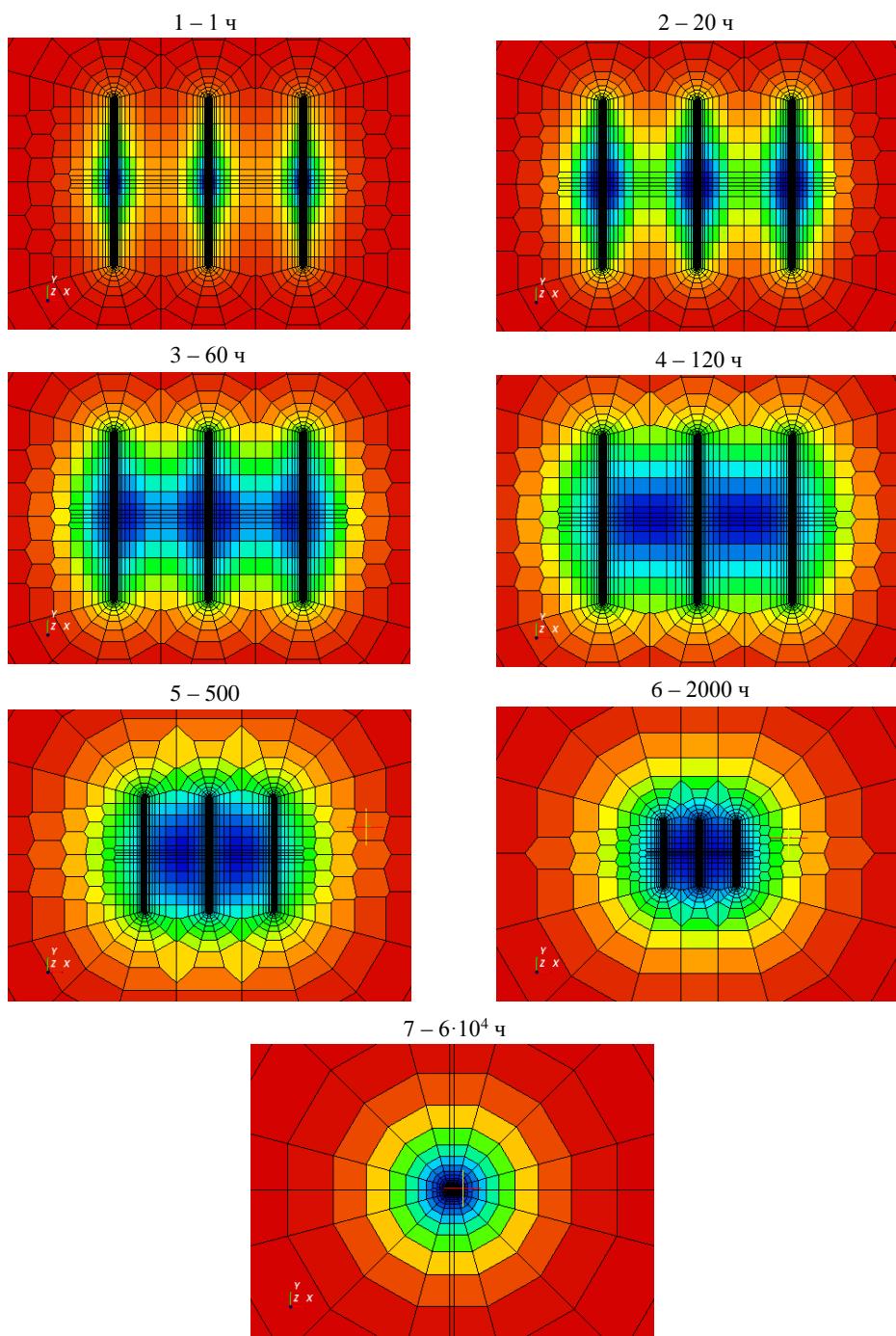


Рис.6. Распределения давления на моменты доминирования характерных режимов.

Трещины конечной проводимости

Условные обозначения см. на рис.5

Таким образом, расхождение в поведении КВД между моделями трещин конечной и бесконечной проводимостей в периоды 1-4 обусловлено различием в охваченной дренированием площади. Последующие временные интервалы характеризуются идентичной динамикой охвата дренированием. В целом представленные численные расчеты позволяют сделать вывод о том, что для скважин с МГРП проявление раннего горизонтального участка на КВД после кратковременной отработки связано с формированием псевдорадиального (эллиптического) режима течения вокруг отдельных трещин. Из-за отличия в геометрии этих областей от строго круговых зон для классического раннерадиального режима следует ожидать и иную связь положения «полки» производной с истинной гидропроводностью пласта.

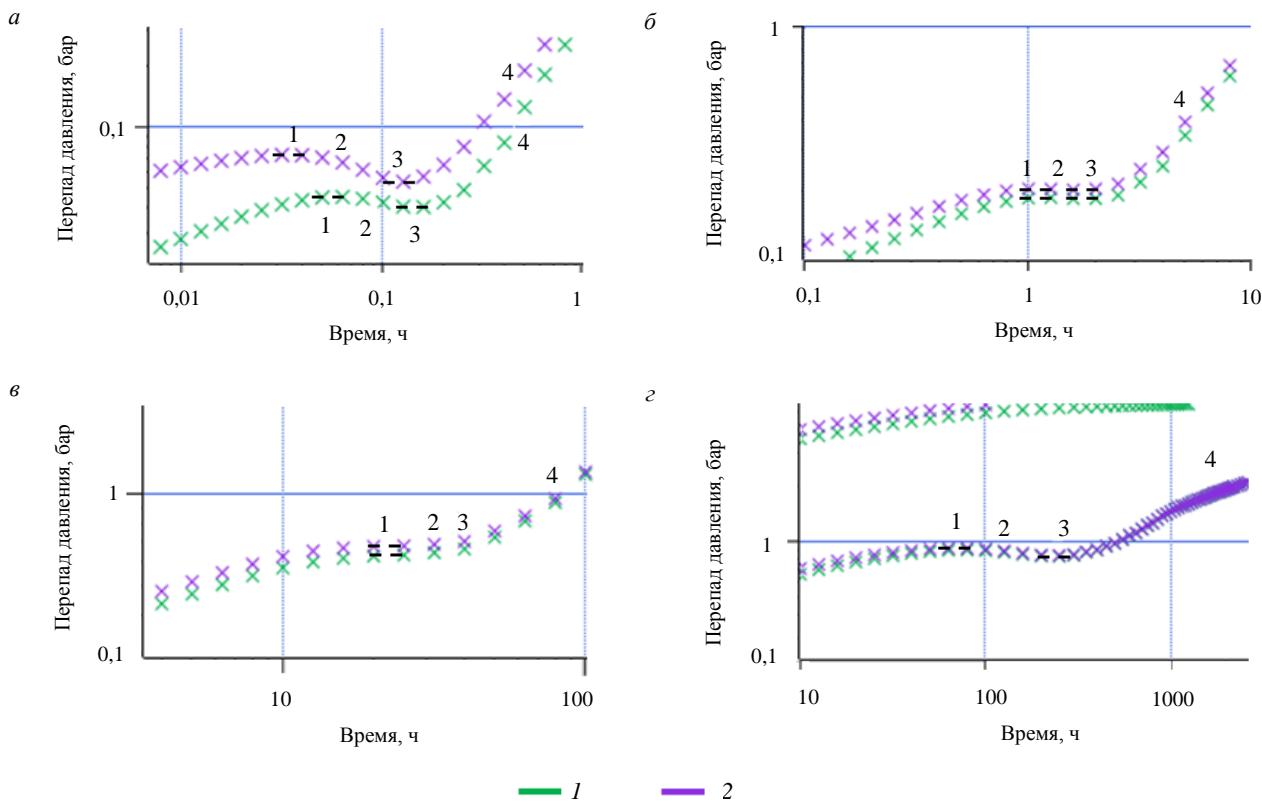


Рис.7. Сопоставление диагностических графиков КВД для трещин бесконечной (1) и конечной (2) проводимости на среднем периоде времени: $a - hw = 25$ м, $T_{\text{отр}} = 0,1$ ч; $\delta - hw = 100$ м, $T_{\text{отр}} = 1$ ч; $\epsilon - hw = 400$ м, $T_{\text{отр}} = 10$ ч;
 $\varepsilon - hw = 1000$ м, $T_{\text{отр}} = 100$ ч

Различие в поведении графиков производной КВД между случаями трещин бесконечной и конечной проводимости требует более подробного исследования. С этой целью были выполнены расчеты синтетических КВД для двух типов проводимости трещин при ранее рассмотренных вариантах длины ГС hw и параметрах системы пласт – скважина (см. табл.1).

На рис.7 сопоставлены диагностические графики синтетических КВД на среднем периоде времени для трещин бесконечной и конечной проводимости для четырех значений hw , где цифрами отмечены следующие характерные режимы:

1. Ранний горизонтальный участок.
2. Снижение производной.
3. Минимум производной («провал»).
4. Период псевдоограниченного течения.

При наиболее плотном размещении трещин (рис.7, a) наблюдается максимальное расхождение между графиками для трещин бесконечной и конечной проводимости. Как и на рис.4, производная для трещин бесконечной проводимости проходит ниже. Расхождение также отмечается и по времени проявления режимов: участок 1 для трещин бесконечной проводимости проявляется позднее. По мере увеличения расстояния между трещинами (hw) в остальных вариантах наблюдается визуальное сближение между кривыми, однако в абсолютных значениях расхождение в положении «полки» горизонтального участка 1 остается в пределах одного порядка в диапазоне 0,0175-0,046 бар (табл.4). При этом наблюдаются практически одинаковые временные интервалы доминирования режимов.

Отдельный интерес представляет изменяющийся характер «провала» производной для различных значений hw . Он является максимальным для $hw = 25$ м, для $hw = 100$ м в периоды 1-3 наблюдается формирование единой полки, для $hw = 400$ м в периоды 2-3 происходит незначительный рост производной, а для $hw = 1000$ м снова наблюдается снижение производной и ее минимум.



Таблица 4

**Сопоставление положения «полки» горизонтального участка 1
для трещин бесконечной и конечной проводимости**

Проводимость трещины	Положение горизонтального участка							
	$hw = 25$ м		$hw = 100$ м		$hw = 400$ м		$hw = 1000$ м	
	i , бар	Δ , бар	i , бар	Δ , бар	i , бар	Δ , бар	i , бар	Δ , бар
Бесконечная	0,0452	0,0277	0,186	0,0175	0,626	0,046	0,896	0,022
Конечная	0,0729		0,2035		0,672		0,918	

В табл.5 сведены значения времени t для середин четырех рассматриваемых периодов, по значениям которых с помощью опции оценки радиуса исследования в Kappa Saphir определены условные радиусы исследования $R_{иссл}$. Расчет радиусов производится согласно известному соотношению через коэффициент пьезопроводности [24, 27]. Отметим, что хотя константа в формуле для $R_{иссл}$ может быть выбрана различным способом [28, 29], в Kappa Saphir используется наиболее распространенное выражение, впервые обоснованное van Poolen в 1964 г. [24]. За исключением варианта $hw = 25$ м, а также участка 1 для варианта $hw = 100$ м, времена характерных периодов для трещин конечной и бесконечной проводимости не различаются. При этом выявляются следующие закономерности:

- период проявления раннего горизонтального участка на производной КВД соответствует времени, когда дренированием охвачена зона с горизонтальным размером меньше половины расстояния между трещинами $L/2$;
- по мере расширения области дренирования и приближения ее горизонтального размера к $L/2$ начинаются процессы интерференции между трещинами, обуславливающие снижение производной;
- в зоне минимума («провала») производной радиус исследования (области дренирования) соответствует половине расстояния между трещинами $R_{иссл} \approx L/2$;
- в период псевдоограниченного течения $R_{иссл}$ превышает $L/2$ примерно в 1,5-2 раза.

Таблица 5

**Средние значения времени и радиуса исследования на четырех участках
при трещинах бесконечной и конечной проводимости**

Проводимость трещины	Середина интервала доминирования режима							
	Участок 1		Участок 2		Участок 3		Участок 4	
	t , ч	$R_{иссл}$, м	t , ч	$R_{иссл}$, м	t , ч	$R_{иссл}$, м	t , ч	$R_{иссл}$, м
$hw = 25$ м ($L/2 = 6,25$ м)								
Бесконечная	0,0634	4,5	0,1005	5,6	0,159	7,1	0,5036	12,6
Конечная	0,0320	3,2	0,0798	5,0	0,127	6,3	0,318	10,0
$hw = 100$ м ($L/2 = 25$ м)								
Бесконечная	1,265	19,9	1,592	22,4	2,0475	25,4	5,0357	39,8
Конечная	1,0475	18,1	1,592	22,4	2,0475	25,4	5,0357	39,8
$hw = 400$ м ($L/2 = 100$ м)								
Бесконечная	20,0	79,4	25,2	89,0	40,0	112,1	79,8	158,3
Конечная	20,0	79,4	25,2	89,0	40,0	112,1	79,8	158,3
$hw = 1000$ м ($L/2 = 250$ м)								
Бесконечная	79,8	158,3	159,2	223,7	250,5	280,5	600,5	434,3
Конечная	79,8	158,3	159,2	223,7	250,5	280,5	600,5	434,3

Выявленные закономерности подтверждаются при анализе распределений давления на рассматриваемых периодах времени для рассчитанных вариантов. Соответствующие рисунки аналогичны рис.5 и 6 и не приводятся для сокращения объема статьи. Для всех вариантов без исключения наблюдается явная корреляция с результатами оценки $R_{иссл}$.

- в период проявления на производной КВД горизонтального участка наблюдается формирование эллипсов в ближайшей к трещинам зоне;
- в период снижения производной отмечается смыкание эллипсов между трещинами;
- на момент «провала» (минимума) производной формируется единая область сниженного давления в пространстве, ограниченном соседними трещинами;
- в период псевдоограниченного течения происходит расширение этой области вдоль направления, параллельного трещинам.

Из данных выводов также ясны причины наибольшего различия в поведении КВД между случаями трещин бесконечной и конечной проводимости при $hw = 25$. Они обусловлены наибольшими расхождениями в геометрии соответствующих эллипсов из-за наиболее вытянутой формы областей между трещинами. При этом для $hw = 25$ м различия в геометрии эллипсов наблюдаются на протяжении всего среднего этапа и ожидаемо исчезнут только при выходе области дренирования за пределы трещин на позднем линейном течении. Также для этого варианта при трещинах конечной проводимости область дренирования в пространстве между трещинами на всех четырех режимах существенно меньше, что и обуславливает более высокое расположение «полки» производной относительно случая трещин бесконечной проводимости. Для $hw = 100$ м различия не являются столь существенными, особенно на участках 3 и 4. Это определяет близость производных давления между двумя вариантами проводимости трещин. Для $hw = 400$ м и $hw = 1000$ м визуальных отличий не наблюдается.

По данным визуальной оценки отсутствие «провала» производной для $hw = 100$ м объясняется тем, что даже при смыкании эллипсов на протяжении периодов 2 и 3, для обоих вариантов проводимости наблюдается сохранение структуры эллиптического потока. Аналогичным образом объясняется начало роста производной с периода 2 для $hw = 400$ м: с момента смыкания эллипсов область начинает формировать структуру, которая визуально не отличается от образующейся в период 4. Для вариантов $hw = 25$ м и $hw = 1000$ м каждый из отмеченных этапов характеризуется формированием структуры потока, отличающейся от предыдущего этапа.

Таким образом, результаты численных расчетов показывают, что возникновение раннего горизонтального участка производной на КВД после кратковременной отработки связано с формированием эллиптического режима течения вокруг трещин ГРП. При этом наблюдаются различия в геометрических параметрах образующихся эллипсов, обусловленные типом проводимости и плотностью расположения трещин, влияющие на положение «полки» горизонтального участка.

Обсуждение результатов

Анализ возможности оценки свойств пласта по бирадиальному режиму. В общепринятой практике и теории ГДИ для радиально подобного вида течения, характерного на определенных периодах времени для скважин с горизонтальным окончанием или с вертикальной трещиной гидоразрыва, используется термин «псевдорадиальный режим» [24, 30, 31]. Считается, что псевдорадиальный режим полностью тождествен «обычному» радиальному режиму по своим диагностическим признакам в виде горизонтального участка на билогарифмическом графике и методике оценки фильтрационных свойств пласта по его вертикальному положению. Таким образом, при псевдорадиальном режиме линии постоянного давления являются окружностями (а область дренирования – круговой), с учетом масштабирования по координатным осям в анизотропном случае.

Вместе с тем ряд авторов выделяет еще один характерный радиально подобный вид течения, обычно возникающий как переходный между линейным и псевдорадиальным режимами. Он может быть связан с упомянутыми типами заканчивания: вертикальными скважинами с ГРП [32-34], ГС с МГРП [35-37], ГС в естественно-трещиноватых пластах [38, 39]. Его возникновение также возможно в случае притока в анизотропных по латерали пластах [32]. Форма линий постоянного давления (и области дренирования) при подобном режиме является эллиптической. Такое название иногда применяется и для самого режима. В зависимости от причин формирования линий постоянного давления могут описываться как подобными эллипсами с эквивалентным масштабированием в псевдорадиальную конфигурацию, так и софокусными эллипсами с другой геометрией течения. В некоторых публикациях для такого течения используется синонимичный термин «бирадиальный режим», название которого, по всей видимости, обусловлено соответствующим характером симметрии потока.



Впервые диагностический признак эллиптического (бирадиального) режима описал в 1993 г. D.Tiab в работе [40]. В дальнейшем другие авторы развили предложенный им метод [37, 41]. На основании регрессионного анализа построенных им кривых для трещины бесконечной проводимости D.Tiab вывел следующую зависимость для производной давления по времени:

$$t_{DA} P'_D = 0,769 \left(\frac{X_e}{Xf} \right)^{0.72} t_{DA}^{0.36}, \quad (1)$$

где X_e – половина длины стороны замкнутой прямоугольной области, в которой рассматривается течение; t_{DA} – безразмерное время,

$$t_{DA} = \frac{kt}{m\mu c_t A},$$

A – площадь области; P_D – безразмерное давление,

$$P_D = \frac{2\pi kh\Delta p}{q\mu B}.$$

В размерном виде уравнение (1) будет иметь вид:

$$t\Delta P' = 0,769 \frac{q\mu B}{2\pi kh} \left(\frac{X_e}{Xf} \right)^{0.72} \left(\frac{kt}{m\mu c_t A} \right)^{0.36}. \quad (2)$$

Здесь произведение в левой части соответствует логарифмической производной изменения давления по времени (производной Бурде). Площадь A определяется произведением длин сторон прямоугольной области дренирования $2X_e$ и $2Y_e$, при этом направление X_e параллельно трещине.

Рассмотрим возможность применения метода D.Tiab к выявленному выше эллиптическому течению на КВД после кратковременной отработки. Исходя из рис.5 и 6 и оценок времени проявления характерных режимов, можно предположить, что ограничивающая эллипсы зона дренирования формируется в пределах области распространения трещин и половины расстояния между ними, поэтому $X_e = Xf$, $Y_e = L/2$.

Из предложенной D.Tiab зависимости (2) очевидно, что в период доминирования бирадиального режима график логарифмической производной должен быть представлен прямолинейным участком с наклоном 0,36. Действительно, при проверке наличие такого режима проявляется для примеров, представленных на рис.7 для обоих вариантов проводимости трещин.

Исходя из наличия характерного диагностического признака и соответствующей зависимости, для бирадиального режима можно выполнить аналогичную раннерадиальному режиму предварительную оценку гидропроводности пласта. Согласно формуле (2), оценка должна производиться путем определения значения производной давления ($t\Delta P'$) на соответствующий данному режиму момент времени t :

$$\frac{kh}{\mu} = \frac{0,769qB}{(t\Delta P')2\pi} \left(\frac{kt}{m\mu c_t} \frac{1}{4Xf L/2} \right)^{0.36}. \quad (3)$$

Для скважины с МГРП аналогично раннерадиальному режиму следует ожидать, что соотношение полученного кажущегося и исходного значений гидропроводности должно соответствовать количеству трещин N . Отметим, что в правой части выражения (3) присутствует коэффициент пьезопроводности $k/(m\mu c_t)$, в величину которого входит проницаемость k . Следовательно, для оценки гидропроводности в реальных условиях требуется более сложный расчет. Однако для верификации метода можно принять, что пьезопроводность является известной величиной.

В табл.6 представлены результаты определения гидропроводности по формуле (3) на участке с наклоном $i = 0,36$ для вариантов, показанных на рис.7. В последнем столбце приведено соотношение полученной кажущейся и исходной гидропроводности. Как видно из таблицы, наиболее

близкое значение соотношения к количеству трещин $N = 3$ наблюдается для варианта $hw = 25$ м с трещиной конечной проводимости. Однако данный факт является скорее совпадением, так как в целом видна тенденция по снижению соотношения по мере увеличения длины ГС, и значения меняются в широком диапазоне. Также видно, что при $hw = 25$ м и $hw = 100$ м большая величина соотношения характерна для трещины бесконечной проводимости.

Таблица 6

Сопоставление кажущейся гидропроводности с исходным значением

Вариант	Длина ГС hw , м	F_C , мД·м	$(kh/\mu)_{\text{исх}}$, мД·м/мПа·с	t , ч	$t\Delta P'$, бар	$(kh/\mu)_{\text{бирад}}$, мД·м/мПа·с	$(kh/\mu)_{\text{бирад}}/(kh/\mu)_{\text{исх}}$
1	25	Бесконечная	30	0,005	0,0213	267,8	8,9
	25	300			0,0556	102,6	3,4
2	100	Бесконечная		0,03	0,0553	62,6	2,1
	100	300			0,0891	38,9	1,3
3	400	Бесконечная	4	0,479			
	400	300					
4	1000	Бесконечная		0,551			
	1000	300					

Таким образом, для выявленного эллиптического режима на КВД скважины с МГРП после кратковременной отработки не применимы критерий бирадиального течения с наклоном производной $i = 0,36$ и эмпирическая формула D.Tiab. Дальнейшая работа должна быть связана с анализом течения в период проявления горизонтального участка производной и зависимости положения «полки» от параметров системы пласт – скважина.

Эмпирическая формула для оценки гидропроводности по горизонтальному участку эллиптического режима. Из представленного выше анализа следуют выводы:

- горизонтальный участок на графике производной КВД после кратковременной отработки соответствует эллиптическому режиму течения;
- положение «полки» производной должно иметь связь с фильтрационными параметрами пласта (гидропроводностью) и геометрическими характеристиками эллиптического течения, формируемого в системе пласт – трещины МГРП.

С целью поиска зависимости для положения «полки» горизонтального участка производной было выполнено 40 расчетов синтетических КВД с вариацией следующих параметров системы пласт – скважина:

1. Дебит q .
2. Проницаемость k .
3. Толщина пласта h .
4. Вязкость μ .
5. Полудлина трещины X_f .
6. Длина ГС hw .

Указанные параметры были выбраны как непосредственно определяющие «полку» горизонтального участка на позднем (истинном) радиальном режиме (q, k, h, μ), так и те, от которых зависит проявление горизонтального участка и геометрия соответствующего эллиптического течения (X_f, hw). Подбор значений параметров производился случайным способом при условии проявления горизонтального участка эллиптического режима на производной КВД для времени отработки $T = 100$ ч. При этом на данном этапе исследований рассматривался только случай трещин бесконечной проводимости, с целью снижения количества факторов, влияющих на положение горизонтального участка.

Значения параметров по вариантам и результаты расчетов приведены в табл. 7. В столбце 12 для сравнения представлены оценки гидропроводности по участку с наклоном $i = 0,36$. Несмотря на ранее выявленное отсутствие зависимости между истинной гидропроводностью, ее расчетным значением по участку с $i = 0,36$ и количеством трещин, при выполнении текущих оценок в формуле (3) количество трещин учитывалось из теоретических соображений, аналогично раннера-дициальному режиму:



Таблица 7

Исходные параметры и результаты оценки гидропроводности для синтетических вариантов

Вариант	$q, \text{м}^3/\text{сут}$	$k, \text{мД}$	$h, \text{м}$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$(kh/\mu)_{\text{исс}}, \text{мД}\cdot\text{м/мПа}\cdot\text{с}$	$Xf, \text{м}$	$Длина ГС, h_w, \text{м}$	Количество трещин N	Расстояние между трещинами $L, \text{м}$			Участок $i = 0.36(4)$			Участок $i = 0.05(5)$		
									$t\Delta P'$ при $t = 1 \text{ ч}, \text{бар}$	$kh/\mu, \text{мД}\cdot\text{м/мПа}\cdot\text{с}$	$\delta, \%$	$t\Delta P', \text{бар}$	$kh/\mu, \text{мД}\cdot\text{м/мПа}\cdot\text{с}$	$\delta, \%$	$t\Delta P', \text{бар}$	$kh/\mu, \text{мД}\cdot\text{м/мПа}\cdot\text{с}$	$\delta, \%$
1	10	0,7	15	6	1,8	100	1000	7	167	0,615	1,2	-33	2,143	1,8	15	1,8	3
2	20	0,7	23	15	1,1	60	300	5	75	1,267	3,0	-48	7,818	1,0	182	1,0	-3
3	5	1	10	30	0,3	150	1000	10	111	1,520	0,2	57	1,754	0,3	342	20,4	3
4	11	1	20	1	20,0	70	400	3	200	0,224	31,5	57	0,836	20,4	240	1,308	2
5	17	0,3	10	1	3,0	100	800	8	114	0,349	8,2	172	1,308	3,0	125	4,050	1
6	8	0,4	5	3	0,7	80	1200	9	150	0,520	1,7	152	4,050	0,7	1,1	1,1	1
7	26	2	30	25	2,4	130	300	4	100	0,477	10,8	352	3,485	2,3	1,1	1,1	1
8	6	0,8	23	12	1,5	60	700	7	117	0,543	1,5	-4	1,712	1,6	1,712	2,687	3
9	14	0,8	14	3	3,7	80	200	3	100	0,672	10,2	172	3,5	-5	1,1	1,1	7
10	18	0,2	22	14	0,3	130	500	8	71	0,575	1,9	501	5,959	0,3	1,1	1,1	5
11	16	1,3	18	7	3,3	120	1000	10	111	0,151	11,3	239	0,702	3,4	1,1	1,1	3
12	27	1,7	24	5	8,2	120	550	4	183	0,324	23,1	183	2,056	8,2	0	0	0
13	8	0,9	26	9	2,6	150	200	3	100	0,202	10,8	315	1,153	2,5	1,1	1,1	3
14	13	0,7	19	13	1,0	120	900	9	113	0,266	3,7	261	2,085	1,1	1,1	1,1	4
15	21	1,7	17	9	3,2	70	1100	10	122	0,358	7,4	130	1,784	3,3	1,1	1,1	3
16	19	2	10	18	1,1	80	500	5	125	1,297	2,9	159	5,856	1,1	1,1	1,1	1
17	17	0,7	16	4	2,8	120	400	4	133	0,489	8,5	203	2,774	2,8	1,1	1,1	1
18	15	1,1	19	11	1,9	60	800	9	100	0,392	4,8	155	2,303	2,0	1,1	1,1	3
19	13	1,7	23	6	6,5	130	400	5	100	0,128	25,6	292	0,485	6,7	3,7	3,7	12
20	24	1,3	35	23	2,0	100	1000	9	125	0,285	6,7	237	2,612	2,1	5	5	5
21	70	2	21	8	5,3	70	700	4	233	2,025	9,5	82	16,399	5,8	10	10	1
22	15	1	6	16	0,4	97	800	7	133	1,365	1,1	205	12,211	0,4	5	5	3
23	15	0,5	18	25	0,4	108	700	8	100	0,605	1,6	345	7,034	0,4	12	12	12
24	55	1,3	10	7	1,9	119	500	7	83	1,290	7,2	289	4,566	2,0	6	6	6
25	10	1,2	12	10	1,4	98	700	7	117	0,304	4,5	215	1,891	1,5	2	2	2
26	29	0,3	18	11	0,5	75	500	9	63	1,197	2,1	327	8,797	0,5	1	1	1
27	45	1,5	34	8	6,4	140	500	3	250	0,649	17,5	174	6,609	6,6	4	4	4
28	53	0,7	26	11	1,7	132	700	10	78	0,541	7,8	372	2,982	1,7	3	3	8
29	15	1,7	6	21	0,5	130	900	9	113	0,668	1,9	293	4,775	0,5	1	1	1
30	9	0,8	24	15	1,3	141	600	5	150	0,209	5,0	289	2,270	1,4	7	7	7
31	12	0,6	14	24	0,4	87	500	9	63	0,617	1,5	342	4,409	0,4	1	1	1
32	32	1,5	16	23	1,0	137	1200	8	171	0,584	4,1	292	7,217	1,1	8	8	8
33	67	1	25	8	3,1	98	500	5	125	1,399	9,1	192	8,855	3,1	1	1	1
34	12	1,6	8	27	0,5	120	900	6	180	0,752	1,6	234	9,332	0,5	10	10	10
35	60	1,1	24	1	26,4	145	1200	6	240	0,226	63,3	140	0,988	27,3	3	3	3
36	37	0,8	33	26	1,0	69	1000	9	125	0,926	2,9	186	10,706	1,1	12	12	12
37	18	0,7	11	22	0,4	91	500	5	125	1,959	1,1	214	21,820	0,4	5	5	5
38	54	1,9	19	28	1,3	132	1100	7	183	1,070	4,3	235	12,250	1,4	10	10	10
39	14	1,7	26	23	1,9	145	800	7	133	0,194	6,9	260	1,514	2,0	3	3	3
40	8	1,5	15	4	5,6	148	1000	6	200	0,081	17,0	201	0,514	5,7	1	1	1

$$\frac{kh}{\mu} = \frac{0,769qB}{(t\Delta P')2\pi N} \left(\frac{kt}{m\mu c_t} \frac{1}{4Xf L/2} \right)^{0,36}. \quad (4)$$

Как видно из столбца 13, приемлемая погрешность оценки гидропроводности по формуле (4) (4 %) наблюдается только для варианта 8. В целом по вариантам среднее значение погрешности по модулю составляет $\delta = 218 \%$, что еще раз подтверждает нерелевантность оценки параметров пласта по участку с наклоном $i = 0,36$.

Эмпирическая зависимость для оценки гидропроводности по «полке» горизонтального участка эллиптического режима отыскивалась с учетом следующих соображений. Для классического радиального режима вклад осесимметричной геометрии течения в зависимость между дебитом и гидропроводностью определяется граничным условием на стенке скважины, вытекающим из закона Дарси:

$$q = \frac{kh}{\mu B} 2\pi r \left| \frac{\partial P}{\partial r} \right| \text{ при } r = r_c \rightarrow 0,$$

где $h2\pi r$ соответствует площади стенки скважины ($2\pi r$ – ее периметру), через которую осуществляется приток; $\left| \frac{\partial P}{\partial r} \right|$ – градиенту давления.

Скважина приближенно считается точечным источником с радиусом $r_c \rightarrow 0$, что приводит к присутствию в итоговом решении только множителя 2π в качестве комплексного вклада периметра стенки скважины и расстояния, влияющего на действующий градиент давления.

В случае эллиптического притока к трещине бесконечной проводимости в роли источника выступает поверхность трещины с ненулевым периметром $4Xf$ (площадью $4Xfh$), а градиент давления должен иметь связь с половиной расстояния между трещинами $L/2$. Включив обе указанные величины в соответствующие части формулы для положения «полки» производной и подбирая недостающий множитель, удалось выявить следующую эмпирическую зависимость:

$$\frac{kh}{\mu} = \frac{qBL/2\sqrt{2}}{(t\Delta P')4\pi N4Xf}, \quad (5)$$

или

$$P_D = \frac{4\pi(t\Delta P')kh4XfN}{q\mu BL/2\sqrt{2}} = 1. \quad (6)$$

Результаты оценки гидропроводности по «полке» горизонтального участка эллиптического режима с использованием формулы (5) представлены в столбце 15 табл.7. В столбце 16 приведены соответствующие значения погрешностей. Ошибка в оценке значения гидропроводности не превышает 12 % и по большинству вариантов находится в пределах 5-6 %, составляя в среднем 4,05 %.

Обозначив левую часть формулы (6) как P_D , можно дополнительно оценить точность полученной эмпирической зависимости, сравнив ее значение с 1 для всех рассмотренных вариантов. По результатам оценки среднее значение P_D по вариантам отличается от 1, но характеризуется близкой величиной – 0,969. При этом ни в одном из вариантов погрешность не превышает критичный с точки зрения устоявшейся практики ГДИ порог в 15 %.

Таким образом, несмотря на то, что эмпирическая зависимость (5) на рассмотренной выборке вариантов дает небольшое смещение оценок, полученные результаты указывают на ее практическую применимость, в отличие от оценок по участку с наклоном $i = 0,36$. Отметим, что исходя из характера распределений давления на рис.5 и 6, зависимость (5) может иметь обобщение и на случай трещин конечной проводимости. При этом потребуется замена величины Xf на эквивалентную протяженность области внутри трещин, охваченной перераспределением давления к моменту развития эллиптического режима.



Несмотря на полученные оптимистичные результаты, область применимости эмпирической формулы (5) требует дальнейшего исследования. Для достаточно больших расстояний между трещинами «полка» эллиптического режима на КВД начинает совпадать с появляющейся «полкой» раннерадиального режима на КСД. Следовательно, формула (5) должна переходить в классическую формулу оценки гидропроводности для радиального режима с поправкой на число трещин.

В частности, расстояние между трещинами по вариантам в табл.7 находится в диапазоне 63-250 м при среднем значении 132 м. Представляет интерес проверка вариантов, находящихся вне этого диапазона. Для этого вернемся к ранее рассмотренным четырем вариантам длины горизонтального ствола hw при $N = 3 - 25, 100, 400$ и 1000 м. Значения P_D для них соответственно составляют 0,994, 1,023, 0,865 и 0,493. Как видно, для вариантов $hw = 25$ м и $hw = 100$ м, значение L для которых (12,5 и 50 м) ниже минимальной величины из указанного выше диапазона, величина P_D даже ближе к единице, чем в большинстве ранее рассмотренных вариантов. Для $hw = 400$ м ($L = 200$ м) отклонение P_D от единицы существенно выше, но также укладывается в 15 %-ный коридор. Значительное (более 50 %) отклонение наблюдается только для варианта $hw = 1000$ м ($L = 500$ м) с явно проявляющимся раннерадиальным течением на КСД. Подтверждается вывод, что зависимость (5) для трещин бесконечной проводимости перестает работать при значительном увеличении расстояния между трещинами (по отношению к их полудлине X_f).

Возможности использования эллиптического режима на практике. С учетом того, что для возникновения эллиптического режима требуется кратковременная отработка, наиболее очевидной возможностью его получения на практике является исследование новых скважин, запускающихся в эксплуатацию непосредственно после бурения. Такое исследование предполагает кратковременную отработку скважины в процессе освоения, после которой должна последовать остановка скважины на КВД. При этом необходимая длительность периодов отработки и остановки должна оцениваться с помощью расчета синтетических кривых (дизайна) исследования, основывающихся на конструкции скважин (количество трещин и расстояние между ними) и прогнозируемых параметрах системы пласт – скважина. Расчет дизайна включает анализ чувствительности с учетом неопределенности исходных данных. По завершении записи КВД производится повторный запуск скважины с целью доосвоения, проведения исследований для оценки продуктивности (индикаторной диаграммы) или непосредственно эксплуатации в нефтегазосборный коллектор.

Другой вариант практического использования – эксплуатирующиеся скважины после их длительного простоя вследствие различных технологических причин. В таком случае также должен составляться дизайн исследования, по которому оценивается как сама возможность получения эллиптического режима (достаточность времени остановки), так и необходимая длительность отработки и последующего закрытия на КВД.

Заключение

Достоверная оценка параметров системы пласт – скважина при интерпретации ГДИ ГС с МГРП в низкопроницаемых коллекторах связана со значительными трудностями из-за практически недостижимого времени выхода на позднерадиальный режим и, как следствие, высокой неопределенности в оценке коэффициента гидропроводности пласта. Альтернативным решением является оценка гидропроводности по данным раннерадиального режима. Однако соответствующий горизонтальный участок проявляется на билогарифмическом графике производной давления только при достаточно больших расстояниях между трещинами по сравнению с их полудлиной.

Представленные и проанализированные в настоящей статье аналитические и численные расчеты значительного числа синтетических вариантов показывают, что при достаточно коротком времени отработки скважины перед остановкой возможно проявление на КВД иного вида радиально подобного режима. Он также характеризуется формированием горизонтальной «полки» производной с возможным последующим «провалом» и переходом к режиму псевдоограниченного

течения в области между трещинами с единичным наклоном графика производной. Выявленный радиально подобный режим характеризуется эллиптической формой зон дренирования в области между трещинами и прекращается при их смыкании после возникновения сильной межтрещинной интерференции. Вертикальное положение «полки» производной устойчиво по отношению к времени отработки и общей сжимаемости системы и связано с гидропроводностью пласта и параметрами трещин (число трещин, их полудлина, проводимость, расстояние между ними).

Применение к обнаруженному эллиптическому режиму известного эмпирического метода D.Tiab на основе участка графика производной с наклоном 0,36 (бирадиальный режим) приводит к кратным ошибкам в оценке гидропроводности и не имеет перспектив с практической точки зрения. С учетом наблюдаемой геометрии формируемого эллиптического течения предложена эмпирическая формула для оценки гидропроводности по «полке» производной в случае трещин бесконечной проводимости. Она показала достаточную точность для практического применения (ошибка не более 12 %, в среднем около 4 %) при относительно малых расстояниях между трещинами. По мере их увеличения точность оценки снижается.

Выполненные исследования расширяют возможности проведения информативных ГДИ ГС с МГРП в низкопроницаемых коллекторах с достоверной оценкой параметров системы пласт – скважина за счет комбинации короткой отработки, например после запуска скважины с последующей остановкой на КВД. Определение эффективного дизайна таких исследований в зависимости от особенностей пласта и конструкции скважины является предметом дальнейших исследований.

Необходимо изучение области применимости предложенной эмпирической формулы и/или ее уточнение для корректной оценки гидропроводности по мере перехода от обнаруженному эллиптического к известному раннерадиальному режиму при больших расстояниях между трещинами. Также представляет практический интерес ее обобщение на случай трещин конечной проводимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аржиловский А.В., Грищенко А.С., Смирнов Д.С. и др. Опыт применения горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта в условиях низкопроницаемых отложений тюменской свиты месторождений ООО «РН-Уватнефтегаз» // Нефтяное хозяйство. 2021. № 2. С. 74-76. [DOI: 10.24887/0028-2448-2021-2-74-76](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-2-74-76)
2. Walker L. Technology Focus: Unconventional and Tight Reservoirs (July 2024) // Journal of Petroleum Technology. 2024. Vol. 76. Iss. 7. P. 88-89. [DOI: 10.2118/0724-0088-JPT](https://doi.org/10.2118/0724-0088-JPT)
3. Manuaba I.B.G.H., Aljishi M., Van Steene M., Dolan J. Logging-While-Drilling Laterolog vs. Electromagnetic Propagation Measurements: Which Is Telling the True Resistivity? // SPE Journal. 2024. Vol. 29. Iss. 8. P. 4000-4013. [DOI: 10.2118/219772-PA](https://doi.org/10.2118/219772-PA)
4. Carpenter C. Holistic Approach Uses Electromagnetic Tools, LWD Data To Improve Reservoir Understanding // Journal of Petroleum Technology. 2024. Vol. 76. Iss. 1. P. 95-97. [DOI: 10.2118/0124-0095-JPT](https://doi.org/10.2118/0124-0095-JPT)
5. Белова А.А., Овчинников К.Н., Буянов А.В. и др. Долговременный мониторинг профиля притока газовой горизонтальной скважины после проведения МГРП посредством маркерных полимерных технологий // Газовая промышленность. 2020. № 9 (806). С. 86-94.
6. Асмандияров Р.Н., Ипатов А.И., Язиков А.В. и др. Опыт «Газпром нефти» в тестировании коммерческих систем маркерного мониторинга работы нефтяных скважин и оценке их надежности // Нефтяное хозяйство. 2023. № 12. С. 53-57. [DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-53-57](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-12-53-57)
7. Zhenzhen Wang, Chen Li, King M.J. Applications of Asymptotic Solutions of the Diffusivity Equation to Infinite Acting Pressure Transient Analysis // SPE Journal. 2024. Vol. 29. Iss. 8. P. 4069-4093. [DOI: 10.2118/180149-PA](https://doi.org/10.2118/180149-PA)
8. Кременецкий М.И., Ипатов А.И. Применение промыслового-геофизического контроля для оптимизации разработки месторождений нефти и газа. В 2 т. Т. 1. Основы гидродинамико-геофизического контроля разработки и мониторинга добычи. М.; Ижевск: ИКИ, 2020. 660 с.
9. Ипатов А.И., Кременецкий М.И. Проблемы промыслового-геофизического контроля в условиях «новой экономической политики» // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. Вып. 2 (37). С. 87-99. [DOI: 10.29222/1png.2078-5712.2022-37.art6](https://doi.org/10.29222/1png.2078-5712.2022-37.art6)
10. Гришина Е.И., Кременецкий М.И., Буянов А.В. Прогноз выработки неоднородного пласта в горизонтальных скважинах с многостадийным гидроразрывом пласта по результатам комплексных геофизических и гидродинамических исследований // Нефтепромысловое дело. 2020. № 5 (617). С. 38-43. [DOI: 10.30713/0207-2351-2020-5\(617\)-38-43](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2020-5(617)-38-43)
11. Ипатов А.И., Кременецкий М.И., Гуляев Д.Н. и др. Гидродинамический и геофизический мониторинг разработки сложнопостроенных месторождений углеводородов // Нефтяное хозяйство. 2015. № 9. С. 68-72.
12. Grishina E. Using Well Testing and Production Logging Methods to Estimate Individual Frature's Parametres and Performance in a Fractured Horizontal // SPE Russian Petroleum Technology Conference, 15-17 October 2018, Moscow, Russia. OnePetro, 2018. № SPE-191563-18RPTC-MS. [DOI: 10.2118/191563-18RPTC-MS](https://doi.org/10.2118/191563-18RPTC-MS)



13. Kremenetskiy M., Kokurina V., Morozovskiy N., Grishina E. PI Evaluation by Well Tests in Case of Low Permeability Formations Exposed by Complex Geometry Fracs // SPE Russian Petroleum Technology Conference, 16-18 October 2017, Moscow, Russia. OnePetro, 2017. № SPE-187766-MS. [DOI: 10.2118/187766-MS](https://doi.org/10.2118/187766-MS)
14. Коваленко И.В. Инвариант связи фильтрационных и емкостных параметров на неустановившемся режиме фильтрации к скважинам с многостадийным гидроразрывом пласта как инструмент интерпретации данных гидродинамических исследований // Нефтепромысловое дело. 2022. № 8 (644). С. 13-20. [DOI: 10.33285/0207-2351-2022-8\(644\)-13-20](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2022-8(644)-13-20)
15. Коваленко И.В. Прогнозирование продуктивности горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта: Автореф. дис. ... д-р техн. наук. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. 38 с.
16. Никонорова А.Н., Ворон К.А., Кременецкий М.И. и др. Оценка динамики добычных возможностей нефтегазовых горизонтальных скважин с многостадийным ГРП по результатам гидродинамических исследований на основе диагностики ранних режимов течения // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 6 (107). С. 50-56. [DOI: 10.24412/2076-6785-2024-6-50-56](https://doi.org/10.24412/2076-6785-2024-6-50-56)
17. Туленков С.В., Туленкова С.В., Мамонов Д.М. и др. Апробация деконволюции при интерпретации данных гидродинамических исследований скважин с гидравлическим разрывом газонасыщенных низкопроницаемых ачимовских отложений // Научный журнал Российского газового общества. 2024. № 3 (45). С. 102-109.
18. Асалхузина Г.Ф., Даuletbaev А.Я., Абдуллин Р.И. и др. Гидродинамические методы исследования скважин в рядной системе разработки на месторождении с низкопроницаемым коллектором // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19. № 3. С. 49-58. [DOI: 10.17122/ngdelo-2021-3-49-58](https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-3-49-58)
19. Martyushev D.A., Yongfei Yang, Kazemzadeh Y. et al. Understanding the Mechanism of Hydraulic Fracturing in Naturally Fractured Carbonate Reservoirs: Microseismic Monitoring and Well Testing // Arabian Journal for Science and Engineering. 2024. Vol. 49. Iss. 6. P. 8573-8586. [DOI: 10.1007/s13369-023-08513-1](https://doi.org/10.1007/s13369-023-08513-1)
20. Галкин В.И., Мартошев Д.А., Пономарева И.Н., Черных И.А. Особенности формирования призабойных зон продуктивных пластов на месторождениях с высокой газонасыщенностью пластовой нефти // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 386-392. [DOI: 10.31897/PMI.2021.3.7](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.7)
21. Сальникова О.Л., Черных И.А., Мартошев Д.А., Пономарева И.Н. Особенности определения фильтрационных параметров сложнопостроенных карбонатных коллекторов при их эксплуатации горизонтальными скважинами // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 5. С. 138-147. [DOI: 10.18799/24131830/2023/5/3970](https://doi.org/10.18799/24131830/2023/5/3970)
22. Гришина Е.И. Геофизический и гидродинамический контроль эксплуатации неоднородных коллекторов на основе инвариантных параметров в скважинах с высокотехнологичным заканчиванием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2021. 24 с.
23. Кременецкий М.И., Ипатов А.И. Применение промыслового-геофизического контроля для оптимизации разработки месторождений нефти и газа. В 2 т. Т. 2. Роль гидродинамико-геофизического мониторинга в управлении разработкой. М.; Ижевск: ИКИ, 2020. 756 с.
24. Houzé O., Viturat D., Fjaere O.S. et al. Dynamic Data Analysis, v5.42. Kappa, 1988-2021. 776 p.
25. Wentao Zhou, Raj Banerjee, Poe B. et al. Semianalytical Production Simulation of Complex Hydraulic-Fracture Networks // SPE Journal. 2014. Vol. 19. Iss. 1. P. 6-18. [DOI: 10.2118/157367-PA](https://doi.org/10.2118/157367-PA)
26. Transient Well Testing / Ed. by M.M. Kamal. Society of Petroleum Engineers, 2009. 860 p.
27. Horne R.N. Modern Well Test Analysis: A Computer-Aided Approach. Petroway, 1995. 257 p.
28. Hossain M.E., Tamim M., Rahman N.M.A. Effects of Criterion Values on Estimation of the Radius of Drainage and Stabilization Time // Journal of Canadian Petroleum Technology. 2007. Vol. 46. Iss. 3. P. 24-30. [DOI: 10.2118/07-03-01](https://doi.org/10.2118/07-03-01)
29. Ramakrishnan T.S., Prange M.D., Kuchuk F.J. Radius of Investigation in Pressure Transient Testing // Transport in Porous Media. 2020. Vol. 131. Iss. 3. P. 783-804. [DOI: 10.1007/s11242-019-01367-y](https://doi.org/10.1007/s11242-019-01367-y)
30. Мажсар В.А., Ридель А.А., Колесников М.В. и др. Опыт гидродинамических исследований в скважинах со сложной конструкцией // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. Вып. 2 (37). С. 127-138. [DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art9](https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art9)
31. Сергеев В.Л., Донг Ван Хоанг. Адаптивная интерпретация гидродинамических исследований горизонтальных скважин с идентификацией псевдорадиального потока // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 10. С. 67-73.
32. Kuchuk F., Bingham W.E. Transient Flow in Elliptical Systems // Society of Petroleum Engineers Journal. 1979. Vol. 19. Iss. 6. P. 401-410. [DOI: 10.2118/7488-PA](https://doi.org/10.2118/7488-PA)
33. Escobar F.-H., Montealegre M.M., Cantillo J.-H. Conventional analysis for characterization of bi-radial (elliptical) flow in infinite-conductivity vertical fractured wells // CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro. 2006. Vol. 3. № 2. P. 141-147.
34. Amini S., Ilk D., Blasingame T.A. Evaluation of the Elliptical Flow Period for Hydraulically-Fractured Wells in Tight Gas Sands – Theoretical Aspects and Practical Considerations // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 29-31 January 2007, College Station, TX, USA. OnePetro, 2007. № SPE-106308-MS. [DOI: 10.2118/106308-MS](https://doi.org/10.2118/106308-MS)
35. Badazhkov D., Ovsyannikov D., Kovalenko A. Analysis of Production Data with Elliptical Flow Regime in Tight Gas Reservoirs // SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, 28-30 October 2008, Moscow, Russia. OnePetro, 2008. № SPE-117023-MS. [DOI: 10.2118/117023-MS](https://doi.org/10.2118/117023-MS)
36. Weiyao Zhu, Yunfeng Liu, Zhongxing Li et al. Study on Pressure Propagation in Tight Oil Reservoirs with Stimulated Reservoir Volume Development // ACS Omega. 2021. Vol. 6. Iss. 4. P. 2589-2600. [DOI: 10.1021/acsomega.0c04661](https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04661)
37. Apte S.S., Lee W.J. Elliptical Flow Regimes in Horizontal Wells with Multiple Hydraulic Fractures // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, 24-26 January 2017, The Woodlands, TX, USA. OnePetro, 2017. № SPE-184856-MS. [DOI: 10.2118/184856-MS](https://doi.org/10.2118/184856-MS)
38. Escobar F.H., Ghisays-Ruiz A., Bonilla L.F. New model for elliptical flow regime in hydraulically-fractured vertical wells in homogeneous and naturally-fractured systems // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. Vol. 9. № 9. P. 1629-1636.



39. *Zhiming Chen, Xinwei Liao, Wei Yu, Sepehrnoori K.* Pressure-Transient Behaviors of Wells in Fractured Reservoirs With Natural- and Hydraulic-Fracture Networks // SPE Journal. 2019. Vol. 24. Iss. 1. P. 375-394. [DOI: 10.2118/194013-PA](https://doi.org/10.2118/194013-PA)
40. *Tiab D.* Analysis of Pressure and Pressure Derivative without Type-Curve Matching – III. Vertically Fractured Wells in Closed Systems // SPE Western Regional Meeting, 26-28 May 1993, Anchorage, AK, USA. OnePetro, 1993. № SPE-26138-MS. [DOI: 10.2118/26138-MS](https://doi.org/10.2118/26138-MS)
41. *Malallah A., Nashawi I.S., Algharaib M.* A comprehensive analysis of transient rate and rate derivative data of an oil well intercepted by infinite-conductivity hydraulic fracture in closed systems // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2024. Vol. 14. Iss. 3. P. 805-822. [DOI: 10.1007/s13202-023-01732-0](https://doi.org/10.1007/s13202-023-01732-0)

Авторы: Тимур Алексеевич Абрамов, аспирант (Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия), abramova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5766-9565>, Илья Михайлович Индрупский, д-р техн. наук, главный научный сотрудник (Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-0038-6279>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Сорбция золота на модифицированном сапоните

В.А.Чантурия, В.Г.Миненко, А.Л.Самусев✉

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Чантурия В.А., Миненко В.Г., Самусев А.Л. Сорбция золота на модифицированном сапоните // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 49-57. [EDN UOUEJM](#)

Аннотация

Теоретически и экспериментально обоснован перспективный метод модификации сапонита (интеркаляция), обеспечивающий его высокую сорбционную емкость по отношению к золоту. Модификация сапонита, выделенного из оборотной воды хвостохранилища обогатительной фабрики, осуществляется путем перемешивания суспензии минерала и ацетона с поверхностью-активным веществом гексадецилtrimетиламмония бромид (СТАВ), четырехкратной промывкой этанолом и дистиллированной водой, сушкой. Механизм интеркаляции сапонита содержащего продукта заключается во внедрении в межслоевое пространство положительно заряженных катионов органических соединений путем катионного обмена или адсорбции, что приводит к расширению слоев минерала, резкому смещению дзета-потенциала в положительную сторону. Появление полос в ИК-спектральном интервале 1460-1490 и 2850-2920 cm^{-1} , относящихся к деформационным и валентным колебаниям группы CH_2 соответственно, подтверждает успешное внедрение молекул СТАВ в структуру минерала. В результате исследований максимальной сорбционной емкости модифицированного сапонита установлено, что при исходной концентрации золота 22,6 мг/л полное извлечение достигается уже через 7,5 мин. Максимальная статическая обменная емкость модифицированного сапонита была достигнута после контакта с третьей порцией свежего золотосодержащего раствора и составила 100,5 мг/г. Изотермы сорбции золота соответствуют модели Ленгмюра, основанной на том, что на поверхности модифицированного сапонита образуется мономолекулярный сорбционный слой, и все активные места обладают равной энергией и энタルпийей сорбции. При этом кинетические зависимости сорбции наилучшим образом описываются моделью псевдовторого порядка, предполагающей, что химическая реакция обмена лимитирует процесс сорбции. Установлено, что интеркаляция сапонита гексадецилtrimетиламмонием бромидом обеспечивает более эффективную сорбцию отрицательно заряженных комплексных ионов золота ($[\text{AuCl}_4]^-$). Рассчитанная равновесная статическая обменная емкость модифицированного сапонита составила 92-119 мг/г, экспериментально установленная – 102 мг/г.

Ключевые слова

органическая модификация; сапонит; золото; сорбция; статическая обменная емкость; кинетика; изотермы сорбции

Поступила: 27.03.2025

Принята: 02.07.2025

Онлайн: 15.10.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Успешное развитие и модернизация отечественной высокотехнологичной промышленности возможны только при достаточно полном обеспечении стратегическим минеральным сырьем (углеводородами, редкими и редкоземельными, благородными металлами и т.д.). Разработка экологически безопасных технологий для эффективного извлечения ценных элементов из сырья различного происхождения актуальна на всех стадиях переработки [1]. Так, например, извлечение золота из продуктивных растворов выщелачивания достигается следующими основными методами: цементация цинком, при которой комплекс золота восстанавливается до элементарного золота (Au) и впоследствии осаждается путем введения цинкового порошка; экстракция растворителем с использованием ионных жидкостей, которые способны извлекать комплекс золота из раствора в виде металлоорганического соединения; применение активированного угля или ионообменной смолы, обеспечивающих извлечение комплекса золота посредством сорбции [2-4]. Наиболее широкое использование для извлечения золота в промышленности получил активированный уголь, применяемый в процессах «уголь в выщелачивании», «уголь в пульпе» и «уголь в колонне» [5, 6]. Однако сорбция комплексов золота на активированном угле происходит относительно медленно из-за медленной диффузии



комплексов в микропоры и их способности к закупорке, что приводит к снижению сорбционной емкости (менее 20-30 мг/г) и эффективности разделения [7, 8]. Это обуславливает актуальность поиска альтернативных сорбентов.

Смектиты – группа слоистых силикатных минералов, относящихся к подклассу филлосиликатов (листовых силикатов) и обладающих высокой удельной поверхностью, способностью к набуханию и емкостью катионного обмена [9, 10]. Из-за широкой распространенности и уникальных свойств они используются в различных отраслях промышленности и медицины.

Характерной особенностью кристаллической решетки минералов группы смектитов (монтмориллонит, бейделлит, нонtronит, сапонит, гекторит) является возможность введения большого объема ионов, компенсирующих (нейтрализующих) отрицательный структурный заряд, что обеспечивает возможность направленного регулирования их обменных свойств [11, 12]. Несмотря на изменчивый вещественный состав и текстурно-структурные особенности натуральных глин различного геологического происхождения, отечественные и зарубежные ученые проводят широкий ряд исследований, направленных на модификацию сорбционных свойств смектитов [13-15].

На основе анализа научно-технической литературы по модификации глинистых минералов установлено, что для практической реализации направленного улучшения их сорбционной способности чаще всего применяются методы механической, термической и химической (органическими и неорганическими соединениями) обработки, а также их совмещение [16-18].

Интеркаляция (введение, включение) органических катионов-компенсаторов в межслоевое пространство смектитов может происходить путем экстра- и интермицелярного обмена и ионной адсорбции с образованием органоглин. При этом склонные к гидратации органические катионы-компенсаторы преобразуют исходно гидрофильную поверхность минерала (например, сапонита) в гидрофобную [19-21]. Возможность применения обширного круга органических соединений также позволяет регулировать прочностную и деформационную стабильность, оптические, сорбционные и катализитические свойства глинистых пород.

Из множества вариантов производства органоглин (в растворе, в расплаве, *in situ* полимеризация) на практике чаще всего используют более простую интеркаляцию в растворе, позволяющую эффективно и быстро внедрить молекулы полимеров в нанослои смектитов [22-24]. В качестве жидкой фазы применяются вода, растворы спиртов, кетонов, хлороформа и т.д., обеспечивающие интенсивную интеркаляцию большего объема органических катионов-компенсаторов [25].

В данной работе представлены результаты исследований сорбционных свойств по отношению к ионам золота природного сапонита – продукта переработки оборотных вод алмазодобывающего производства, модифицированного путем интеркаляции поверхности-активного органического соединения.

Методы

В качестве материала исследований использован сапонит алмазоносного месторождения Ломоносовское (Архангельская обл., РФ), модельные и продуктивные золотосодержащие растворы.

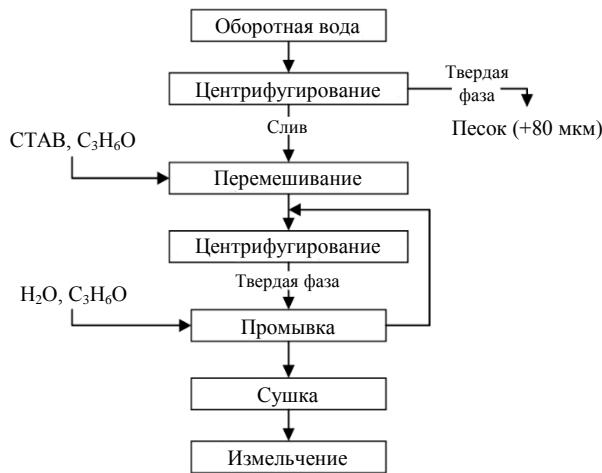


Рис.1. Схема получения сапонита, модифицированного СТАВ

В результате переработки алмазосодержащего сырья мелкодисперсный сапонит накапливается в оборотных водах обогатительной фабрики и складируется в хвостохранилище. Для извлечения сапонита из водной суспензии в работе использован метод центрифugирования (ULAB, KHP), позволяющий выделить исходный материал для изготовления сорбентов крупностью менее 80 мкм (тонкая фракция) (рис.1). Содержание сапонита в твердой фазе составляло более 73 % [26, 27]. Широко распространенное в различных областях науки и промышленности (биохимия, молекулярная биология, нанотехнологии, медицина и фармакология, косметика и бытовая химия) катионное поверхности-активное вещество (ПАВ)

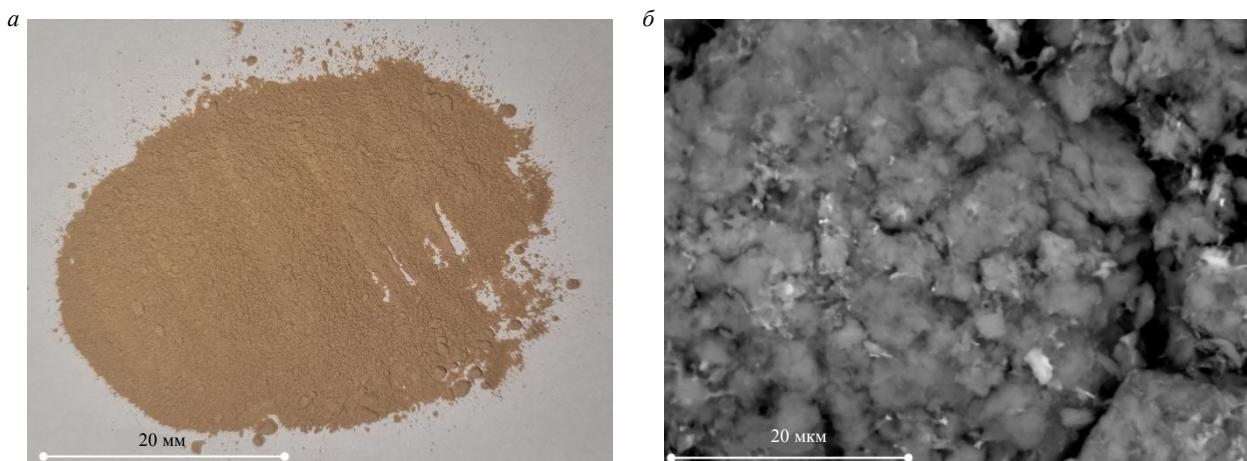


Рис.2. Внешний вид сапонита, модифицированного СТАВ: *а* – оптический микроскоп; *б* – электронный микроскоп

гексадецилtrimетиламмония бромид $C_{19}H_{42}BrN$ (СТАВ) использовался для модификации сорбционных свойств сапонита [28, 29]. В отличие от предыдущих исследований [26] синтез композита осуществлялся без предварительной сушки следующим образом: 300 мл осветленного слива (с содержанием твердого 50 г/л) перемешивали со 150 мл ацетона (50 % к объему сапонита) в течение одного часа. После диспергирования в суспензию равномерно в течение 1 сут вводили водный раствор ПАВ (4,2 % по массе). Перемешивание суспензии проводили на водяной бане (температура 50 °C) при постоянной скорости вращения импеллера верхнеприводной мешалкой 300 об/мин. После завершения интеркаляции ПАВ в структуру сапонита твердую фракцию отделяли на лабораторной центрифуге в течение 5 мин (2500 об/мин). Для удаления ионов Br^- сорбент последовательно промывали в четыре стадии: на первой стадии 200 мл 50 %-ного раствора этилового спирта; на последующих – 200 мл дистиллированной воды. Сушка готового сорбента до постоянной массы осуществлялась при температуре 50-60 °C в лабораторной муфельной печи (ЛОИП, РФ) (рис.2).

В качестве золотосодержащих растворов использованы модельные растворы $HAuCl_4$ с концентрацией золота 10-90 мг/л и продуктивный раствор выщелачивания сульфидного концентрата Васильковского месторождения с концентрацией золота ~ 4,5 мг/л [30]. По данным термодинамического моделирования (программное обеспечение Hydra, Medusa), при pH 2,2 исходного модельного раствора ионы золота находятся в виде комплекса $AuCl_4^-$ (рис.3).

Эксперименты по сорбции золота проводились в течение 7,5-60 мин при дозировке модифицированного сапонита 220-500 мг/л с использованием лабораторного шейкера US-6500 (Ulab, KHP) (рис.4). После завершения сорбции раствор отделяли на лабораторной центрифуге UC-4000 (Ulab, KHP) при ускорении 3500г. Концентрацию золота в растворах после сорбции определяли на УФ-спектрометре UV-1700 (Shimadzu, Япония), отградуированном на стандартных растворах при длине волны 313 нм ($R^2 = 0,9938$) [31, 32].

Равновесная статическая обменная емкость модифицированного сапонита и эффективность извлечения золота рассчитывались согласно следующим формулам [33]:

$$q_e = \frac{V}{m} (C_0 - C_e);$$

$$E = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \cdot 100 \%,$$

где C_0 , C_e – начальная и конечная концентрации золота в растворе соответственно, мг/л; V – объем раствора, мл; m – масса сорбента, г.

Структурно-текстурные особенности и вещественный состав поверхности насыщенного

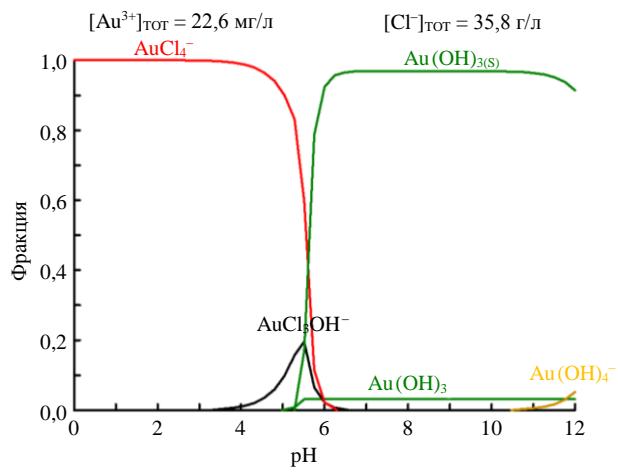


Рис.3. Распределение форм золота от pH

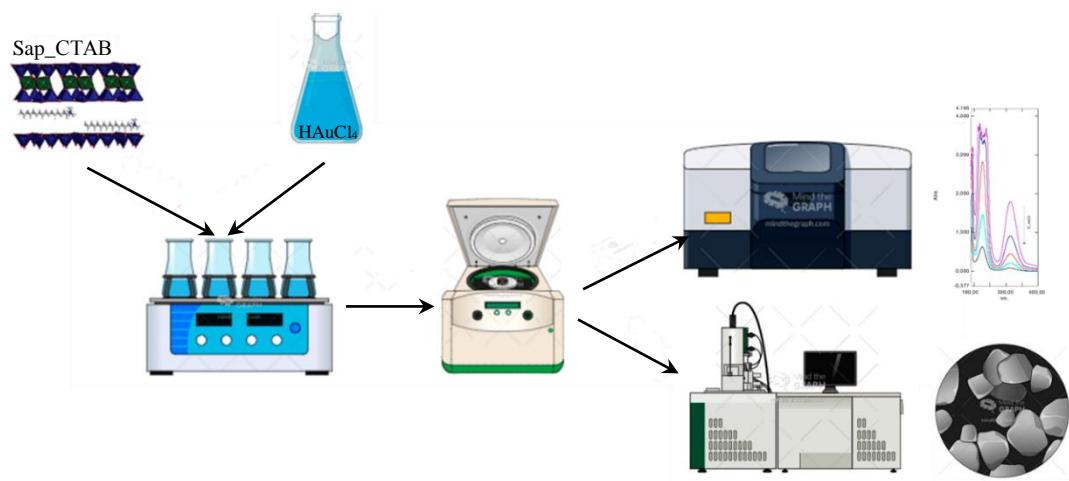


Рис.4. Схема экспериментов по сорбции золота

золотом модифицированного сапонита исследовались на растровом электронном микроскопе LEO (1420VP INCA 350, Zeiss). Межплоскостное расстояние сапонита определяли методом рентгеновской дифрактометрии (XRD 7000, Shimadzu). Дзета-потенциал исходного и модифицированного сапонитов исследовался в дистиллированной воде (рН 6,5) на навесках массой 0,5 г после предварительного ультразвукового диспергирования с использованием анализатора Nanosizer Zeta Pro (919S, Optronix). ИК-спектроскопия с преобразованием Фурье осуществлялась с использованием спектрометра IR-Affinity (Shimadzu). Результаты обрабатывались с применением методов математической статистики, программ OriginPro 2018, Microsoft Excel.

Обсуждение результатов

Замещение Si^{4+} на Al^{3+} и Fe^{3+} в тетраэдрическом листе и частичная замена Fe^{3+} и Al^{3+} на Fe^{2+} и Mg^{2+} в октаэдрическом листе обосновывает отрицательный дзета-потенциал ($-41,9$ мВ) исходного природного сапонита. В результате интеркаляции СТАВ алкиламмониевые катионы внедряются и абсорбируются на поверхности и в межплоскостном пространстве, нейтрализуя отрицательный заряд; дзета-потенциал сапонита резко смещается в положительную сторону до $+32,5$ мВ, что увеличивает электростатическое притяжение и способствует эффективной сорбции анионов [34]. По данным рентгенофазового анализа, после модификации межплоскостное расстояние сапонита увеличивается в 1,45 раза с $14,96$ до $21,74$ Å, что подтверждает успешное внедрение молекул СТАВ в структуру минерала [35, 36].

В ИК-спектрах модифицированного сапонита (рис.5, *а*) идентифицировано появление полос в спектральном интервале 1460 - 1490 и 2850 - 2920 cm^{-1} (рис.5, *б*), относящихся к деформационным и валентным колебаниям группы CH_2 соответственно [37, 38].

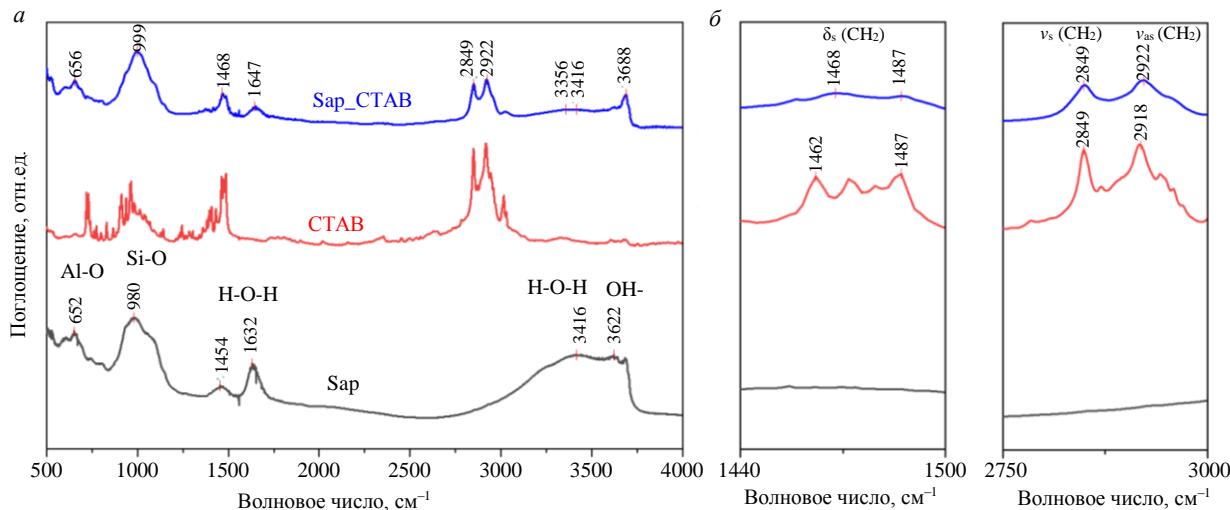


Рис.5. ИК-спектры исходного сапонита (нижний спектр), СТАВ (средний спектр) и сапонита после модификации (верхний спектр)



В табл.1 представлены результаты исследования максимальной сорбционной емкости модифицированного сапонита, единичная навеска сорбента последовательно контактировала с тремя порциями модельного раствора (каждая объемом 200 мл) с концентрацией золота 22,6 мг/л. Установлено, что при контакте с первой порцией раствора полное извлечение золота достигается уже через 7,5 мин. Максимальная статическая обменная емкость модифицированного сапонита была достигнута после контакта с третьей порцией свежего золотосодержащего раствора и составила 100,5 мг/г. В результате аналогичных исследований установлено, что СОЕ исходного (не модифицированного) сапонита составляет всего 18,8 мг/г при извлечении золота менее 58 %.

Таблица 1

Результаты сорбции золота на модифицированном сапоните
 $(C[\text{Sap_CTAB}] = 500 \text{ мг/л}; C[\text{Au}] = 22,6 \text{ мг/л}; T = 25^\circ\text{C})$

Параметр	Объем модельного раствора, мл							
	200		+200 (400)			+200 (600)		
t , мин	0,0	7,5	7,5	15,0	30,0	7,5	15,0	30,0
C , мг/л	22,6	0,0	4,5	2,5	0,0	18,2	17,3	17,3
ΣE , %	0,0	100,0	80,1	88,6	100,0	19,3	23,4	23,4
q_e , мг/г	0,0	45,2	36,2	3,9	4,7	8,7	1,8	0,0
Σq_e , мг/г	0,0	45,2	81,4	85,3	89,9	98,7	100,5	100,5

На рис.6 представлены результаты исследований сорбционных свойств модифицированного сапонита в зависимости от исходной концентрации золота и продолжительности сорбции. Установлено, что максимальная СОЕ модифицированного СТАВ сапонита по отношению к золоту составляет 91,8-102,4 мг/г.

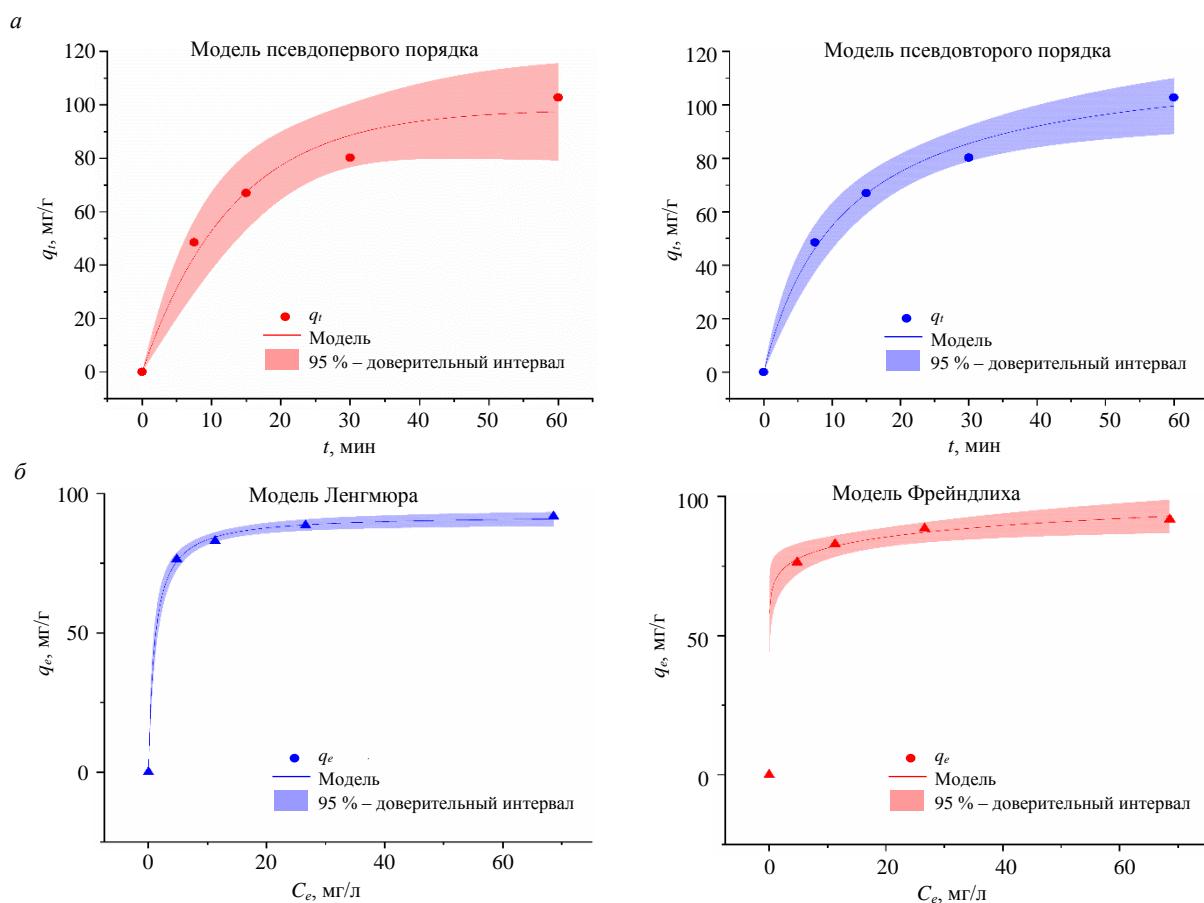


Рис.6. Модели кинетики сорбции ($C[\text{Au}] = 22,6 \text{ мг/л}; C[\text{Sap_CTAB}] = 220 \text{ мг/л}; T = 25^\circ\text{C}; t = 60 \text{ мин}$) (а) и изотермы сорбции ($C[\text{Sap}] = 83-226 \text{ мг/л}; T = 25^\circ\text{C}; t = 60 \text{ мин}$) (б)



При адаптировании экспериментальных данных к различным кинетическим моделям установлено, что сорбция Au на сапоните соответствует модели псевдовторого порядка ($R^2 = 0,99284$), предполагающей, что химическая реакция обмена лимитирует процесс сорбции [39, 40], а максимальная сорбционная емкость достигает $119,1 \pm 6,7$ мг/г (рис.6, *a*, табл.2).

Анализ изотерм сорбции выявил соответствие экспериментальных данных модели Ленгмюра с максимальной адсорбционной способностью $92,3 \pm 0,9$ мг/г (рис.6, *b*, табл.3) основанной на том, что на поверхности сапонита образуется мономолекулярный сорбционный слой и все активные места обладают равной энергией и энталпией сорбции [41-43].

Таблица 2

Параметры кинетики адсорбции Au на модифицированном сапоните

Модель псевдовторого порядка			Модель псевдовторого порядка		
k_1 , мин ⁻¹	q_e , мг/г	R^2	k_2 , Г·МГ ⁻¹ ·мин ⁻¹	q_e , мг/г	R^2
$7,7 \cdot 10^{-2} \pm 1,5 \cdot 10^{-2}$	$98,4 \pm 6,4$	0,97876	$7,1 \cdot 10^{-4} \pm 1,6 \cdot 10^{-4}$	$119,1 \pm 6,7$	0,99284

Примечание: k_1 , k_2 – константы скоростей.

Таблица 3

Параметры изотерм адсорбции Au на модифицированном сапоните

Модель Ленгмюра			Модель Фрейндлиха		
b , л/мг	q_{\max} , мг/г	R^2	n_F	K_F , (мг/г)(л/мг) ⁻ⁿ	R^2
$0,95 \pm 0,1$	$92,3 \pm 0,9$	0,9994	$0,068 \pm 0,009$	$69,7 \pm 2,1$	0,96265

Примечание: b – адсорбционный коэффициент; K_F – константа уравнения Фрейндлиха; n_F – безразмерный коэффициент.

Данные об эффективной сорбции золота модифицированным сапонитом подтверждены анализом морфологии и химического состава поверхности образцов после сорбции (рис.7). На поверхности сапонита после сорбции выявлены различные по крупности и содержанию золота новообразования: единичные крупные агрегаты (рис.7, *г*) с содержанием Au 8,5-10,5 % и отдельные микровключения (рис.7, *б*) с содержанием Au 3,5-8,5 %. При этом элементный анализ областей поверхности, не занятых новообразованными фазами, также выявил наличие небольшого количества золота (от 0,5 до 3,5 %) (рис.7, *а*).

Таким образом, с использованием современных физических и физико-химических методов анализа в работе подтверждена возможность эффективной модификации сорбционных свойств сапонита путем интеркаляции катионного ПАВ гексадецилtrimетиламмонием бромида. В результате проведенных исследований кинетики и изотерм сорбции, морфологии и элементного состава модифицированного сапонита установлена принципиальная возможность получения на его основе эффективных сорбентов золотосодержащих комплексов, обеспечивающая как высокий уровень извлечения золота, так и повышенные сорбционные свойства – более 100 мг/г.

В табл.4 представлены результаты предварительных исследований сорбционных свойств модифицированного СТАВ сапонита на реальных растворах гипохлоритного выщелачивания сульфидного концентраты обогатительной фабрики «Альтынтау Kokshetau» (бывший Васильковский горно-обогатительный комбинат) с концентрацией золота 4,5 мг/л (шесть порций реального раствора, каждая объемом 200 мл). Как и в случае с модельными растворами, максимальная сорбция ионов золота наблюдалась в первые 10-30 мин, при этом максимальная статическая обменная емкость достигала 75 мг/г.

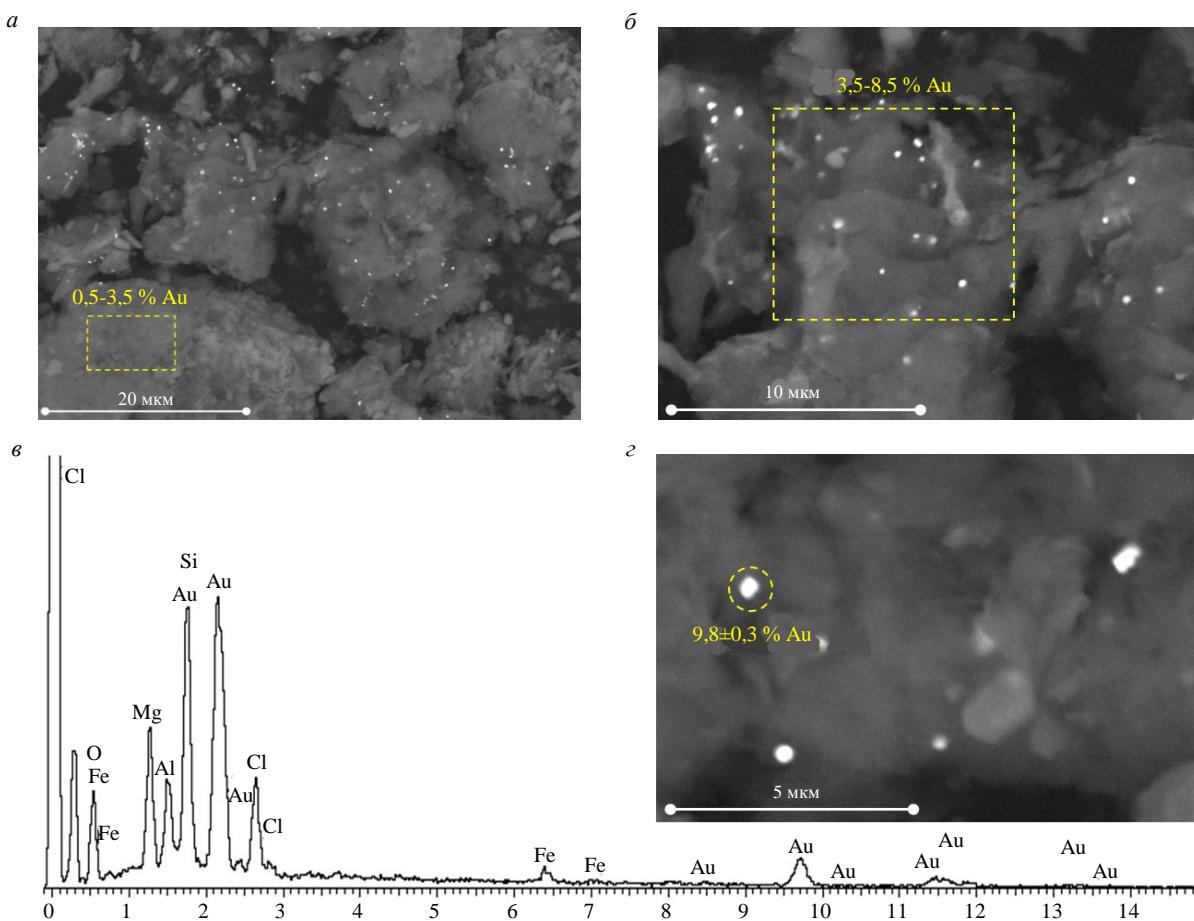


Рис.7. Микрофотографии (а, б, г) поверхности сапонита, модифицированного СТАВ, после сорбции и энергодисперсионный спектр (в) отдельного новообразования золота (выделен кружком)

Таблица 4

Результаты сорбции золота на модифицированном сапоните
($C[\text{Sap_СТАВ}] = 250 \text{ мг/л}$, $C[\text{Au}] = 4,5 \text{ мг/л}$, $T = 25^\circ\text{C}$)

Параметр	Объем реального раствора, мл					
	200		+200 (400)	+200 (600)	+200 (800)	+200 (1000)
	C_0	C_e	C_e	C_e	C_e	C_e
C , мг/л	4,5	0,0	0,0	0,1	0,3	3,425
ΣE , %	0,0	100,0	100,0	97,8	93,3	23,9
q_e , мг/г	0,0	18,0	18,0	17,6	16,8	4,3
Σq_e , мг/г	0,0	18,0	36,0	53,6	70,4	74,7

Заключение

Исследованы сорбционные свойства органомодифицированного СТАВ сапонита для извлечения золота из продуктивных растворов выщелачивания золотосодержащего концентрата. Установлено, что интеркаляция СТАВ до 15 % по массе приводит к расширению межплоскостного пространства сапонита с 14,9 до 21,7 Å, увеличению значения дзета-потенциала в область положительных значений с $-41,9$ до $+32,5$ мВ и появлению характерных для метиленовых (CH_2) групп пиков на ИК-спектрах, что обеспечивает более эффективную сорбцию отрицательно заряженных комплексных ионов золота AuCl_4^- . Экспериментально установлено, что изотермы сорбции золота на модифицированном сапоните с коэффициентом корреляции 0,9994 соответствуют модели Ленгмюра. При этом кинетические зависимости сорбции наилучшим образом описываются моделью псевдовторого порядка, предполагающей, что химическая реакция обмена лимитирует процесс сорбции. Рассчитанная равновесная статическая обменная емкость модифицированного сапонита по отношению к золоту ($[\text{AuCl}_4^-]$) составила 92-119 мг/г, экспериментально установленная – 102 мг/г.



Предварительными исследованиями на продуктивном растворе гипохлоритного выщелачивания сульфидного концентрата подтверждена высокая статическая обменная емкость (75 мг/г) модифицированного СТАВ сапонита, превышающая заявленную емкость распространенного активированного угля марки GoldSorb – до 20-30 мг/г.

Дальнейшая работа будет направлена на исследование процессов регенерации насыщенных сорбентов, влияния крупности (грануляции) сапонита и ионного состава продуктивных растворов на эффективность извлечения золота.

Авторы выражают благодарность коллегам – старшему научному сотруднику канд. техн. наук М.В.Рязанцевой, главному геологу канд. геол.-минерал. наук Е.В.Копорулиной, младшему научному сотруднику Г.А.Кожевникову (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН) за помощь при выполнении исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чантурия В.А., Николаев А.И., Александрова Т.Н. Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 402-415. [DOI: 10.31857/S0016777023050040](https://doi.org/10.31857/S0016777023050040)
2. Нандиянто А.Б.Д., Нурагха В.К., Юстия И. и др. Изотерма и кинетическая адсорбция частиц рисовой шелухи как модельного адсорбента для решения проблем устойчивой добычи золота в результате выщелачивания ртути // Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 104-120.
3. Воронанова Л.А., Кокоева Н.Б. Способ селективной экстракции ионов золота и серебра из солянокислых растворов трибутилфосфатом // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 823-827. [DOI: 10.18454/PMI.2016.6.823](https://doi.org/10.18454/PMI.2016.6.823)
4. Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Абурова В.А. «Невидимые» благородные металлы в углеродистых породах и продуктах обогащения: возможность выявления и укрупнения // Горные науки и технологии. 2024. Т. 9 (3). С. 231-242. [DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-229](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-229)
5. Heshami M., Taheri B. An experimental study on the adsorption behavior of gold glycinate complex on graphene oxide // Hydrometallurgy. 2024. Vol. 224. № 106229. [DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106229](https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106229)
6. Romero H., Suarez C., Salazar N. et al. Evaluation of gold adsorption on activated carbon from real cyanide and thiourea leachate solutions // Heliyon. 2024. Vol. 10. Iss. 11. № e31606. [DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31606](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31606)
7. Енифоров А.В., Козлов А.А., Немчинова Н.В., Селезнев А.Н. Угольно-сорбционное извлечение золота из сернокислых растворов атмосферного выщелачивания золотомедного флотоконцентрата, содержащих тиоцианат-ион // Цветные металлы. 2020. № 1. С. 38-44. [DOI: 10.17580/tsm.2020.01.06](https://doi.org/10.17580/tsm.2020.01.06)
8. Jinsong Xia, Marthi R., Twinney J., Ghahreman A. A review on adsorption mechanism of gold cyanide complex onto activation carbon // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2022. Vol. 111. P. 35-42. [DOI: 10.1016/j.jiec.2022.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.04.014)
9. Wypych F., Alves de Freitas R. Chapter 1 – Clay minerals: Classification, structure, and properties // Developments in Clay Science. 2022. Vol. 10. P. 3-35. [DOI: 10.1016/B978-0-323-91858-9.00004-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91858-9.00004-5)
10. Shaojian Xie, Lei Huang, Changqing Su et al. Application of clay minerals as adsorbents for removing heavy metals from the environment // Green and Smart Mining Engineering. 2024. Vol. 1. Iss. 3. P. 249-261. [DOI: 10.1016/j.gsme.2024.07.002](https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.07.002)
11. Pengsheng Wang, Xinkai Shen, Shusheng Qiu et al. Clay-Based Materials for Heavy Metals Adsorption: Mechanisms, Advancements, and Future Prospects in Environmental Remediation // Crystals. 2024. Vol. 14. Iss. 12. № 1046. [DOI: 10.3390/crust14121046](https://doi.org/10.3390/crust14121046)
12. Orucoglu E., Grangeon S., Gloter A. et al. Competitive Adsorption Processes at Clay Mineral Surfaces: A Coupled Experimental and Modeling Approach // ACS Earth and Space Chemistry. 2022. Vol. 6. Iss. 1. P. 144-159. [DOI: 10.1021/acsearthspacechem.1c00323](https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00323)
13. Chun Hui Zhou, Qian Zhou, Qi Qi Wu et al. Modification, hybridization and applications of saponite: An overview // Applied Clay Science. 2019. Vol. 168. P. 136-154. [DOI: 10.1016/j.clay.2018.11.002](https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.11.002)
14. Krupskaya V.V., Zakusin S.V., Tyupina E.A. et al. Experimental Study of Montmorillonite Structure and Transformation of Its Properties under Treatment with Inorganic Acid Solutions // Minerals. 2017. Vol. 7. Iss. 4. № 49. [DOI: 10.3390/min7040049](https://doi.org/10.3390/min7040049)
15. Xiaotong Yang, Yi Zhou, Jingjing Hu et al. Clay minerals and clay-based materials for heavy metals pollution control // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 954. № 176193. [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176193](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176193)
16. Najafi H., Farajfaed S., Zolgharnian S. et al. A comprehensive study on modified-pillared clays as an adsorbent in wastewater treatment processes // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 147. P. 8-36. [DOI: 10.1016/j.psep.2020.09.028](https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.028)
17. Kanglong Cheng, Qin You, Linxi Zou et al. High-temperature calcination modified red clay as an efficient adsorbent for phosphate removal from water // Environmental Research. 2025. Vol. 268. № 120704. [DOI: 10.1016/j.envres.2024.120704](https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120704)
18. Kabdrakhmanova S., Aryp K., Shaimardan E. et al. Acid modification of clays from the Kalzhat, Orta Tentek deposits and study their physical-chemical properties // Materials Today: Proceedings. 2023. 6 p. [DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.427](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.427)
19. Costanza-Robinson M.S., Payne E.M., Dellinger E. et al. Influence of water saturation on interlayer properties of HDTMA-, HDTMP-, and HDPy-modified montmorillonite organoclays // Applied Clay Science. 2024. Vol. 247. № 107188. [DOI: 10.1016/j.clay.2023.107188](https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107188)
20. Huawei Han, Rafiq M.K., Tuoyu Zhou et al. A critical review of clay-based composites with enhanced adsorption performance for metal and organic pollutants // Journal of Hazardous Materials. 2019. Vol. 369. P. 780-796. [DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.003](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.003)
21. Kotal M., Bhowmick A.K. Polymer nanocomposites from modified clays: Recent advances and challenges // Progress in Polymer Science. 2015. Vol. 51. P. 127-187. [DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2015.10.001](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.10.001)
22. Shanshan Mao, Manglai Gao. Functional organoclays for removal of heavy metal ions from water: A review // Journal of Molecular Liquids. 2021. Vol. 334. № 116143. [DOI: 10.1016/j.molliq.2021.116143](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116143)



23. *Perelomov L., Mandzhieva S., Minkina T. et al.* The Synthesis of Organoclays Based on Clay Minerals with Different Structural Expansion Capacities // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 7. № 707. [DOI: 10.3390/min11070707](https://doi.org/10.3390/min11070707)
24. *Ханхасаева С.Ц., Бадмаева С.В.* Получение нанопористого сорбента на основе бентонитовой глины и комплексов алюминия для применения в процессах водоочистки // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2024. Т. 60. № 4. С. 413-421. [DOI: 10.31857/S0044185624040092](https://doi.org/10.31857/S0044185624040092)
25. *Gorona J.M., Janošević-Ležaić A.M., Dimitrijević B.M. et al.* Determination of critical micelle concentration of cetyltrimethylammonium bromide: Different procedures for analysis of experimental data // Hemiska industrija. 2016. Vol. 70. Iss. 4. P. 485-492. [DOI: 10.2298/HEMIND150622055G](https://doi.org/10.2298/HEMIND150622055G)
26. *Чантурия В.А., Миненко В.Г.* Теоретическое и экспериментальное обоснование методов получения вторичных продуктов из сапонитсодержащих техногенных вод // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 6. С. 91-104. [DOI: 10.15372/FTPRPI20230609](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230609)
27. *Двойченкова Г.П., Миненко В.Г., Масанов А.Ю., Тимофеев А.С.* Обоснование криогенной технологии осветления сапонитсодержащей оборотной воды хвостохранилища обогатительной фабрики № 1 АО «Севералмаз» // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 2 (60). С. 692-709. [DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-692-709](https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-2-692-709)
28. *Wei Hua Yu, Ting Ting Zhu, Dong Shen Tong et al.* Preparation of Organo-Montmorillonites and the Relationship Between Microstructure and Swellability // Clays and Clay Minerals. 2017. Vol. 65. Iss. 6. P. 417-430. [DOI: 10.1346/CCMN.2017.064068](https://doi.org/10.1346/CCMN.2017.064068)
29. *Zhiping Shi, Pengxiang Li, Liyan Liu.* Interactions between CTAB and montmorillonite by atomic force microscopy and molecular dynamics simulation // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 657. Part B. № 130656. [DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.130656](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130656)
30. *Чантурия В.А., Самусев А.Л., Миненко В.Г.* Интенсификация химико-электрохимического выщелачивания золота из упорного минерального сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 5. С. 154-164. [DOI: 10.15372/FTPRPI20200518](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200518)
31. *Матвеева Т.Н., Гетман В.В., Каркешкина А.Ю.* Исследование адсорбционных и флотационных характеристик реагента дитиопирилметана для извлечения золота из упорных золотомышьяковых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 4. С. 157-163. [DOI: 10.15372/FTPRPI20200415](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200415)
32. *Wojnicki M., Luty-Blocho M., Socha R.P. et al.* The kinetic studies of gold(III) chloride complex adsorption mechanism from an aqueous and semi-aqueous system // Journal of Molecular Liquids. 2019. Vol. 278. P. 43-52. [DOI: 10.1016/j.molliq.2019.01.028](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.028)
33. *Чантурия В.А., Миненко В.Г., Самусев А.Л. и др.* Сорбция редкоземельных элементов на модифицированном сапоните // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2024. № 3. С. 145-154. [DOI: 10.15372/FTPRPI20240315](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240315)
34. *Jorge N.L., Garrafa M.V., Romero J.M. et al.* Adsorption of Ciprofloxacin on Clay Minerals in Argentinian Santa Rosa-Corrientes Soils // Molecules. 2024. Vol. 29. Iss. 8. № 1760. [DOI: 10.3390/molecules29081760](https://doi.org/10.3390/molecules29081760)
35. *Qian Li, Min Yi, Lin Shao et al.* CTAB modified metakaolin-based geopolymer microspheres for the selective adsorption and recovery of $\text{TeO}_4^-/\text{ReO}_4^-$ // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 350. № 127853. [DOI: 10.1016/j.seppur.2024.127853](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127853)
36. *Oliveira G.A., San Gil R.A.S., Gonzalez W.A. et al.* Synthesis and structural characterization of HPW-doped niobium pillared Brazilian clay // Microporous and Mesoporous Materials. 2024. Vol. 368. № 113030. [DOI: 10.1016/j.micromeso.2024.113030](https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.113030)
37. *Moslemizadeh A., Aghdam S.K.-Y., Shahbazi Kh. et al.* Assessment of swelling inhibitive effect of CTAB adsorption on montmorillonite in aqueous phase // Applied Clay Science. 2016. Vol. 127-128. P. 111-122. [DOI: 10.1016/j.clay.2016.04.014](https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.014)
38. *Yunyan Zhu, Yuming Cui, Yiming Peng et al.* Preparation of CTAB intercalated bentonite for ultrafast adsorption of anionic dyes and mechanism study // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 658. № 130705. [DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.130705](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130705)
39. *Jianlong Wang, Xuan Guo.* Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 390. № 122156. [DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122156](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156)
40. *El Abbadi S., El Moustansiri H., Douma M. et al.* Enhancing the performance of alumina-pillared clay for phenol removal from water solutions and polyphenol removal from olive mill wastewater: Characterization, kinetics, adsorption performance, and mechanism // Journal of Water Process Engineering. 2024. Vol. 63. № 105432. [DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105432](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105432)
41. *Jianlong Wang, Xuan Guo.* Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method // Chemosphere. 2020. Vol. 258. № 127279. [DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127279](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279)
42. *Maleki S., Abedi E., Hashemi S.M.B.* Insights into kinetic, isotherm, and thermodynamic of ultrasound mode- and amplitude-dependent carotenoid and chlorophyll degradation or/and adsorption // Ultrasonics Sonochemistry. 2024. Vol. 111. № 107130. [DOI: 10.1016/j.ultsonch.2024.107130](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107130)
43. *Allaoui I., El Mourabit M., Arfay B. et al.* Adsorption equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies on the removal of paracetamol from wastewater using natural and HDTMA-modified clay // Desalination and Water Treatment. 2024. Vol. 318. № 100345. [DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100345](https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100345)

Авторы: Валентин Алексеевич Чантурия, д-р техн. наук, академик РАН, главный научный сотрудник (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-4410-8182>, Владимир Геннадиевич Миненко, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-9117-4310>, Андрей Леонидович Самусев, канд. техн. наук, старший научный сотрудник (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия), Andrey63vzm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7324-0353>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

О возможности утилизации карбонатсодержащих отходов добычи полезных ископаемых путем получения фотокаталитических композиционных материалов

В.В.Строкова, Е.Н.Губарева✉, Ю.Н.Огурцова, С.В.Неровная

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия

Как цитировать эту статью: Строкова В.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н., Неровная С.В. О возможности утилизации карбонатсодержащих отходов добычи полезных ископаемых путем получения фотокаталитических композиционных материалов // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 58-70. [EDN ZXSJF](#)

Аннотация

Отходы недропользования составляют подавляющую по массе часть отходов, образующихся и накопленных на территории России. Увеличение объемов переработки полезных ископаемых горно-добычающей и горно-обогатительной отраслями ведет к обострению экологических проблем – возрастаает негативное влияние отвалов вскрышных масс, отвальных хвостов обогащения и переработки минерального сырья на окружающую среду. На примере трех видов пород рассмотрена возможность применения карбонатных отходов недропользования в качестве сырьевых компонентов при формировании фотокаталитических композиционных материалов (ФКМ) при производстве строительных материалов и изделий и одновременного решения экологических проблем территорий за счет масштабной утилизации техногенных отходов. Проведен комплекс физических (пористость, удельная поверхность, дисперсность, морфология поверхности) и химических (химический состав, кислотно-основные центры, дзета-потенциал, водородный показатель) исследований свойств карбонатных материалов различных генетических типов для определения возможности их применения как подложки при получении ФКМ. Фотокаталитический материал, получаемый осаждением золь-гель синтезированных соединений титана на минеральный носитель, предназначен для введения в состав цементных строительных композитов и придания им свойства самоочищения при эксплуатации. Проведено ранжирование минеральных порошков известняков Тюшевского (Т) и Пореченского (П) месторождений и мрамора Полоцкого месторождения согласно определенным требованиям – дисперсность, пористость, адсорбционная активность. Установление численных показателей по каждому виду сырья позволило определить степень пригодности минеральных порошков карбонатных пород для получения композиционных материалов, вводимых в состав строительных материалов. Проведено ранжирование минеральных порошков по увеличению потенциальной эффективности использования в составе ФКМ в следующей последовательности: известняк Т → известняк П → мрамор. ФКМ на основе карбонатных носителей проявляют высокие показатели деградации органического загрязнителя (более 90 %) и применимы как фотокаталитические агенты.

Ключевые слова

карбонатное сырье; известняк; мрамор; строительные материалы; фотокатализатор; композиционный материал

Финансирование

Исследование выполнено в рамках реализации Государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г.Шухова.

Поступила: 31.07.2024

Принята: 02.07.2025

Онлайн: 23.09.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Наличие минеральных ресурсов – важное конкурентное преимущество российской экономики, определяющее место и роль страны на международной арене. Наряду с высокими показателями добычи и переработки полезных ископаемых, горно-обогатительная отрасль является одним из основных источников крупнотоннажных отходов, по составу и свойствам близких к природному сырью. Отходы недропользования представлены вскрышными и вмещающими горными породами, шламами, хвостами обогащения полезных ископаемых и иными отходами геологического изучения, разведки, добычи и первичной переработки минерального сырья, содержащими или



не содержащими полезные ископаемые и компоненты. По данным Росстата за 2023 г.* на предприятиях по добыче полезных ископаемых было образовано 8666,3 млн т отходов, из них утилизировано около 40 % (3564,8 млн т). Основные пути снижения ущерба окружающей среде от выделения и накопления отходов горного производства – сокращение их объемов, обезвреживание и утилизация [1].

Необходимость утилизации продуктов недропользования путем вовлечения отходов в промышленное использование обусловлена высокой экологической нагрузкой на окружающую среду [2]. Решению проблем наиболее полного использования отходов и ресурсосбережения в значительной степени может способствовать расширение спектра технологий применения вторичных минеральных ресурсов при создании высокотехнологичных продуктов, имеющих высокую добавленную стоимость.

Породы карбонатного состава являются одними из наиболее распространенных и востребованных видов минерального сырья, применяемого при производстве широкого спектра продукции. При добыче и переработке карбонатных горных пород (известняка, мела, известняка-ракушечника, доломита, мрамора, известкового туфа, мергелей) доля образующихся отходов может составлять 30-40 % от общей массы перерабатываемого материала. В линейке сырья для строительных материалов среди относительно мономинеральных пород они занимают третье место, уступая глинам и кварцевым пескам. Среди модификаторов минерального происхождения на рынке добавочных цементов наиболее широко представлены известняк (22 %), доменный гранулированный шлак (58 %) и пущлановая добавка (15 %). Минеральные порошки, выступающие в качестве наполнителей в составе строительных изделий и конструкций, уплотняют структуру бетона, позволяя уменьшить расход цемента и снизить стоимость продукта [3, 4].

Для оценки возможности использования карбонатных отходов как потенциального минерального сырья при получении фотокаталитических композиционных материалов (ФКМ), предназначенных для производства самоочищающихся строительных материалов, были проведены исследования, где в качестве модельных систем рассмотрены мономинеральные породы различных генетических типов, представителями которых являются известняк и мрамор.

Высокий интерес к самоочищающимся материалам подтверждается ростом исследований создания фотокаталитических компонентов и их применения в строительной сфере [5, 6]. Изучаются синтез [7], модификация (допирование, сенсибилизация к видимому свету) [8-10] и использование в составе строительных материалов доступного и эффективного фотокатализатора – диоксида титана [11-13].

Фактором, ограничивающим применение диоксида титана в бетонных изделиях, является его инертность по отношению к компонентам твердеющей системы, что приводит к выветриванию незакрепленных частиц фотокатализатора с поверхности готового изделия и снижению эффективности самоочищения в процессе эксплуатации. Проблему закрепления фотокаталитически активного компонента в строительном материале предлагается решать путем использования композиционного материала типа «ядро – оболочка», в котором фотокатализатор предварительно осажден на носитель. При этом носитель должен активно взаимодействовать с основным веществом матрицы, иметь с ней химическое сродство, участвовать в процессах структурообразования, упрочняя цементобетонную матрицу материала.

Анализ зарубежных и отечественных исследований показал положительные результаты синтеза и внедрения в состав строительных изделий ФКМ, в которых в качестве носителей фотокатализаторов использовано кремнеземное [14-16] и алюмосиликатное сырье [17-19]. Меньше изучена возможность применения карбонатных материалов [20]. Как и для кремнеземного и алюмосиликатного состава, при использовании карбонатных носителей удается достичь активизации трансформации фотогенерированных пар электрон-дырка на поверхности фотокатализатора в результате взаимодействия между TiO_2 и $CaCO_3$, а также увеличения степени адсорбции загрязняющих веществ для их последующего разложения [4].

* Образование отходов производства и потребления по видам экономической деятельности по Российской Федерации. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Oxr_oxtd1-okved2_2023.xls (дата обращения 31.07.2024).

Карбонатные породы широко распространены в составе земной коры и встречаются в виде отходов горно-перерабатывающей промышленности [21-23], эффективность их использования в тонкодисперсном виде в составах бетонов нового поколения доказана [24-26]. Большое количество месторождений карбонатных пород позволяет расширить минерально-сырьевую базу для получения фотокаталитических композиционных материалов и, следовательно, номенклатуру строительных материалов и изделий, обладающих эффектом самоочищения. Использование отходов горно-обогатительной промышленности в композиционных материалах позволит расширить спектр технологий утилизации карбонатного сырья при получении высокотехнологичных продуктов. В связи с этим актуально исследование возможности осаждения фотокатализатора на карбонатные материалы.

Установлены требования к кремнеземным носителям фотокаталитического агента для применения в цементных системах: высокое содержание SiO_2 (более 70 %), дисперсность носителя в пределах 0,1-500 мкм с полимодальным распределением частиц, наличие мезопор размером 2-50 мкм, высокие показатели активности центров адсорбции Льюиса и Бренстеда на поверхности носителя [27].

В работе представлены результаты изучения комплекса физико-химических свойств карбонатных материалов различных генетических типов как модельных систем для ранжирования по эффективности применения в качестве носителя фотокаталитического агента в составе композиционного материала типа «ядро – оболочка» для вовлечения в технологию производства ФКМ карбонатного сырья как природного, так и техногенного происхождения.

Методы

Виды карбонатных материалов. В работе использованы порошкообразные тонкодисперсные карбонатные материалы различных генетических типов, используемые в составе бетонов в качестве минеральных добавок осадочного хемогенного происхождения – известняк Т (ООО «Стромис», Липецкая обл., Тюшевское месторождение), известняк П (ООО «Центр-Известняк», Тульская обл., Пореченское месторождение); метаморфического происхождения – мраморная пыль МП как отход измельчения и фракционирования природного мрамора (ООО «Риф-микромрамор», Челябинская обл., г. Магнитогорск, Погоцкое месторождение). Все виды карбонатов имеют белую окраску, что позволяет использовать их в составе смесей с белым цементом.

Карбонатные материалы исследовались в том состоянии, в котором были получены от поставщиков и используются при производстве строительных материалов. Таким образом, применение данных видов минеральных порошков позволяет минимизировать затраты на дополнительную подготовку (путем домола) носителя при получении ФКМ.

Золь-гель осаждение фотокаталитического агента на носитель. Для предварительной проверки ранжирования карбонатных пород по эффективности использования в качестве носителя фотокаталитического агента по технологии золь-гель были синтезированы фотокаталитические композиционные материалы. Составы золя и технологические параметры золь-гель синтеза были разработаны ранее [28]. Технология заключается в смешении титанового прекурсора в спиртовом растворителе в присутствии носителя, вследствие чего новообразования титановых соединений закрепляются на его поверхности, и последующей температурной обработке, которая способствует кристаллизации гидратов и оксигидратов титана в анатаз. В результате структурных переходов образуется композиционный материал «фотокатализатор – носитель», способный разлагать сложные органические загрязнения на простые при облучении ультрафиолетовым светом.

Химический и минеральный составы карбонатных материалов исследовались с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL 9900 WorkStation, рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA (Си-анод). При измерении химического состава погрешность определяемого количества оксидов, составляющих исследуемые материалы, находится в пределах $\pm 0,25$ мас.% для CaO и $\pm 0,1$ мас.% для остальных оксидов. С помощью рентгенофазового анализа определялось качественное содержание минералов в составе карбонатных сырьевых материалов, в связи с чем количественные погрешности измерения не учитывались.

Размер частиц определялся методом лазерной дифракции на лазерном анализаторе Analysette 22 NanoTec plus.



Удельная поверхность оценивалась методом воздухопроницаемости на приборе ПСХ-11М(СП), удельная активная поверхность и пористость наnanoуровне – методом низкотемпературной адсорбции/десорбции азота с помощью прибора BELSORP-MINI X.

Показатель pH водной суспензии карбонатных материалов определяли потенциометрическим методом с использованием цифрового pH-метра Orville ML-51. При определении pH водных суспензий порошковых материалов проводились три параллельных измерения, погрешность между полученными значениями не превышала 2-3 %.

Электрокинетический потенциал (ζ -потенциал) заряда поверхности частиц (в концентрации сырьевого материала 1 г/л) исследовался электрофоретическим методом с помощью лазерного анализатора Zetatrac.

Концентрация и распределение кислотно-основных центров на поверхности карбонатных материалов выявлялись с помощью спектрофотометрического метода оценки адсорбции индикаторов из водной среды с pK_a в диапазоне от -4,4 до 12,8 на спектрофотометре UNICO 2802S.

Микроструктурные особенности карбонатных материалов изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMU.

Фотокаталитическая активность порошковых материалов оценивалась по степени деградации органического загрязнителя [29] родамина Б (водный раствор с концентрацией $4 \cdot 10^{-4}$ моль/л) по методике UNI 11259 при интенсивности ультрафиолетового облучения $2,7 \text{ Вт/м}^2$ с помощью программы GIMP 2.10.8.

По разработанной золь-гель технологии были синтезированы фотокаталитические композиционные материалы, где в качестве носителя фотокатализатора в состав реакционной смеси вводились исследуемые карбонаты.

Фотокаталитическая способность материалов подтверждается, согласно стандарту UNI 11259:2016, при соблюдении условия обесцвечивания R_x родамина Б более 20 % после 4 ч ультрафиолетового облучения и более 50 % после 26 ч облучения от начального показателя цветовой координаты a цветового пространства Lab, характеризующей положение цвета на оси между красным и зеленым.

На подготовленные образцы порошковых материалов наносилось 2 мл водного раствора родамина Б. После выдерживания в темноте в течение 30 мин образцы подвергались воздействию ультрафиолетового облучения. До и после 4 и 26 ч воздействия колориметрическим методом определялась координата a и рассчитывалась степень обесцвечивания красителя:

$$R_4 = \frac{a_0 - a_4}{a_0} \cdot 100 \%,$$

$$R_{26} = \frac{a_0 - a_{26}}{a_0} \cdot 100 \%.$$

Обсуждение результатов

Наличие примесей в составе карбонатного носителя может оказывать влияние как на характер осаждения фотокаталитического агента на него, так и на взаимодействие ФКМ на его основе с вяжущим в процессе гидратации цементом. В связи с этим проведена сравнительная оценка составов карбонатных сырьевых материалов.

Таблица 1

Химический и минеральный состав исследуемых материалов

Материал	Содержание оксидов, мас. %											
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SrO	TiO ₂	CO ₂	ппп.*
Известняк Т	52,2	2,82	1,10	0,92	0,44	0,17	0,12	0,08	0,04	0,03	42	0,08
Известняк П	53,4	1,51	0,68	0,90	0,23	0,08	0,06	0,07	0,05	0,01	43	0,01
Мраморная пыль МП	55	0,12	0,06	0,31	0,02	–	–	–	0,02	0,002	43	1,47

*п.п.п. – потери при прокаливании.

Химический и минеральный состав исследуемых материалов (табл.1, рис.1) типичен для карбонатных осадочных и метаморфических пород, содержание CaO – 52-55 мас.%, CO₂ – 42-43 мас.%,

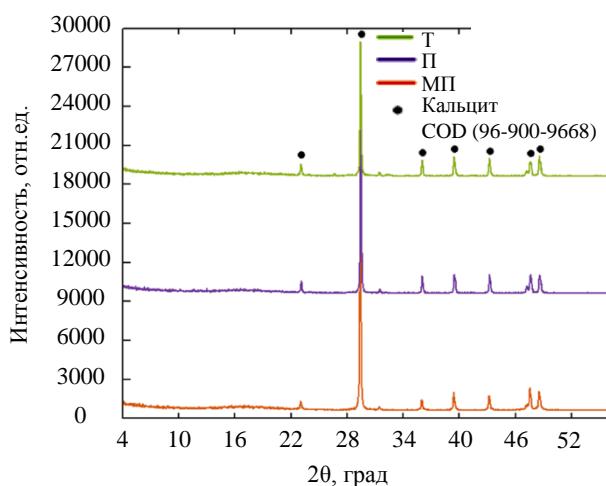


Рис.1. Минеральный состав исследуемых материалов

фазового состава цементного камня и обеспечивающим повышение морозостойкости [31, 32]. В обоих случаях уровень дисперсности добавок находится в пределах 400-500 м²/кг [33] и сопоставим с рациональными значениями, предъявляемыми к носителям при получении ФКМ, поэтому была проведена оценка характеристик рассматриваемых карбонатов.

Методом лазерной дифракции установлен характер распределения частиц по размерам (рис.2). Известняки характеризуются полимодальным распределением частиц. Размеры частиц известняка Т находятся в пределах 0,15-195 мкм (пиковые значения на 13-17, 85-105 мкм), известняка П – 0,1-135 мкм (пиковые значения на 2,5-4, 13-17, 65-75 мкм) (рис.2, а, б). Мраморная пыль имеет три пиковых значения 1,5-2,5, 9-14 и 60-65 мкм (рис.2, в). Среди исследуемых карбонатных материалов наибольшей дисперсностью характеризуется мраморная пыль, а наименьшей – известняк Т (рис.2, г).

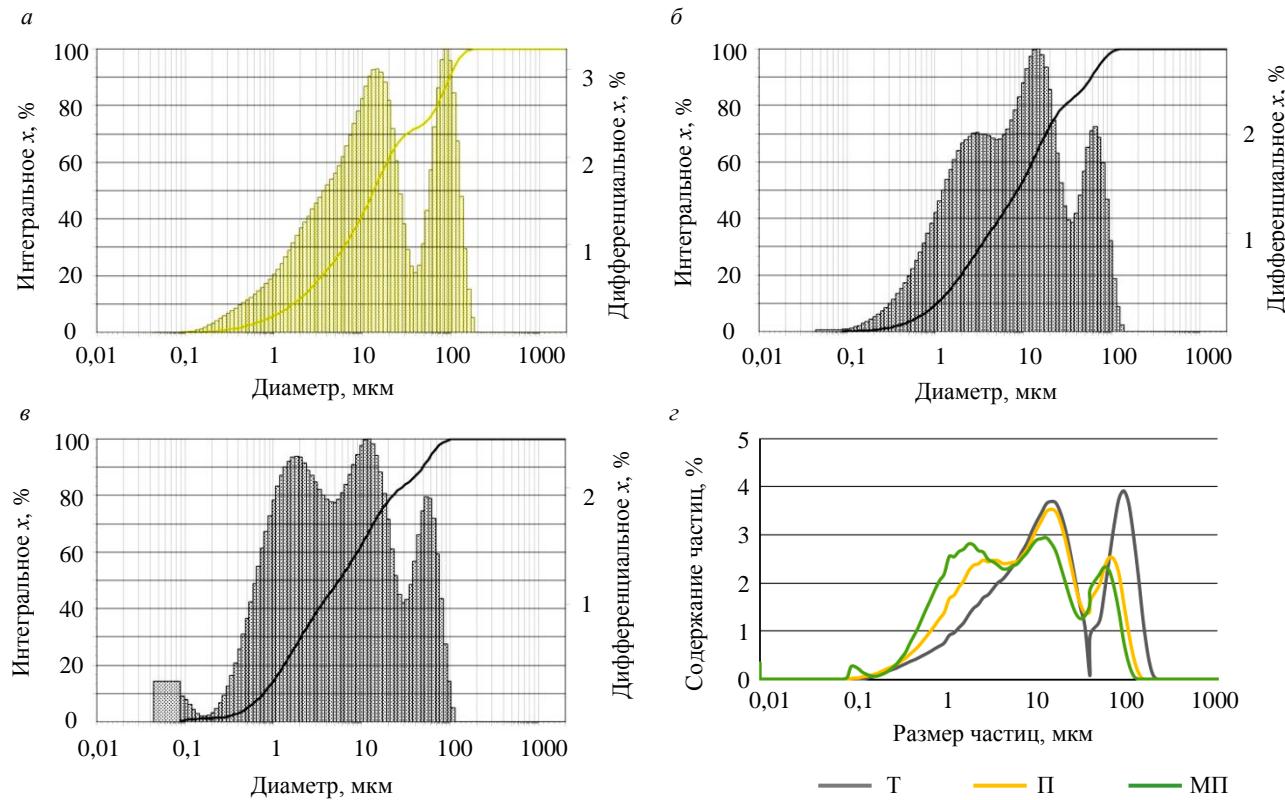


Рис.2. Распределение частиц по размерам носителей карбонатного состава: а – Т; б – П; в – МП; г – сравнительный анализ дисперсности минерального сырья

т.е. более чем на 90 % представлен кальцитом. Больше всего примесных оксидов SiO₂, Al₂O₃, MgO, Fe₂O₃ наблюдается в составе известняка Т, что может разнообразить состав кислотно-основных центров на его поверхности. Наиболее чистым химическим составом характеризуется мраморная пыль. Примеси железа могут окрашивать породы, влияя на внешний вид синтезируемого фотокатализитического композиционного материала.

Добавки карбонатного состава вводятся в состав цементных композитов в качестве наполнителей для оптимизации фракционного состава и создания плотнейшей упаковки [30] и в качестве компонента участвующего в процессах гидратации, оказывающего влияние на изменение



На основании результатов определения гранулометрического состава проводилось ранжирование карбонатных материалов, предлагаемых в качестве носителя фотокаталитического агента, по степени увеличения дисперсности: известняк Т → известняк П → мраморная пыль.

Анализ удельной поверхности минеральных материалов проводился по результатам оценки воздухопроницаемости (метод ПСХ) и адсорбции азота (метод БЭТ). Полученные данные коррелируют между собой (рис.3), однако значительная разница в значениях объясняется особенностями исследования полной удельной поверхности методом адсорбции газа-адсорбата, учитывающего мезо- и микропористость материала.

Среди исследуемых карбонатных материалов наибольшей удельной поверхностью частиц характеризуется мраморная пыль ($S_{уд,ПСХ} = 682 \text{ м}^2/\text{кг}$, $S_{уд,БЭТ} = 2444 \text{ м}^2/\text{кг}$), наименьшей – известняк Тюшевского месторождения ($S_{уд,ПСХ} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$, $S_{уд,БЭТ} = 2054 \text{ м}^2/\text{кг}$). По увеличению удельной поверхности рассматриваемые материалы можно ранжировать в последовательности: известняк Т → известняк П → мраморная пыль.

На качество закрепления фотокатализатора на носителе влияют как химические, так и физико-механические процессы, к которым относятся несовершенства его поверхности – развитая морфология и высокая пористость. При золь-гель осаждении TiO_2 необходимо учитывать пористость носителя, чем она выше, тем больше фотокаталитического агента можно внедрить в приповерхностную структуру материала-носителя и тем выше будет его эксплуатационная эффективность. Применение наиболее дисперсного сырья с высокими показателями удельной поверхности и пористости приведет к увеличению активной удельной поверхности TiO_2 в составе фотокаталитического композиционного материала. Методом низкотемпературной адсорбции/десорбции азота были также определены характеристики нанопористости исследуемых карбонатных материалов.

Анализ пористости карбонатных сырьевых материалов показал преобладание на их поверхности мезопор (от 2 до 50 нм по рекомендациям ИЮПАК), размер которых составляет от 2 до 20 нм. Поскольку известняк представляет собой хемогенную осадочную породу, наличие пор нанометрового размера характерно для этого вида материала. Размер пор на поверхности исследуемых видов известняков находится в пределах 2-6 нм (рис.4, а, б). Разница в пористости исследуемых сырьевых порошков незначительна либо отсутствует, поэтому влияние на различия в удельной поверхности этих материалов заключается в их дисперсности.

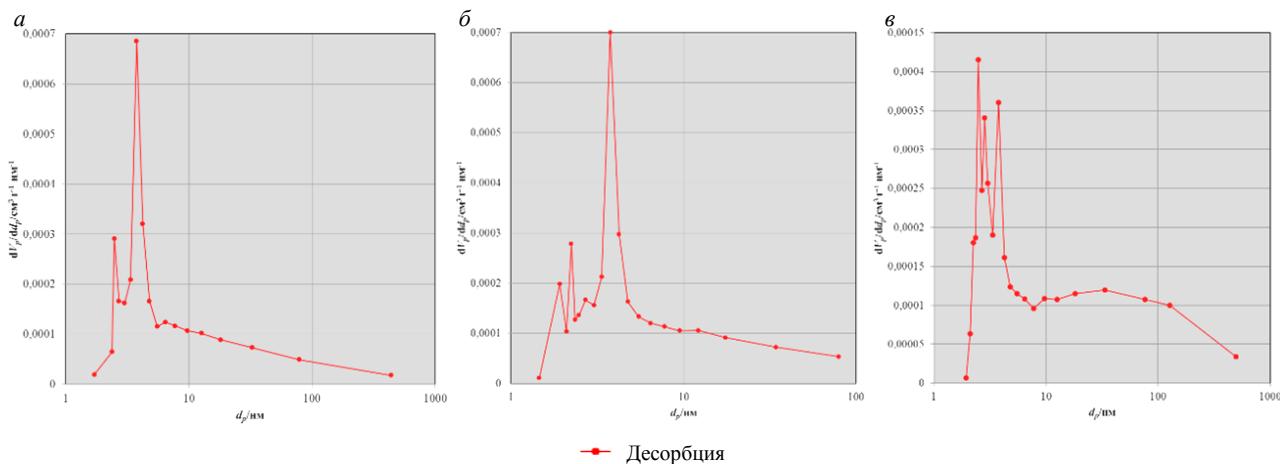


Рис.4. Пористость карбонатных материалов: а – Т; б – П; в – МП

Состав и морфоструктурные особенности носителя во многом определяют свойства его поверхности, которые оказывают значительное влияние на результат золь-гель синтеза и фотокаталитическую активность композиционного материала. Высокие показатели кислотности по Льюису и Бренстеду, pH водно-минерального раствора, близкий к pH золя диоксида титана и pH матрицы строительного композита, а также низкие значения ζ -потенциала сырья могут увеличить эффективность закрепления фотокаталитического агента на поверхности карбонатного носителя при получении устойчивой системы типа «ядро – оболочка». Изменения ζ -потенциала позволяют изучать процесс адсорбции на поверхности минералов, что важно при исследовании механизма осаждения титановых соединений при золь-гель синтезе, для чего было определено исходное значение электрохимического потенциала.

Эффективность закрепления частиц диоксида титана на поверхности минеральных составляющих носителей во многом зависит от адсорбционных свойств сырьевых материалов на границе раздела фаз «раствор – твердое тело» [4]. Адсорбционная активность сырья обусловлена pH и ζ -потенциалом водно-минерального раствора (в концентрации сырьевого материала 1 г/л) и кислотно-основными центрами Льюиса и Бренстеда, в связи с чем был изучен комплекс показателей, определяющий адсорбционные свойства исследуемых компонентов.

Породообразующим минералом изучаемых материалов является кальцит. Данная полиморфная модификация имеет островную структуру, состоящую из групп CO_3^{2-} и катионов Ca^{2+} , расположенных по ромбоэдру в элементарной ячейке и являющихся потенциалопределяющими для данного минерала. Для определения ζ -потенциала кальцита важно учитывать, что, во-первых, кальцит растворим в воде и ионы Ca^{2+} и CO_3^{2-} в зависимости от pH уходят в раствор либо располагаются на поверхности минерала, во-вторых, углекислый газ CO_2 , содержащийся в воздухе, может взаимодействовать с раствором и влиять на pH и концентрацию ионов Ca^{2+} , CO_3^{2-} и HCO_3^- [34].

Показатель pH для исследованных карбонатных материалов составляет 10,75 для Т; 10,31 для П; 9,95 для МП, что говорит об их щелочности и нахождении на поверхности частиц преимущественно гидроксид-ионов. Рассматриваемые карбонатные материалы характеризуются положительным электрохимическим потенциалом. Известняки Т и П менее устойчивы с ζ -потенциалами 4,78 и 4,83 мВ, а мраморная пыль, ζ -потенциал которой составляет 20,53 мВ, более устойчива в водно-минеральном растворе.

Образование частиц аморфного диоксида титана в процессе золь-гель технологии предполагает протекание реакций гидролиза и поликонденсации титанового прекурсора в дисперсионной среде с образованием OH-групп, в связи с чем дополнительный источник протонов, способных связывать оксигидраты титана с поверхностью носителя, является дополнительным фактором сцепления титановых новообразований с поверхностью носителя. Образующаяся вода участвует в гидролизе, тем самым осуществляется конденсация продуктов частичного гидролиза с формированием кислородно-титановой цепочки. Важно исследование совокупности кислотно-основных центров Льюиса и Бренстеда материалов-носителей, которая наилучшим образом отражает реакционную способность поверхности в донорно-акцепторных взаимодействиях. Методика адсорбции индикаторов позволяет провести количественное определение центров адсорбции по Льюису и Бренстеду с дифференциацией их по типу и концентрации в зависимости от константы диссоциации pK_a применяемого индикатора [35, 36].

Характер распределения кислотно-основных активных центров по исследуемым индикаторам аналогичен для всех изучаемых карбонатных материалов (рис.5), но имеются различия в их концентрации (табл.2).

Поверхность известняка Т продемонстрировала адсорбцию индикаторов с pK_a , равными 2,5 и 10,5, которые соответствуют кислотным и основным центрам Бренстеда. Концентрация основных центров данного материала по используемому набору индикаторов превышает концентрацию кислотных.

Известняк П характеризуется поверхностью с высокой концентрацией активных центров. При pK_a , равном –0,29 (основание Льюиса), 2,5 (кислота Бренстеда), 10,5 (основание Бренстеда) концентрация активных центров равна 52,2, 6,5 и 4,8 ммоль/г. Поверхность данного известняка также характеризуется более высокой концентрацией основных центров.

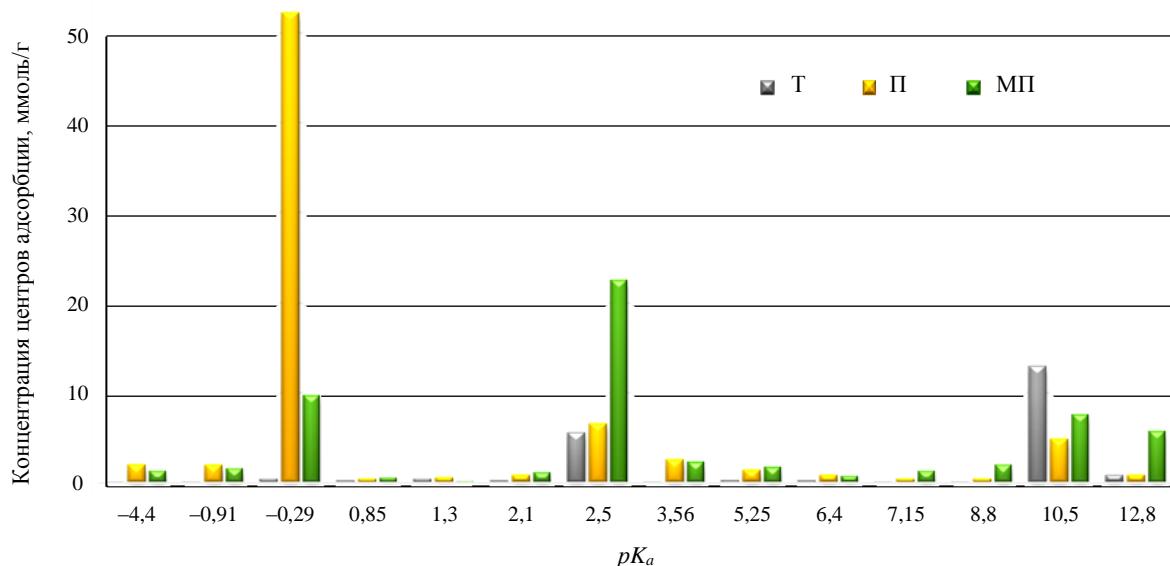


Рис.5. Распределение кислотно-основных центров на поверхности карбонатных материалов

Таблица 2

Концентрация кислотно-основных активных центров на поверхности карбонатных материалов, ммоль/г

Материал	Основания по Льюису -4,4-0	Кислоты по Бренстеду 0-7	Основания по Бренстеду 7-13	Сумма
Известняк Т	0,66	7,06	13,87	21,6
Известняк П	56,11	13,01	6,47	75,7
Мраморная пыль МП	12,37	28,75	16,4	57,5

Концентрация кислотно-основных центров поверхности мраморной пыли 9,5 ммоль/г при $pK_a = -0,29$, 22,4 ммоль/г при $pK_a = 2,5$, 7,5 ммоль/г при $pK_a = 10,5$. У мраморной пыли более высокая кислотность поверхности, чем у известняков, при этом отмечается и значительное содержание основных центров. Мраморная пыль имеет метаморфическое происхождение, более чистый химический состав и более высокую удельную поверхность, что определяет отличие концентрации кислотно-основных центров от исследуемых известняков [4].

Наибольшие концентрации основных центров Льюиса и суммарная концентрация кислотно-основных центров по набору индикаторов отмечается на поверхности у известняка Т (75,7 ммоль/г), наибольшая концентрация бренстедовских центров, как кислотных, так и основных – на поверхности частиц мраморной пыли.

Кислотно-основные свойства поверхности носителя позволяют прогнозировать возможность и характер осаждения на нем фотокаталитического агента. Поскольку реакции гидролиза и поликонденсации в процессе золь-гель синтеза частиц диоксида титана сопровождаются выделением и присоединением OH^- групп, то для эффективного осаждения следует учитывать активность кислотных бренстедовских центров поверхности карбонатных материалов [4]. Исходя из этого, наиболее пригодной для применения в качестве носителя в составе фотокаталитического композиционного материала является мраморная пыль с общим количеством бренстедовских центров 45,15 ммоль/г.

Далее была проведена оценка микроструктуры карбонатных материалов (рис.6), выбранных в качестве носителя фотокатализатора композиционного материала.

Структура осадочных сырьевых материалов представляет собой совокупность частиц неправильной формы различных размеров без видимых пор. Микрофотоснимки известняка Т позволяют охарактеризовать его как порошковый материал с частицами неправильной формы размерами от 1 до 40 мкм (рис.6, а, г). Известняк П характеризуется частицами меньшего размера от 0,8 до 20 мкм

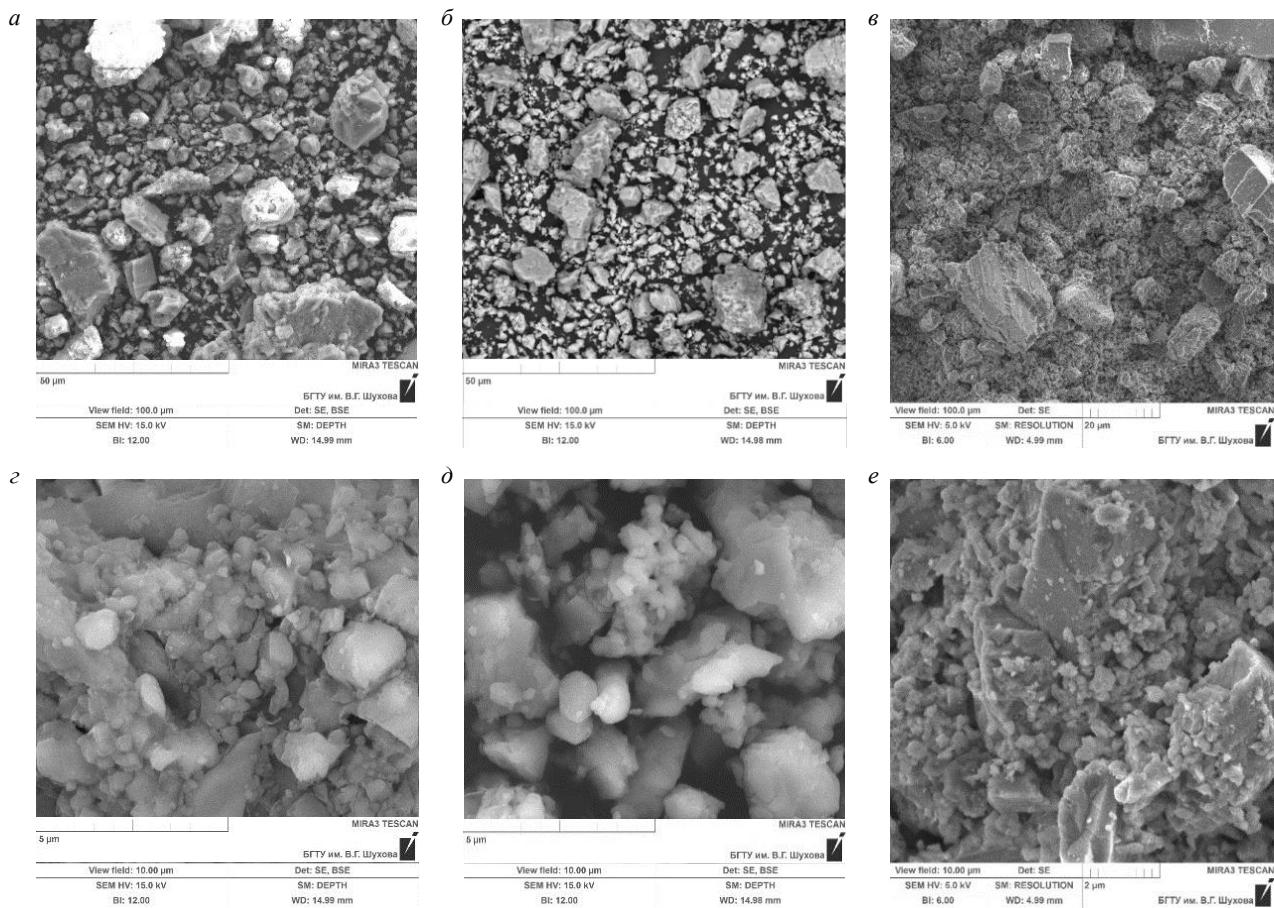


Рис.6. Морфоструктурные особенности карбонатных материалов:
 Т (a, c); П (b, d); МП (e, e)

(рис.6, б, д). Анализ микрофотографий карбонатных материалов, который позволяет оценить размер частиц, слагаемых материал, коррелирует с результатами распределения частиц по размерам, полученными с помощью лазерной дифракции (см. рис.2).

Мраморная пыль вследствие своего генезиса (отход производства) характеризуется полидисперсным распределением пылевидных частиц размером от 300 нм до 3 мкм, а также содержанием более крупных частиц обломков материала, достигающих 20-30 мкм (рис.6, в, е).

Проведена сравнительная оценка физических и химических свойств карбонатных материалов и представлена матрица их ранжирования с точки зрения потенциальной эффективности использования в качестве носителя фотокаталитического агента в составе композиционного материала, предназначенного для использования в строительных материалах на основе цементных вяжущих (табл.3).

Результаты анализа физико-химических свойств исследованных карбонатных материалов различных видов свидетельствуют об их соответствии требованиям, предъявляемым к носителям в составе композиционного материала вида «носитель – фотокатализатор» для использования в составе строительных материалов на основе цементных вяжущих. По совокупности свойств карбонатные материалы можно предварительно проранжировать по повышению эффективности их использования в качестве носителя в следующей последовательности: известняк Т → известняк П → мраморная пыль МП.

Для проверки предварительного ранжирования карбонатного сырья по физико-химическим свойствам проведено сопоставление с результатами оценки фотокаталитической активности синтезированных на их основе фотокаталитических композиционных материалов. Исследование возможности использования карбонатного носителя в составе композиционного материала устанавливает способность синтезированного материала к деградации органических красителей.



Сравнение результатов оценки фотокаталитической активности синтезированных ФКМ, полученных методом золь-гель осаждения оксидов и гидроксидов титана на носителе с последующей термической обработкой при 550 °C, проводилось с широко применяемым фотокаталитическим продуктом Degussa P-25 (Р-25) в качестве контрольного образца.

Таблица 3

Матрица ранжирования карбонатных материалов

Характеристика	Последовательность повышения потенциальной эффективности использования		
	Известняк Т	Известняк П	Мраморная пыль МП
Химический состав сырьевого материала			
Содержание CaO, мас.%	Известняк Т	Известняк П	Мраморная пыль МП
Дисперсность по методу лазерной дифракции	Известняк Т	Известняк П	Мраморная пыль МП
Удельная поверхность (ПСХ)	Известняк Т	Известняк П	Мраморная пыль МП
Удельная поверхность (БЭТ)	Известняк Т	Известняк П	Мраморная пыль МП
Активные центры, ммоль/г			
Общее количество	Известняк Т	Мраморная пыль МП	Известняк П
Центры Бренстеда	Известняк П	Известняк Т	Мраморная пыль МП

Анализ результатов сравнения (рис.7) показал, что исходные сырьевые материалы не обладают фотокаталитическими свойствами. Некоторое снижение насыщенности цвета загрязнителя родамина Б после 4 ч (3-14 %) и 26 ч (порядка 40 %) облучения ультрафиолетовым светом объясняется естественной сорбцией красителя в объем порошкового материала.

Высокая фотокаталитическая активность синтезированных материалов, превышающая показатели контрольного образца Р-25 при меньшем содержании TiO₂ в исследуемых образцах, может быть обусловлена спецификой взаимодействия анатаза с карбонатной подложкой, способствующей разделению фотовозбужденных электронов и дырок, в то время как высокая удельная поверхность в сочетании с подходящим размером пор может способствовать адсорбции органических молекул на поверхности фотокатализаторов и вблизи нее [37].

ФКМ на основе мраморной пыли проявляет наиболее высокую фотокаталитическую активность. Это может быть связано как с ее повышенной дисперсностью, так и с повышенным содержанием активных центров по Бренстеду (45,15 ммоль/г), выступающих центрами OH⁻ групп, которые могли способствовать лучшему закреплению соединений титана на его поверхности в процессе золь-гель синтеза.

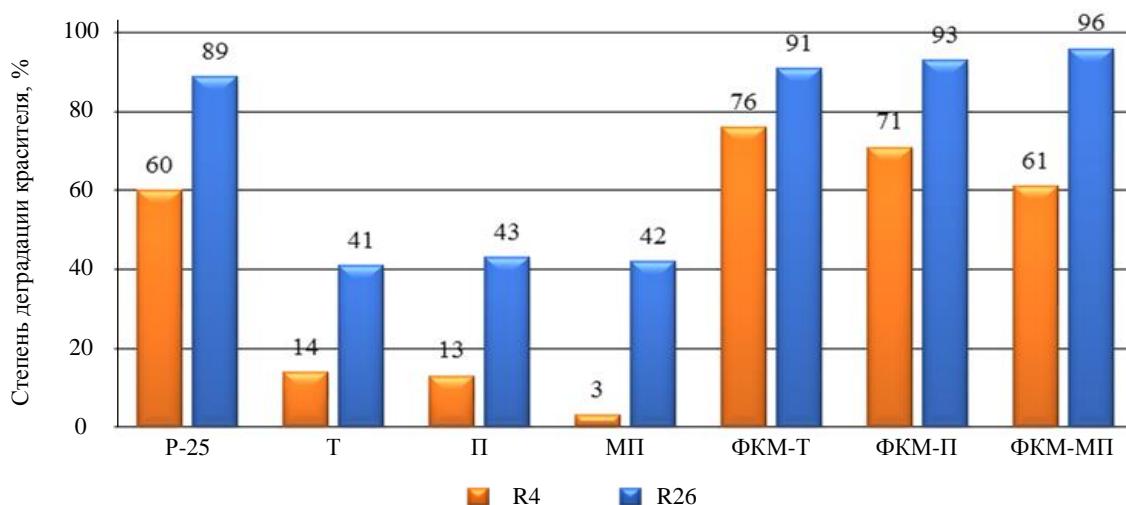


Рис.7. Обесцвечивание поверхности исследуемых материалов. Р-25 – фотокаталитический продукт Degussa P-25; Т и П – известняки; МП – мраморная пыль; ФКМ-Т, ФКМ-П, ФКМ-МП – композиционные материалы на соответствующих носителях; R4, R26 – время облучения образцов ультрафиолетовым светом (4 и 26 ч)

Концентрации активных центров Бренстеда на поверхности известняков Т и П, способствующих закреплению частиц диоксида титана, близки (19,48 и 20,93 ммоль/г), в связи с чем ФКМ на их основе по истечении 26 ч облучения показывают деградацию красителя 91-93 %, что меньше, чем у ФКМ-МП (96 %), но выше, чем у контрольного Р-25 (89 %).

По степени увеличения фотокаталитической активности композиционные материалы после воздействия УФ-светом располагаются в следующем порядке: ФКМ-МП – 61 %, ФКМ-П – 71 %, ФКМ-Т – 76 % (4 ч), ФКМ-Т – 91 %, ФКМ-П – 93 %, ФКМ-МП – 96 % (26 ч). Мраморная пыль продемонстрировала меньшую сорбцию органического красителя через 4 ч УФ-облучения (3 %), что могло оказаться и на относительно низком показателе фотокаталитической активности ФКМ-МП через 4 ч по сравнению с ФКМ на известняках.

Анализ результатов обесцвечивания загрязнителя показал, что синтезированные золь-гель осаждением композиционные материалы «фотокатализатор – носитель», где в качестве носителя фотокаталитического агента используется карбонатный материал, являются активными фотокаталитическими системами, обеспечивающими окислительно-восстановительные реакции под действием ультрафиолетового облучения, что приводит к деградации загрязняющего вещества.

Исходя из результатов фотокаталитической активности синтезированных композиционных материалов, можно установить требования к карбонатным сырьевым компонентам-носителям фотокаталитического агента: содержание CaCO_3 не менее 90 %, дисперсность носителя в пределах 0,1-150 мкм с полимодальным распределением частиц, удельная поверхность 400-700 $\text{m}^2/\text{кг}$, наличие мезопор размером 2-50 мкм, высокие показатели активности центров адсорбции Льюиса и Бренстеда на поверхности носителя.

Ранжирование по степени эффективности карбонатного сырья является предварительным и будет уточняться на стадиях золь-гель осаждения, термической обработки, его физико-химического взаимодействия с компонентами цементной и бетонной систем, влияния на процессы их фазо- и структурообразования, свойства, закрепления в бетонной матрице, оценки фотокаталитической активности бетона с ФКМ. Ранжирование эффективности носителей на различных технологических стадиях получения ФКМ и их сопоставление необходимо для установления необходимых и достаточных критериев оценки сырьевых компонентов и их весомости. В дальнейшем при расширении спектра сырьевых компонентов, используемых в качестве носителей фотокаталитического агента, это позволит проводить их предварительную прогнозную экспресс-оценку.

Заключение

Отходы горно-добывающей и горно-перерабатывающей промышленностей являются наиболее распространенными видами отходов. Перспективным способом использования вмещающих и вскрытых пород, находящихся в отвалах, а также высокодисперсных отходов переработки минеральных полезных ископаемых, является включение их в состав композиционных материалов. Для снижения объема отходов основного производства и получения товарных продуктов рассматривается возможность использования карбонатных минеральных материалов в композитах, предназначенных для внедрения в состав материалов и изделий строительной отрасли. Предлагаемый способ утилизации высокодисперсных отходов недропользования позволит снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

В работе показана принципиальная возможность использования карбонатного сырья в качестве перспективного носителя фотокаталитического агента в составе фотокаталитических композиционных материалов, что позволяет применять полученные результаты при адаптации технологии золь-гель синтеза ФКМ при использовании карбонатных отходов различных производств. В качестве модельных систем карбонатного состава рассмотрены порошки известняка Тюшевского (известняк Т) и Пореченского (известняк П) месторождений, а также мраморная пыль Полоцкого месторождения, применяемые при производстве строительных материалов в качестве минеральных дисперсных наполнителей.

Определены физико-химические характеристики карбонатного сырья, являющиеся критериями оценки эффективности распределения и закрепления фотокаталитического агента в процессе его синтеза. Размер частиц исследованных материалов находится в диапазоне 0,1-150 мкм, удельная поверхность 400-600 $\text{m}^2/\text{кг}$, поры размером 2-50 нм, pH 7-11, высокая концентрация



кислотно-основных центров Бренстеда и Льюиса, развитая морфология поверхности. По совокупности характеристик карбонатные материалы проранжированы по повышению потенциальной эффективности их использования в качестве носителя фотокаталитического агента в следующей последовательности: известняк Т → известняк П → мраморная пыль МП.

Ранжирование подтверждено результатами оценки фотокаталитической активности на основании фотоколориметрических замеров степени деградации модельного органического загрязнителя родамина Б при ультрафиолетовом воздействии на поверхности сырьевых материалов в их исходном состоянии и синтезированных на их основе фотокаталитических композиционных материалов. Установлено, что фотокаталитические свойства, не присущие исходным сырьевым материалам, активно проявляются в синтезированных на их основе композитах и пре-восходят значения, которые демонстрирует коммерческий фотокатализатор Р-25. Наибольшую фотокаталитическую активность (96 %) проявил композиционный материал на основе мраморной пыли, для известняков Т и П она составила 91 и 93 %.

Таким образом, показана принципиальная возможность использования носителей карбонатного состава при получении фотокаталитических композиционных материалов состава «ядро – оболочка».

ЛИТЕРАТУРА

1. Golik V.I., Mitsik M.F., Aleksakhina Yu.V. et al. Comprehensive Recovery of Metals in Tailings Utilization with Mechano-chemical Activation // Resources. 2023. Vol. 12. Iss. 10. № 113. [DOI: 10.3390/resources12100113](https://doi.org/10.3390/resources12100113)
2. Abbadi A., Mucsi G. A review on complex utilization of mine tailings: Recovery of rare earth elements and residue valorization // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024. Vol. 12. Iss. 3. № 113118. [DOI: 10.1016/j.jece.2024.113118](https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113118)
3. Крылов Д.П., Климова Е.В. Происхождение карбонатно-силикатных пород Порьей губы (Лапландско-Кольвицкий гранулитовый пояс) по результатам анализа стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) // Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 3-15.
4. Неровная С.В. Фотокаталитические композиционные материалы и штукатурные смеси с их использованием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, 2024. 19 с.
5. Кийко П.И., Черных Т.Н., Созыкин С.А., Ильина Л.В. О способах измерения эффективности процесса самоочищения у фотокаталитически активных строительных материалов // Эксперт: теория и практика. 2023. № 3 (22). С. 86-92. [DOI: 10.51608/26867818_2023_3_86](https://doi.org/10.51608/26867818_2023_3_86)
6. Тюкавкина В.В., Цырятьева А.В. Мелкозернистые фотокаталитические бетоны на основе титаносиликатных отходов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14. № 4. С. 207-212. [DOI: 10.37614/2949-1215.2023.14.4.035](https://doi.org/10.37614/2949-1215.2023.14.4.035)
7. Cerro-Prada E., Torres Costa V., Manso Silván M. Sol-gel TiO₂ nanoparticles prompt photocatalytic cement for pollution degradation // Advanced Material Science. 2016. Vol. 1. Iss. 1. P. 1-3. [DOI: 10.15761/AMS.1000101](https://doi.org/10.15761/AMS.1000101)
8. Беликов М.Л., Седнева Т.А., Локшин Э.П. Адсорбционные и фотокаталитические свойства диоксида титана, модифицированного вольфрамом // Неорганические материалы. 2021. Т. 57. № 2. С. 154-162. [DOI: 10.31857/S0002337X21020020](https://doi.org/10.31857/S0002337X21020020)
9. Авдин В.В., Буланова А.В., Уржумова А.В. Фотокаталитическая активность гранулированных композитных оксидов TiO₂/SiO₂ в реакциях деструкции красителей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. 2022. Т. 14. № 2. С 135-142. [DOI: 10.14529/chem220214](https://doi.org/10.14529/chem220214)
10. Чиркунова Н.В., Дорогов М.В., Романов А.Е. Содопирирование диоксида титана для фотокатализа // Письма в журнал технической физики. 2023. Т. 49. Вып. 11. С. 7-10. [DOI: 10.21883/PJTF.2023.11.55530.19522](https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.11.55530.19522)
11. Ansari M.A., Shariq M., Ansari S.S., Husain A. Efficiency Assessment of TiO₂-Based Photocatalytic Concrete for Clean and Sustainable Construction: A State-of-the-Art Review // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2024. Vol. 48. Iss. 6. P. 3871-3898. [DOI: 10.1007/s40996-024-01415-8](https://doi.org/10.1007/s40996-024-01415-8)
12. Федосеев С.В., Саннерис Д., Точило М.В. Анализ и классификация ресурсосберегающих технологий воспроизводства минерально-сырьевой базы титановой промышленности // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 756-760. [DOI: 10.18454/PML.2016.5.756](https://doi.org/10.18454/PML.2016.5.756)
13. Pathak S.S., Vesmawala G.R. Influence of Nano-TiO₂ and water to cement ratio on fracture parameters of concrete // Asian Journal of Civil Engineering. 2023. Vol. 24. Iss. 7. P. 1969-1979. [DOI: 10.1007/s42107-023-00616-2](https://doi.org/10.1007/s42107-023-00616-2)
14. Batista G. dos S., Takimi A.S., da Costa E.M. Hardened oil well cement paste modified with TiO₂@SiO₂ nanoparticles: Physical and chemical properties // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 367. № 130282. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130282](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130282)
15. Zengkun Li, Haiyan He, Xuan Wang et al. Robust SiO₂@TiO₂ nanocoatings with antireflection and photocatalytic self-cleaning properties by introducing commercial P25 TiO₂ // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 664. № 131176. [DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.131176](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131176)
16. Yadav M., Arora R., Dhanda M. et al. Ppy/TiO₂-SiO₂ nanohybrid series: synthesis, characterization, photocatalytic activity, and antimicrobial potentiality // Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2023. Vol. 21. Iss. 1. P. 239-254. [DOI: 10.1007/s40201-023-00858-x](https://doi.org/10.1007/s40201-023-00858-x)

17. Singh K., Kumar A., Singh A.K., Agarwal A. Fly ash and TiO₂ modified fly ash as adsorbing materials for effective removal of methylene blue and malachite green from aqueous solutions // Journal of the Indian Chemical Society. 2023. Vol. 100. Iss. 3. № 100942. [DOI: 10.1016/j.jics.2023.100942](https://doi.org/10.1016/j.jics.2023.100942)
18. Visa M., Cosnita M., Moldovan M. et al. Fly Ash Waste Recycling by Pt/TiO₂ Incorporation for Industrial Dye Removal // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Vol. 18. Iss. 8. № 3887. [DOI: 10.3390/ijerph18083887](https://doi.org/10.3390/ijerph18083887)
19. Petcu G., Papa F., Anghel E.M. et al. Effects of Aluminosilicate Gel Treatment and TiO₂ Loading on Photocatalytic Properties of Au-TiO₂/Zeolite Y // Gels. 2023. Vol. 9. Iss. 6. № 503. [DOI: 10.3390/gels9060503](https://doi.org/10.3390/gels9060503)
20. Wen Cui, Jieyuan Li, Lvcun Chen et al. Nature-inspired CaCO₃ loading TiO₂ composites for efficient and durable photocatalytic mineralization of gaseous toluene // Science Bulletin. 2020. Vol. 65. Iss. 19. P. 1626-1634. [DOI: 10.1016/j.scib.2020.05.024](https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.05.024)
21. Самченко С.В., Александрова О.В., Гуркин А.Ю. Свойства цементных композитов на основе известняка в зависимости от его гранулометрического состава // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 999-1006. [DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.999-1006](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.7.999-1006)
22. Туремуратов Ш.Н., Нажимова Н.Б. Химические и физико-химические свойства карбонатных минералов плато Устюрт // Universum: химия и биология. 2020. № 10-1 (76). С. 61-63.
23. Лозовая С.Ю., Ченцов А.Е., Севостьянов А.Э. Анализ области применения карбонатных пород в строительстве // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, 2018. Вып. XVII. С. 214-217.
24. Ahmad I., Shen D., Khan K.A. et al. Effectiveness of Limestone Powder in Controlling the Shrinkage Behavior of Cement Based System: a Review // Silicon. 2022. Vol. 14. Iss. 2. P. 359-371. [DOI: 10.1007/s12633-020-00897-1](https://doi.org/10.1007/s12633-020-00897-1)
25. Белов В.В., Куляев П.В., Баркя Т.Р. Механические свойства мелкозернистых карбонатных бетонов с комплексной добавкой, включающей тонкодисперсный известняковый наполнитель и суперпластификатор // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 2. С. 251-257. [DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-251-257](https://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-2-251-257)
26. Тараканов О.В., Белякова Е.А., Москвин Р.Н. Применение минеральных шламов и карбонатных пород в производстве цементных материалов // Эксперт: теория и практика. 2023. № 1 (20). С. 130-132. [DOI: 10.51608/26867818_2023_1_130](https://doi.org/10.51608/26867818_2023_1_130)
27. Строкова В.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н. Оценка свойств кремнеземного сырья как подложки в составе композиционного фотокаталитического материала // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г.Шухова. 2017. № 2. С. 6-12.
28. Strokova V., Gubareva E., Ogurtsova Y. et al. Obtaining and Properties of a Photocatalytic Composite Material of the «SiO₂-TiO₂» System Based on Various Types of Silica Raw Materials // Nanomaterials. 2021. Vol. 11. Iss. 4. № 866. [DOI: 10.3390/nano11040866](https://doi.org/10.3390/nano11040866)
29. Gang Liao, Wu Yao, Anming She et al. Interfacial design of nano-TiO₂ modified recycled concrete powder for building self-cleaning // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 661. № 130925. [DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.130925](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.130925)
30. Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Рябчевский И.С. и др. Светящиеся декоративные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г.Шухова. 2020. № 12. С. 8-16. [DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-8-16](https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-8-16)
31. Корчунов И.В., Потапова Е.Н., Сивков С.П. и др. Использование известняка при разработке составов добавочных цементов повышенной морозостойкости // Цемент и его применение. 2022. № 2. С. 44-49.
32. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Косинова А.А., Хахалева Е.Н. Влияние электроповерхностных свойств минерального наполнителя на морозостойкость порошковых бетонов // Строительные материалы. 2019. № 10. С. 12-15. [DOI: 10.31659/0585-430X-2019-775-10-12-15](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-12-15)
33. Колмогоров А.Ю., Корчунов И.В., Потапова Е.Н. Влияние минеральных добавок на морозостойкость цементного камня // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. XXXVI. № 3. С. 83-85.
34. Анашина Н.Е. Экспериментальное обоснование механизма модифицирования физико-химических, структурных и технологических свойств алмазов и породообразующих минералов кимберлитов при нетепловом воздействии высоковольтных наносекундных импульсов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова, 2019. 26 с.
35. Петрунин М.А., Максаева Л.Б., Юрасова Т.А. Роль кислотно-основных взаимодействий в коррозии металлов. Обзор // Коррозия: защита материалов и методы исследований. 2024. № 3. С. 1-43. [DOI: 10.61852/2949-3412-2024-2-3-1-43](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2024-2-3-1-43)
36. Скворцова Л.Н., Тихонова И.А., Дычко К.А. и др. Кислотно-основные свойства и адсорбционная активность железосодержащих композитов в процессах фотокаталитической деградации органических загрязнителей // Журнал физической химии. 2024. Т. 98. № 10. С. 32-40. [DOI: 10.31857/S0044453724100054](https://doi.org/10.31857/S0044453724100054)
37. Hai D. Tran, Dinh Quan Nguyen, Phuong T. Do, Uyen N.P. Tran. Kinetics of photocatalytic degradation of organic compounds: a mini-review and new approach // RSC Advances. 2023. Vol. 13. Iss. 25. P. 16915-16925. [DOI: 10.1039/D3RA01970E](https://doi.org/10.1039/D3RA01970E)

Авторы: Валерия Валерьевна Строкова, д-р техн. наук, заведующий кафедрой (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6895-4511>, Екатерина Николаевна Губарева, канд. техн. наук, старший научный сотрудник (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия), 43448504@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4854-6673>, Юлия Николаевна Огурцова, канд. техн. наук, доцент (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-0199-7274>, Софья Владимировна Неровная, младший научный сотрудник (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия), <https://orcid.org/0009-0007-1028-3066>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Литолого-геохимическая специфика и особенности генезиса терригенно-карбонатных пород нижнеэвенкийской подсвиты (средний кембрий, запад Сибирской платформы)

С.И.Меренкова^{1,2}✉, Е.В.Карпова³, А.Ю.Пузик⁴, В.А.Литвинский⁵, Ю.В.Шувалова⁵, М.А.Волкова⁴, А.А.Медведков^{3,6}

¹ Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

⁴ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

⁵ Палеонтологический институт им. А.А.Борисяка РАН, Москва, Россия

⁶ Институт географии РАН, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Меренкова С.И., Карпова Е.В., Пузик А.Ю., Литвинский В.А., Шувалова Ю.В., Волкова М.А., Медведков А.А. Литолого-геохимическая специфика и особенности генезиса терригенно-карбонатных пород нижнеэвенкийской подсвиты (средний кембрий, запад Сибирской платформы) // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 71-88. [EDN NYWOAF](#)

Аннотация

Уточнены литологические особенности сублиторальных-литоральных образований среднего кембрия – нижнеэвенкийской подсвиты Байкитской антеклизы. Выделены четыре типа доломитов: со строматолитовой текстурой, комковато-сгустковые, замещения кристаллические без сохранения первичных структур протолита, замещения разнокристаллические с реликтовой алевро-пелитовой структурой. Постседиментационные изменения пород связаны с процессами разностадийной доломитизации – ранней, сингенетической (в литотипах доломитов со строматолитовой текстурой и/или бактериальными структурами) и более поздней (в литотипах доломитов замещения и алевро-песчаников с доломитовым цементом). Анализируется изотопный состав углерода и кислорода карбонатов. Изучен элементный состав карбонатных, терригенно-карбонатных, карбонатно-терригенных и терригенных пород. С помощью тепловой карты и кластеризации визуализирован общий характер обогащения различными элементами. Карбонатные литотипы заметно обогащены Co, Cr, Sc, Rb и обеднены Cu, Zn, Li, Ba, Pb и Sr относительно кларка в карбонатах. Изучена природа положительной Eu-аномалии, возможновение которой связано с Eu-содержащими минералами в терригенной составляющей пород, а не гидротермальными растворами. Не наблюдается прямой зависимости содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) от количества терригенной примеси, поэтому нельзя исключать влияние восстановительных условий или состава доломитообразующего флюида на распределение РЗЭ. Терригенные разности относительно кларка для глин и глинистых сланцев обеднены Cu, Zn, Pb, Ba, Th, U. При нормировании на PAAS доломитистых аргиллитов, доломитовых алевролитов, песчаников и алевро-песчаников в основном характерно обогащение ТРЗЭ относительно ЛРЗЭ. Источником терригенной кластики выступали докембрийские террейны Енисейского кряжа, образованные оstromводужными комплексами, и рециклированный осадочный материал.

Ключевые слова

Сибирская платформа; средний кембрий; эвенкийская свита; геохимия редких и редкоземельных элементов; изотопный состав углерода и кислорода; обстановки осадконакопления

Финансирование

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИО РАН по теме FMWE-2024-0020. Изотопные исследования осуществлялись за счет средств Государственного задания ПИН РАН. Частичное выполнение работ осуществлялось в рамках Государственных заданий ИФЗ РАН и ИГ РАН.

Поступила: 03.10.2024

Принята: 10.04.2025

Онлайн: 14.10.2025

Опубликована: 29.12.2025



Введение

Определение условий формирования отложений лагун, себх, приливных отмелей и других переходных зон между сушей и морским бассейном представляет собой одну из самых сложных проблем в исследовании палеозойских и более ранних отложений. Несмотря на активное изучение терригенно-карбонатных и карбонатно-соленосных отложений, формировавшихся в прибрежно-мелководных и субаэральных условиях внутренних районов Сибирской платформы, кембрийские разрезы остаются недостаточно изученными из-за трудностей с датировкой отложений и большого своеобразия фаций, не имеющих современных аналогов.

В Байкитской зоне эвенкийская свита подразделяется на две подсвиты [1], либо выделяют черноостровскую и вельминскую свиты в составе эвенкийской серии (рис.1, *a*), которые согласно залегают на породах оленчиминской свиты. Нижняя подсвита (220-325 м) в основании состоит из однообразных красных и реже зеленых алевритистых доломитовых мергелей, часто соленосных и сульфатоносных, с серыми глинистыми доломитами и известняками. Верхняя ее пачка имеет более терригенный состав, преобладают доломитистые аргиллиты, алевролиты, мергели, песчаники [1]. В отличие от нижней подсвиты, верхняя (190-205 м) более карбонатная и включает красноцветные доломиты, доломитовые мергели и алевролиты, с вишнево-бурыми и зеленоватыми мергелями и прослойками аргиллитов. Нижняя подсвита относится к майскому ярусу среднего кембрия, верхняя – к верхнему кембрию [1, 2].

Обнажение нижнеэвенкийской подсвиты расположено на правом берегу р. Подкаменная Тунгуска близ поселка Суломай (Эвенкийский муниципальный район, Красноярский край) (рис.1, *б*, *в*)¹. Детальное описание разреза общей мощностью 61,4 м представлено в работе [3]. Согласно фациально-палеогеографической схеме Сибирской платформы для майского века кембрия [2], область развития пород эвенкийской свиты лежит в поле надприливных равнин (себх). Существует гипотеза формирования эвенкийской свиты с ведущей ролью процессов штормовой седиментации [4]. Ранее в работах [3, 5] было показано, что по литологическому составу к породам нижнеэвенкийской подсвиты р. Подкаменная Тунгуска наиболее близки литоральные образования

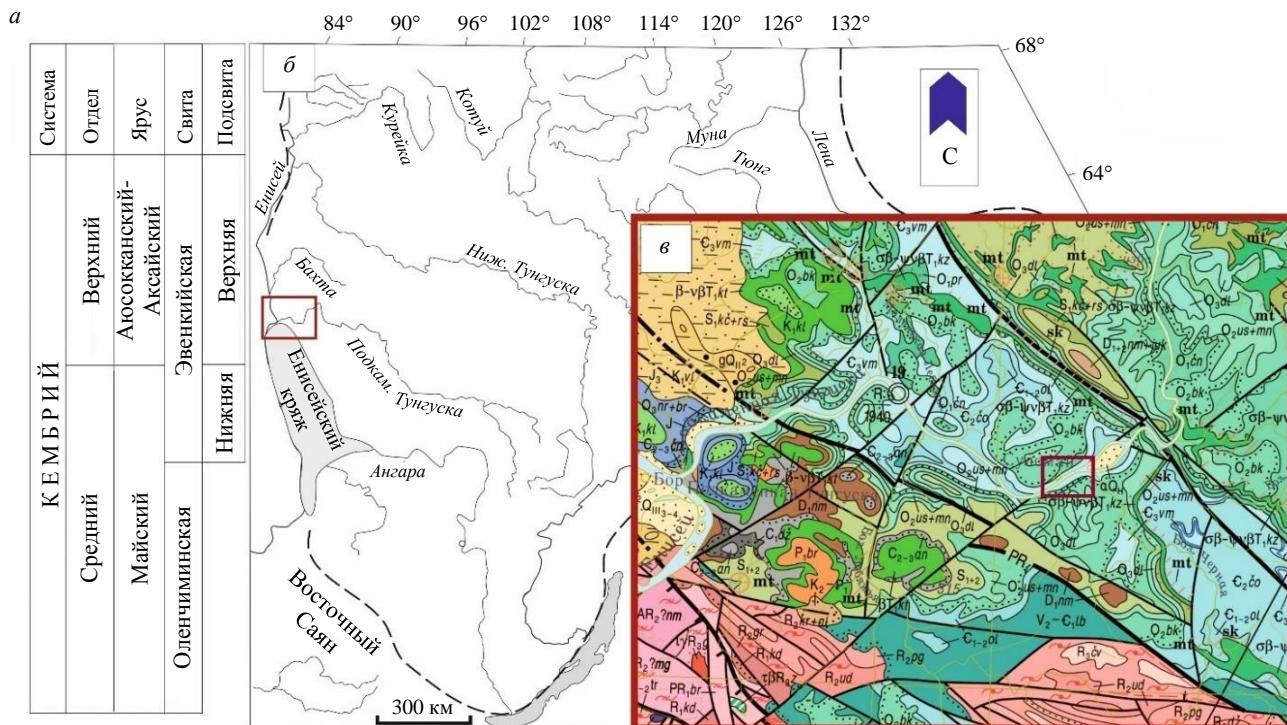


Рис.1. Положение исследуемого разреза эвенкийской свиты: *а* – стратиграфическое; *б*, *в* – региональное

¹ Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист Р-46 – Северо-Енисейский. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 470 с.



в составе карбонатно-соленосной формации венда – нижнего кембрия Непско-Ботубинской антеклизы [6, 7]. На этом основании выдвинуто предположение [3, 5] о принадлежности изученных фаций эвенкийской свиты преимущественно к обстановкам верхней литорали с возможными эпизодическими условиями нижней супралиторали при понижении относительного уровня моря. В исследуемом разрезе эвенкийской свиты не наблюдается характерных для себя линз, корок, желваков гипса и ангидрита, только единичные реликтовые поры выщелачивания в алевро-глинистых доломитах. Присутствуют знаки волновой ряби, текстуры конседиментационных деформаций, тонкая пологоволнистая, пологая косая, градационная слоистость. В породах встречаются литокласты доломитов. На основании описанных особенностей разреза нижнеэвенкийской подсвиты в долине нижнего течения р. Подкаменная Тунгуска и анализа генезиса современных и древних себховых и некоторых береговых фаций сделан вывод, что изученные породы формировались преимущественно в условиях приливно-отливных отмелей, ассоциированных с прибрежными себхами [5].

В пределах Непско-Ботубинской антеклизы терригенные породы венского возраста, образовавшиеся в прибрежно-морских обстановках приливно-отливного побережья с себхами, изучаются гораздо более детально [8, 9], так как с вен-кембрийскими отложениями этой области связаны залежи нефти и газа. Сходным образом, в связи с газоносностью отложений, интерес исследователей вызывают условия формирования, диагенетические и постдиагенетические преобразования доломитов себх среднего ордовика бассейна Ордос (Китай) [10-12].

Настоящая работа направлена на изучение геохимических особенностей и дополнительные петрографические исследования пород, образовавшихся в условиях приливно-отливных отмелей в среднем кембрии. Результаты дают представление о характере постседиментационных изменений, геохимических чертах, процессах доломитизации карбонатных и терригенно-карбонатных пород, а при рассмотрении карбонатно-терригенных и терригенных отложений – о влиянии питающих провинций.

Методы

Описание и фотографирование шлифов производилось с использованием микроскопа Zeiss Axio Scope и программного обеспечения Zeiss ZEN core.

Для анализа изотопного состава углерода и кислорода на базе кабинета приборной аналитики Палеонтологического института им. А.А.Борисяка РАН (ПИН РАН) использовались измельченные до состояния пудры валовые пробы доломитов. Полученный аналитический материал переносили в плотно закрывающиеся микроцентрифужные пробирки. На микровесах брали навески каждого измельченного аналитического материала в виалы из боросиликатного стекла. Масса одной навески находилась в диапазоне 330-390 мкг. В каждую виалу с навеской пробы карбонатов с помощью автоматической системы подачи вносили 0,05 мл раствора концентрированной ортофосфорной кислоты. Взаимодействие навески карбонатов с кислотой длилось 1 ч в термостатируемом штативе при температуре $70,1 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Анализ отношений стабильных изотопов углерода и кислорода выполняли с использованием приборного комплекса Isoprime precisION-IsoFLOW (Elementar UK Ltd., Великобритания). Для контроля качества измерений использовались международный стандарт МАГАТЭ NBS18 и внутрилабораторный стандарт КН2. Воспроизводимость результатов оценивалась со стандартным отклонением, которое для $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ составляло 0,1 % PDB.

Лабораторные аналитические исследования элементного состава карбонатных, терригенно-карбонатных, карбонатно-терригенных и терригенных пород выполнены в Центре коллективного пользования Пермского государственного национального исследовательского университета. Навеска 0,1 г истертого образца подвергалась кислотному разложению. Навеску помещали в стеклоуглеродные стаканы, смачивали водой для лабораторного анализа, добавляли 0,5 см³ хлорной (70 %), 3 см³ фтористоводородной (40 %) и 0,5 см³ азотной (65 %) кислот, закрывали крышками и прогревали в течение 30 мин при температуре 130 °C на плитке РП-1 (ООО «НПП Томьянанит», Россия). Затем снимали крышки и упаривали при 170-180 °C. Далее стаканы охлаждали, обмывали стенки и снова упаривали до влажных солей. Затем добавляли 2 см³ соляной и 0,2 см³ 0,1M раствора борной кислот и упаривали растворы до объема 0,7 см³. Полученные растворы переносили



в полиэтиленовые пробирки, добавляли внутренний стандарт индия. Содержание микроэлементов определяли с помощью масс-спектрометра Bruker AURORA M90 (США) с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS.

В качестве статистических инструментов при интерпретации данных микроэлементного анализа использованы тепловая карта с кластеризацией методом полной связи (complete-linkage clustering) и коэффициенты корреляции Пирсона. В основе тепловой карты – метод обнаружения выбросов в массиве данных [13].

Результаты

Характеристика литологических типов отложений. По результатам изучения в шлифах наиболее представительных образцов карбонатных, терригенно-карбонатных и карбонатно-терригенных пород можно выделить следующие литотипы (табл.1):

- Доломиты строматолитовые.
- Доломиты комковато-сгустковые.
- Доломиты замещения разнокристаллические без сохранения первичных структур протолита.
- Доломиты замещения разнокристаллические, с реликтовой алевро-пелитовой структурой протолита, пятнисто ожелезненные; или с примесью (до 35-40 %) остаточного алевро-песчаного материала.
- Песчаники разных структурных типов и алевро-песчаники аркозовые с базальным доломитовым цементом.

Содержание полевых шпатов (ПШ) приводится по результатам расчета нормативного минерального состава по методу О.М.Розена [14, 15].

Таблица 1

Литологические типы пород эвенкийской свиты

Литотип	Образец	Описание
Доломиты со строматолитовой текстурой	SL-3/1	Доломит микрокристаллический (0,01-0,05 мм), местами тонкозернистый (до 0,1 мм), со строматолитовой текстурой. Состоит из корочек микритового строения, чередующихся со спаритовыми слойками доломита тонкокристаллической размерности. Содержит тонкорассеянную примесь (0,5-1 %) алевритового, редко тонкопесчаного кварца, ПШ и слюды. Общее содержание ПШ от 2,4 до 6,2 %
	SL-6/43	Доломит бактериальный, участками со строматолитовой текстурой. Состоит из корочек и пленок сплошного микритового строения, чередующихся с микрослойками и микролинзочками комковатого материала. Содержит участки спаритового строения, местами приобретает фенестровый облик с заполнением пустот мелко-среднекристаллическим кальцитом. Цианобактериальные образования имеют шаровидную форму (<i>Renalcis</i> ?), определяются микроонконолиты, катаграфии, сгустки. Присутствует тонкорассеянная примесь (0,5-1 %) алевритового, редко тонкопесчаного кварца, ПШ и слюды. Общее содержание ПШ 7,5 %
Доломиты комковато-сгустковые	SL-6/8	Доломит комковато-сгустковый, состоит из агрегатов микритового строения округлой формы. На отдельных участках встречаются остатки цианобактерий. Порода неслоистая, содержит участки сплошного микритового и яснокристаллического доломита в виде цементирующей массы. Присутствует примесь обломочного материала (3-5 %) в виде плохоокатанных зерен кварца, слюды, ПШ алевро-тонкопесчаной размерности. Наблюдаются единичные зерна циркона и микроконкремции глауконита и коллофана (до 0,07 мм). Порода слабопористая, в пустотах – аутогенный яснокристаллический доломит и кварц. Общее содержание ПШ 3,4 %
	SL-6/9 SL-6/18	Представлены несколько разных по строению и составу слойков – доломит комковато-сгустковый, доломит замещения яснокристаллический с примесью градационно распределенного (до 25 %) тонкопесчаного материала, представленного кварцем, ПШ и слюдой. Общее содержание ПШ 10,9-12,9 %
Доломиты замещения кристаллические без сохранения первичных структур протолита	SL-2/2	Доломит замещения разнокристаллический (размер кристаллов от 0,03-0,05 до 0,12 мм) однородный, без сохранения признаков первичной структуры и текстуры, с остаточными зернами кварца, мусковита, плагиоклаза алевритовой и тонкопесчаной размерности (суммарное количество примеси не более 1-2 %), распределенными равномерно; с пустотами выщелачивания, выполненными тонко-мелкокристаллическим кальцитом (1-2 %). Общее содержание ПШ 2 %



Окончание табл.1

Литотип	Образец	Описание
Доломиты замещения разно-кристаллические с реликтовой алевро-пелитовой структурой протолита, пятнисто ожелезненные; или с примесью (до 35-40 %) остаточного алевро-песчаного материала	SL-6/5	Доломит замещения разнокристаллический (размер кристаллов от 0,03-0,05 до 0,15 мм), пятнистый за счет неравномерного распределения железистого (гематитового?) вещества, с реликтовой тонкопесчано-алевро-пелитовой структурой. Состоит из разнокристаллической массы доломитового состава, с сохранением признаков первичной замещаемой породы. В межкристаллическом доломитовом пространстве прослеживается глинистое вещество пелитовой структуры, по которому развивается доломитизация. Наблюдается первичная примесь (25 %) тонкопесчано-алевритового материала преимущественно слюдисто-кварцевого состава. Фиксируются редкие зерна ортоклазов. Присутствуют плохоокатанные литокласти внутриформационных микрозернистых доломитов (интракласти) размером 0,5-0,8 мм. Общее содержание ПШ 2,1 %
	SL-6/54	Доломит замещения ожелезненный (гематитовый?), тонкокристаллический, неслоистый, с обильной (30-35 %) мелко-тонкопесчаной примесью остаточных, плохо- и полуокатанных зерен кварца (15-20 %), ПШ (10-12 %), единичных слюд, обломков пород и литокластиов доломита (1-2 %). Основная масса породы состоит из тонкокристаллического доломита. Кристаллы доломита субдиоморфные, облекаются тонкими пленками железосодержащего минерала (гематита?), придающего породе красный оттенок. Многие кристаллы доломита зонального, многостадийного строения с начальной недиоморфной затравкой в тонкой пленке оксидов железа, регенерационной каймой в пленке, одной-двумя зонами роста, разделенными пленками гематита, вплоть до идиоморфных кристаллов доломита размером 0,1-0,2 мм. В породе сохраняется остаточная (первичная) тонко-мелкозернистая хорошо сортированная примесь плохо- и полуокатанных зерен в количестве 30-35 %, среди которой превалирует кварц (15-20 %). Отдельные зерна кварца регенерированы с образованием тонких прерывистых регенерационных кайм. Среди ПШ преобладают ортоклазы, единичные зерна регенерированы; встречаются кислые плагиоклазы. Слюды (единичные) представлены мусковитом и биотитом. Обломки пород представлена микрокварцитами, кислыми эфузивами, доломитами (суммарно 1-2 %). Литокласти доломитов хорошо окатаны, имеют размер 0,2-1 мм. Общее содержание ПШ 9,4 %
	SL-6/22 SL-6/53	Доломит замещения, аналогичный SL-6/54. Содержит прослой, обогащенный средне-крупнозернистыми, хорошо сортированными и окатанными обломками (до 40 % состава породы) кварца, ПШ, и обломков более ранних пород – гнейсов, кварцитов, кислых эфузивов, железистых силицитов, сидеритов. Среди литокластиов преобладают обломки внутриформационных доломитов – микрозернистых и тонкокристаллических, с бактериальными структурами. Порода образца SL-6/53 слабо сульфатизирована, содержит единичные розетки гипса размером 0,2-0,5 мм. Общее содержание ПШ 4,5-13,1 %
Песчаники разных структурных типов и алевро-песчаники аркозовые с базальным доломитовым цементом	SL-6/51 SL-6/49	Песчаник мелко-тонкозернистый, хорошо сортированный, массивный, аркозовый. Состоит из плохо- и полуокатанных зерен кварца (50 %), ПШ (45 %), слюд (5 %), литокластиов (<1 %), с единичным глауконитом, с базальным (до 40 %) доломитовым тонкокристаллическим цементом. Порода содержит прослой (до 50 % площади шлифа), обогащенный средне-крупнозернистыми, хорошо сортированными и окатанными обломками кварца, ПШ, гнейсов, кварцитов, кислых эфузивов, железистых силицитов, сидеритов; с преобладанием интракластиов микрозернистых и тонкокристаллических доломитов, местами с бактериальными структурами. В образце SL-6/51 крупнопесчаные обломки единичны. Общее содержание ПШ 14,7-21 %
	SL-6/20	Песчаник тонкозернистый с обильной примесью алевритового материала (30-35 %), хорошо сортированный, с конседиментационными складками, находящимися между слойками с не нарушенной штриховато-горизонтальной текстурой, аркозовый. Состоит из плохо- и полуокатанных зерен кварца (60 %), ПШ (30 %), слюд (10 %), единичных литокластиов, с базальным (до 40 %) доломитовым тонкокристаллическим цементом. Общее содержание ПШ 10,9 %

Положение пород на разрезе и их шлифы показаны на рис.2.

В разрезе обширно представлены алевролиты доломитовые и аргиллиты доломитистые красно-бурые, с зелеными пятнами, реже зеленые, тонкоплитчатые (в сухом состоянии), иногда рыхлые и комковатые. Изучение в шлифах этих терригенных разностей не проводилось, но они послужили материалом для исследований содержания редких элементов.

Геохимическая характеристика. Корреляция и кластеризация элементов. Содержания редких элементов приведены в табл.2, содержания главных оксидов – в работе [3].

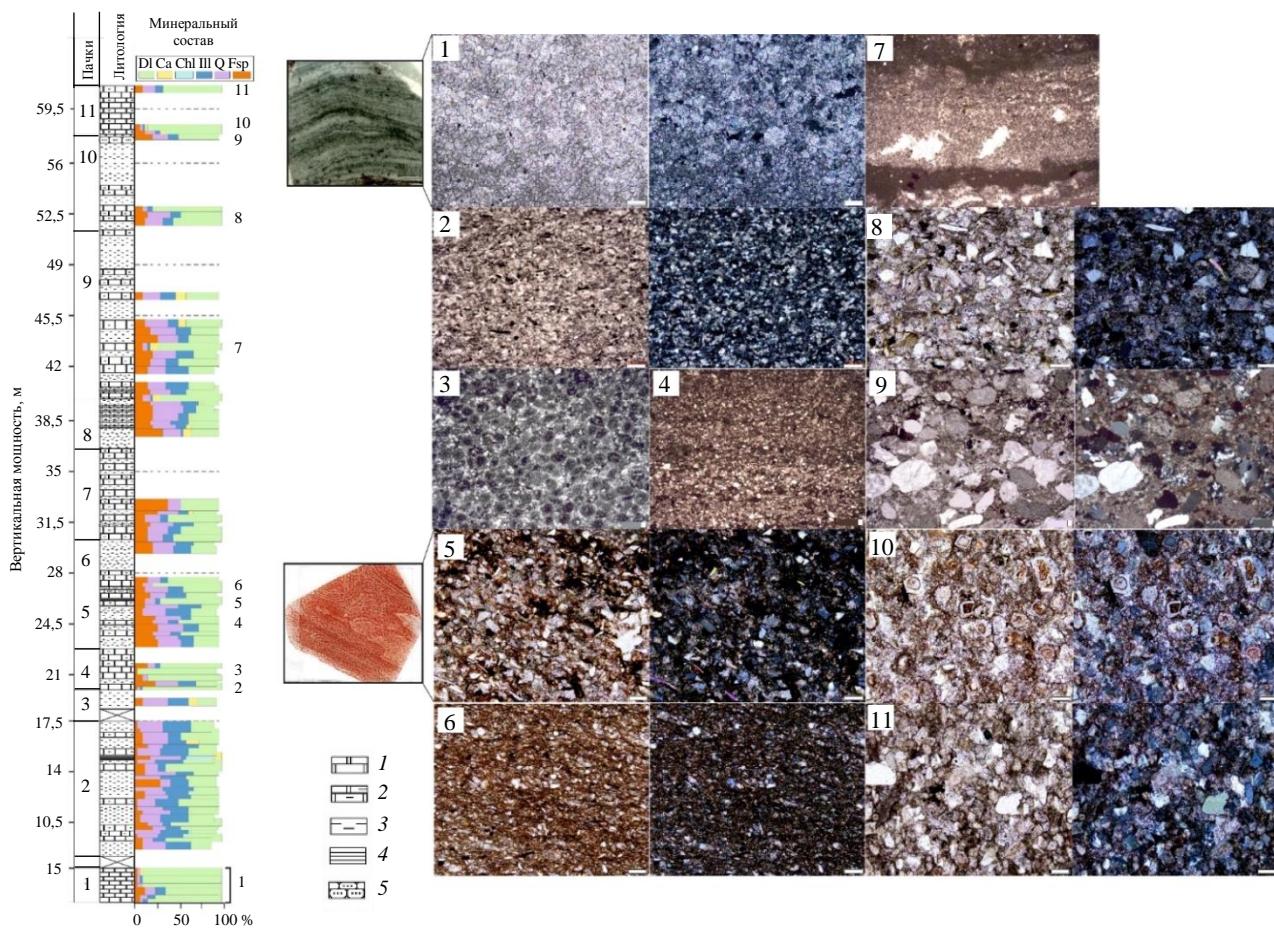


Рис.2. Разрез нижнеэвенкийской подсвиты на р. Подкаменная Тунгуска

Литологическая колонка:

1 – доломиты; 2 – доломиты алевро-глинистые; 3 – алевролиты доломитовые; 4 – аргиллиты доломитистые; 5 – песчаники.

Нормативный минеральный состав [3]:

Q – кварц, минералы кремнезема; Fsp – полевые шпаты; III – иллит и слюды; Chl – хлорит; Ca – кальцит, DI – доломит.

Фотографии шлифов образцов:

1 – SL-1/1; 2 – SL-6/5; 3 – SL-6/8; 4 – SL-6/18; 5 – SL-6/20; 6 – SL-6/22; 7 – SL-6/43; 8 – SL-6/49; 9 – SL-6/51; 10 – SL-6/53; 11 – SL-6/54.

Масштабная линейка 100 мкм. Петрографическую характеристику образцов см. в табл.1

Таблица 2

Элементный состав пород эвенкийской свиты, г/т

Образец	Точка отбора (от основания разреза), м	Li	Sc	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Ba	Pb	Th	U	Hf
SL-1/1	0,01	3,19	4,39	26,13	9,49	18,25	14,47	20,25	147,24	91,49	92,74	0,92	0,01	0,49	0,22
SL-1/5	0,67	26,00	8,39	63,17	15,33	30,29	23,05	32,77	165,87	166,92	439,71	1,58	2,13	0,80	2,26
SL-2/2	1,87	2,12	3,24	18,93	6,81	8,38	7,04	7,37	56,08	129,42	125,85	0,76	0,05	0,49	0,01
SL-3/1	1,53	1,70	3,01	14,71	4,97	6,20	3,00	7,78	6,08	216,64	700,54	0,84	0,07	0,08	0,03
SL-4/1	8,92	61,95	16,00	99,71	17,32	63,88	21,74	61,08	19,61	134,40	250,32	5,99	1,51	1,13	2,35
SL-4/2	9,47	26,75	9,37	77,12	12,33	24,18	8,70	25,81	291,35	131,66	259,23	1,90	2,92	0,62	3,13
SL-4/3	9,67	48,04	12,49	97,53	14,53	48,10	19,00	46,40	437,89	167,52	297,35	7,95	4,08	1,17	2,64
SL-4/4	9,92	59,79	14,55	97,90	16,85	58,27	20,02	57,20	385,28	207,81	358,74	9,02	4,30	1,39	4,68
SL-4/10	11,87	40,07	12,02	72,40	13,82	40,65	12,72	40,99	341,97	175,65	241,25	2,16	3,55	0,95	2,39
SL-5/3	12,92	53,59	17,08	101,93	16,09	53,39	19,54	54,00	34,57	91,95	299,26	5,21	3,20	0,95	2,61
SL-5/7	14,32	8,42	8,00	50,30	12,88	22,12	7,43	25,24	174,57	124,38	82,04	2,09	0,25	1,14	1,68
SL-5/9	15,02	58,98	14,00	118,66	17,51	62,90	22,95	66,24	122,39	126,50	255,86	10,12	2,03	1,42	5,86
SL-5/11	15,72	73,09	12,96	117,93	18,69	76,27	25,00	82,27	35,97	156,24	319,97	7,10	1,28	1,57	4,87
SL-6/2	16,77	58,15	13,05	104,51	16,99	60,94	20,42	63,04	209,90	607,03	286,38	8,49	3,11	1,31	4,88
SL-6/4	19,17	30,19	12,74	111,50	14,34	38,04	17,31	35,98	185,56	232,24	350,70	5,97	2,51	0,92	4,07
SL-6/5	20,22	1,50	3,56	14,07	5,80	8,07	10,24	11,37	88,43	72,66	12,91	0,75	0,04	0,46	0,04
SL-6/6	20,57	42,00	15,70	85,86	13,95	39,70	20,32	45,42	36,51	456,51	338,05	3,19	2,24	0,89	1,84
SL-6/9	21,62	7,74	9,20	48,30	14,60	16,46	18,36	20,76	18,44	110,11	140,01	0,86	0,07	0,53	0,47
SL-6/13	24,42	33,61	12,40	147,34	12,03	38,33	13,40	40,86	247,50	68,88	302,45	2,48	2,33	1,09	5,11



Окончание табл.2

Образец	Точка отбора (от основания разреза), м	Li	Sc	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Ba	Pb	Th	U	Hf
SL-6/17	25,82	37,19	12,56	108,61	12,54	40,32	14,24	42,92	203,93	80,08	325,81	2,83	1,97	0,87	3,62
SL-6/18	26,17	5,43	6,70	44,68	11,59	16,75	6,51	19,92	193,01	88,07	114,24	1,09	0,03	0,71	0,74
SL-6/19	26,52	53,34	11,77	106,33	16,15	51,38	17,34	56,58	273,43	80,77	319,80	2,10	4,22	1,32	4,85
SL-6/20	26,87	23,32	12,19	128,86	10,23	23,52	9,76	24,32	250,45	50,20	227,69	2,36	2,69	0,91	2,59
SL-6/24	30,02	45,93	11,91	109,22	13,96	48,28	16,27	45,55	206,12	74,04	291,90	4,02	2,84	1,17	4,39
SL-6/29	32,17	30,44	16,45	91,34	16,17	31,37	12,46	33,00	40,28	95,34	268,23	2,24	2,15	0,59	2,11
SL-6/34	38,77	24,02	11,87	103,88	12,58	28,22	10,55	26,89	380,10	74,62	269,23	2,16	2,93	0,97	2,37
SL-6/35	39,32	20,74	12,71	114,08	13,62	39,03	11,71	35,79	219,44	76,28	237,78	3,06	1,73	0,92	3,49
SL-6/36	39,67	28,49	11,52	110,00	13,12	39,67	11,52	36,94	92,55	67,36	263,54	1,97	1,00	1,04	2,67
SL-6/39	40,87	39,17	11,14	104,59	15,68	49,61	13,37	41,98	308,93	90,88	327,08	3,25	2,98	1,19	3,51
SL-6/41	42,47	24,13	10,80	82,85	13,87	34,13	10,60	31,73	222,74	94,48	238,43	2,43	2,13	4,91	2,98
SL-6/42	43,02	28,80	10,86	87,89	12,35	41,69	11,65	38,90	247,42	64,25	275,80	3,00	2,33	0,96	3,37
SL-6/45	44,47	23,74	11,48	93,35	12,17	38,63	9,33	29,87	255,29	78,39	294,20	1,99	2,66	0,95	3,79
SL-6/48	51,92	11,55	7,06	60,76	7,77	16,57	5,61	15,68	166,17	38,17	208,56	1,22	1,15	0,76	0,83
SL-6/49	52,47	8,90	8,45	108,24	9,07	18,25	7,60	15,26	129,22	59,64	159,11	1,78	0,91	0,73	2,22
SL-6/51	57,87	16,42	9,85	73,17	11,40	23,51	10,77	22,03	158,86	77,25	562,44	2,07	0,94	0,87	1,99
SL-6/54	61	11,42	7,41	58,23	7,70	12,07	4,57	11,50	193,18	55,71	172,27	1,60	1,78	0,76	0,84
Образец	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Ce/Ce*	Eu/Eu*
SL-1/1	0,25	0,41	0,06	0,21	0,04	0,07	0,05	0,03	0,14	0,02	0,02	0,10	0,03	0,77	6,63
SL-1/5	4,94	10,16	1,37	5,05	1,00	1,29	1,02	0,68	3,44	0,62	1,85	1,43	0,20	0,89	5,99
SL-2/2	0,23	0,38	0,06	0,23	0,04	0,07	0,05	0,04	0,06	0,00	0,07	0,15	0,03	0,71	7,80
SL-3/1	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,04	0,08	0,10	0,08	0,09	0,08	0,21	4,93
SL-4/1	6,07	16,91	2,02	8,83	1,89	0,46	1,99	0,34	1,84	0,28	1,10	1,00	0,08	1,08	0,58
SL-4/2	6,99	14,73	1,94	7,39	1,70	2,11	1,69	1,34	6,78	1,30	3,75	3,15	0,47	0,91	2,60
SL-4/3	7,26	13,87	1,76	6,42	1,26	1,51	1,28	0,91	4,76	0,92	2,82	2,47	0,37	0,88	1,89
SL-4/4	6,45	13,55	1,76	6,60	1,33	1,62	1,38	1,00	5,29	1,04	3,14	2,84	0,43	0,91	2,05
SL-4/10	6,48	13,58	1,79	6,72	1,43	1,77	1,46	1,15	5,88	1,15	3,28	2,74	0,40	0,91	2,22
SL-5/3	10,28	23,28	2,63	11,12	2,30	0,55	2,49	0,41	2,10	0,33	1,25	1,12	0,10	1,02	0,71
SL-5/7	2,70	4,69	0,76	2,86	0,57	0,69	0,56	0,35	1,85	0,32	0,84	0,55	0,07	0,74	5,73
SL-5/9	1,80	5,09	0,66	2,65	0,67	0,74	0,69	0,60	3,87	0,79	2,49	2,45	0,34	1,04	0,93
SL-5/11	2,09	5,37	0,78	3,21	0,72	0,91	0,71	0,52	3,14	0,65	2,00	1,95	0,30	0,93	1,11
SL-6/2	4,13	9,69	1,29	4,96	1,11	1,40	1,12	0,91	5,01	1,01	3,01	2,71	0,40	0,95	1,74
SL-6/4	7,15	27,99	4,78	18,57	2,80	2,84	2,50	1,45	5,30	0,97	3,07	2,23	0,33	0,96	3,32
SL-6/5	0,13	0,21	0,08	0,13	0,07	0,01	0,07	0,06	0,01	0,01	0,09	0,16	0,03	0,41	0,45
SL-6/6	8,75	20,01	2,27	9,58	1,91	0,47	2,08	0,33	1,68	0,24	0,94	0,83	0,05	1,02	0,61
SL-6/9	2,47	4,90	0,70	3,13	0,51	0,10	0,58	0,06	0,35	0,02	0,14	0,08	0,06	0,84	0,87
SL-6/13	4,49	10,23	1,28	4,74	0,95	1,04	0,93	0,62	3,33	0,63	1,84	1,52	0,22	0,97	1,28
SL-6/17	2,94	7,60	1,02	3,91	0,86	1,04	0,85	0,63	3,59	0,71	2,09	1,84	0,27	0,98	1,28
SL-6/18	0,52	0,99	0,13	0,43	0,08	0,11	0,10	0,01	0,23	0,04	0,03	0,04	0,02	0,86	5,61
SL-6/19	7,56	14,01	1,76	6,36	1,20	1,41	1,25	0,85	4,24	0,84	2,51	2,02	0,30	0,88	1,77
SL-6/20	4,41	9,30	1,28	4,71	1,00	1,17	1,03	0,75	3,98	0,75	2,12	1,71	0,24	0,89	1,47
SL-6/24	4,76	10,17	1,34	5,01	1,11	1,34	1,11	0,86	4,74	0,93	2,70	2,40	0,36	0,91	1,66
SL-6/29	17,09	52,06	7,85	32,80	5,11	1,13	4,80	0,65	2,34	0,35	1,37	1,01	0,08	0,97	1,36
SL-6/34	5,73	12,70	1,82	6,71	1,33	1,57	1,33	0,97	4,83	0,92	2,70	2,21	0,32	0,89	1,94
SL-6/35	2,97	8,13	1,10	3,96	0,68	0,74	0,67	0,34	1,62	0,36	0,85	0,56	0,08	1,00	0,91
SL-6/36	2,56	6,65	1,07	4,10	0,91	1,06	0,88	0,63	3,50	0,68	1,99	1,62	0,24	0,88	1,28
SL-6/39	8,52	15,77	2,15	7,90	1,61	1,86	1,57	1,16	5,85	1,19	3,21	2,59	0,37	0,84	2,27
SL-6/41	5,81	12,24	1,75	6,42	1,31	1,59	1,59	0,95	4,84	0,88	2,48	1,84	0,25	0,87	2,17
SL-6/42	5,22	10,95	1,38	5,16	1,04	1,23	1,01	0,73	3,84	0,72	2,00	1,59	0,22	0,93	1,50
SL-6/45	5,55	11,48	1,65	6,12	1,19	1,36	1,17	0,80	4,04	0,74	2,10	1,63	0,25	0,86	1,67
SL-6/48	2,25	3,61	0,75	2,79	0,53	0,69	0,55	0,33	2,01	0,35	0,91	0,66	0,09	0,63	6,03
SL-6/49	1,99	4,73	0,65	2,41	0,52	0,64	0,52	0,33	1,94	0,35	0,89	0,59	0,08	0,94	5,83
SL-6/51	2,17	4,38	0,58	2,08	0,43	0,67	0,52	0,27	1,66	0,27	0,77	0,58	0,07	0,89	6,68
SL-6/54	4,68	7,84	1,33	5,02	1,04	1,29	1,04	0,77	3,98	0,74	2,06	1,48	0,21	0,71	5,83

Примечание. Голубым отмечены карбонатные литотипы (на основании исследования в шлифах); $Eu/Eu^* = [Eu_{UCC}/(Sm_{UCC}^*Gd_{UCC})^{0.5}]$; $(Ce/Ce^*)_{UCC} = [2Ce_{UCC}/(La_{UCC} + Pr_{UCC})]$.

Для анализа и визуализации статистических данных построена тепловая карта с кластеризацией методом полной связи (рис.3). Цветом показана величина z -оценки для каждого образца по тому или иному элементу. Параметр z -оценка (z -score, стандартизированная оценка) дает

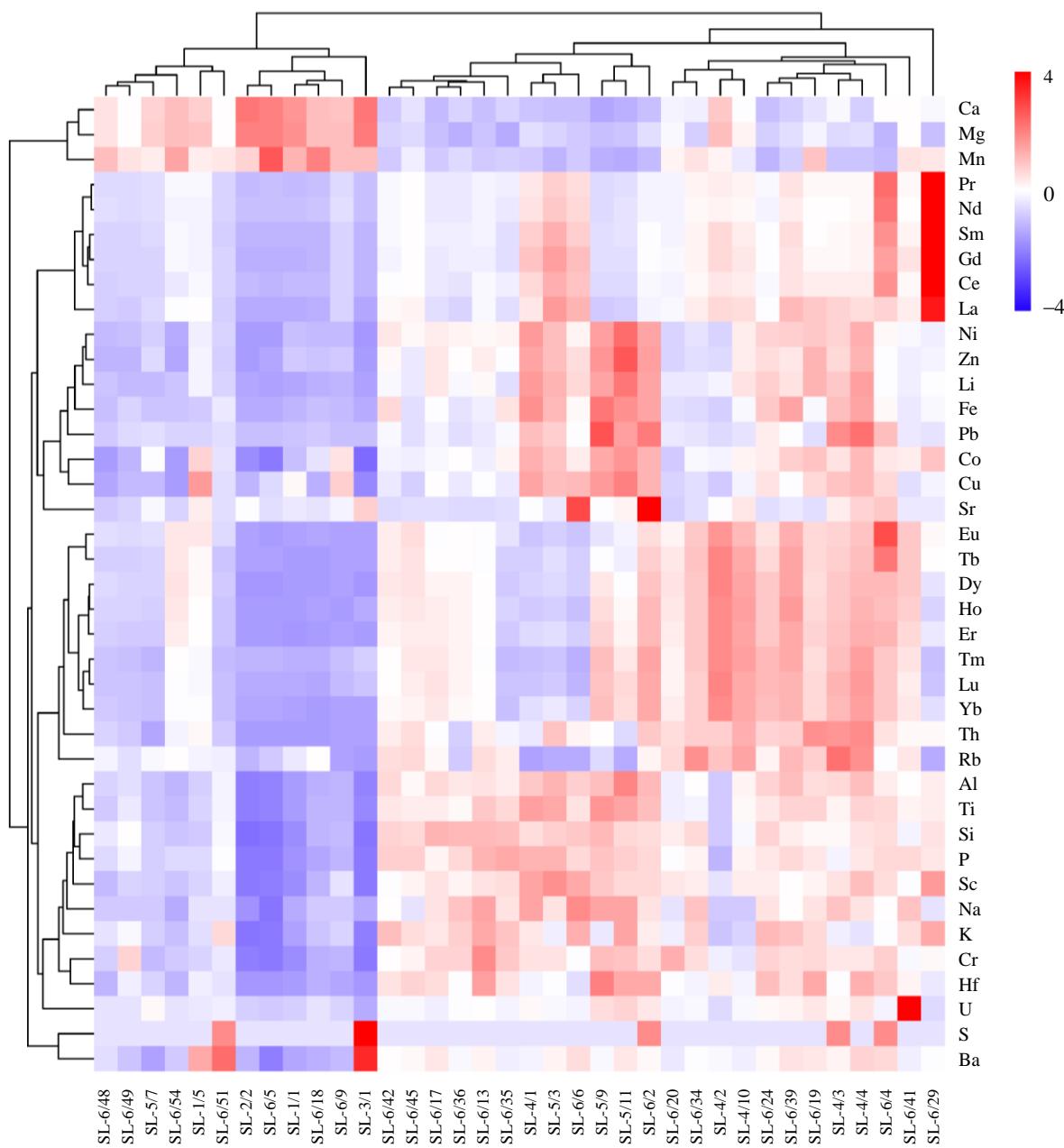


Рис.3. Тепловая карта химического состава изученных пород нижнеэвенкийской подсвиты р. Подкаменная Тунгуска

представление о том, насколько далека от среднего значения величина в точке массива данных. Для расчета z -оценки, помимо значения для каждого отдельного образца, используются среднее значение μ и стандартное отклонение σ совокупности. Знак z -оценки показывает, в какую половину распределения попадает показатель – положительный знак (или его отсутствие) указывает, что показатель выше среднего и находится в правой части распределения, отрицательный знак означает, что оценка ниже среднего значения и находится в левой части распределения. Величина полученного числа в единицах стандартных отклонений показывает, насколько далеко оценка находится от центра или среднего значения. Чем менее насыщенный оттенок цвета в точке и ближе к нулю значение оценки, тем ближе значение к среднему по выборке. Состав выборки: доломиты со строматолитовой текстурой (три образца), доломиты комковато-сгустковые (два образца), доломиты замещения кристаллические без сохранения первичных структур протолита (один образец), доломиты замещения разнокристаллические с реликтовой алевро-пелитовой структурой протолита (два образца), доломитистые аргиллиты и доломитовые алевролиты (23 образца), песчаники и алевро-песчаники аркозовые с базальным доломитовым цементом (пять образцов).



На тепловой карте четко визуально идентифицируется наличие аномалий среди выборки – значений, превышающих среднее по выборке для данного химического элемента.

Рассматриваемые элементы в породах можно сгруппировать следующим образом:

- Группа 1 – Ca, Mg, Mn. Связаны нахождением в доломите (Mn – характерная изоморфная примесь).
- Группа 2 – ЛРЗЭ, кроме Eu + Gd, Ni, Zn, Li, Fe, Pb, Co, Cu, Sr.
- Группа 3 – ТРЗЭ + Eu, Th, Rb, Al, Ti, Si, P, Sc, Na, K, Cr, Hf, U.

Концентрации элементов групп 2 и 3 находятся в зависимости от количества и состава терригенной составляющей, что также выражается в отрицательной корреляции между элементами группы 1 и групп 2, 3.

• Группа 4 – S, Ba. Повышенные содержания в единичных пробах, вероятно, указывают на наличие в них барита.

Помимо группировки элементов важно обратить внимание на кластеризацию образцов. В зависимости от вариаций содержания доломита и терригенной составляющей выделяются две группы образцов. В первую группу попадают как доломиты, так и песчаники, алевро-песчаники аркозовые с базальным доломитовым цементом (SL-6/48, SL-6/49, SL-6/51), во вторую – алевролиты, аргиллиты и песчаники. Дальнейшее нормирование на стандарт целесообразно выполнять исходя из этого разделения, используя кларки для карбонатных либо глинистых и песчаных пород.

Изотопный состав углерода и кислорода карбонатов ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$). Величины $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ в образцах приведены в табл.3, на рис.4. Проанализированные породы характеризуются вариациями $\delta^{13}\text{C}$ от $-1,4$ до $-0,3\text{‰}$ и $\delta^{18}\text{O}$ от $-7,3$ до $-5,7\text{‰}$. В хемостратиграфии позднего протерозоя и раннего палеозоя изотопный состав кислорода показателен как индикатор постседиментационных изменений и сохранности С-изотопной системы. Для известняков эмпирически установлено, что в ходе диагенетических и более поздних преобразований концентрации Mn и Fe в них увеличиваются, а содержание Sr уменьшается, поэтому для определения сохранности С-изотопной системы используются следующие критерии – $\text{Mn/Sr} \leq 4$, $\text{Fe/Sr} \leq 10$, $\delta^{18}\text{O} \geq -10\text{‰}$ VPDB [16-18]. Для доломитов предложены иные критерии – $\text{Mn/Sr} \leq 6$, $\text{Fe/Sr} \leq 15$ [17, 19].

Таблица 3

Изотопный состав С и О доломитов нижнеэоценской подсвиты

Образец	Литотип	$\delta^{13}\text{C}$ (VPDB), ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (VPDB), ‰	Образец	Литотип	$\delta^{13}\text{C}$ (VPDB), ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (VPDB), ‰
SL-1/3	1	-1,4	-7,2	SL-6/5	4	-0,9	-6,1
SL-1/6	1	-1,2	-6,9	SL-6/21	4	-0,4	-6,5
SL-3/1	1	-0,3	-6,9	SL-6/22	4	-0,3	-6,4
SL-6/43	1	-1,4	-7,3	SL-6/28	4	-0,5	-6,3
SL-2/1	2	-1,1	-7,0	SL-6/50	4	-1,1	-6,3
SL-2/2	2	-1,2	-6,8	SL-6/53	4	-1,4	-6,3
SL-6/8	3	-0,8	-6,5	SL-6/54	4	-0,7	-5,7
SL-6/18	3	-0,5	-6,5				

Примечание. Литотипы: 1 – доломиты строматолитовые; 2 – доломиты кристаллические без сохранения первичных структур протолита; 3 – доломиты комковато-сгустковые; 4 – доломиты замещения разнокристаллических с реликтовой алевро-пелитовой структурой протолита.

Доломиты со строматолитовой текстурой характеризуются величинами Mn/Sr от 5 до 12,5, Fe/Sr от 16,8 до 70, доломит замещения кристаллический без сохранения первичных структур протолита – Mn/Sr = 7,8, Fe/Sr = 23,2. Отношения в доломитах комковато-сгустковых для Mn/Sr составляют 9,8-15,2, для Fe/Sr – 69,2-100,1; в доломитах замещения разнокристаллических с реликтовой алевро-пелитовой структурой протолита – Mn/Sr 20,6-21,3, Fe/Sr 49,1-180,8. Для изучаемых доломитов нижнеэоценской подсвиты указанные соотношения Sr с другими элементами малоинформативны из-за высокого содержания алюмосиликокластики (глин, слюд, ПШ, содержащих Sr в виде примеси и накапливающих радиогенный Sr).

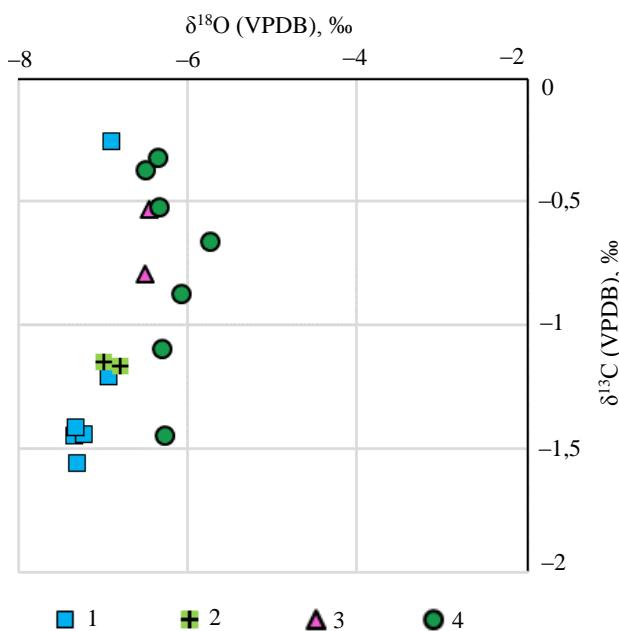


Рис.4. График соотношения величин $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ доломитов нижнеэвенкийской подсвиты

1 – со строматолитовой текстурой; 2 – замещения кристаллические без сохранения первичных структур протолита;
3 – комковато-сгустковые; 4 – замещения разнокристаллические с реликтовой алевро-пелитовой структурой протолита

признаки диагенеза, гипергенеза и других постседиментационных изменений, изотопный состав углерода и кислорода в целом соответствует сводным кривым эволюции изотопного состава С и О для морских карбонатных пород кембрия.

Обсуждение результатов

Генетическая интерпретация выделенных литотипов. Среди генетических особенностей выделенных литотипов отмечается широкое развитие доломитов со строматолитовой текстурой и/или бактериальными структурами (остатки кальцимикробов *Renalcis*, микроонколиты, катаграфии, комки, сгустки). В отдельных литотипах присутствуют признаки субаэральной экспозиции осадка в виде слабо выраженного микрокарста (SL-1/6 (см. рис.2, шлиф 1), SL-6/43 (см. рис.2, шлиф 7), а также типичные для приливно-отливных обстановок фенестровые структуры (SL-6/43). В карбонатно-терригенных разностях прослеживается изменение гранулометрического состава алевро-песчаной компоненты, ее распределения по слойкам (SL-6/18 (см. рис.2, шлиф 4), обогащение отдельных слоев средне-крупнопесчаным алюмосиликокластическим материалом (SL-6/51 (см. рис.2, шлиф 9) или тонкопесчано-алевритовым слюдистым материалом (SL-6/54 (см. рис.2, шлиф 11), наличие плохо выраженной косой и градационной слоистости, штриховатой горизонтальной текстуры, а также конседиментационных деформаций (SL-6/20 (см. рис.2, шлиф 5), свидетельствующих о вариациях гидродинамического режима и способа накопления осадка, усиление привноса терригенного материала или перераспределения его в бассейне седиментации. В верхней части разреза (SL-6/49, SL-6/53 (см. рис.2, шлифы 8, 10) обнаруживается гипс. Восстанавливаются обстановки седиментации – сублиторальные, литоральные (приливно-отливные), возможно, субхальные (в верхней части разреза).

Постседиментационные изменения пород связаны с процессами разностадийной доломитизации – ранней, сингенетической, наблюданной в литотипах доломитов со строматолитовой текстурой и/или бактериальными структурами, и более поздней, выделяемой авторами в литотипах доломитов замещения и алевро-песчаников с доломитовым цементом. В первом случае доломит генерируется и осаждается в щелочных условиях сингенеза – раннего диагенеза, обусловленных

На диаграмме $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ (рис.4) точки составов доломитов четырех описанных литотипов не образуют обособленных скоплений, но отмечается схожий изотопный состав доломитов со строматолитовой текстурой и доломитов замещения кристаллических без сохранения первичных структур протолита. Для этих двух литотипов $\delta^{18}\text{O}$ находится в пределах от -6,8 до -7,3 %. По $\delta^{13}\text{C}$ выделяется образец SL-3/1, для остальных доломитов этих групп данный параметр находится в интервале от -1,4 до -1,1 %. Доломиты замещения разнокристаллические с реликтовой алевро-пелитовой структурой протолита отличаются относительно широкими вариациями $\delta^{13}\text{C}$ – от -1,4 до -0,3 %. Промежуточное положение на диаграмме занимают доломиты комковато-сгустковые.

Значения $\delta^{13}\text{C}$ в образцах доломитов эвенкийской свиты лежат в пределах зарегистрированного диапазона значений $\delta^{13}\text{C}$ кембрийских осадочных карбонатов от -2,5 до 2 % PDB [20, 21], но сохранность изотопной системы спорна. Таким образом, несмотря на



жизнедеятельностью низших организмов, такой механизм доломитообразования подробно описан в статьях [22-24]. Во втором случае доломиты обладают разнокристаллической структурой, и в отдельных образцах отсутствуют признаки замещаемой породы (SL-2/2). В образцах SL-6/5, SL-6/22, SL-6/53, SL-6/54 отмечается алевро-пелитовая первичная структура, примесь песчаного материала. Новообразованный доломит массивный, неравномерно распределенный на разных участках. Кристаллы субдиоморфные зональные с одной-тремя зонами роста, разделенными пленками железо-содержащего минерала (гематита?), что отражает несколько этапов кристаллизации. В песчаниках и алевро-песчаниках с базальным доломитовым цементом (SL-6/20, SL-6/49, SL-6/51) структурные признаки вторичного доломита аналогичны, в единичных случаях прослеживается коррозия доломитовыми кристаллами силикатных обломков.

Геохимия доломитов. Содержание РЗЭ в доломитах может дать информацию о составе доломитообразующего флюида. Установлена существенная роль океанических водных растворов, вероятно, обогащенных рудными веществами из гидротермальных флюидов, при формировании неоархейских Мальманийских доломитов рудопроявления в регионе Хайфельдав северо-западной провинции ЮАР [25, 26]. Исследование содержаний РЗЭ в марганцевых конкрециях и в подстилающих Мальманийских доломитах позволило авторам проследить их тесную генетическую связь, а также обосновать генетическую модель многофакторного процесса марганцевого рудогенеза на исследуемой территории [25, 26].

Установлено, что распределение РЗЭ в первичных доломитах наследуется в основном из морской воды и/или морских рассолов и не меняется относительно предшествующих им парагенетических известняков [27]. Доломиты, измененные метеорными водами или гидротермальными растворами, должны обладать отличающимся от морской воды распределением РЗЭ [28-30].

Наряду с традиционным нормированием на NASC или PAAS, оправдано нормирование доломитов на состав современной морской воды [30, 31]. Процесс перекристаллизации может привести к изменению суммарных концентраций РЗЭ, но не меняет общее распределение РЗЭ, включая обогащение Ce_{SN} (SN – seawater normalized) и ЛРЗЭ [30]. Воздействие же метеорных вод может привести к изменению величины аномалии Ce, а влияние гидротермальных флюидов отражается в сложных флюктуациях на спайдер-диаграмме РЗЭ и на возникновении положительной аномалии Eu [30].

Состав доломитов эвенкийской свиты нормирован на современную морскую воду [32] и PAAS [33], спектры приведены на рис.5. Доломиты имеют выраженную положительную Ce-аномалию при нормировании на состав морской воды. Низкие содержания Ce в современном океане в ряде случаев могут привести к положительным аномалиям Ce в нормализованных на морскую воду спектрах [30]. Чтобы проверить, действительно ли существует положительная аномалия Ce, используют следующий метод [34]: рассчитывается $(Pr/Pr^*)_{SN}$ [$2Pr_{SN}/(Ce_{SN} + Nd_{SN})$] и сравнивается с $(Ce/Ce^*)_{SN}$ [$2Ce_{SN}/(La_{SN} + Pr_{SN})$], где SN – морская вода. Если $(Pr/Pr^*)_{SN} < 1$, то существует положительная аномалия Ce_{SN} ; если $(Pr/Pr^*)_{SN} > 1$, существует отрицательная аномалия Ce_{SN} . Для изучаемых доломитов $(Ce/Ce^*)_{SN}$ варьируется от 2,0 до 10,3 (в среднем 7,7), $(Pr/Pr^*)_{SN} = 0,24-0,69$, кроме образца SL-3/1, где $(Pr/Pr^*)_{SN} = 1,56$. Для строматолитового доломита SL-3/1 выявлена отрицательная Ce-аномалия, и можно предположить, что на его формирование оказали влияние метеорные воды. Цериевая аномалия в этом образце также может быть следствием седиментации в более богатых кислородом обстановках. При нормировании по верхней коре (при расчете $(Ce/Ce^*)_{UCC} = [2Ce_{UCC}/(La_{UCC} + Pr_{UCC})]$), где UCC – верхняя континентальная кора [35]), наблюдается отрицательная Ce-аномалия – 0,21-0,89.

Величина Nd_{SN}/Y_{BSN} варьируется от 0,3 до 15,07, что указывает на обогащение ЛРЗЭ за счет терригенной примеси. Отношение ненормированных содержаний $\Sigma LPr3\text{Э}$ к $\Sigma TPr3\text{Э}$ в доломитах составляет от 0,82 (SL-3/1) до 8,72. Ранее установлено [36], что в карбонатных породах южного складчатого обрамления Сибирской платформы с увеличением доли обломочного материала возрастает доля ЛРЗЭ, а с ее уменьшением падает общее содержание РЗЭ, но возрастает доля ТРЗЭ.

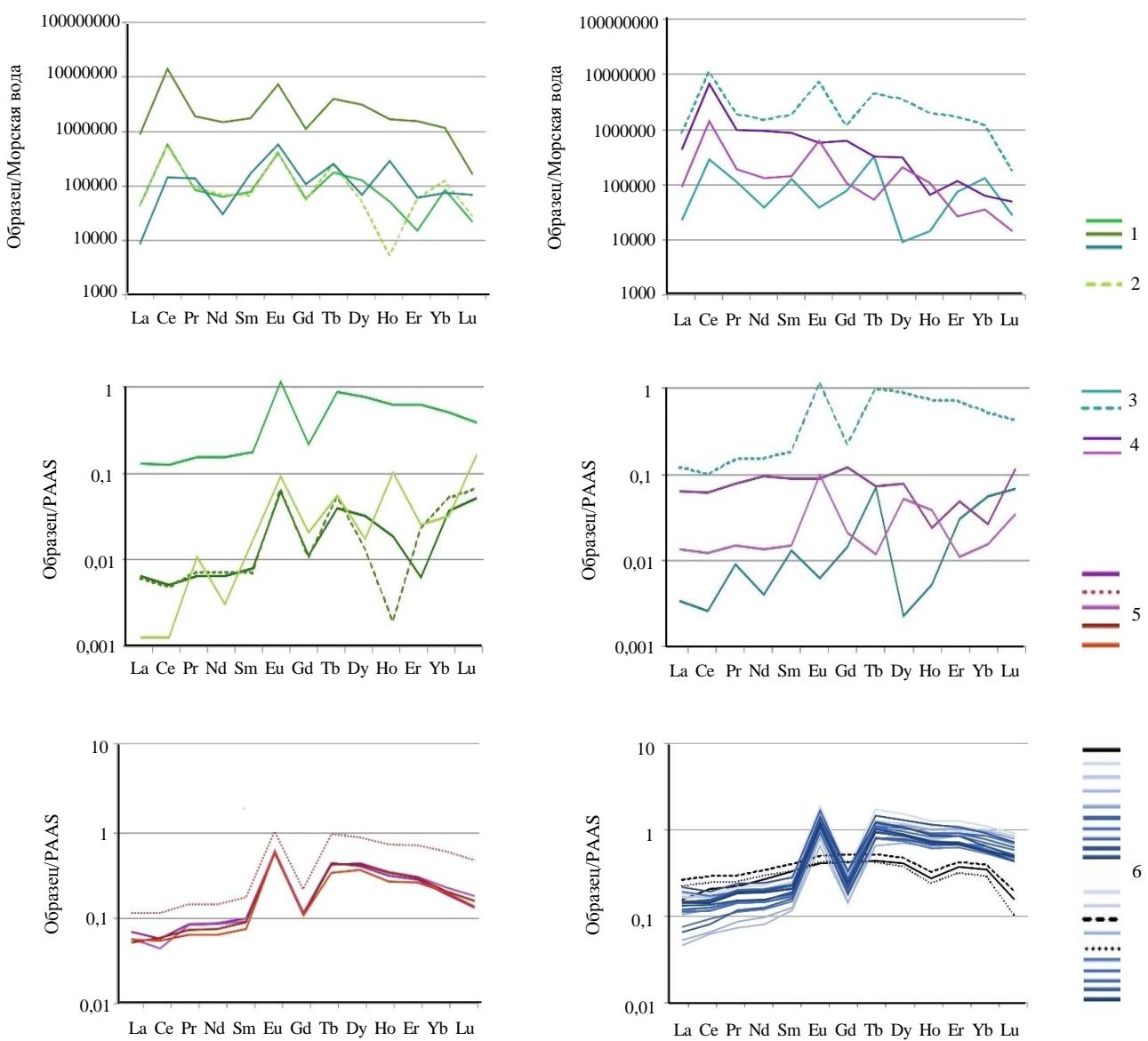


Рис.5. Спайдер-диаграммы распределений РЗЭ для пород нижнеэвенкийской подсвиты

1 – доломиты со строматолитовой текстурой; 2 – доломиты замещения кристаллические без сохранения первичных структур протолита; 3 – доломиты комковато-сгустковые; 4 – доломиты замещения разнокристаллические с реликтовой алевро-пелитовой структурой протолита; 5 – песчаники и алевро-песчаники аркозовые с базальным доломитовым цементом; 6 – аргиллиты доломитистые и алевролиты доломитовые. Нормативные содержания в морской воде по [32], PAAS – [33]

При нормировании на состав современной морской воды и на концентрации в хондрите наблюдается выраженная положительная Eu-аномалия, исключение – образцы SL-6/5 и SL-6/9 с отрицательной Eu-аномалией. При нормировании на состав верхней континентальной коры величина $\text{Eu/Eu}^* = [\text{Eu}_{\text{UCC}}/(\text{Sm}_{\text{UCC}}^* \cdot \text{Gd}_{\text{UCC}})^{0.5}]$ составляет 0,45 и 0,87 для образцов SL-6/5 и SL-6/9, для остальных исследуемых доломитов – 4,93-6,63. Для раннепалеозойских карбонатных отложений шельфа обрамления Сибирской платформы, напротив, характерно наличие выраженной отрицательной Eu-аномалии [36, 37]. Причины такого обогащения карбонатов стоит рассмотреть подробнее.

Европий способен встраиваться в кристаллическую решетку кальцита [38, 39]. Причиной положительных аномалий Eu_{CN} (CN – chondrite-normalized) в прожилках доломита исследователи называют состав первичного флюида [40]. Продукты выщелачивания с положительными аномалиями Eu могут образовываться в результате предварительной мобилизации Eu в ходе высокотемпературных (>200 °C) процессов изменения пород, содержащих Ca-плагиоклазы, когда Eu³⁺



восстанавливается до Eu^{2+} [41]. Eu^{2+} , адсорбированный на минеральных поверхностях и в межкристаллическом пространстве, после охлаждения и термохимического окисления до Eu^{3+} легко доступен для ремобилизации в водной среде [41, 42]. Таким образом, обогащение европием часто рассматривается как индикатор влияния гидротермальных флюидов на осадочную систему.

Помимо восстановительных условий в диагенезе и воздействия флюидов с высоким содержанием Eu, положительная аномалия в валовых пробах может быть следствием вклада обломочной примеси. Для карбонатных пород со значительным содержанием терригенной примеси при нормировании по сланцу нередко характерны «сглаженные» спектры без явных аномалий, а сумма РЗЭ коррелирует с нерастворимым остатком [43, 44]. Такие особенности наблюдаются для карбонатных пород рифея – венда Байкитской антеклизы [44], а среди исследуемых образцов присутствуют карбонаты с Eu-аномалией. Автор работы [44] вслед за авторами статьи [40] связывает ее возникновение либо с восстановительными обстановками формирования, либо с присутствием в породах Ca-плагиоклазов.

При нормировании доломитов нижнеэwenkской подсвиты на PAAS (рис.5) также выделяется положительная аномалия Eu (кроме SL-6/9). В то же время в доломитах со строматолитовой текстурой ($\text{Eu/Eu}^* = 4,9\text{-}6,6$) присутствует тонкорассеянная примесь ПШ и слюд. В доломите замещения кристаллическим (SL-2/2, $\text{Eu/Eu}^* = 7,8$) наблюдаются остаточные зерна мусковита и пластика. Для слюд и пластика нередко характерны примеси Eu. Наибольший коэффициент корреляции (выборка только карбонатных пород) связывает Eu с Li (0,83) и Th (0,95), а также с другими ЛРЗЭ. Возникновение положительной Eu-аномалии, вероятно, связано с Eu-содержащими минералами в терригенной составляющей доломитов и смешанных пород, а не с гидротермальными растворами. При этом не наблюдается прямой зависимости содержания РЗЭ от количества терригенной примеси, поэтому нельзя исключать влияние восстановительных условий или состава доломитообразующего раствора на распределение РЗЭ в доломитах.

Относительно кларка для карбонатных пород [45] изучаемые отложения заметно обогащены Co, Cr, Sc, Rb и обеднены Cu, Zn, Li, Ba (кроме образца SL-1/5, для которого характерно обогащение этими элементами), а также Pb и Sr (рис.6, а). В основном относительные вариации обеднения/обогащения характеризуют элементный состав терригенной примеси. Ввиду присутствия в песчаниках до 40 % доломитового цемента и расположения в одном кластере с доломитами образцы SL-6/51 и SL-6/49 также нормировались по карбонатным породам.

Геохимия карбонатно-терригенных пород. При нормировании на PAAS для доломитистых аргиллитов, доломитовых алевролитов, песчаников и алевро-песчаников (рис.5) в основном характерно обогащение ТРЗЭ относительно ЛРЗЭ (кроме Eu). В образцах SL-4/1, SL-5/3, SL-6/6, SL-6/29, напротив, наблюдается обогащение ЛРЗЭ относительно ТРЗЭ.

Так же, как и в карбонатных литотипах, выявлена положительная Eu-аномалия, кроме образцов SL-4/1, SL-5/3, SL-6/6, SL-6/29. При нормировании на состав верхней континентальной коры величина Eu/Eu^* для доломитистых аргиллитов и доломитовых алевролитов составляет от 0,58 (SL-4/1) до 3,32 (SL-6/4), в среднем – 1,6. Величина Ce/Ce^* варьируется от 0,84 до 1,08. Сумма РЗЭ составляет от 22,1 (SL-6/35) до 126,7 (SL-6/29) г/т. Отношение ненормированных содержаний $\Sigma\text{LRZ}\text{Э}$ к $\Sigma\text{TRZ}\text{Э}$ от 1 (SL-5/9) до 10,89 (SL-6/29), среднее – 3,06.

Для песчаников и алевро-песчаников при нормировании на состав верхней континентальной коры величина Eu/Eu^* находится в пределах 5,73-6,68, а Ce/Ce^* – 0,63-0,94. Сумма РЗЭ от 14,5 до 16,85 г/т. Отношение ненормированных содержаний ЛРЗЭ к ТРЗЭ от 2,13 до 2,68 (сумма ЛРЗЭ возрастает за счет Eu).

Относительно кларка для глин и глинистых сланцев [45] изучаемые породы обеднены Cu, Zn, Pb, Ba, Th, U, как и описанные карбонатные литотипы, кроме образца SL-6/41, слабо обогащенного ураном. Наблюдаются значительное обогащение отдельных образцов Rb и Sr, а концентрации Co, Ni, Cr, Sc близки к кларковым с незначительным обеднением или обогащением этими элементами (рис.6, б).

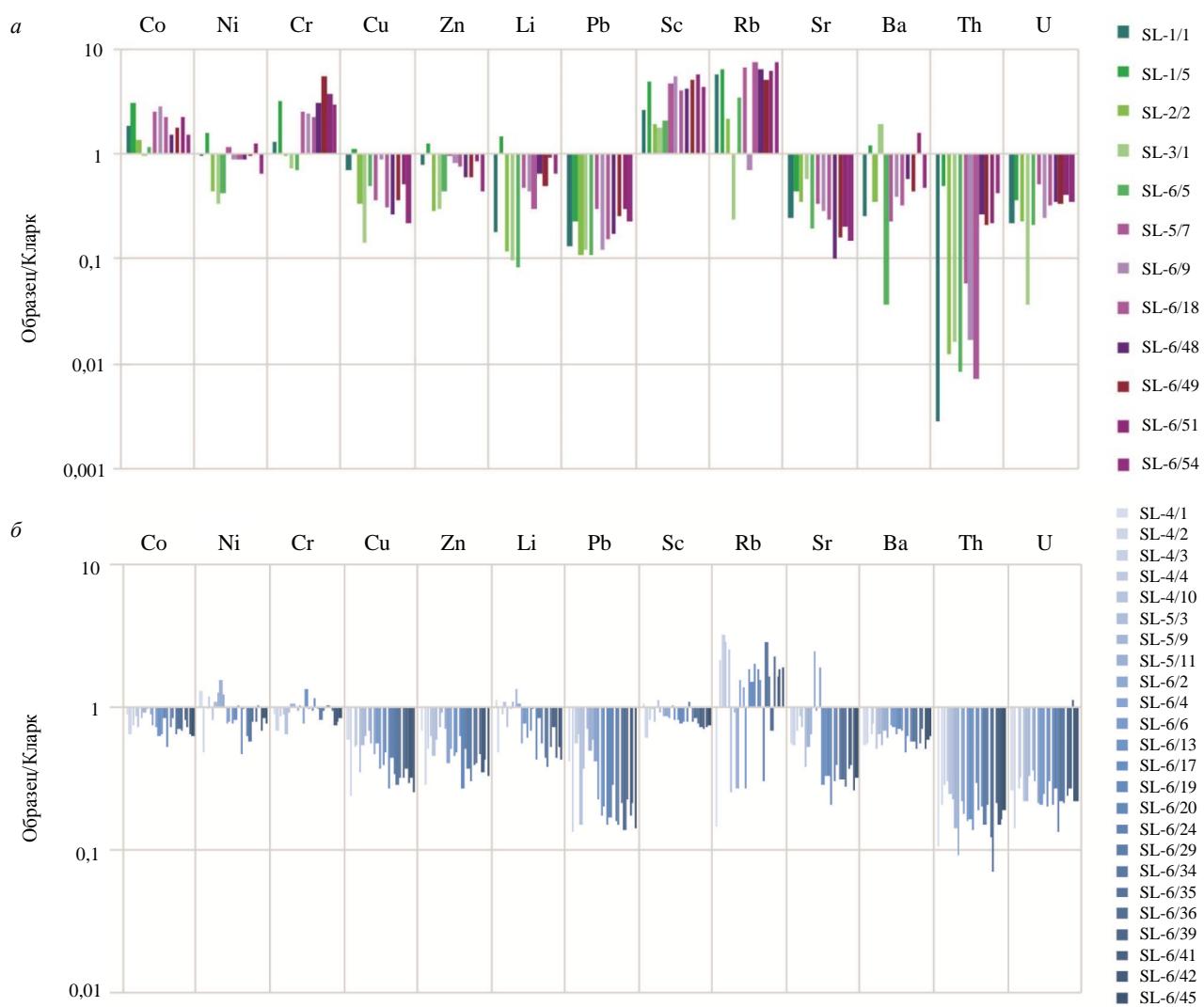
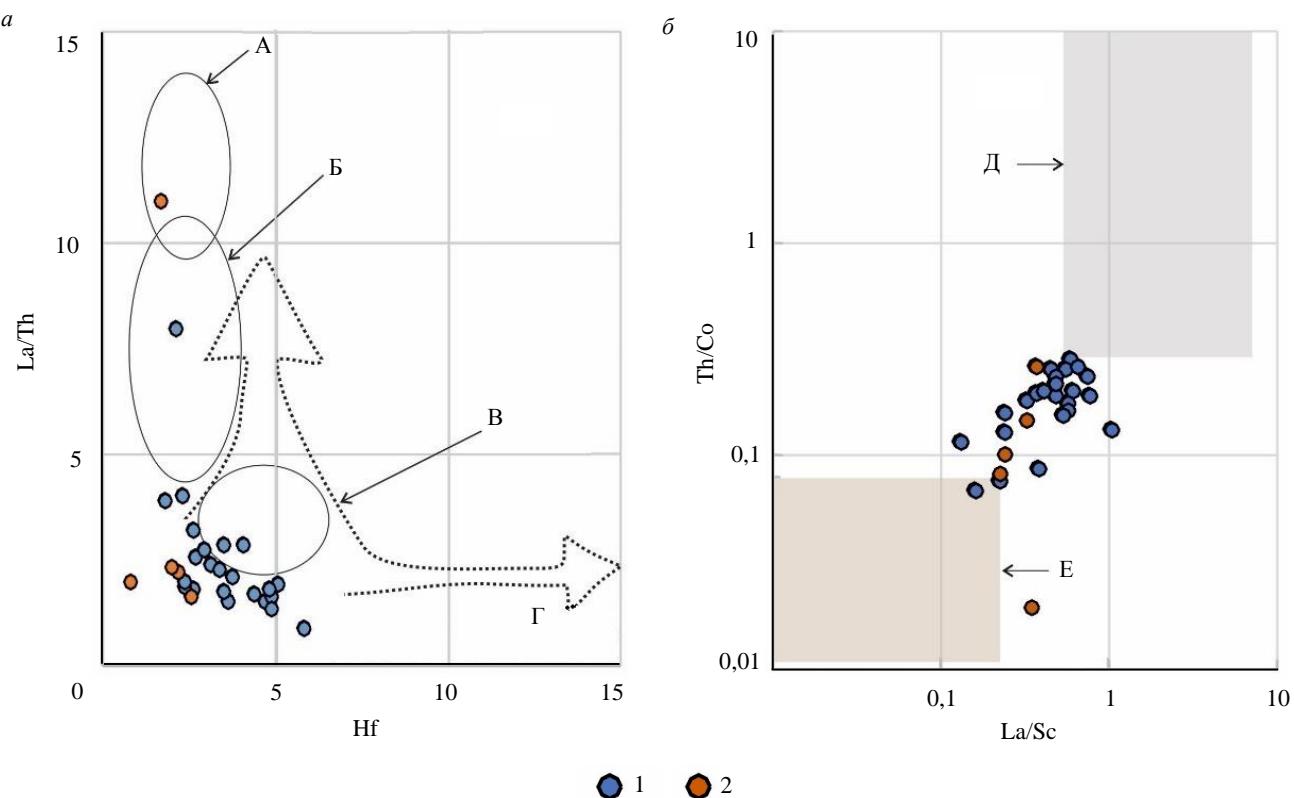


Рис.6. Нормализованные на кларк содержания элементов-примесей: *a* – в карбонатных породах (кларк для карбонатных пород [45]); *б* – в карбонатно-терригенных породах эвенкийской свиты (кларк для глин и глинистых сланцев [45])

Диаграмма Hf-La/Th [46] позволяет разграничить поля состава осадочных образований, сформированных за счет разрушения океанических островов, сложенных толеитовыми базальтами А, андезитами Б, либо кислыми вулканитами В, а также показывает области смешения кластики из этих типов пород Г (рис.7, *a*). На рис.7, *a* точки состава карбонатно-терригенных пород эвенкийской свиты попадают в поле фельзитовых источников. Выделяется образец SL-6/29, попадающий в поле образований, сформированных при разрушении островных дуг с преобладанием андезитов. Для этого образца характерно максимальное среди выборки отношение ЛРЗЭ/ТРЗЭ и общая сумма РЗЭ. Образец SL-5/7 попадает в поле образований, сформированных за счет разрушения океанических островов с преобладанием толеитовых базальтов. На диаграмме La/Sc-Th/Co [47] (рис.7, *б*) состав пород эвенкийской свиты демонстрирует смешанный источник – продукты разрушения пород кислого Д и основного Е составов.

Комплекс вулканогенно-осадочных пород, подобных по составу современным энсиалическим островным дугам, включающий породы известково-щелочной риолит-андезит-базальтовой вулканической серии, слагает террейны в северо-западной части Енисейского кряжа [48, 49]. Кроме того, в прилегающих районах Енисейского кряжа распространены докембрийские метаосадочные образования – в пределах Центрально-Ангарского (толщи которого соответствуют отложениям пассивных континентальных окраин [48]) и Исаковского террейнов, скорее всего, и выступавших поставщиками кластики. В шлифах отмечены обломки гнейсов, кварцитов, кислых эфузивов, железистых силицитов, сидеритов.

Рис.7. Положение фигуративных точек на диаграммах: *а* – Hf-La/Th [46]; *б* – La/Sc-Th/Co [47]

1 – алевролиты доломитовые и аргиллиты доломитистые;
2 – песчаники и алевро-песчаники аркозовые с базальным доломитовым цементом

Ранее исследователями были получены возрасты зерен детритового циркона dZr из пород эвенкийской свиты Восточно-Ангарской зоны (север Енисейского кряжа) [50, 51]. Установлено [50, 51], что в эвенкийской свите в существенных количествах содержатся продукты эрозии неопротерозойских кристаллических комплексов, что не фиксировалось в более древних толщах, источником которых служили преимущественно архейско-палеопротерозойские кристаллические комплексы фундамента Сибирской платформы. Песчаники эвенкийской свиты содержат продукты размыва неопротерозойско-кембрийских кристаллических комплексов, сформированных на соответствующих этапах эволюции сопряженных с Сибирской платформой элементов структуры Центрально-Азиатского складчатого пояса.

Заключение

В результате проведенного исследования уточнены литологические особенности сублиторальных-литоральных образований нижнеэвенкийской подсвиты среднего кембрия. Выделено четыре типа доломитов: со строматолитовой текстурой, комковато-сгустковые, замещения кристаллические без сохранения первичных структур протолита, замещения разнокристаллические с реликтовой алевро-пелитовой структурой протолита. Постседиментационные изменения пород связаны с процессами разностадийной доломитизации – ранней, сингенетической, наблюдаемой в литотипах доломитов со строматолитовой текстурой и/или бактериальными структурами, и более поздней, выделяемой в литотипах доломитов замещения и алевро-песчаников с доломитовым цементом.

Изучен элементный состав карбонатных (доломиты) и терригенных (алевролиты доломитовые и аргиллиты доломитистые, песчаники и алевро-песчаники аркозовые с базальным доломитовым цементом) пород. С помощью тепловой карты и кластеризации визуализирован общий характер распределения микроэлементов. Карбонатные литотипы заметно обогащены Co, Cr, Sc, Rb и обеднены Cu, Zn, Li, Ba, Pb и Sr относительно кларка в карбонатах. В обломочной части доломитов



присутствуют кварц, ПШ (ортоклазы, кислые плагиоклазы), слюды (биотит и мусковит), фрагменты гнейсов, кварцитов, кислых эфузивов, железистых силицитов, сидеритов.

Изучена природа положительной Eu-аномалии, характерной для карбонатных и терригенных пород. Ее возникновение, вероятно, связано с Eu-содержащими минералами (плагиоклазами) в терригенной составляющей, а не с гидротермальными растворами. Прямой зависимости содержания РЗЭ от количества терригенной примеси и нормативного количества ПШ не наблюдается, поэтому нельзя исключать влияние восстановительных условий или состава доломитообразующего раствора на распределение РЗЭ.

Вероятным источником терригенной кластики выступали докембрийские террейны Енисейского кряжа, образованные островодужными и кристаллическими/метаморфическими комплексами, а также рециклированный осадочный материал.

Авторы выражают благодарность лаборанту кабинета приборной аналитики ПИН РАН Т.С.Сергеевой и ассистенту кафедры минералогии и петрографии ПГНИУ В.В.Пугачу за помощь в выполнении аналитических работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы. Стратиграфия, история развития. Новосибирск: Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 2018. 177 с.
2. Региональная стратиграфическая схема кембрийских отложений Сибирской платформы. Объяснительная записка: Решения Всероссийского стратиграфического совещания по разработке региональных стратиграфических схем верхнего докембрия и палеозоя Сибири (Новосибирск, 2012) (Кембрий Сибирской платформы) / Под ред. С.С.Сухова, Т.В.Пегель, Ю.Я.Шабанова. Новосибирск: Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 2021. 60 с.
3. Меренкова С.И., Пузик А.Ю., Афонин И.В. и др. Условия формирования пород эвенкийской свиты в долине нижнего течения р. Подкаменная Тунгуска, Сибирская платформа // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2024. № 1. С. 25-37. [DOI: 10.5595/MSU0579-9406-4-2024-63-1-25-37](https://doi.org/10.5595/MSU0579-9406-4-2024-63-1-25-37)
4. Сараев С.В., Хоменко А.В., Батурина Т.П. и др. Венд и кембрий юго-востока Западной Сибири: стратиграфия, седиментология, палеогеография // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2004. № 1. С. 7-18.
5. Меренкова С.И. Кембрийский палеобассейн юга Сибирской платформы: геохимическая и палеогеографическая характеристика: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, 2024. 21 с.
6. Кузнецов В.Г., Журавлева Л.М. Пустотное пространство карбонатных тайдалитов – палеоклиматический аспект // Литология и полезные ископаемые. 2019. № 4. С. 351-363. [DOI: 10.31857/S0024-497X20194351-363](https://doi.org/10.31857/S0024-497X20194351-363)
7. Кузнецов В.Г., Илюхин Л.Н., Постникова О.В. и др. Древние карбонатные толщи Восточной Сибири и их нефтегазоносность. М.: Научный мир, 2000. 104 с.
8. Плюснин А.В. Модель строения венда северо-восточной части Непско-Ботуобинской антиклизы по результатам изучения опорных разрезов и секвенс-стратиграфического моделирования Непского свода и Миринского выступа // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2019. Т. 14. № 3. 39 с. [DOI: 10.17353/2070-5379/30_2019](https://doi.org/10.17353/2070-5379/30_2019)
9. Плюснин А.В., Иванова Н.А., Сентякова Н.С. и др. Строение и условия формирования яркитинского продуктивного горизонта позднего венда южной части Непско-Ботуобинской антиклизы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 11. С. 80-93. [DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4137](https://doi.org/10.18799/24131830/2023/11/4137)
10. Qingqing Luo, Bo Liu, Kaibo Shi et al. The moldic pore evolution of the Middle Ordovician sabkha dolostone in Ordos Basin, China: A study based on the petrographic and geochemical characteristics of pore fillings // Geological Journal. 2022. Vol. 57. Iss. 7. P. 2812-2827. [DOI: 10.1002/gj.4441](https://doi.org/10.1002/gj.4441)
11. Guwei Xie, Fanwei Meng, Meifang Ye et al. Stromatolites from the Majiagou Formation in the Ordos Basin, Northwestern China // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2024. Vol. 633. № 111879. [DOI: 10.1016/j.palaeo.2023.111879](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2023.111879)
12. Ying Xiong, Li-Chao Wang, Xiu-Cheng Tan et al. Dolomitization of the Ordovician subsalt Majiagou Formation in the central Ordos Basin, China: fluid origins and dolomites evolution // Petroleum Science. 2021. Vol. 18. Iss. 2. P. 362-379. [DOI: 10.1007/s12182-020-00522-1](https://doi.org/10.1007/s12182-020-00522-1)
13. Misra S., Osogba O., Powers M. Chapter 1 – Unsupervised outlier detection techniques for well logs and geophysical data // Machine Learning for Subsurface Characterization. Gulf Professional Publishing, 2020. P. 1-37. [DOI: 10.1016/B978-0-12-817736-5.00001-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817736-5.00001-6)
14. Розен О.М., Аббасов А.А. Количественный минеральный состав осадочных пород: расчет по петрохимическим данным, анализ достоверности результатов (компьютерная программа MINLITH) // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 3. С. 299-312.



15. Rosen O.M., Abbyasov A.A., Migdisov A.A., Yaroshevskii A.A. MINLITH – A Program to Calculate the Normative Mineralogy of Sedimentary Rocks: the Reliability of Results Obtained for Deposits of Old Platforms // Geochemistry International. 2000. Vol. 38. N 4, p. 388-400.
16. Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. Возможности стронциевой изотопной хемостратиграфии в решении проблем стратиграфии верхнего протерозоя (рифяя и венда) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2014. Т. 22. № 6. С. 3-25. [DOI: 10.7868/S0869592X14060039](https://doi.org/10.7868/S0869592X14060039)
17. Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Маслов А.В. и др. Sr- и C-изотопная хемостратиграфия типового разреза верхнего рифяя (Южный Урал): новые данные // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2006. Т. 14. № 6. С. 25-53.
18. Покровский Б.Г., Мележин В.А., Буякайте М.И. Изотопный состав С, О, Sr и S в позднедокембрийских отложениях патомского комплекса, Центральная Сибирь. Сообщение 1. Результаты, изотопная стратиграфия и проблемы датирования // Литология и полезные ископаемые. 2006. № 5. С. 505-530.
19. Подковыров В.Н., Семихатов М.А., Кузнецов А.Б. и др. Изотопный состав карбонатного углерода в стратотипе верхнего рифяя (каратавская серия Южного Урала) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1998. Т. 6. № 4. С. 3-19.
20. Montañez I.P., Osleger D.A., Banner J.L. et al. Evolution of the Sr and C Isotope Composition of Cambrian Oceans // GSA Today. 2000. Vol. 10. № 5. P. 1-7.
21. Saltzman M.R. Phosphorus, nitrogen, and the redox evolution of the Paleozoic oceans // Geology. 2005. Vol. 33. № 7. P. 573-576. [DOI: 10.1130/G21535.1](https://doi.org/10.1130/G21535.1)
22. Burns S.J., Mckenzie J.A., Vasconcelos C. Dolomite formation and biogeochemical cycles in the Phanerozoic // Sedimentology. 2000. Vol. 47. Suppl. 1. P. 49-61. [DOI: 10.1046/j.1365-3091.2000.00004.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00004.x)
23. Mazzullo S.J. Organogenic Dolomitization in Peritidal to Deep-Sea Sediments // Journal of Sedimentary Research. 2000. Vol. 70. N 1. P. 10-23. [DOI: 10.1306/2DC408F9-0E47-11D7-8643000102C1865D](https://doi.org/10.1306/2DC408F9-0E47-11D7-8643000102C1865D)
24. Vasconcelos C., McKenzie J., Bernasconi S. et al. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures // Nature. 1995. Vol. 377. Iss. 6546. P. 220-222. [DOI: 10.1038/377220a0](https://doi.org/10.1038/377220a0)
25. Евдокимов А.Н., Пхарое Б.Л. Особенности минерального и химического составов Северо-Западного рудопроявления марганца в районе Хайфельда, ЮАР // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 195-208. [DOI: 10.31897/PMI.2021.2.4](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.2.4)
26. Евдокимов А.Н., Пхарое Б.Л. Индикаторная роль редких и редкоземельных элементов Северо-Западного рудопроявления марганца (ЮАР) в генетической модели гипергенных марганцевых месторождений // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 814-825. [DOI: 10.31897/PMI.2021.6.4](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.4)
27. Miura N., Kawabe I. Dolomitization of limestone with MgCl₂ solution at 150°C: Preserved original signatures of rare earth elements and yttrium as marine limestone // Geochemical Journal. 2000. Vol. 34. Iss. 3. P. 223-227. [DOI: 10.2343/geochemj.34.223](https://doi.org/10.2343/geochemj.34.223)
28. Elderfield H., Greaves M.J. The rare earth elements in seawater // Nature. 1982. Vol. 296. Iss. 5854. P. 214-219. [DOI: 10.1038/296214a0](https://doi.org/10.1038/296214a0)
29. Kawabe I., Toriumi T., Ohta A., Miura N. Monoisotopic REE abundances in seawater and the origin of seawater tetrad effect // Geochemical Journal. 1998. Vol. 32. Iss. 4. P. 213-229. [DOI: 10.2343/geochemj.32.213](https://doi.org/10.2343/geochemj.32.213)
30. Lichao Wang, Wenxuan Hu, Xiaolin Wang et al. Seawater normalized REE patterns of dolomites in Geshan and Panlongdong sections, China: Implications for tracing dolomitization and diagenetic fluids // Marine and Petroleum Geology. 2014. Vol. 56. P. 63-73. [DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2014.02.018](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.02.018)
31. Ying Ren, Dakang Zhong, Chonglong Gao et al. The paleoenvironmental evolution of the Cambrian Longwangmiao Formation (Stage 4, Toyonian) on the Yangtze Platform, South China: Petrographic and geochemical constrains // Marine and Petroleum Geology. 2019. Vol. 100. P. 391-411. [DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2018.10.022](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.10.022)
32. Nozaki Y. Elemental distribution. Overview // Encyclopedia of Ocean Sciences. Academic Press, 2001. P. 840-845. [DOI: 10.1006/rwos.2001.0402](https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0402)
33. Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, 1985. 312 p.
34. Bau M., Dulski P. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa // Precambrian Research. 1996. Vol. 79. Iss. 1-2. P. 37-55. [DOI: 10.1016/0301-9268\(95\)00087-9](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00087-9)
35. Taylor S.R., McLennan S.M. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 1981. Vol. 301. Iss. 1461. P. 381-399. [DOI: 10.1098/rsta.1981.0119](https://doi.org/10.1098/rsta.1981.0119)
36. Летникова Е.Ф. Распределение РЭ в карбонатных отложениях различных геодинамических типов (на примере южного складчатого обрамления Сибирской платформы) // Доклады Академии наук. 2003. Т. 393. № 2. С. 235-240.
37. Летникова Е.Ф., Кузнецов А.Б., Вишневская И.А. и др. Вендская пассивная континентальная окраина юга Сибирской платформы: геохимические, изотопные (Sr, Sm-Nd) свидетельства, данные U-Pb датирования LA-ICP-MS детритовых цирконов // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 10. С. 1507-1529.
38. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // Acta Crystallographica Section A. 1976. Vol. 32. Iss. 5. P. 751-767. [DOI: 10.1107/S0567739476001551](https://doi.org/10.1107/S0567739476001551)
39. Lakshtanov L.Z., Stipp S.L.S. Experimental study of europium (III) coprecipitation with calcite // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2004. Vol. 68. Iss. 4. P. 819-827. [DOI: 10.1016/j.gca.2003.07.010](https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.07.010)
40. Kučera J., Cempírek J., Dolníček Z. et al. Rare earth elements and yttrium geochemistry of dolomite from post-Variscan vein-type mineralization of the Nízký Jeseník and Upper Silesian Basins, Czech Republic // Journal of Geochemical Exploration. 2009. Vol. 103. Iss. 2-3. P. 69-79. [DOI: 10.1016/j.gexplo.2009.08.001](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.08.001)
41. Schwinn G., Markl G. REE systematics in hydrothermal fluorite // Chemical Geology. 2005. Vol. 216. Iss. 3-4. P. 225-248. [DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.11.012](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.11.012)
42. Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium // Chemical Geology. 1991. Vol. 93. Iss. 3-4. P. 219-230. [DOI: 10.1016/0009-2541\(91\)90115-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(91)90115-8)



43. *Banner J.L.* Application of the trace element and isotope geochemistry of strontium to studies of carbonate diagenesis // *Sedimentology*. 1995. Vol. 42. Iss. 5. P. 805-824. [DOI: 10.1111/j.1365-3091.1995.tb00410.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1995.tb00410.x)

44. *Васильева К.Ю.* Стадийность постседиментационных изменений карбонатных пород рифея – венда Куюбинского месторождения и ее связь с геологической эволюцией Байкитской антеклизы (юго-запад Сибирской платформы): Автoref. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: Санкт-Петербургский государственный университет, 2017. 21 с.

45. *Григорьев Н.А.* Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, 2009. 381 с.

46. *Floyd P.A., Leveridge B.E.* Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones // *Journal of the Geological Society*. 1987. Vol. 144. № 4. P. 531-542. [DOI: 10.1144/gsjgs.144.4.0531](https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531)

47. *Cullers R.L.* Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // *Chemical Geology*. 2002. Vol. 191. Iss. 4. P. 305-327. [DOI: 10.1016/S0009-2541\(02\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X)

48. *Верниковский В.А., Верниковская А.Е.* Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 1. С. 35-52.

49. *Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Ножкин А.Д., Пономарчук В.А.* Рифейские оphiолиты Исаковского пояса (Енисейский кряж) // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7-8. С. 169-181.

50. *Прияткина Н.С., Кузнецов Н.Б., Шацилло А.В. и др.* U/Pb датирование цирконов из позднедокембрийских и раннепалеозойских песчаников Енисейского кряжа // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания, 11-14 октября 2016, Иркутск, Россия. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. Вып. 14. С. 230-232.

51. *Кузнецов Н.Б., Шацилло А.В., Романюк Т.В. и др.* Первичные источники циркона в обломочных породах неопротерозойских и нижнепалеозойских толщ Восточно-Ангарской зоны (север Енисейского кряжа) // Фундаментальные проблемы изучения вулканогенно-осадочных, терригенных и карбонатных комплексов: Материалы Всероссийского литологического совещания, посвященного памяти А.Г. Коссовской и И.В. Хворовой, 11-12 ноября 2020, Москва, Россия. М.: ГЕОС, 2020. С. 118-123.

Авторы: Софья Ивановна Меренкова, канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник (Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, Россия), младший научный сотрудник (Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия), koshelevasof@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3204-4393>, Евгения Владимировна Карпова, канд. геол.-минерал. наук, доцент (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-3094-2253>, Алексей Юрьевич Пузик, старший преподаватель (Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-7148-7344>, Владимир Анатольевич Литвинский, канд. биол. наук, старший научный сотрудник (Палеонтологический институт им. А.А.Борисяка РАН, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-2045-4002>, Юлия Валентиновна Шувалова, PhD, научный сотрудник (Палеонтологический институт им. А.А.Борисяка РАН, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-5075-6952>, Маргарита Александровна Волкова, канд. хим. наук, доцент (Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-3416-8296>, Алексей Анатольевич Медведков, канд. геогр. наук, доцент (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), старший научный сотрудник (Институт географии РАН, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-7242-7172>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Условия кристаллизации хлоридов при скважинной эксплуатации предельно насыщенных литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы

А.В.Сергеева¹✉, А.В.Кирюхин¹, А.Г.Вахромеев², С.Б.Коротков³, М.А.Данилова^{4,5}, Е.В.Карташева¹, А.А.Кузьмина¹, М.А.Назарова¹

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

² Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

³ ООО «Газпром Инвест», Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО «РН-Красноярск НИПИнефть», Красноярск, Россия

⁵ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Как цитировать эту статью: Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Вахромеев А.Г., Коротков С.Б., Данилова М.А., Карташева Е.В., Кузьмина А.А., Назарова М.А. Условия кристаллизации хлоридов при скважинной эксплуатации предельно насыщенных литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 89-106. [EDN XEQICR](#)

Аннотация

Рассмотрены условия кристаллизации предельно насыщенных рассолов хлоридов кальция, калия, магния Ангаро-Ленского артезианского бассейна, Сибирская платформа (СП), при температурах, соответствующих фактическим температурным условиям в скважинах Ковыктинского газоконденсатного месторождения участка «Литий». Этот важнейший тип литиеносного сырья отнесен к трудноизвлекаемым запасам. В большинстве скважин глубиной до 2,2 км температура горных пород верхней части геологического разреза ниже 20 °С, и в процессе работы скважин из предельно насыщенных хлоридных магниево-кальциевых рассолов в эксплуатационной колонне выпадают в осадок различные соли. В результате происходит быстрое зарастание скважин и прекращение их продукции. Термодинамический анализ фазовых диаграмм показывает, что в зависимости от температуры кристаллизуются антарктиkit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, тахгидрит $\text{Mg}_2\text{CaCl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, небольшие количества карналлита $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, бишофита $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и некоторых других хлоридов. При температуре выше 55 °С количество выделяющихся солей незначительное. Термогидродинамическое моделирование эксплуатации одиночной фонтанирующей скважины для гидрогеологических условий, близких к условиям Ковыктинской площади на юге СП, показало принципиальную возможность длительной (от месяца до года) эксплуатации предельно насыщенных хлоридно-натриевых и хлоридно-кальциевых литиеносных рассолов с добычей лития от 31,2 до 4,2 т на одну скважину.

Ключевые слова

литий; антарктиkit; тахгидрит; предельно насыщенные рассолы; гидроминеральное сырье; диаграммы состояний; TOUGH2-EWASG моделирование

Финансирование

Работа выполнена по теме FWME-2024-0007 «Тепломассоперенос, сейсмичность и минеральные преобразования в гидротермальных и вулканических системах, термогидродинамическое-геохимическое-геомеханическое моделирование, приложения для оценки геотермальных ресурсов, прогноза катастрофических гидротермальных процессов, извержений вулканов и сильнейших землетрясений» ИВиС ДВО РАН с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа».

Поступила: 13.12.2024

Принята: 16.07.2025

Онлайн: 01.12.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Литий, являясь стратегически важным элементом при производстве аккумуляторных батарей, используется в атомной энергетике для замкнутого цикла с участием трития и в целом имеет широкое применение. Сравнительно новый промышленный тип литиевого сырья в России – гидроминеральные ресурсы [1, 2], представляющие природные растворы различной концентрации – от солоноватых термальных вод до весьма крепких рассолов, формирование которых связано



с эвапориовыми формациями, длительным взаимодействием в системе вода – порода и масштабными наложенными процессами платформенного магматизма [3, 4]. В ходе добычи гидроминерального сырья нередки случаи лавинообразной кристаллизации солей в колоннах скважин, что затрудняет освоение ресурса. Цель настоящего исследования – анализ диаграмм состояния рассола и термогидродинамическое моделирование для обоснования возможности длительной эксплуатации скважин при извлечении литиеносного рассола в условиях предельного насыщения и фактического распределения температуры в стволе скважины с учетом теплообмена с вмещающими горными породами. Рассматриваются решения тестовых демонстрационных задач по солеотложению (галит NaCl , антарктиkit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) при работе одиночной эксплуатационной скважины в режиме свободного фонтанирования с использованием программы TOUGH2-EWASG, расширением области ее применения на предельно насыщенные рассолы хлорида кальция для гидрогеологических условий, близких к Ковыктинской площади на юге Сибирской платформы (СП).

О мировом интересе к добыче лития свидетельствует множество работ, посвященных разведке и оценке запасов, гибридным технологиям извлечения из геотермальных рассолов и растворов [5, 6], например из отработанного теплоносителя скважин на геотермальных месторождениях [7]. Импульс к развитию получили технологии извлечения лития из природных растворов, (салары, морская вода и геотермальные рассолы [8, 9]), промышленных рассолов СП [10, 11].

Гидроминеральное литиевое сырье имеется в ряде стран – на востоке Франции [12], в районе Хаф-Мун восточной провинции Саудовской Аравии [13], в Германии на геотермальной станции Брухзаль [14]. Поисковые работы проведены на территориях Невады и Солтон (Калифорния, США) [15]. Рудное литиевое сырье не теряет своей промышленной актуальности, поэтому ему по-прежнему посвящены научные и научно-практические работы. Например, для понимания генезиса литиевого сырья исследованы тектономагматические факторы, контролирующие локализацию литий-фтористых гранитов востока России [16-18] и рудоносность гранитоидных интрузий [19]. Многие исследователи усматривают связь между литиеносными рассолами, геотермальными и вулканическими проявлениями [20, 21]. Механизм формирования литиеносных рассолов на севере Тибетского нагорья с участием геотермальных флюидов приведен в работах [22, 23]. Подробно рассмотрены вопросы взаимодействия гидротермальных систем и самих вулканических структур [24].

Значительную часть мировой добычи лития обеспечивают месторождения миоцен-четвертичной бор-литиевой провинции Южной Америки. Однако нефтяные и газовые резервуары, а также геотермальные растворы могут представлять альтернативный саларам и твердым породам литиевый ресурс [25]. Актуальность переоценки запасов лития [26] в «литиевом треугольнике» оказалась столь велика, что проводятся работы с использованием спутниковых изображений и ряда геологических данных для поиска древних саларов, погребенных под отложениями вулканов [27-30]. Вопросы транспорта и накопления лития в саларах «литиевого треугольника» исследуются в статье [30]. Интерес к концентрированным и литиеносным подземным рассолам СП значительно возрос в последние годы [2, 31]. По ресурсной базе литиеносных рассолов гидроминеральная провинция СП (в том числе Иркутская обл. и Западная Якутия) сопоставимы с месторождениями Южной Америки, Китая и Тибета [31]. Из крепких рассолов можно извлекать хлорид, карбонат, фторид, гидроксид лития [11] и ряд других элементов [32]. Комплексная переработка высокоминерализованных крепких рассолов позволит закрыть потребности в магниевом и кальциевом сырье. Интерес к литию возрастает во всем мире, исследования касаются всех аспектов – генезиса, разведки, оценки запасов, извлечения и создания опытных и промышленных производств. Для достижения технологического суверенитета России необходимо на постоянной основе планировать прирост минерально-сырьевой базы лития, в том числе проводить комплексные исследования гидроминерального сырья. Таким образом будет достигнута независимость от внешних поставщиков лития и получена возможность добывать литиевое сырье внутри страны. На пути освоения богатейшего гидроминерального литиевого сырья СП стоит ряд задач и технических проблем, одной из которых является кристаллизация солей в лифтовых колоннах при скважинной добыче высокоминерализованных крепких рассолов. Цель настоящего исследования – применение термогидродинамического моделирования для оценки количества извлекаемого предельно насыщенного рассола из типовой добычной скважины при ее эксплуатации в режиме самоизлива с учетом минералообразования, вызванного теплопотерями при подъеме в зону пониженных температур вмещающих



горных пород. Задачи включают анализ химического состава репрезентативной пробы рассола и соответствующих фазовых диаграмм, демонстрационное термогидродинамическое моделирование эксплуатации добычной скважины с фильтрационно-емкостными и теплофизическими параметрами Ковыктинской площади.

Условия залегания весьма крепких и предельно насыщенных рассолов

В Ангаро-Ленском артезианском бассейне бурением обнаружены весьма крепкие и предельно насыщенные промышленные рассолы с очень высокой минерализацией до 630-728 г/л и высоким пластовым давлением до 400-500 бар на глубинах 1800-2200 м [1, 33, 16]. Аномально высокое давление обеспечивает фонтанную эксплуатацию скважин (рис.1), однако отложения солей в обсадной колонне (ОК) приводят к падению дебита. На рис.2 показан температурный профиль добычной скважины по глубине, на большем протяжении температура ниже 20 °C и выделение хлоридов из пересыщенных растворов может носить лавинообразный характер. Температурный градиент составляет около 15 °C/км, а растворимость хлоридов кальция и магния сильно зависит от температуры, в отличие, например, от растворимости хлорида натрия.

Работы по разведке данного бассейна проводятся с 1960-х годов. В настоящее время в составе проекта геологоразведочных работ (ГРР) на участке недр «Литий» планируется реализовать технологические исследования на опытной установке по добыче рассолов и селективному извлечению лития. На пути решения проблемы добычи лития стоит множество задач, одна из них – это самопроизвольная кристаллизация в обсадной скважине солей [1, 2], что приводит к уменьшению



Рис.1. Ковыктинская площадь, Ангаро-Ленский артезианский бассейн: *а* – управляемое фонтанирование глубокой скважины, участок «Литий»; *б* – солевая пробка из бурильных труб, соли кристаллизуются при нарушении РВТ-условий системы (фотографии предоставлены А.Г.Вахромеевым)

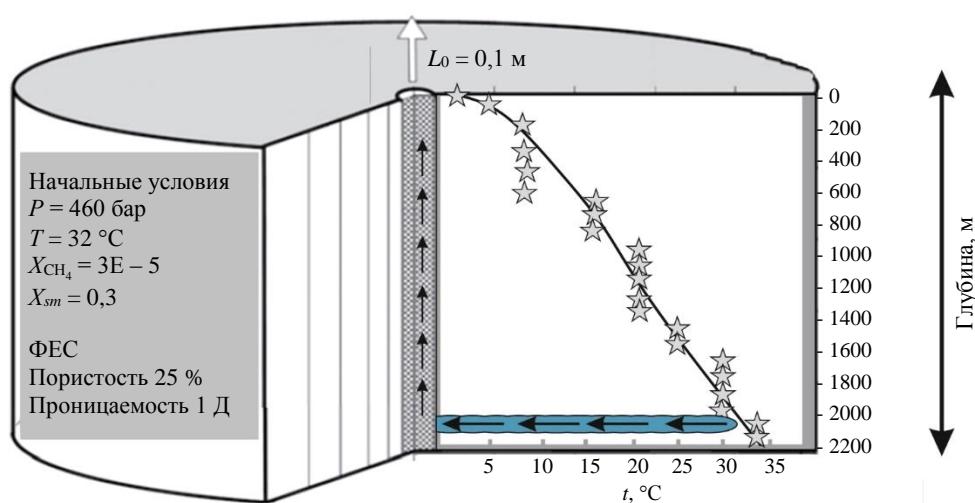


Рис.2. Концептуальная модель скважинной эксплуатации литиеносных предельно насыщенных рассолов, Ковыктинский участок, Ангаро-Ленский бассейн [31]

Добычные скважины в асимметричной (RZ) системе координат вскрывают целевой резервуар на глубине 2 км; слева – информация о начальных условиях в целевом резервуаре и его фильтрационно-емкостных свойствах (ФЕС); справа – график изменения температуры с глубиной (звездочки) в покрышке вмещающих горных пород; стрелки – движение рассола из целевого резервуара и вверх по скважине; X_{CH_4} – массовая доля метана; X_{sm} – массовая доля соли в растворе



потока и прекращению поступления литиеносных рассолов из скважин. Это основная причина отнесения такого типа сырья к трудноизвлекаемым (ТРИЗ). Отмечено, что кристаллизация солей, забивающих скважины, происходит в пределах оголовка, но может начаться в любом месте при охлаждении рассола до определенных температур. Высокая растворимость солей кальция и магния, в основном антарктиита $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, тахигидрита $2\text{MgCl}_2 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и бишофита $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, обеспечивают устойчивое состояние системы в пласте при повышенных температурах 35-40 °C и высоком давлении в залежи. Снижение температуры и давления на устье скважины приводит к самопроизвольной кристаллизации солей, в основном антарктиита с примесью бишофита.

Ковыктинское газоконденсатное месторождение и опытный участок проекта «Литий» находятся в зоне резко континентального климата, где перепад суточных температур воздуха превышает 25 °C, лето жаркое до 38-43 °C, а зимы холодные, зачастую ниже -45 °C. Внешние суточные и сезонные перепады неблагоприятно воздействуют на рассматриваемую хлоридную систему рассол – соли. Многолетняя мерзлота и область низких температур в верхнем интервале геологического разреза осадочного чехла – критически важный фактор снижения температур обсадных и лифтовых колонн скважины и, как следствие, восходящего по стволу потока гидроминерального сырья – ТРИЗ концентрированных рассолов в циклах ГРР и добычи [2], особенно при остановке потока на скважине. При хранении таких рассолов в открытых бассейнах количество выпавших солей в значительной степени зависит от температуры окружающей среды [10]. Для переработки рассолов предварительным этапом может быть естественное охлаждение, сопровождаемое кристаллизацией и перераспределением элементов между кристаллическими фазами и раствором.

Методы исследования химического состава рапы и осадка

Рассмотрена кристаллизация хлоридных солей в скважине при температурах, соответствующих температурному профилю лифтовой колонны. В задачи дальнейших исследований входит создание нестационарных химически-термогидродинамических моделей. Проанализирован состав рассолов из Ковыктинского участка (проект «Литий») для определения содержания лития и макроэлементов – натрия, калия, кальция, магния, и основных анионов – хлорида, сульфата, гидрокарбоната. Рапа представляет высококонцентрированный рассол, поэтому для анализа он был разбавлен в 200 раз с высокоточным контролем степени разбавления.

Образец для анализа отобран с устья фонтанирующей скважины из Ковыктинского участка (проект «Литий»). Условия отбора пробы – на переливе с высоким (более 1000 м³/сут.) дебитом управляемого фонтанирования скважины рассолом. При комнатной температуре он представлял двухфазную смесь, вязкий раствор с кристаллами на дне, причем количественно кристаллы преобладали над раствором. Гомогенизация двухфазной смеси достигалась путем небольшого нагрева до температуры около 40-50 °C, после чего отбирали аликвоту полученной жидкости и переносили в мерную колбу с суммарным разбавлением в 200 раз. По мнению авторов статьи, рассол при фонтанировании до зарастания скважины практически не меняет своего химического состава во время поднятия и проанализированный состав отражает состав насыщенного рассола.

Макрокомпонентный состав исследован на базе Центра коллективного пользования «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа» ИВиС ДВО РАН. Содержания кальция и магния определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии с погрешностью 11 % по методике ПНДФ 14:1:2:4.137-98. Литий, натрий, калий, рубидий и цезий – методом пламенно-эмиссионной спектрометрии с неопределенностью 10 %, ПНДФ 14:1:2:4.138-98, с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра Thermo Electron SOLAAR. Железо – по взаимодействию с сульфосалициловой кислотой, вначале находили общее содержание железа, затем только железо (III), по разнице общего и железа (III) определяли железо (II), ПНДФ 14:1:2:4.50-96. Измерения проводились с помощью спектрофотометра UV-Mini-1240 Shimadzu. Содержание хлорид-ионов определяли аргентометрическим методом с неопределенностью 16 %, ПНДФ 14:1:2:3.96-97; сульфат-иона – турбидиметрическим методом с погрешностью 15 %, ПНДФ 14:1:2:159-2000.

Минеральный состав солевого осадка, выпавшего при температуре около 20 °C, исследован с помощью рентгеновского дифрактометра MAX XRD 7000 (Shimadzu) в диапазоне углов гониометра



от 6 до 65° 2θ с шагом 0,1° 2θ, скорость сканирования составляла 2 град/мин, что эквивалентно выдержке в точке 3 с. Съемка велась при вращении образца со скоростью 30 об/мин.

Сведения о растворимости в системе $\text{KCl}-\text{MgCl}_2-\text{CaCl}_2-\text{H}_2\text{O}$ взяты из справочных данных по растворимости в многокомпонентных водно-солевых системах¹. Пространство состояний системы $\text{KCl}-\text{MgCl}_2-\text{CaCl}_2-\text{H}_2\text{O}$ при фиксированных температуре и давлении представляет тетраэдр, где вершинам отвечают чистые компоненты, шесть ребер соответствуют двухкомпонентным подсистемам, четыре грани – тройным подсистемам [34-36]. Использованы данные по растворимости в бинарных и тройных подсистемах системы $\text{KCl}-\text{MgCl}_2-\text{CaCl}_2-\text{H}_2\text{O}$. В справочниках имеется информация о составе твердых фаз, существующих растворов и температуре. Справочные данные по составу пересчитаны в мольные доли, построены концентрационные треугольники с нанесенными составами твердых фаз и существующих растворов в определенных температурных интервалах. Температурные интервалы выбирались таким образом, чтобы в их пределах не было значимых фазовых переходов.

Влияние давления на кристаллизацию из рассола можно оценить исходя из соотношения молярных объемов или плотностей существующих фаз. Кристаллы солей тонут в собственном насыщенном растворе, поэтому кристаллизация сопровождается уменьшением молярного объема. Увеличение давления будет способствовать кристаллизации, а сброс давления, наоборот, благоприятен для растворения солей. Влиянием давления на равновесие солей с растворами можно пренебречь, так как давление слабо воздействует на процессы в конденсированных средах.

Для удобства представления рассмотрены три тройные подсистемы, в которых одним из компонентов является вода; из-за незначительного содержания в представленной рапе отброшен хлорид натрия. Для построения квазизотермических сечений свели воедино данные о составе растворов, существующих с кристаллами солей при различных температурах из рассмотренной четверной системы. Составы растворов и твердых фаз выразили в мольных долях, в качестве компонентов взяли соединения KCl , MgCl_2 , CaCl_2 , H_2O . Для упрощения рассмотрены тройные подсистемы $\text{MgCl}_2-\text{CaCl}_2-\text{H}_2\text{O}$, $\text{KCl}-\text{CaCl}_2-\text{H}_2\text{O}$, $\text{KCl}-\text{MgCl}_2-\text{H}_2\text{O}$ в определенных температурных интервалах от –35 до 100 °C, а не собственно изотермические разрезы. Полученные результаты соотнесены с реальным составом рапы из добывающей скважины, чтобы определить состав солей, которыми застает ОК скважины в зависимости от температуры. При построении трехкомпонентной подсистемы $\text{MgCl}_2-\text{CaCl}_2-\text{H}_2\text{O}$ количества хлорида калия выбраны как не превышающие содержания в рассоле. В таких пределах хлорид калия не оказывает заметного влияния на положения коннод.

Треугольники состава масштабированы, чтобы были видны поля кристаллизации в области, прилегающей к воде. Необходимо подобрать такие условия, при которых фигуративная точка рапы попадает в поле жидкости. В этом состоянии соли не должны выделяться. При условии попадания фигуративной точки на двухфазную конноду, которая является образцом равновесия кристаллов соли с раствором, чем ближе фигуративная точка рапы к полю жидкости, тем меньшее количество солей выделяется, так как соотношение количеств фаз в равновесии определяется правилом рычага или моментов.

Результаты анализа фазовых диаграмм и термогидродинамического моделирования

Состав рапы. В составе рассола доминируют хлориды кальция, магния, в меньших количествах присутствуют калий и натрий. Благодаря наличию трехвалентного железа раствор окрашен в буро-оранжевый цвет и обладает сравнительно низким pH, так как трехвалентное железо склонно к гидролизу. Содержание в рассоле лития после выпадения солей около 660 мг/л, что в пересчете на LiCl дает около 4 г хлорида. Кроме лития в рассоле присутствуют рубидий и цезий – 4,7 и 13,9 мг/л. В пересчете на соли рассол представленной на анализ пробы содержит 442 г/л CaCl_2 , 112 г/л MgCl_2 , 5 г/л KCl . Основные компоненты рассола – хлориды кальция и магния при подчиненных количествах хлоридов калия и натрия. Поэтому следует ожидать кристаллизации доминирующих солей в виде различных соединений, а соли на основе хлоридов калия и натрия будут выделяться

¹ Справочник по растворимости. В 7 т. Т. 3: Тройные и многокомпонентные системы, образованные неорганическими веществами. Кн. 3 / Сост. В.Б.Коган, С.К.Огородников, В.В.Кафаров. Л.: Наука, 1970. 1221 с.

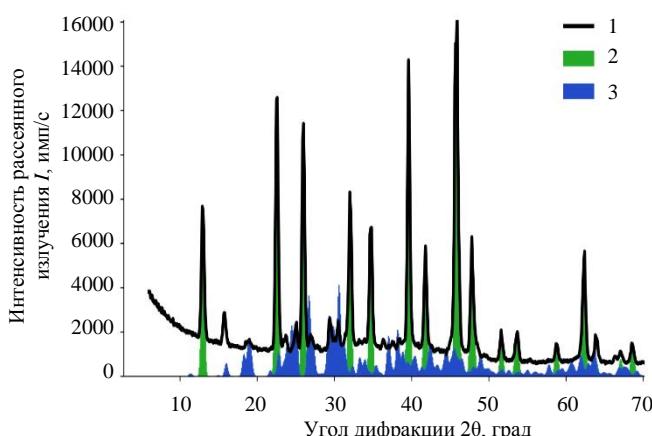


Рис.3. Дифрактограмма солевого осадка, сосуществующего с литиеносным рассолом, при температуре около 20 °С

1 – соль; 2 – антарктиkit; 3 – карналлит

ственной кристаллизационной воде, может переходить в тетрагидрат и дигидрат хлорида кальция. Менее растворимыми являются соли калия, магния и их соединение – карналлит. Карналлит сохраняется при температуре плавления антарктикита и, по всей видимости, может кристаллизоваться во внутреннем пространстве скважин, хотя его количество для данного состава рассола небольшое. Тахгидрит с помощью рентгеновской дифрактометрии не обнаружен. Скорее всего, при температуре около 20 °С скважина будет застать антарктикитом. При незначительном повышении температуры до 40 °С солевой осадок растворяется практически полностью, в виде взвеси остаются небольшие количества других хлоридов.

Система $KCl-MgCl_2-CaCl_2-H_2O$. Сопоставлены положения figurативной точки, отвечающей составу рапы, и полей двухфазных равновесий в разрезах, построенных для различных температурных интервалов (рис.4) при давлении 1 атм. Для гексагидрата $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ характерна ступенчатая дегидратация с образованием дигидрата и отщеплением воды, с конечным появлением насыщенного раствора (L) тетрагидрата и дигидрата в небольшом температурном интервале 20–45 °С (см. таблицу). Фазовые переходы гексагидрата хлорида кальция могут протекать по метастабильному пути².

В системе $KCl-MgCl_2-CaCl_2-H_2O$ зафиксировано около 20 фаз, включая воду и лед. В таблице показаны те соли, которые могут кристаллизоваться из рапы исследованного состава при температурах от –34 до 100 °С. Соли кальция и магния склонны к образованию гидратов с переменным количеством воды, при повышении температуры вода постепенно отщепляется и кристаллогидраты переходят в менее гидратированные формы. Условно обозначим кристаллогидраты хлорида кальция протяженной областью на ребре $CaCl_2-H_2O$. Антарктиkit при нагревании переходит в тетрагидрат и дигидрат, его растворимость увеличивается. Аналогично ведет себя хлорид магния – при низких температурах количество кристаллизационной воды доходит до 12, при повышении температуры додекагидрат переходит в октагидрат, гексагидрат и далее в тетрагидрат и тригидрат, но это происходит при более высоких температурах по сравнению с гидратами хлорида кальция. Такое поведение характерно для кристаллогидратов. Особенностью хлоридов кальция и магния может являться сам характер фазового перехода, который совершается по перитектоидному равновесию с выделением жидкости и напоминает плавление в собственной кристаллизационной воде. Для кристаллогидратов при повышении температуры сокращается поле двухфазных равновесий, соответственно уменьшается количество выделяющейся соли, и можно подобрать такие условия, при которых количество выделяющейся соли будет незначительным, не приводя к созданию пробки, либо когда figurативная точка рапы окажется в поле жидкости.

² Киргинцев А.Н., Трушникова Л.Н., Лаврентьев В.Г. Растворимость неорганических веществ в воде. Л.: Химия, 1972. 248 с.

в небольшом количестве, которое может и не привести к застанию скважин. Состав предельно насыщенного рассола, сосуществующего с осадком, г/л: анионы – Cl^- 382,80, SO_4^{2-} 0,45; катионы – Li^+ 0,66, Na^+ 1,69, K^+ 2,49, Ca^{2+} 159,20, Mg^{2+} 28,20, $Fe_{общ}$ 1,00, Cs^+ 0,014, Rb^+ 0,005. Суммарная минерализация – 576,51 г/л; анионы 383,25 г/л; катионы 193,26 г/л. Массовая доля лития в минерализации исходного рассола – 0,114 %.

Состав солевого осадка. Солевой осадок при 20 °С представлен небольшим количеством карналлита при доминировании легкоплавкого антарктикита – шестиводного хлорида кальция (рис.3). Он кристаллизуется при температуре ниже 30 °С, при более высокой температуре постепенно плавится в собственной кристаллизационной воде – тетрагидрат и дигидрат хлорида кальция. Менее растворимыми являются соли калия, магния и их соединение – карналлит. Карналлит сохраняется при температуре плавления антарктикита и, по всей видимости, может кристаллизоваться во внутреннем пространстве скважин, хотя его количество для данного состава рассола небольшое. Тахгидрит с помощью рентгеновской дифрактометрии не обнаружен. Скорее всего, при температуре около 20 °С скважина будет застать антарктикитом. При незначительном повышении температуры до 40 °С солевой осадок растворяется практически полностью, в виде взвеси остаются небольшие количества других хлоридов.

Система $KCl-MgCl_2-CaCl_2-H_2O$. Сопоставлены положения figurативной точки, отвечающей составу рапы, и полей двухфазных равновесий в разрезах, построенных для различных температурных интервалов (рис.4) при давлении 1 атм. Для гексагидрата $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ характерна ступенчатая дегидратация с образованием дигидрата и отщеплением воды, с конечным появлением насыщенного раствора (L) тетрагидрата и дигидрата в небольшом температурном интервале 20–45 °С (см. таблицу). Фазовые переходы гексагидрата хлорида кальция могут протекать по метастабильному пути².

В системе $KCl-MgCl_2-CaCl_2-H_2O$ зафиксировано около 20 фаз, включая воду и лед. В таблице показаны те соли, которые могут кристаллизоваться из рапы исследованного состава при температурах от –34 до 100 °С. Соли кальция и магния склонны к образованию гидратов с переменным количеством воды, при повышении температуры вода постепенно отщепляется и кристаллогидраты переходят в менее гидратированные формы. Условно обозначим кристаллогидраты хлорида кальция протяженной областью на ребре $CaCl_2-H_2O$. Антарктиkit при нагревании переходит в тетрагидрат и дигидрат, его растворимость увеличивается. Аналогично ведет себя хлорид магния – при низких температурах количество кристаллизационной воды доходит до 12, при повышении температуры додекагидрат переходит в октагидрат, гексагидрат и далее в тетрагидрат и тригидрат, но это происходит при более высоких температурах по сравнению с гидратами хлорида кальция. Такое поведение характерно для кристаллогидратов. Особенностью хлоридов кальция и магния может являться сам характер фазового перехода, который совершается по перитектоидному равновесию с выделением жидкости и напоминает плавление в собственной кристаллизационной воде. Для кристаллогидратов при повышении температуры сокращается поле двухфазных равновесий, соответственно уменьшается количество выделяющейся соли, и можно подобрать такие условия, при которых количество выделяющейся соли будет незначительным, не приводя к созданию пробки, либо когда figurативная точка рапы окажется в поле жидкости.

² Киргинцев А.Н., Трушникова Л.Н., Лаврентьев В.Г. Растворимость неорганических веществ в воде. Л.: Химия, 1972. 248 с.

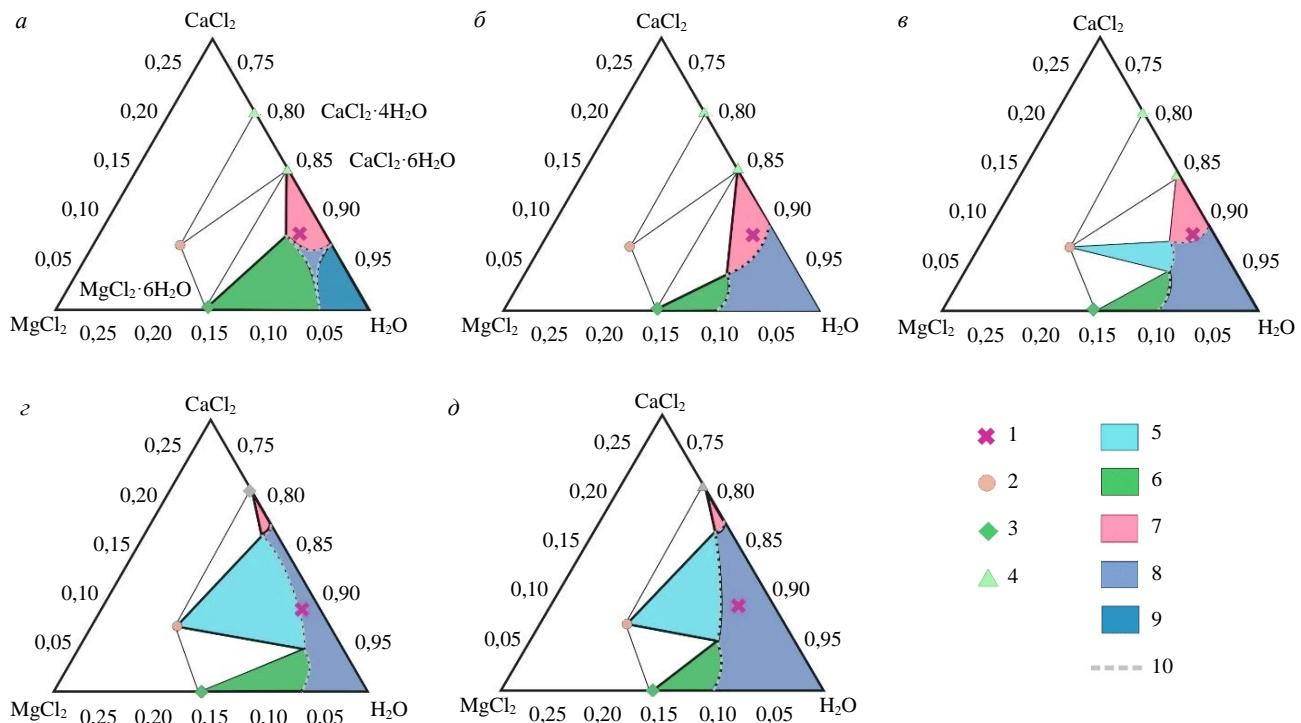


Рис.4. Схема фазовых отношений в тройной подсистеме $\text{MgCl}_2\text{--CaCl}_2\text{--H}_2\text{O}$, температурные диапазоны от -35 до 0 $^{\circ}\text{C}$ (a), от 0 до 20 $^{\circ}\text{C}$ (b), от 20 до 30 $^{\circ}\text{C}$ (c), от 30 до 40 $^{\circ}\text{C}$ (d) и свыше 40 $^{\circ}\text{C}$ (e)

1 – состав рапы Ковыткинское; 2 – тахидрит $\text{Mg}_2\text{CaCl}_6\cdot 12\text{H}_2\text{O}$; 3 – гидраты хлорида магния $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 4 – гидраты хлорида кальция $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 5-7 – насыщенные растворы в равновесии с осадком тахидрита (5), гидратов хлорида магния (6), гидратов хлорида кальция (7); 8 – область жидкого раствора; 9 – лед в контакте с растворами хлоридов; 10 – линия, отделяющая область жидкого раствора от областей двухфазных равновесий. Состав выражен в мольных долях, треугольник состава масштабирован; разнообразие гидратов хлоридов магния и кальция не показано [37]

Фазы системы $\text{KCl}\text{--MgCl}_2\text{--CaCl}_2\text{--H}_2\text{O}$ [38]

Формула (название)	Равновесия с участием растворов	$t, ^{\circ}\text{C}$
$\text{KMgCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (карналлит)	–	–
$\text{MgCl}_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgCl}_2\cdot 12\text{H}_2\text{O} \sim 2\text{H}_2\text{O}$ (лед + L)	≈ -34
	$\text{MgCl}_2\cdot 12\text{H}_2\text{O} \sim \text{MgCl}_2\cdot 8\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$ (L)	≈ -17
$\text{MgCl}_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgCl}_2\cdot 8\text{H}_2\text{O} \sim \text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$ (L)	≈ -3
$\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (бишофит)	$\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O} \sim \text{MgCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$ (L)	117
$\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (антарктиkit)	$\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O} \sim \text{CaCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$ (L)	29
$\text{CaCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (гиарант)	$\text{CaCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O} \sim \text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$ (L)	45
$\text{Mg}_2\text{CaCl}_6\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (тахидрит)	$\text{Mg}_2\text{CaCl}_6\cdot 12\text{H}_2\text{O} \sim \text{Mg}_2\text{CaCl}_6\cdot 6\text{H}_2\text{O} + 6\text{H}_2\text{O}$ (L)	>55
$\text{Mg}_2\text{CaCl}_6\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	–	–

Среди фаз подсистемы $\text{MgCl}_2\text{--CaCl}_2\text{--H}_2\text{O}$ можно выделить две – образование антарктикита $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и тахидрита $\text{Mg}_2\text{CaCl}_6\cdot 12\text{H}_2\text{O}$, которыми наиболее вероятно будут зарастать скважины. Антарктикит относится к низкотемпературной фазе, он стабилен примерно до 29 $^{\circ}\text{C}$, тахидрит же фиксируется при температуре выше 20 $^{\circ}\text{C}$ и приходит на смену антарктикиту. Поэтому подбор температурного режима эксплуатации добывающей скважины должен учитывать трансформации солей при изменении температуры. Отметим, что для магния характерно большее разнообразие гидратов вследствие большей склонности катиона магния к комплексообразованию, чем для кальция. Поэтому при низких температурах можно ожидать зарастание скважин гидратами хлорида магния с различным содержанием воды и гидратами хлорида кальция, а при более высоких температурах скважинное пространство будет зарастать преимущественно гидратами хлорида кальция или кальция-магния.



Температурный диапазон –35-0 °С. При таком интервале температур из рапы исследованного состава будут кристаллизоваться гидраты хлорида магния и кальция, фигуративная точка рассола лежит в области равновесия бишофита с антарктиkitом (рис.4, а). Указанный диапазон температур актуален при эксплуатации скважин в условиях сибирской зимы, когда температура опускается до –40 °С и поступающий на дневную поверхность рассол, охлаждаясь, будет выделять указанные соли, а также карналлит, не показанный на рис.4 ввиду его принадлежности к другой подсистеме. Если хлорид лития будет оставаться и накапливаться в остаточной жидкости – жидкой фазе, то, например, рубидий может замещать калий в карналлите, хлориде калия и других солях калия, концентрируясь в солевом осадке. Перераспределение целевых элементов в ходе фазовых переходов рассола актуально для научно обоснованных технологий комплексного освоения сырья.

Температурный диапазон 0-20 °С. При таких условиях кристаллизуется антарктиkit, как видно на рис.4, б, фигуративная точка лежит в поле двухфазной области $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \sim \text{L}$ в подсистеме $\text{MgCl}_2 - \text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$, причем довольно далеко от границы с раствором. Растворимости рассматриваемых солей сильно зависят от температуры, и при ее изменении заметно смещаются области двухфазных равновесий и ликвидус. Ввиду того, что концентрация хлорида кальция в рассоле высокая, выделение этого минерала может носить лавинообразный характер. Будет выделяться карналлит, так как содержание хлоридов калия и магния отвечает линии насыщения по карналлиту, не показанной на рис.4 ввиду принадлежности к другой подсистеме. Если состав рапы пересчитывать на содержание гидратированных солей, то концентрации карналлита, антарктиkitа или тахгидрита – 17,7; 871,6; 303,7 г/л соответственно, количество карналлита незначительно на фоне антарктиkitа или тахгидрита.

Температурный диапазон 20-30 °С. В этом интервале температур шестиводный хлорид кальция – антарктиkit – начинает заметно плавиться в собственной кристаллизационной воде (рис.4, в), поле двухфазного равновесия сокращается; начинает выделяться тетрагидрат хлорида кальция, тоже хорошо растворимый. Появляется узкое поле тахгидрита, однако фигуративная точка рапы лежит близко к границе трехфазной конноды тахгидрит – антарктиkit – раствор и выделения тахгидрита незначительно. Могут выделяться незначительные количества карналлита, так как его содержание близко к насыщению по карналлиту. И хотя растворимость антарктиkitа в этом температурном диапазоне возрастает, фигуративная точка рапы лежит в области двухфазного равновесия с заходом в область трехфазного равновесия антарктиkit – тахгидрит – раствор, поэтому зарастание скважин весьма ожидаемо.

Температурный диапазон 30-40 °С. В подсистеме $\text{MgCl}_2 - \text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$ фигуративная точка рапы попадает в поле двухфазного равновесия тахгидрита с насыщенным раствором $\text{Mg}_2\text{CaCl} \times 12\text{H}_2\text{O} \sim \text{L}$, а поле кристаллизации тетрагидрата хлорида кальция сокращается, что отвечает увеличению его растворимости (рис.4, г). Тахгидрит приходит на смену антарктиkitу, который при данной температуре становится нестабилен, и гиариту с узким полем двухфазных коннод. Хлорид калия не должен выделяться из рапы данного состава, однако в небольших количествах могут кристаллизоваться карналлит или бишофит, так как в подсистеме $\text{KCl} - \text{MgCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$ состав рапы близок к насыщению относительно выделения этих минералов.

Температурный диапазон свыше 40 °С. Фигуративная точка рассола лежит в области двухфазного равновесия тахгидрита с его насыщенным раствором (рис.4, д), по остальным хлоридам рапа получается ненасыщенной. Ввиду того, что состав рапы лежит практически на границе однодифазной области, отвечающей жидкому раствору, и линии двухфазного равновесия, количество выделяющегося тахгидрита не должно быть большим, так как соотношение фаз определяется правилом рычага и масса жидкого раствора должна значительно превышать массу выделяющегося тахгидрита. Этот температурный диапазон сравнительно удобен для эксплуатации, так как в его пределах зарастание обсадной трубы скважины не должно наблюдаться вследствие небольшого количества выделяющейся соли – тахгидрита, а также выноса выделяющихся кристаллов на поверхность. Допустимо расчетное смешение с горячей пресной технической водой, паром, с порционной подачей в область башмака лифтовых труб.



С повышением температуры поле жидкости увеличивается, и фигуративная точка рапы оказывается в однофазной области раствора. Так же и по остальным хлоридам – нагретая рапа становится ненасыщенной относительно других солей. Это наиболее удобный диапазон температур для эксплуатации лифтовых глубоких скважин, при котором не должно наблюдаться зарастания и падения потока.

Термогидродинамическое моделирование солеоотложения при работе эксплуатационной скважины, уравнения состояния флюида. Постановка задачи, геометрия модели. Показана геометрия радиально-цилиндрической RZ-модели (см. рис.2). Для моделирования систем, содержащих солевые растворы и неконденсирующийся газ [38], применяется программа TOUGH2 с модулем состояния EWASG.

Исходные ФЕС целевого резервуара соответствуют Знаменской площади: глубина 2 км, мощность 2,5 м, пористость 0,25 (25 %), проницаемость 1 Д, начальное давление 300 бар, температура 32 °C, массовая доля CH₄ = 3·10⁻⁵. В качестве соли на первых этапах моделирования задавался NaCl, хотя в реальных условиях преобладает CaCl₂. С практической точки зрения предполагалось, что это обеспечивает запас прочности при обосновании инженерно-технологических решений, так как хлориды натрия выпадают в твердую фазу в первую очередь. Заданная в модели температура 32 °C, измеренная на забое, скорее всего несколько занижена, так как при таких условиях фигуративная точка находится в области сосуществования таухидрита и его насыщенного раствора. Но для хлорида натрия данное упрощение не является критическим, так как его растворимость слабо зависит от температуры.

На модели начальная массовая доля растворенной соли NaCl автоматически определяется программой TOUGH2 с модулем состояния EWASG по условиям предельного насыщения. В широком температурном диапазоне плотность и вязкость насыщенных растворов хлоридов натрия, кальция и магния близки, поэтому при геофильтрационных расчетах можно опираться на свойства NaCl, поддерживаемые в модуле состояния EWASG программы TOUGH2. Для моделирования существенные отличия хлорида натрия от хлоридов кальция и магния состоят в том, что растворимость NaCl слабо зависит от температуры, и в целом у галита меньшая растворимость, чем у хлоридов магния и кальция.

Моделирование добычи с циклической закачкой горячей воды (тестовая задача 1). В этой задаче ствол скважины (см. рис.2) не учитывается в явном виде и добыча/закачка определены в режиме циклически действующего массового источника. Целевой резервуар задан в виде диска мощностью 2,5 м и с радиусом 200 м. Вычислительная сетка (RZ) состоит из 100 смежных элементов ($NX = 100$) с прогрессивно увеличивающимся радиусом. Циклический массовый источник задается в центре модели следующим образом: закачка пресной воды с расходом Q и температурой 100 °C (энталпийей 419 кДж/кг) в диапазонах времени $[\Delta t K, \Delta t (K + 1)]$, откачка рассола с расходом Q в диапазонах времени $[\Delta t (K + 1), \Delta t (K + 2)]$, где $\Delta t = 1$ сут., $K = 0, 2, 4, \dots, 364$. В течение суток закачивается в скважину горячая вода, затем в течение суток извлекается флюид с тем же расходом, и так происходит в течение года (365 сут.). На внешней границе модели заданы фиксированные граничные условия. Для улучшения перемешивания закачиваемой воды с пластовым рассолом на модели определено повышенное значение гидродисперсии (молекулярной диффузии 0,001 м²/с).

Максимальный возможный расход циклической откачки/закачки определен равным 9,3 кг/с методом многовариантного моделирования из условия недопущения кристаллизации в призабойном пространстве. Суммарная годовая добыча соли NaCl в такой модели оценивается как 8436,7 т, в пересчете на литий 9,6 т, если принять его массовую долю в минерализации исходного рассола 0,114 %.

Моделирование добычи в режиме самоизлива (тестовая задача 2). В таком варианте моделирования учитывается теплообмен извлекаемого флюида через стенки скважины глубиной 2000 м с вмещающими горными породами. Модель определена на RZ вычислительной сетке с разбиением по радиальному направлению на 100 элементов ($NX = 100$, как в тестовой задаче 1), а по глубине на 101 элемент ($NZ = 100$). Целевой резервуар определен в диапазоне глубин от 1977,5 до 2000,0 м,



а выше по разрезу – непроницаемые вмещающие породы с заданным распределением температуры. Начальные условия задаются по следующим основным переменным: давлению P , температуре T , насыщению твердой фазой S_S (объемной доле твердой соли в поровом пространстве); массовой доле метана X_{CH_4} . Начальное распределение температуры задается уравнением

$$T = 5,0 + 0,0135Z,$$

где Z – глубина, м.

Начальное давление задано по гидростатическому закону с максимальным значением 300 бар на глубине 2 км; $S_S = 0,01$ (что автоматически определяет насыщенный раствор хлорида натрия); $X_{\text{CH}_4} = 3,0 \cdot 10^{-7}$ (т.е. массовая доля CH_4 невелика). Добычна скважина определена в режиме самоизлива на устье с индексом продуктивности $1,0 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$.

Расчетная производительность скважины в течение 3 сут. в данной задаче такова, что максимальный расход достигает 7 кг/с, далее поток стабилизируется на величине 4 кг/с. Заrstание ствола скважины эквивалентно достижению переменной S_S значения 1,0 (100 %). На момент времени 237 сут. насыщение твердой фазы S_S достигает 1,0 в приустьевой части, т.е. ствол скважины закупоривается соляной пробкой. Таким образом, срок эксплуатации скважины для заданных на модели условий ограничен 237 сут.

Моделирование добычи в режиме самоизлива с учетом снижения проницаемости при заrstании порового пространства (тестовая задача 3). В этой задаче сохраняются условия предыдущей, но дополнительно учитывается снижение проницаемости продуктивного резервуара при заполнении его трещинно-порового пространства кристаллической солью. Соотношение между количеством высадившейся из раствора твердой фазой и изменением пористости достаточно простое. При этом вклад изменения пористости в изменение проницаемости более сложен. Лабораторные эксперименты показывают, что небольшое изменение пористости может привести к значительным изменениям проницаемости. Это объясняется конвергентно-дивергентной природой поровых каналов, когда сужения пор запечатываются осадком, в то время как в поровом пространстве остаются разъединенные полости [39]. Эффекты снижения проницаемости определяются не только общим понижением пористости, но и особенностями геометрии порового пространства и распределением осадка в нем. Такие эффекты могут по-разному проявляться в пористых средах различного типа, что создает трудности для прогноза проницаемости при изменении пористости за счет солеотложения. В EWASG есть несколько опций функциональной зависимости относительных изменений проницаемости k/k_0 от относительного изменения активной пористости ϕ_f/ϕ_0 :

$$\frac{k}{k_0} = f\left(\frac{\phi_f}{\phi_0}\right) \equiv f(1 - S_S),$$

где $1 - S_S$ – доля начального порового пространства, остающегося доступным для флюидов.

Простейшую модель, отображающую конвергентно-дивергентную природу естественных поровых каналов, можно представить в виде последовательности сегментов капиллярных трубок большего и меньшего радиусов (рис.5).

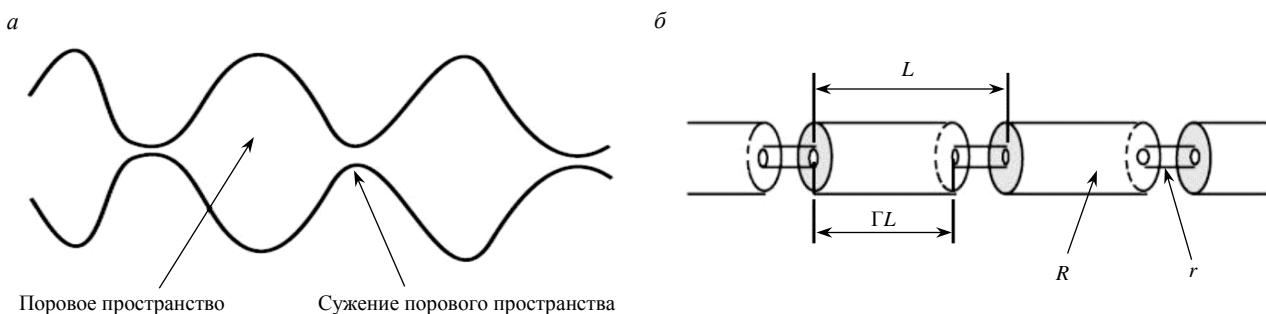


Рис.5. Модель для конвергентно-дивергентных (сжимающихся-расширяющихся) поровых каналов:
а – концептуальная модель; б – серия последовательных трубок



Хотя для моделей прямых капиллярных трубок проницаемость остается ненулевой, пока пористость не обратится в нуль, в моделях трубок с переменным радиусом каналов проницаемость падает до нуля при ненулевой пористости. Для модели, изображенной на рис.5, справедливо следующее соотношение [39]:

$$\frac{k}{k_0} = \theta^2 \frac{1 - \Gamma + \Gamma / \omega^2}{1 - \Gamma + \Gamma [\theta / (\theta + \omega - 1)]^2}, \quad (1)$$

где общая пористость имеет вид:

$$\theta = \frac{1 - S_S - \emptyset_r}{1 - \emptyset_r},$$

\emptyset_r – доля начальной пористости, при которой проницаемость понижается до нуля; Γ – доля длины пористых каналов большого радиуса.

Тогда возникает следующее выражение:

$$\omega = 1 + \frac{1 / \Gamma}{1 / \emptyset_r - 1}.$$

Таким образом, уравнение (1) имеет только два исходных геометрических параметра, которые необходимо определить, – \emptyset_r и Γ . При моделировании принята изложенная выше схема серии последовательных трубок зависимости понижения проницаемости от пористости с параметрами $\emptyset_r = 0,1$, $\Gamma = 0,8$. Дополнительно также увеличен (по сравнению с тестовой задачей 2) индекс продуктивности скважины до $1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3$, на устье давление прежнее – 1 бар (свободное фонтанирование).

На рис.6 показаны результаты моделирования с исходными параметрами: изменение расхода и устьевой температуры; насыщения твердой фазой и концентрации NaCl в устьевой части скважины в процессе ее эксплуатации продолжительностью один год. Динамика заполнения ствола скважины твердыми осадками на различные моменты эксплуатации ($t = 0, 30, 60, 150$ и 360 сут.) такова, что происходит неравномерное заполнение ствола скважины твердым осадком преимущественно в верхней приустьевой части скважины, уже через месяц эксплуатации скважина зарастает в верхней части на 50 % и ее расход уменьшается в три раза. Суммарная добыча соли составит 27387,7 т, в пересчете на литий – 31,2 т, если принять его массовую долю в минерализации исходного рассола 0,114 %.

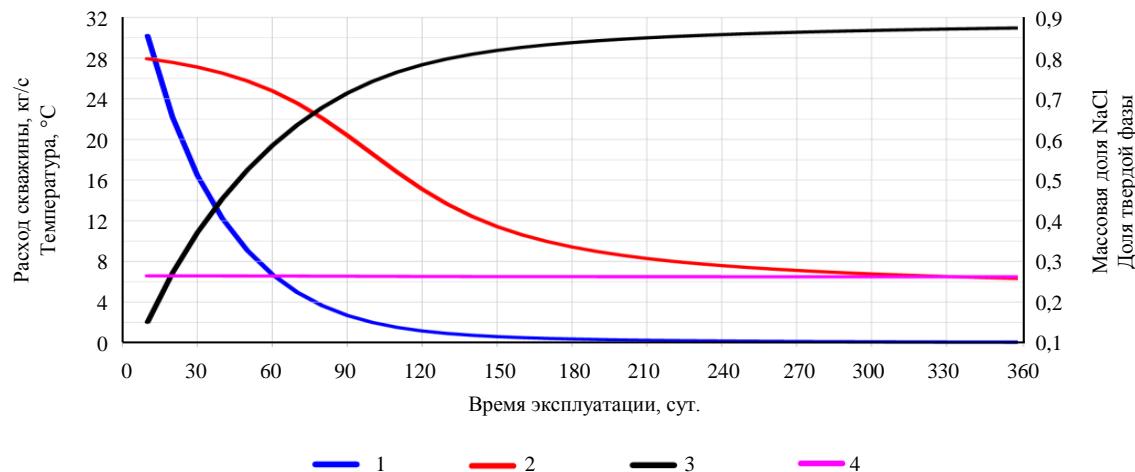


Рис.6. Результаты TOUGH2-EWASG моделирования извлечения предельно насыщенных рассолов (тестовая задача 3)

1 – изменение расхода добываемой скважины, кг/с; 2 – устьевой температуры, °C; 3 – объемной доли S_S заполнения скважинного пространства твердой фазой NaCl; 4 – массовой доли NaCl в приустьевой части добываемой скважины

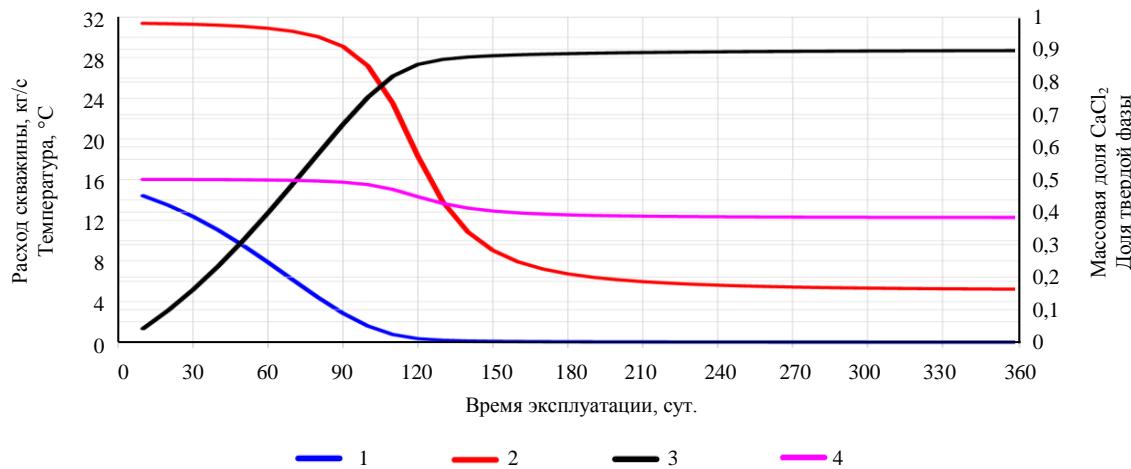


Рис.7. Результаты TOUGH2-EWASG-CaCl₂ моделирования извлечения предельно насыщенных рассолов (тестовая задача 4A)

1 – изменение расхода добывной скважины, кг/с; 2 – устьевой температуры, °С;
3 – объемной доли S_g заполнения скважинного пространства твердой фазой CaCl₂·6H₂O;
4 – массовой доли CaCl₂ в приустевой части добывной скважины

Моделирование добычи в режиме самоизлива с учетом снижения проницаемости при зарастании порового пространства и хлоридно-кальциевого состава предельно насыщенного рассола (тестовые задачи 4, 4A). В тестовой задаче 4 сохраняются условия предыдущей (тестовая задача 3), но при этом рассматривается хлоридно-кальциевый состав предельно насыщенного рассола и возможность отложения в твердой фазе антарктиита в целевом резервуаре и стволе скважины. В связи с этим модуль состояния флюида EWASG был программно преобразован в EWASG-CACL2. Растворимость антарктиита в зависимости от температуры аппроксимирована формулой

$$XEQ = 35,533874 + 0,5595171T - 0,000030751T^2,$$

где XEQ – массовая доля CaCl₂ в предельно насыщенном рассоле; T – температура, °С.

Зависимость плотности предельно насыщенного рассола DB от массовой доли CaCl₂ определена как $DB = 997,55060 + 460,56046 \cdot XEQ + 974,57187 \cdot XEQ^2$.

Результаты моделирования с исходными параметрами показывают, что расход скважины катастрофически падает с 2 кг/с до нуля в первую неделю эксплуатации и устьевая часть заполняется антарктиитом. Суммарная добыча CaCl₂ невелика и составит 207,6 т, в пересчете на литий – 237 кг, если принять его массовую долю в минерализации исходного рассола 0,114 %. Поэтому была рассмотрена тестовая задача 4A, в которой по сравнению с тестовой задачей 4 увеличен индекс продуктивности скважины до $1,0 \cdot 10^{-10}$ м³ и уменьшена теплопроводность вмещающих скважину горных пород до 0,1 Вт/м·°С.

На рис.7 показаны результаты моделирования с исходными параметрами: изменение расхода и устьевой температуры; насыщения твердой фазы и концентрации CaCl₂ в устьевой части скважины в процессе ее эксплуатации продолжительностью 37 сут. Как и в предшествующих тестовых задачах, динамика заполнения ствола скважины твердыми осадками на различные моменты эксплуатации ($t = 1$ ч, 1, 3, 5, 10 и 37 сут.) такова, что происходит неравномерное заполнение ствола скважины твердым осадком преимущественно в верхней приустевой части скважины, уже через неделю эксплуатации скважина зарастает в верхней части на 50 % и ее расход уменьшается с 14 до 5,5 кг/с. Суммарная добыча соли составит 3681 т, в пересчете на литий – 4,2 т, если принять его массовую долю в минерализации исходного рассола 0,114 %.

Обсуждение результатов

В составе рассолов доминируют хлориды кальция, магния, калия и натрия. И если для хлоридов натрия и калия характерна слабая зависимость растворимости от температуры, то растворимость хлоридов кальция и магния, которые кристаллизуются в виде кристаллогидратов с переменным



количеством воды, очевидно зависит от температуры. Вследствие сильной зависимости растворимости от температуры предельно насыщенные концентрированные растворы хлоридов кальция и магния крайне чувствительны к колебаниям внешних параметров, и уже при небольшом понижении температуры из рассола могут лавинообразно кристаллизоваться водные хлориды. Хлорид кальция доминирует в составе рассола, добываемого из скважины Ковыктинского газоконденсатного месторождения, участка «Литий», на котором проводятся ГРР и строится опытное производство по добыче литиеносных рассолов. Рапа должна оставаться жидкой при температуре выше 40-55 °C, когда в подсистеме $MgCl_2-CaCl_2-H_2O$ широкую область занимает кристаллизация тахгидрита, а фигутивная точка рапы попадает почти на границу его выделения.

На рис.2 показан температурный профиль ОК, где видно, что на большей части колонны температура ниже 35 °C, что в принципе может привести к застанию на любом участке. Особенно критична ситуация на первом километре от поверхности, когда температура опускается до 2-9 °C. Это зона лавинообразного выделения антарктиита, биофита. На глубине 600-1200 м скважина имеет температуру 10-20 °C. Здесь будет кристаллизоваться антарктиит, и его количество может стать существенным для застания ОК. На глубине 1200-1900 м, где ОК имеет температуру 20-30 °C, количество выделяющегося антарктиита уменьшается, ему на смену приходит тахгидрит. Выше 30 °C на глубинах ниже 1900 м может выделяться тахгидрит, и с ростом температуры количество кристаллических фаз уменьшается. Выше 40 °C количество выделяющегося тахгидрита уменьшается вследствие увеличения его растворимости, и количество выделяющейся соли может быть уже не критичным для скважины, например по причине механического удаления кристаллов потоком рассола, находящегося под давлением.

Отметим, что в ходе добычи ТРИЗ гидроминерального сырья участка «Литий» оптимальным будет обеспечить технико-технологические решения по сохранению высокой, условно более 40-55 °C, температуры обсадной, лифтовой колонн и устьевого оборудования. В высокотемпературных условиях антарктиит уже нестабилен, а поле кристаллизации тахгидрита уменьшается, количество выделяющейся соли может быть небольшим и не заполнит пространство внутри лифтовой колонны.

Иной вариант решения проблемы застания добывчих скважин хлоридными солями предлагает российский опыт по оптимизации работы добывчих скважин [40]. Исследуется проблема снижения проницаемости коллекторов вследствие кольматации скважин при первичном вскрытии в ходе добычи углеводородного сырья [41], проведено моделирование дробления пород и течения технологических растворов [42], где образование осадка компенсируется его выносом на поверхность. Снижение проницаемости продуктивных пластов, имеющее негативные последствия, обсуждается в работе [43]. Одним из способов борьбы является применение технологических растворов, снижающих поверхностное натяжение. Отрабатывается технология бурения в ледовом массиве методом плавления [44], что показывает актуальность и технологическую возможность температурного контроля в ходе бурения скважин. Отметим, что способ добычи предельно насыщенных рассолов, склонных к кристаллизации (ТРИЗ), рассмотрен в ряде патентов [31], где предлагается одновременно несколько решений: новая конструкция и схема обвязки устья и технология бурения с одновременным возвратом, обратной закачкой в поглощающий горизонт; при остановке углубления скважины – закачки в призабойную зону пласта слабоминерализованных, стабилизованных рассолов, последующего стравливания давления и перехода в режим самоизлива с прогревом колонны. Также существует российский патент на изобретение – способ вскрытия пропластков с аномально высоким пластовым давлением и низкими ФЕС.

Создана технология термокейса [45, 46] – создания теплоизоляционного слоя в ОК [47] либо потока горячего теплоносителя. Изначально технология термокейса разработана для добычи нефти в многолетнемерзлотных породах и предотвращения их таяния [48]. В качестве теплоизолятора может быть использовано базальтовое волокно, пенополиуретан и др. Возможно, технология термокейса может быть полезна не только для предотвращения оттаивания вечной мерзлоты, но и контроля температурного режима скважин в ходе гидродинамических исследований и добычи ТРИЗ высокоминерализованных рассолов.



Оптимальной можно считать технологию прогрева эксплуатационной колонны горячим потоком теплоносителя, которая проверена в условиях производственных циклов работы на управляемом переливе скважины ЗА Знаменской и показала свою эффективность. Поэтому для решения проблемы зарастания скважин солями из рассола могут быть применены существующие технологии с прогревом, закачкой слабоминерализованных либо практически «чистых» горячих технических вод, прогрев и теплоизоляция скважинного оборудования.

Применение TOUGH2-EWASG моделирования воспроизводит динамические процессы при эксплуатации хлоридно-натриевых рассолов и позволяет оценить принципиальную возможность эксплуатации в аналогичных условиях более растворимых хлоридно-кальциевых рассолов. Кристаллизация соли в модели происходит в результате уменьшения растворимости галита при изменениях температуры, однако сама по себе зависимость растворимости NaCl от температуры слабая, в отличие от растворимости хлоридов кальция и магния. Экстраполируя результат моделирования на раствор хлорида кальция и магния, можно отметить более быстрое зарастание скважинного пространства, чем в случае хлорида кальция. Вариант добычи с циклической закачкой горячей воды и откачкой полученного рассола (тестовая задача 1) предотвращает зарастание добывающих скважин и приводит к устойчивой добыче гидроминерального сырья. Но при этом необходимо обеспечить хорошее перемешивание закачиваемой горячей воды с исходным рассолом, что легко сделать на модели за счет увеличения коэффициента гидродисперсии, но может оказаться трудновыполнимым на практике.

При термогидродинамическом моделировании (тестовые задачи 3 и 4А) фонтанной эксплуатации с учетом нестационарного теплообмена показана возможность извлечения предельно насыщенного рассола хлоридно-натриевого (27387,7 т) и хлоридно-кальциевого (3681 т) из цевового продуктивного резервуара (вопреки термодинамической кристаллизации, соответствующей температурному профилю скважины). При этом добыча лития оценивается от 31,2 до 4,2 т на одну скважину. Термогидродинамическое моделирование демонстрирует снижение расхода фонтанирующих скважин, синхронизированное с уменьшением температуры и увеличением скорости заполнения скважины твердым осадком. На модели воспроизводится наблюдаемое на практике быстрое зарастание эксплуатационной колонны и снижение дебита добывающих скважин в течение недель (хлоридно-кальциевые предельно насыщенные рассолы) или месяцев (хлоридно-натриевые предельно насыщенные рассолы).

Заключение

В системе $\text{KCl}-\text{MgCl}_2-\text{CaCl}_2-\text{H}_2\text{O}$ зафиксировано около двадцати фаз, включая лед и раствор. При зарастании ОК имеют значение две из них – антарктиkit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и тахгидрит $\text{Mg}_2\text{CaCl}_6 \times 12\text{H}_2\text{O}$. Соли на основе хлоридов кальция и магния, кристаллизующиеся из рассола, в основном представляют кристаллогидраты с переменным количеством воды, и при повышении температуры их растворимость сильно возрастает. В составе рапы доминирует хлорид кальция – 442 г/л, далее хлорид магния – 112 г/л и хлорид калия около 5 г/л. При зарастании скважин критично поведение хлоридов кальция и магния как доминирующих солей, а соли на основе калия даже если и выделяются, то в небольшом количестве, что позволяет предположить их незначительную и пренебрежимо малую роль в зарастании лифтовых и ОК.

При низких температурах от -35 до -10 $^{\circ}\text{C}$, которые встречаются в условиях сибирской зимы, из рапы на дневной поверхности кристаллизуются лед, гидраты хлорида магния и кальция, двенадцативодный хлорид магния $\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. В виде изоморфной примеси в состав этого соединения может входить рубидий. Литий же, наиболее вероятно, останется в жидкости. При температурах от -10 до 20 $^{\circ}\text{C}$ из рапы может лавинообразно кристаллизоваться антарктиkit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, а скважинное пространство зарастать солевыми отложениями. С повышением температуры поле двухфазного равновесия антарктикита с его насыщенным раствором сокращается за счет увеличения поля жидкости, что эквивалентно увеличению его растворимости и соответствует уменьшению количества выделяющейся соли. В температурном интервале от 20 до 30 $^{\circ}\text{C}$ поле кристаллизации



антарктиита сокращается, но он по-прежнему выделяется. Одновременно на диаграмме состояний появляется узкое поле равновесия насыщенного раствора с тахгидритом, который также может кристаллизоваться в ОК и в районе оголовка в заметных количествах. Этот температурный диапазон не слишком оптимален для эксплуатации, хотя в его пределах растворимость антарктиита уже достаточно высокая, а поле кристаллизации тахгидрита достаточно узкое, что скорее приведет к меньшему количеству выделяемых солей, чем в более холодных температурных условиях.

При дальнейшем повышении температуры в диапазоне 30-40 °С на смену антарктииту приходит тахгидрит (двойная соль с формулой $Mg_2CaCl_6 \cdot 12H_2O$). Кроме того, из рапы может выделяться карналлит $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$, но в небольших количествах. Скважинное пространство в этом диапазоне может зарастать, на этот раз не антарктиитом, а тахгидритом. Повышение температуры приводит к сокращению поля кристаллизации двойного кристаллогидрата, и в диапазоне 40-55 °С фигурация точка рассола оказывается вблизи линии двухфазного равновесия кристаллизации тахгидрита. Поэтому, несмотря на то, что тахгидрит кристаллизуется, количества выделяющейся соли относительно массы рассола небольшое. При более высоких температурах до 100 °С тахгидрит выделяется в незначительных количествах.

Термограмма скважины показывает, что до глубины 1200 м температура ниже 20 °С и ОК может зарастать антарктиитом и бишофитом. При 20 °С ниже 1200 м на смену антарктииту приходит тахгидрит, который тоже хорошо растворим, и при температурах выше 30 °С эта соль будет доминировать в составе выделяющегося осадка. Однако с возрастанием температуры количество выделяющегося антарктиита будет уменьшаться вследствие возрастания его растворимости.

Подводя итог термодинамическому анализу, можно заключить, что оптимальными температурными режимами эксплуатации глубоких скважин для добычи ТРИЗ хлоридно-кальциевых сверхкрепких рассолов являются температуры выше 30-55 °С. Имеющийся опыт эксплуатации осложненных скважин показывает, что промывка ОК слабоминерализованными растворами, а также технологии теплоизоляции и прогрева скважин могут быть адаптированы к добыче ТРИЗ предельно насыщенных и весьма крепких литиеносных рассолов. Технические условия, обеспечивающие необходимые температурные диапазоны, могут быть аналогичны методу термокейса, который применяется при разработке ТРИЗ углеводородного сырья в условиях вечной мерзлоты и призван предотвратить как ее протаивание, так и выделение в обсадных трубах отложений из тяжелых парафинов.

Термогидродинамическое моделирование одиночной фонтанирующей скважины для гидро-геологических условий, близких к условиям Ковыктинской площади на юге СП, показало принципиальную возможность длительной (от месяца до года) эксплуатации предельно насыщенных хлоридно-натриевых и хлоридно-кальциевых литиеносных рассолов с добычей лития от 31,2 до 4,2 т на одну скважину.

Задачи дальнейших исследований включают доработку модуля состояния флюидов TOUGH2-EWASG для хлоридно-кальциевых и хлоридно-магниевых рассолов, апробацию моделей на данных опытных работ на участках разведки и эксплуатации предельно насыщенных литиеносных хлоридных рассолов, отработку методов решения обратных задач для определения фильтрационно-емкостных, теплофизических свойств и граничных условий целевых резервуаров, обоснование технологий устойчивой эксплуатации скважины в режиме самоизлива/фонтонирования, откачки или комбинированного самоизлива с закачкой горячей воды или пара.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра коллективного пользования ИВиС ДВО РАН «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа» ведущим инженерам Е.А.Якимовой, Л.А.Позолотиной, О.В.Белоусу, старшим инженерам С.М.Ивановой, В.М.Рагулиной, Н.И.Чебровой, С.Д.Курдюкову за качественные прецизионные аналитические работы.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Юрчик И.И.* Литий в рассолах Сибирского солеродного бассейна // XX Международный научный конгресс «Ингерекспо ГЕО-Сибирь»: Материалы Международной научной конференции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология», 15-17 мая 2024, Новосибирск, Россия. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2024. Т. 2. № 1. С. 247-250. [DOI: 10.33764/2618-981X-2024-2-1-247-250](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2024-2-1-247-250)
2. *Мохунов В.Ю., Гулый Н.И.* Анализ тенденций современных технологий извлечения лития из гидроминерального сырья // Недропользование XXI век. 2022. № 4 (96). С. 38-50.
3. *Патрикеев П.А., Ахияров А.В., Кирсанов А.М. и др.* Прогноз перспектив нефтегазоносности в пределах Кочечумско-Мархинской НГПЗ Лено-Тунгусской НГП, с учетом сложного геологического разреза, насыщенного продуктами интрузивного траппового магматизма // Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата: Сборник трудов III Всероссийской конференции, посвященной 25-летию Института проблем нефти и газа СО РАН, 10-13 сентября 2024, Якутск, Россия. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2024. С. 75-80. [DOI: 10.24412/cl-37255-2024-1-75-80](https://doi.org/10.24412/cl-37255-2024-1-75-80)
4. *Donskaya T.V., Gladkochub D.P.* Post-collisional magmatism of 1.88–1.84 Ga in the southern Siberian Craton: An overview // Precambrian Research. 2021. Vol. 367. № 106447. [DOI: 10.1016/j.precamres.2021.106447](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106447)
5. *Chang S.A., Balouch A., Abdullah.* Analytical perspective of lithium extraction from brine waste: Analysis and current progress // Microchemical Journal. 2024. Vol. 200. № 110291. [DOI: 10.1016/j.microc.2024.110291](https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110291)
6. *Попов Г.В., Пашкевич Р.И.* Кинетика ионного обмена лития из растворов в статических условиях // Башкирский химический журнал. 2018. Т. 25. № 4. С. 46-49. [DOI: 10.17122/bcj-2018-4-46-49](https://doi.org/10.17122/bcj-2018-4-46-49)
7. *Белова Т.П., Ратчина Т.И.* Исследование сорбции лития катионитом КУ-2-8 из модельных растворов, имитирующих геотермальные теплоносители в динамическом режиме // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 197-201. [DOI: 10.31897/PMI.2020.2.197](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.197)
8. *Mends E.A., Chu P.* Lithium extraction from unconventional aqueous resources – A review on recent technological development for seawater and geothermal brines // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. Vol. 11. Iss. 5. № 110710. [DOI: 10.1016/j.jece.2023.110710](https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110710)
9. *Suharyanto A., Rohmah M., Lalaesari L.H., Mubarok M.Z.* Lithium adsorption behaviour from Ciseeng geothermal brine water onto Amberlite resin // AIP Conference Proceedings. 2024. Vol. 3003. Iss. 1. № 020113. [DOI: 10.1063/5.0186324](https://doi.org/10.1063/5.0186324)
10. *Рябцев А.Д., Коцупало Н.П., Менжерес Л.Т. и др.* Реализация комплексной технологии переработки рассолов хлоридного кальциевого типа с получением безбромного литиевого концентрат // Химическая технология. 2023. Т. 24. № 9. С. 337-342. [DOI: 10.31044/1684-5811-2023-24-9-337-342](https://doi.org/10.31044/1684-5811-2023-24-9-337-342)
11. *Коцупало Н.П., Немудрый А.П.* Разработка технологий переработки горнорудного и гидроминерального литиеносного сырья. Научные основы получения селективного сорбента лития // Химия в интересах устойчивого развития. 2021. Т. 29. № 3. С. 355-362. [DOI: 10.15372/KhUR2021312](https://doi.org/10.15372/KhUR2021312)
12. *Bofill L., Bozetti G., Schäfer G. et al.* Quantitative facies analysis of a fluvio-aeolian system: Lower Triassic Buntsandstein Group, eastern France // Sedimentary Geology. 2024. Vol. 465. № 106634. [DOI: 10.1016/j.sedgeo.2024.106634](https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2024.106634)
13. *Ashadi A.L., Martinez Y., Kirmizakis P. et al.* First High-Power CSEM Field Test in Saudi Arabia // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 10. № 1236. [DOI: 10.3390/min12101236](https://doi.org/10.3390/min12101236)
14. *Herrmann L., Ehrenberg H., Graczyk-Zajac M. et al.* Lithium recovery from geothermal brine – an investigation into the desorption of lithium ions using manganese oxide adsorbents // Energy Advances. 2022. Vol. 1. Iss. 11. P. 877-885. [DOI: 10.1039/d2ya00099g](https://doi.org/10.1039/d2ya00099g)
15. *Glen J.M.G., Earney T.E.* New high resolution airborne geophysical surveys in Nevada And California for geothermal and mineral resource studies // Geothermal Resources Council Transactions. 2023. Vol. 47. P. 1738-1762.
16. *Кузьменко П.С., Михеева Е.Д.* Минерально-сырьевая база месторождений литиеносных глин и туфов // Недропользование XXI век. 2024. № 2 (103). С. 14-19.
17. *Антипин В.С., Кузьмин М.И., Одгэрэл Д. и др.* Редкometалльные литий-фтористые граниты в позднепалеозойском, раннемезозойском и позднемезозойском ареалах гранитоидного магматизма Центральной Азии // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 7. С. 935-955. [DOI: 10.15372/GiG2021165](https://doi.org/10.15372/GiG2021165)
18. *Алексеев В.И.* Тектоно-магматические факторы локализации литий-фтористых гранитов Востока России // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 173-179. [DOI: 10.31897/PMI.2021.2.1](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.2.1)
19. *Алексеев В.И.* Типовая интрузивная серия Дальневосточного пояса литий-фтористых гранитов и ее рудоносность // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 377-392. [DOI: 10.31897/PMI.2022.21](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.21)
20. *Alam M.A., Muñoz A.* A critical evaluation of the role of a geothermal system in lithium enrichment of brines in the salt flats: A case study from Laguna Verde in the Atacama Region of Chile // Geothermics. 2024. Vol. 119. № 102970. [DOI: 10.1016/j.geothermics.2024.102970](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102970)
21. *Судариков С.М., Змievский М.В.* Геохимия рудообразующих гидротермальных флюидов Мирового океана // Записки Горного института. 2015. Т. 215. С. 5-15.
22. *Fei Xue, Hongbing Tan, Xiyi Zhang et al.* Contrasting sources and enrichment mechanisms in lithium-rich salt lakes: A Li-H-O isotopic and geochemical study from northern Tibetan Plateau // Geoscience Frontiers. 2024. Vol. 15. Iss. 2. № 101768. [DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101768](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101768)
23. *Zheng Hao, Zhao Hai Xiang, Tan Hong Bing.* Calculation of ore-forming material balance and material source of Li-B rich brines in Mami Co Lake, Tibet // Mineral Deposits. 2023. Vol. 42. № 2. P. 411-424. [DOI: 10.16111/j.0258-7106.2023.02.011](https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2023.02.011)



24. Kiryukhin A.V., Nazhalova I.N., Zhuravlev N.B. Hot water-methane reservoirs at southwest foothills of Koryaksky volcano, Kamchatka // Geothermics. 2022. Vol. 106. № 102552. [DOI: 10.1016/j.geothermics.2022.102552](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102552)
25. Dugamin E.J.M., Cathelineau M., Boiron M.C. et al. Lithium enrichment processes in sedimentary formation waters // Chemical Geology. 2023. Vol. 635. № 121626. [DOI: 10.1016/j.chemgeo.2023.121626](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121626)
26. Al-Jawad J., Ford J., Petavratzi E., Hughes A. Understanding the spatial variation in lithium concentration of high Andean Salars using diagnostic factors // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 906. № 167647. [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167647](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167647)
27. Baines A., Broadley M., Gines J. et al. Bare-earth satellite imagery and the search for hidden lithium-rich brines: An example from the Lithium Triangle in South America // The International Meeting for Applied Geoscience and Energy: Expanded Abstracts 2023 Technical Program, 28 August – 1 September 2023, Houston, TX, USA. Society of Exploration Geophysicists, 2023. P. 1136-1140. [DOI: 10.1190/image2023-3909965.1](https://doi.org/10.1190/image2023-3909965.1)
28. Lattus J.M., Barber M.E., Skoković D. et al. Spaceborne Radars for Mapping Surface and Subsurface Salt Pan Configuration: A Case Study of the Pozuelos Salt Flat in Northern Argentina // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. Iss. 8. № 1411. [DOI: 10.3390/rs16081411](https://doi.org/10.3390/rs16081411)
29. Jiang Guo, Zhou Kefa, Wang Jinlin et al. Identification of lithium-beryllium granitic pegmatites based on deep learning // Earth Science Frontiers. 2023. Vol. 30. № 5. P. 185-186. [DOI: 10.13745/j.esf.sf.2023.5.20](https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.5.20)
30. Rossi C., Bateson L., Bayaraa M. et al. Framework for Remote Sensing and Modelling of Lithium-Brine Deposit Formation // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. Iss. 6. № 1383. [DOI: 10.3390/rs14061383](https://doi.org/10.3390/rs14061383)
31. Агафонов Ю.А., Алексеев С.В., Алексеева Л.П. и др. Рапогазопроявления и аномально высокие пластовые давления литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы (флюидогеодинамическая интерпретация геолого-геофизических и геопромысловых данных; прогноз горно-геологических условий, инновационные подходы и решения в бурении и освоении Ковыктинского газоконденсатного месторождения). В 2 т. Т. 1. Обзор проблемы бурения скважин в условиях АВПД и высокодебитных фонтанных притоков редкометальных рассолов. Геолого-структурная позиция и строение Ковыктинского ГКМ. Гидрогеология и минерагения концентрированных рассолов. Строение межсолевых природных резервуаров осадочного чехла галогенно-карбонатного кембрия. Поликомпонентные промышленные рассолы глубоких горизонтов чехла как комплексное гидроминеральное сырье. Технологии переработки рассолов. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. 302 с.
32. Мелентьев Г.Б., Шевчук Р.М., Делицын Л.М. и др. Приоритетные минеральные ресурсы и «критические» материалы России для производства литий-ионных аккумуляторов // Известия Коми научного центра УрО РАН. Серия «Экономические науки». 2023. № 3 (61). С. 59-70. [DOI: 10.19110/1994-5655-2023-3-59-70](https://doi.org/10.19110/1994-5655-2023-3-59-70)
33. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vakhromeev A.G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects // Applied Geochemistry. 2020. Vol. 117. № 104588. [DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104588](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104588)
34. Сырков А.Г., Прокопчук Н.Р., Воробьев А.Г., Бричкин В.Н. Академик Н.С.Курнаков как основоположник физико-химического анализа – научного фундамента для разработки новых металлических сплавов и материалов // Цветные металлы. 2021. № 1. С. 77-83. [DOI: 10.17580/tsm.2021.01.09](https://doi.org/10.17580/tsm.2021.01.09)
35. Солиев Л., Жумаев М.Т. Дивариантные равновесия в многокомпонентных системах // Химический журнал Казахстана. 2021. № 4 (76). С. 59-71. [DOI: 10.51580/2021-1/2710-1185.49](https://doi.org/10.51580/2021-1/2710-1185.49)
36. Хамракулов З.А., Аскарова М.К., Тухтаев С. Растворимость компонентов в системах $MgCl_2-CaCl_2-H_2O$, (48.2% $CaCl_2$ + 51.8% $MgCl_2$)– $NaClO_3-H_2O$ // Журнал неорганической химии. 2015. Т. 60. № 10. С. 1405-1410. [DOI: 10.7868/S0044457X15080103](https://doi.org/10.7868/S0044457X15080103)
37. Вахромеев А.Г., Смирнов А.С., Сверкунов С.А. и др. Технологические варианты освоения литиеносных залежей ТРИЗ межсолевых рассолоносных пластов с АВПД флюидной системы // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2025. № 6 (390). С. 5-13.
38. Feng Liu, Gui-ling Wang, Wei Zhang et al. Using TOUGH2 numerical simulation to analyse the geothermal formation in Guide basin, China // Journal of Groundwater Science and Engineering. 2020. Vol. 8. № 4. P. 328-337. [DOI: 10.19637/j.cnki.2305-7068.2020.04.003](https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2020.04.003)
39. Pruess K., Oldenburg C., Moridis G. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. Ernest Orlando Lawrence Berkley National Laboratory, 1999. Report № LBNL-43134. 204 p. [DOI: 10.2172/751729](https://doi.org/10.2172/751729)
40. Топоркова Е.В., Конкин В.В., Лашкин Н.Е., Зайцев К.А. Совершенствование технологии подготовки нефти на приразломном нефтяном месторождении // Академический журнал Западной Сибири. 2015. Т. 11. № 5 (60). С. 35-36.
41. Гасумов Р.А. Причины отсутствия притоков пластовых флюидов при освоении скважин малых месторождений (на примере хадум-баталпашинского горизонта) // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 630-636. [DOI: 10.31897/PMI.2018.6.630](https://doi.org/10.31897/PMI.2018.6.630)
42. Григорьев Б.С., Елисеев А.А., Погарская Т.А., Торопов Е.Е. Математическое моделирование дробления грунта и многофазного течения бурового раствора при бурении скважин // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 16-23. [DOI: 10.31897/PMI.2019.1.16](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.1.16)
43. Рогов Е.А. Исследование проницаемости призабойной зоны скважин при воздействии технологическими жидкостями // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 169-173. [DOI: 10.31897/PMI.2020.2.169](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.169)
44. Сербин Д.В., Дмитриев А.Н. Экспериментальные исследования теплового способа бурения плавлением скважины в ледовом массиве с одновременным контролируемым расширением ее диаметра // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 833-842. [DOI: 10.31897/PMI.2022.82](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.82)
45. Артеменков В.Ю., Ерехинский Б.А., Заряев И.А. Об опыте применения теплоизолированных лифтовых труб при добывче нефти и газа // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2017. № 2 (60). С. 20-23.
46. Гришин М.С., Галеев А.Р. Исследование комбинированной технологии изоляции ствола скважины в интервалах многолетнемерзлых пород // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2023. Т. 1. С. 154-159.



47. Посконина Е.А., Курчатова А.Н. Определение минимальной длины термокейса при выбранном расстоянии между скважинами // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2019. № 2 (12). С. 66-70. DOI: 10.24887/2587-7399-2019-2-66-70

48. Баданина Ю.В., Комков М.А., Бочкарев С.В., Павловская К.В. Создание насосно-компрессорных труб с высокоеффективным композиционным термобарьерным покрытием для паротепловой обработки скважин // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-3. С. 461-466.

Авторы: Анастасия Валерьевна Сергеева, канд. хим. наук, старший научный сотрудник (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), anastavalers@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5127-347X>,
Алексей Владимирович Кирюхин, д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-5468-1452>, Андрей Гелиевич Вахромеев, д-р геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией (Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия), <https://orcid.org/0009-0000-7309-4464>, Сергей Борисович Коротков, канд. геол.-минерал. наук, начальник отдела (ООО «Газпром Инвест», Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-8536-6911>, Мария Александровна Данилова, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник (ООО «РН-Красноярск НИПИнефть», Красноярск, Россия), научный сотрудник (Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-0577-8175>, Елена Вячеславовна Карташева, заведующий Аналитическим центром (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-0518-7412>, Анна Александровна Кузьмина, младший научный сотрудник (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-1428-6447>, Мария Анатольевна Назарова, младший научный сотрудник (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6839-6599>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Прогноз предельного состояния и дилатансии пород вокруг горных выработок

А.Г.Протосеня, М.А.Карасев, Н.А.Беляков, П.К.Тулин

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

Как цитировать эту статью: Протосеня А.Г., Карасев М.А., Беляков Н.А., Тулин П.К. Прогноз предельного состояния и дилатансии пород вокруг горных выработок // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 107-122. [EDN YMRWQB](#)

Аннотация

Цель работы – совершенствование метода прогноза геомеханических процессов при строительстве горных выработок в упругопластическом породном массиве с дилатансией. Приведены результаты экспериментальных исследований объемной прочности горных пород и особенностей развития объемных деформаций при пластическом сдвиге. Показано проявление дилатансии горных пород, представлены диаграммы изменения объемных деформаций пластического сдвига при различной величине достигнутых сдвиговых деформаций. Выполнена обработка результатов испытаний горных пород с использованием условия пластичности А.Н.Ставрогина. Предложено новое аналитическое решение задачи прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива в зоне развития неупругих деформаций на основании условия пластичности А.Н.Ставрогина, в том числе уравнения для расчета зоны предельного состояния пород в окрестности горной выработки. Представлен алгоритм прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива. Изучены закономерности связи размеров зоны предельного состояния породного массива в окрестности горной выработки с параметрами дилатансии горных пород, коэффициентом бокового распора и глубиной заложения выработки. Исследован характер развития смещений контура горной выработки кругового очертания в постановке плоской деформации при различных параметрах условия пластичности и показателях дилатансии горных пород. Выполнено внедрение условия пластичности А.Н.Ставрогина в программный комплекс Abaqus. Результаты исследований позволили установить область применения аналитического решения. Оно сохраняет физический смысл только при формировании зоны предельного состояния в окрестности всего контура горной выработки. Представленный подход к численному решению не содержит это ограничение и может распространяться на произвольное геомеханическое состояние породного массива и на любую форму сечения горной выработки.

Ключевые слова

горная порода; прочность; условие пластичности; дилатансия; неупругое деформирование; смещения контура; горная выработка; геомеханическая модель

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-00144).

Поступила: 11.07.2024

Принята: 09.10.2025

Онлайн: 26.11.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

С увеличением глубины разработки месторождений полезных ископаемых наблюдается снижение устойчивости породных обнажений [1-3], которое сопровождается развитием пластических деформаций в зоне предельного состояния [4]. Решение задачи прогноза зоны предельного состояния и смещений в окрестности породных обнажений, расположенных в упругопластическом породном массиве, представляет значительный интерес при освоении подземного пространства и разработке месторождений полезных ископаемых [3, 4]. Оно включает в себя изучение механических характеристик пород [5-8], породного массива [9, 10], формулировку новых критериев прочности пород [11-13] и разработку моделей прогноза геомеханического состояния породного массива в окрестности горных выработок как от его естественного напряженного состояния, так и с учетом внутреннего давления, возникновение которого возможно в выработанном пространстве. На основании полученных решений разрабатываются мероприятия по приведению породных обнажений к устойчивому состоянию [14].

Расчет зон предельного состояния пород вокруг выработок в плоской постановке сводится к решению двумерных упругопластических задач [15, 16] с заранее недетерминированной границей, разделяющей упругую и пластическую области в породном массиве, в которых деформирование сред определяется различными наборами уравнений. Аналитическое решение этих задач представляет известные трудности, поскольку форма и размеры пластической области заранее не известны и должны быть определены при решении [17-19].

Впервые точное решение упругопластической задачи о распределении напряжений вокруг кругового отверстия в бесконечной плоскости дал Л.А.Галин. Решение можно использовать для оценки зон предельного состояния вокруг выработки в массиве, растягиваемом постоянными напряжениями на бесконечности, и с нормальными усилиями, приложенными на ее контуре. Смещения в пластической области для задачи Галина были определены методом малого параметра Д.Д.Ивлевым, а Н.И.Остробаблиным получено точное решение системы уравнений для смещений в этой области. Дальнейшие исследования плоской упругопластической задачи связаны с изменением формы отверстия с круговой на эллиптическую.

Большинство из существующих аналитических и полуаналитических решений для прогноза размеров зон предельного состояния вокруг выработки основаны на рассмотрении бесконечной плоскости в окрестности породного обнажения как упругопластической среды с использованием условия пластичности Кулона [20, 21]. Получен ряд аналитических решений для прогноза напряженно-деформированного состояния с использованием нелинейных критериев прочности горных пород [22-25]. Основное внимание было уделено формированию напряженно-деформированного состояния в окрестности горной выработки кругового очертания. Решение такой задачи получено для условий идеальной упругопластической среды [26-28], упругопластической среды с учетом изотропного упрочнения или разупрочнения [29-31]. Представлены аналитические зависимости для прогноза размеров зоны предельного состояния и деформаций контура породных обнажений как для малых, так и для больших деформаций [32, 33]. Отдельные работы были посвящены вопросам прогноза напряженно-деформированного состояния в окрестности выработки, расположенной в анизотропном породном массиве [34] или в массиве, представленном вязкопластической средой [35]. Работы последних лет нашли широкое применение при прогнозе напряженно-деформированного состояния породных массивов, склонных к развитию больших деформаций. К отдельным задачам можно отнести прогноз напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности тоннелей некругового очертания [36] или сдвоенных тоннелей [37].

Несмотря на перечисленные результаты, аналитические решения получены для простых условий прочности, преимущественно линейных. Известно, что многие горные породы обладают нелинейными огибающими предельных кругов Мора. Этот факт желательно учитывать при выполнении геомеханических прогнозов. В работе уделено внимание выводу аналитического решения и созданию численной модели для прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки кругового очертания на основании условия прочности А.Н.Ставрогина.

Методы исследования

Условие прочности А.Н.Ставрогина. Форма огибающей предельных кругов Мора горной породы имеет криволинейный вид, что связано со сложным характером ее разрушения при различных видах напряженных состояний. В частных случаях огибающая может быть упрощена и представлена в виде линейной зависимости, называемой условием прочности Кулона. Для описания нелинейной огибающей предлагается [25] использовать различные кривые, в том числе параболу, экспоненту, циклоиду и другие в комбинации с прямолинейными отрезками и без них. А.Н.Ставрогиным предложены критерии прочности для предельного упругого состояния и предела прочности следующего вида:

$$\tau_y = \tau_y^0 e^{BC}; \quad (1)$$

$$\tau_n = \tau_n^0 e^{AC}, \quad (2)$$

где уравнение (1) – условие предельных упругих состояний; уравнение (2) – условие пределов прочности; $\tau_y = (\sigma_1^y - \sigma_3)/2$; $\tau_n = (\sigma_1^n - \sigma_3)/2$ – пределы упругости и прочности; τ_y^0 , τ_n^0 – константы,



являющиеся пределами упругости и прочности при одноосном сжатии; B, A – константы, отражающие упрочнение горных пород с ростом гидростатического давления; $C = \sigma_3/\sigma_1$ – параметр, характеризующий вид напряженного состояния.

Из условия равенства $\tau_n = \tau_y$ находим координату

$$C_p = \ln\left(\frac{\tau_n^0}{\tau_y^0}\right) \frac{1}{A - B}. \quad (3)$$

Значение C_p , подставленное в условия (1) или (2), позволяет получить вторую координату точки пересечения предельных кривых Int_n . После этого можно подсчитать прочность на отрыв по формуле

$$\sigma_p = \frac{2\tau_n}{\left(\frac{1}{C_p} - 1\right)}. \quad (4)$$

Постановка задачи прогноза зоны предельного состояния в окрестности горной выработки. Прогноз зоны предельного состояния в окрестности горной выработки рассматривается в постановке плоской деформации (рис.1). Размер горной выработки принимается равным r_0 , размер расчетной области $R \gg r$. Внешнее воздействие по границам расчетной области задается через давление, равное γH (вертикальная составляющая) и $\lambda \gamma H$ (горизонтальная составляющая). В результате внешнего воздействия в расчетной области формируется напряженное состояние, определяемое компонентами тензора напряжений $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$. При определении размера зоны предельного состояния принято, что размер зоны составляет R_L , при этом аналитическое решение имеет смысл только в том случае, когда зона предельного состояния полностью охватывает контур горной выработки. Численное решение не обладает такими ограничениями.

Условие прочности А.Н.Ставрогина не реализовано в программных продуктах для выполнения прочностных расчетов с применением численных методов анализа, а условия пластиичности для геоматериалов ограничиваются их линейным видом. Для внедрения условия пластиичности требуется разработка специальной процедуры, которая будет обновлять напряженное состояние при упругопластическом деформировании материала. Разделив нелинейное условие пластиичности А.Н.Ставрогина на набор линейных участков, можно добиться его реализации без разработки модели с полным описанием всех процедур, характерных для численной теории пластического течения.

В качестве линейного условия пластиичности принято хорошо зарекомендовавшее себя на практике условие пластиичности Кулона – Мора:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (5)$$

где c – сцепление; φ – угол внутреннего трения.

Для перевода показателей прочности А.Н.Ставрогина к эквивалентным показателям прочности Кулона, т.е. к эквивалентным сцеплению и углу внутреннего трения, будем использовать аппроксимацию экспоненциальной огибающей кругов предельного состояния (2) кусочно-линейной функцией. Точность аппроксимации определяется только количеством точек, выбранных на исходной экспоненциальной огибающей.

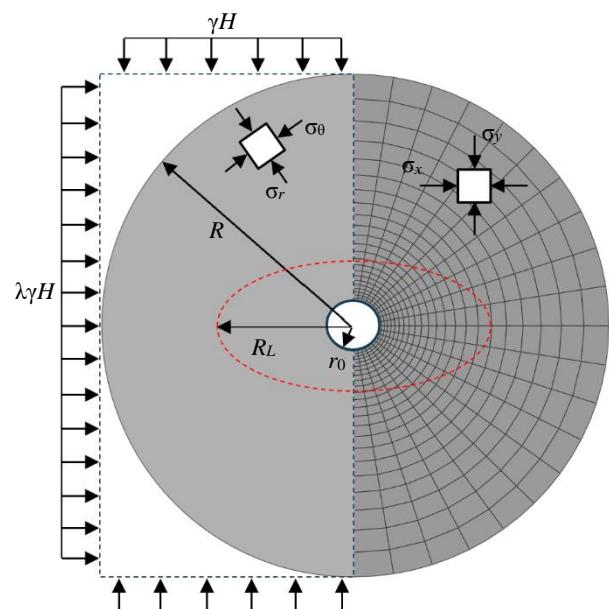


Рис.1. Постановка задачи прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки: слева – расчетная схема; справа – конечно-элементная модель; σ_x, σ_y – компоненты нормальных напряжений; σ_θ, σ_r – тангенциальные и радиальные напряжения; R – радиус до внешнего контура расчетной области ($R \gg r$); R_L – размер зоны предельного состояния

Для двух последовательно расположенных на экспоненциальной огибающей точек, представляющих на аппроксимирующей кусочно-линейной огибающей начальную и конечную точку одного линейного участка функции с постоянными значениями сцепления и угла внутреннего трения, значения будут определяться согласно выражениям:

$$c = \frac{\tau_M \sigma_N - \tau_N \sigma_M}{\tau_B - \tau_A}; \quad (6)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\tau_M - \tau_N}{\sigma_M - \sigma_N} \right), \quad (7)$$

где $\tau_M, \tau_N, \sigma_M, \sigma_N$ – координаты соседних точек M и N на экспоненциальной огибающей.

Результаты исследований

Аналитическое решение для прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива с условием А.Н.Ставрогина в окрестности горной выработки кругового очертания. В работе [26] рассмотрены вопросы расчета зоны пластических деформаций в окрестности горной выработки кругового очертания для случая гидростатического естественного напряженного состояния. Границы зоны предельного состояния определяются условием пластичности А.Н.Ставрогина.

Размер области предельного состояния получен с использованием метода малого параметра и может быть записан в следующем виде:

$$R_L = (r_0 + \varepsilon r_1 \cos 2\theta) R_0, \quad (8)$$

где $\varepsilon = 0,5(1-\lambda)$; θ – угловая координата;

$$\left. \begin{aligned} r_0^2 &= \tau_n^0 C_1 \frac{\exp \left[\frac{2A}{(A-N_1)} \right]}{\left[(\lambda_1 \gamma H k)^2 (A-N_1)^{2A} \right]}; \\ r_1 &= \frac{2r_0}{\lambda_1 k} \frac{\left[(A-N_1)^2 - A(1+A-N_1) \right]}{\left[(A-N_1)^2 - 2A(1+A-N_1) \right]}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$\lambda_1 = 0,5(1+\lambda)$; H – глубина заложения выработки; γ – удельный вес толщи пород; R_0 – радиус выработки; $N_1 = \ln \frac{\lambda_1 \gamma H k}{\tau_n^0}$.

Величина $k = a/r_0^2$ определяется из уравнения

$$A - N_1 = k(A + N_1). \quad (10)$$

В формулах (9) постоянная C_1 равна

$$C_1 = \frac{\tau_1^2}{\tau_n^0} \left(A - \ln \frac{\tau_1}{\tau_n^0} \right)^{2A} \exp \left[-\frac{2A}{\left(A - \ln \frac{\tau_1}{\tau_n^0} \right)} \right]; \quad (11)$$

τ_1 определяется из уравнения

$$p_0 = 2\tau_1 \frac{\left(\ln \frac{\tau_1}{\tau_n^0} \right)}{\left(A - \ln \frac{\tau_1}{\tau_n^0} \right)}, \quad (12)$$

где p_0 – отпор крепи.



Компоненты напряжений в упругой зоне около выработки записываются в виде:

$$\sigma_r = \gamma H \left[\lambda_1 \left(1 - \frac{a}{r^2} \right) - \varepsilon \left(1 - \frac{2b}{r^2} + \frac{d_2}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]; \quad (13)$$

$$\sigma_\theta = \gamma H \left[\lambda_1 \left(1 + \frac{a}{r^2} \right) + \varepsilon \left(1 + \frac{d_2}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]; \quad (14)$$

$$\tau_{r\phi} = \gamma H \left(1 + \frac{b}{r^2} - \frac{d_2}{r^4} \right) \sin 2\theta, \quad (15)$$

где a, b, d_2 – коэффициенты, учитывающие граничные условия.

Перейдем к определению смещений вокруг горной выработки для случая геостатического естественного напряженного состояния, когда коэффициент бокового давления λ отличен от единицы. Смещения в породном массиве вокруг выработки в этом случае зависят от радиальной r и угловой ϕ координат. При решении задачи ограничимся линейной аппроксимацией дилатансии.

Условие дилатансии в полярной системе координат может быть записано в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} = d \left(\frac{u}{r} - \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) + d_1, \quad (16)$$

где u, v – радиальное и окружное смещения.

Экспериментальные данные показывают, что для некоторых пород коэффициент d при линейной аппроксимации изменяется от 0 до -0,86.

В силу изотропности изменение объема при пластическом деформировании пород не зависит от направления и не влияет на деформации сдвига, поэтому в предельной зоне вблизи контура выработки деформации сдвига

$$\gamma_{r\phi} = \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} = 0. \quad (17)$$

Тогда для определения смещений u и v необходимо решить уравнения (16) и (17). Для этого используем полуобратный метод решения. Ограничивааясь первым приближением по малому параметру ε , смещения будем искать в виде:

$$u = \frac{u_0}{r^{\frac{1-d}{1+d}}} - \frac{d_1}{2} r + \varepsilon f(r) \cos 2\theta; \quad (18)$$

$$v = \varepsilon \varphi(r) \sin 2\theta, \quad (19)$$

где u_0 – постоянная функция; $f(r)$, $\varphi(r)$ – искомые функции.

Внося функции (18) и (19) в уравнения (16) и (17) и приравнивая выражения при одинаковых степенях ε , получим систему

$$\begin{cases} (1+d) f' + (1-d) \frac{f}{r} + 2(1-d) \frac{\varphi}{r} = 0; \\ \varphi' - \frac{\varphi}{r} - \frac{2}{r} f = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Сведем эту систему уравнений к дифференциальному уравнению Эйлера:

$$r^2 \varphi'' + N_2 r \varphi' + 3N_2 \varphi = 0, \quad (21)$$

где $N_2 = \frac{1-d}{1+d}$ и характеристическое уравнение записывается как

$$K^2 - \frac{2d}{1+d}K + 3N_2 = 0, \quad (22)$$

имеет корни

$$K_{1,2} = \frac{d}{1+d} \pm iN_3, \quad \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} < d \leq 0 \right), \quad (23)$$

$$N_3 = \frac{\sqrt{3-4d^2}}{1+d},$$

$$K_{1,2} = \frac{d \pm \sqrt{4-d^2}}{1+d}, \quad \left(-1 < d \leq -\frac{\sqrt{3}}{2} \right). \quad (24)$$

Учитывая, что коэффициент d согласно экспериментальным данным находится в диапазоне $-\sqrt{3}/2 < d \leq 3$, рассмотрим только случай комплексных корней. Тогда функция $\varphi(r)$ уравнения (21) будет записываться в виде:

$$\varphi(r) = r \frac{d}{1+d} [c_1 \cos(N_3 \ln r) + c_2 \sin(N_3 \ln r)]. \quad (25)$$

Определяя из уравнения (25) $\varphi(r)$ и подставляя (25) в (18) и (19), смещения u и v запишем так:

$$u = u_1 + u_2 (u_3 - u_4) \cos 2\theta, \quad (26)$$

где

$$u_1 = \frac{u_0}{r^{N_2}} - \frac{d}{2} r;$$

$$u_2 = \frac{r^{N_2}}{2(1+d)};$$

$$u_3 = \left[(1+2d)c_1 + c_2 \sqrt{3-4d^2} \right] \cos(N_3 \ln r);$$

$$u_4 = \left[\sqrt{3-4d^2}c_1 + (1+2d)c_2 \right] \sin(N_3 \ln r);$$

$$v = \varepsilon r^{1+d} [c_1 \cos(N_3 \ln r) + c_2 \sin(N_3 \ln r)] \sin 2\theta. \quad (27)$$

В упругой зоне напряжения и смещения связаны законом Гука:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - v(\sigma_\varphi + \sigma_z)]; \quad (28)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{E} [\sigma_\varphi - v(\sigma_r + \sigma_z)], \quad (29)$$

где E , v – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона массива горных пород.

Смещения в указанной зоне найдем, внося напряжения (13) и (14) в (28) и (29), интегрируя полученные выражения и ограничиваясь первым приближением по малому параметру ε , получим:

$$u = u_1 (u_2 - u_3) \cos 2\theta, \quad (30)$$

где

$$u_1 = -\frac{\gamma H}{2E};$$



$$\begin{aligned}
 u_2 &= (2-v) \left[\lambda_1 \left(r_0 + \frac{a}{r_0} \right) + \varepsilon \lambda_1 r_1 (\varphi) \left(1 - \frac{a}{r_0^2} \right) - \varepsilon \left(r_0 + \frac{2b}{r_0} - \frac{d}{3r_0^3} \right) \cos 2\theta \right]; \\
 u_3 &= 3v \left[\lambda_1 \left(r_0 - \frac{a}{r_0} \right) + \varepsilon \lambda_1 r_1 (\varphi) \left(1 + \frac{a}{r_0^2} \right) + \varepsilon \left(r_0 - \frac{d}{3} \frac{1}{r_0^3} \right) \cos 2\theta \right]; \\
 v &= \varepsilon \frac{\gamma H}{2E} \left[(2-v) \left(r_0 + \frac{b}{r_0} + \frac{1}{3} \frac{d}{r_0^3} \right) + 3v \left(r_0 - \frac{b}{r_0} + \frac{1}{3} \frac{d}{r_0^3} \right) \right] \sin 2\theta. \tag{31}
 \end{aligned}$$

Неизвестные коэффициенты u_0 , c_1 , c_2 находятся из условий непрерывности смещений u и v на границе области предельных деформаций (26) и (27). Попарно приравнивая выражения (26), (30) и (27), (31), найдем:

$$u_0 = \frac{d_1}{2} r_0^{\frac{2}{1+d}} + \frac{\gamma H \lambda_1}{2E} r_0^{N_2} \left[(2-v) \left(r_0 + \frac{a}{r_0} \right) - 3v \left(r_0 + \frac{a}{r_0} \right) \right]; \tag{32}$$

$$c_{1,1} + c_{1,2} = n_1, \tag{33}$$

где

$$\begin{cases} c_{1,1} = c_1 \left[(1+2d) \cos(N_3 \ln r_0) - \sqrt{3-4d^2} \sin(N_3 \ln r_0) \right]; \\ c_{1,2} = c_2 \left[\sqrt{3-4d^2} \cos(N_3 \ln r_0) + (1+2d) \sin(N_3 \ln r_0) \right]; \\ c_1 \cos(N_3 \ln r_0) + c_2 \sin(N_3 \ln r_0) = n_2; \end{cases} \tag{34}$$

$$n_1 = n_{1,1} n_{1,2} + n_{1,3}; \tag{35}$$

$$\begin{aligned}
 n_{1,1} &= \frac{\gamma H (1+d)}{E} r_0^{-\frac{d}{1+d}}; \\
 n_{1,2} &= \lambda_1 r_1 \left[(2-v) \left(1 - \frac{a}{r_0^2} \right) - 3v \left(1 + \frac{a}{r_0^2} \right) \right] + \frac{2-v}{3} \left(\frac{5b}{r_0} - 2r_0 \right) - v \left(2r_0 - \frac{b}{r_0} \right); \\
 n_{1,3} &= 2r_1 (1-d) u_0 r_0^{-\frac{2-d}{1+d}}; \\
 n_2 &= \frac{\gamma H}{2E} r_0^{-\frac{d}{1+d}} \left[\frac{2-v}{3} \left(4r_0 - \frac{b}{r_0} \right) + 2v \left(2r_0 - \frac{b}{r_0} \right) \right]. \tag{36}
 \end{aligned}$$

Из системы (34) получаем:

$$c_1 = n_2 \cos(N_3 \ln r_0) - \frac{n_1 (1+2d) n_2}{\sqrt{3-4d^2}} \sin(N_3 \ln r_0); \tag{37}$$

$$c_2 = \frac{n_1 - (1+2d) n_2}{\sqrt{3-4d^2}} \cos(N_3 \ln r_0) + n_2 \sin(N_3 \ln r_0). \tag{38}$$

Смещение контура выработки получим из выражения (30), внося в него полученные коэффициенты c_1 , c_2 и $r = 1$:



$$u = u_1 + u_2 u_3 \cos 2\theta, \quad (39)$$

где

$$u_1 = \left(u_0 - \frac{d_1}{2} \right) R_0;$$

$$u_2 = \frac{(1-\lambda)R_0}{4(1+d)};$$

$$u_3 = \left[n_1 \cos(N_3 \ln r_0) - \frac{n_1(1+2d) - 4n_2(1+d)}{\sqrt{2-4d^2}} \sin(N_3 \ln r_0) \right].$$

Обсуждение результатов исследования

Для изучения применимости условия А.Н.Ставрогина для описания прочности горных пород рассмотрены результаты испытаний, выполненных в условиях объемных напряженных состояний по схеме Кармана $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. На рис.2, *a* показаны полные диаграммы деформирования горной породы, полученные при разных величинах бокового давления. По горизонтали на графиках отложены продольные (осевые) ε_1 и поперечные ε_3 деформации, по вертикали – величина главного

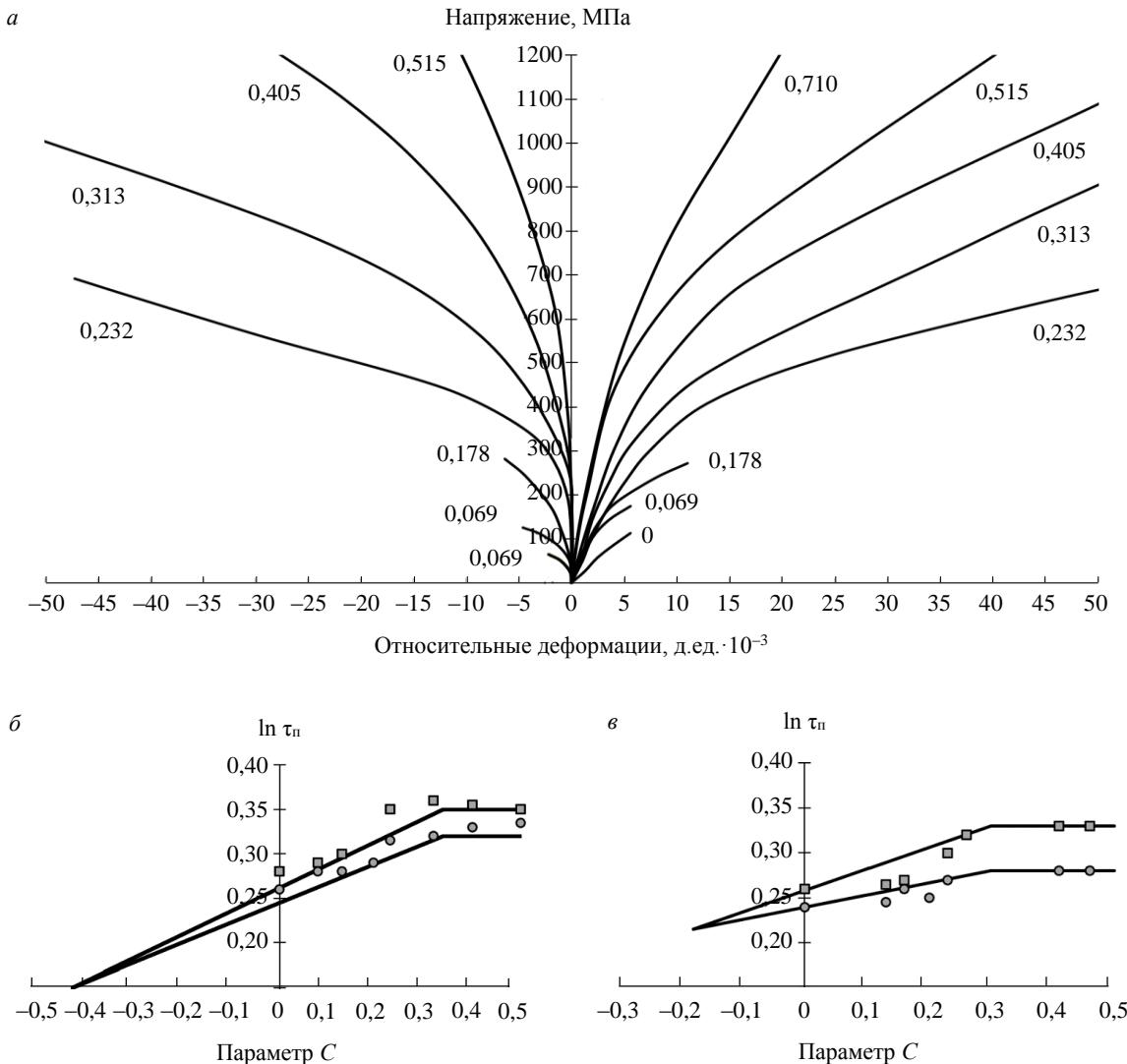


Рис.2. Диаграмма деформирования мрамора при различных величинах бокового обжатия (*a*) и зависимости пределов прочности и пределов упругости от параметра C для мрамора № 1 (*б*) и мрамора № 2 (*в*)



осевого напряжения σ_1 . Возле кривых указаны величины параметра C , характеризующего напряженное состояние, при котором выполнялся лабораторный эксперимент. Экспериментальные графики предельных упругих и предельных прочностных состояний в координатах $(\ln \tau - C)$ для образцов мрамора представлены на рис.2, б, в.

Из экспериментальных зависимостей видно, что исследованные породы при деформировании показали отклонения от закона Гука. Наибольшие отклонения были получены на образцах двух разновидностей белого мрамора одинакового минерального состава (мрамор № 1 и мрамор № 2). Результаты обработки экспериментальных исследований образцов мрамора приведены на рис.3. При анализе результатов экспериментов определились главные относительные упругие деформации ε_1^e , $\varepsilon_2^e = \varepsilon_3^e$ и неупругие деформации $\varepsilon_1^n = \varepsilon_1 - \varepsilon_1^e$, $\varepsilon_2^n = \varepsilon_2 - \varepsilon_2^e$, а также относительное полное $\theta = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$, упругое $\theta^e = \varepsilon_1^e + 2\varepsilon_2^e$ и неупругое $\theta^n = \varepsilon_1^n + 2\varepsilon_2^n = \theta - \theta^e$ изменения объема.

Коэффициент неупругой поперечной деформации определяется по формуле

$$\mu = -\varepsilon_2^n / \varepsilon_1^n.$$

У исследованных пород в зависимости θ от σ наблюдается отклонение кривых при разных величинах C от линии гидростатического сжатия, что указывает на возникновение в испытанных образцах микротрещин. Деформации были разделены на упругие и остаточные по изложенному выше методу, после чего были построены зависимости между остаточными деформациями и параметром напряженного состояния C .

Величины предельного остаточного изменения объема θ^n при разрушающем значении напряжений в зависимости от параметра C представлены на рис.2. Аналогичные зависимости были получены по другим испытанным породам. Для всех испытанных пород характерен максимум изменения

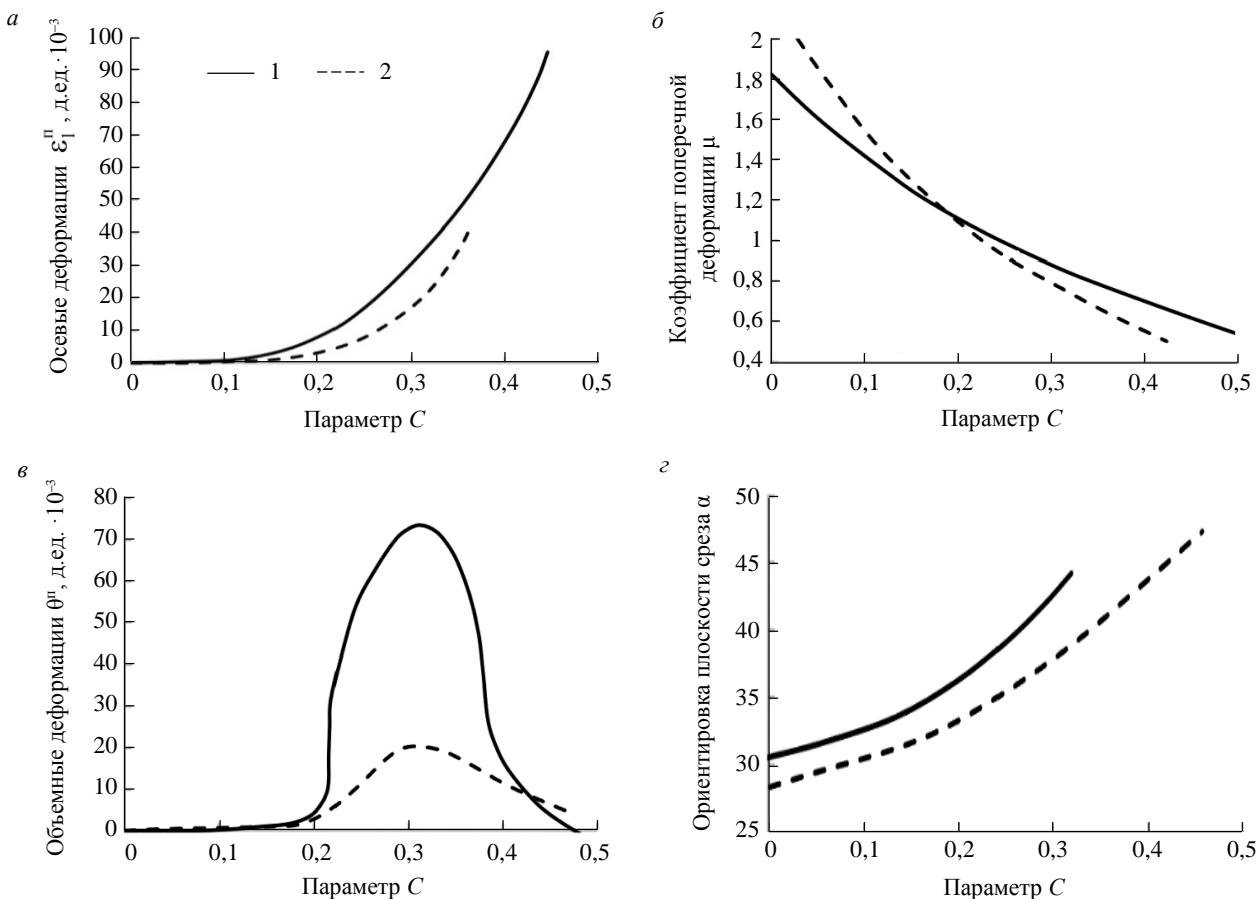


Рис.3. Зависимости остаточных деформаций ε_1^n (а); коэффициента поперечной деформации μ (б) (угол отсчитывается от направления действия осевых напряжений); объемных деформаций (в) и угла ориентировки плоскости среза α (г) от параметра C для мрамора № 1 (1) и мрамора № 2 (2)

объема, расположение которого на оси C зависит от свойств конкретной породы. Для мрамора № 1 значение θ^n в максимуме оказалось наибольшим из всех испытанных пород. Коэффициент попечерной остаточной деформации μ при C , близких к нулю, во всех случаях имеет наибольшее значение и для некоторых пород достигает величины, превышающей 2. С возрастанием C величина μ постепенно падает и стремится к 0,5. При условии $\mu = 0,5$ остаточное изменение объема равно нулю. Аналогичная зависимость имеет место и для других исследованных пород.

При значениях C , когда $\mu \rightarrow 0,5$, а $\theta^n \rightarrow 0$, угол среза стремится к 45° . При одноосном сжатии α существенно меньше 45° . Отдельные точки на графике разбросаны, однако общая зависимость α от C во всех случаях прослеживается довольно четко. При этом абсолютные значения предельной деформации ε_1^n возрастают, что означает повышение пластичности материалов.

Полученные экспериментальные результаты не удается объяснить, если исходить из представления о том, что природа остаточных деформаций горных пород состоит из чисто сдвиговых процессов. Против такого подхода свидетельствуют увеличение θ^n и значения коэффициента μ , намного превышающие величину 0,5. Отклонение угла среза α от 45° только формально объяснено в теории Мора без раскрытия его физической сущности.

Перечисленные экспериментальные результаты можно объяснить, исходя из упрощенной гипотетической схемы протекания процесса деформирования и разрушения в изотропном материале неоднородного строения. При разрушении образца, деформируемого главными напряжениями σ_1 и σ_2 , образуются макроскопическая плоскость среза, наклоненная к оси образца под углом α , и микротрещины разрыва, которые располагаются по площадкам, нормальным к главным напряжениям. Формирование отрицательной дилатансии (разрыхления) связано с развитием микротрещин разрыва, а ее уменьшение с ростом показателя C при $\mu \rightarrow 0,5$ объясняется закрытием микротрещин разрыва.

Наряду с деформационной дилатансией, связанной с процессами деформирования и разрушения в процессе разгрузки, на дилатансию также оказывает влияние начальная эффективная пористость горных пород. Анализ экспериментальных данных изменения дилатансии мрамора № 1 показывает, что она достигает максимума при $C = 0,313$ и является отрицательной, т.е. имеет место разрыхление породы. При изменении показателя C от 0 до 0,313 наблюдается увеличение дилатансии, а в интервале от 0,313 до 0,5 – уменьшение дилатансии до нуля.

Экспериментальные данные для различных типов горных пород показывают, что пластическая дилатансия зависит от параметра C и является нелинейной функцией:

$$\theta^n = \theta^n(C).$$

С учетом связи между параметром C , напряжениями σ и τ условие дилатансии можно записать как

$$\theta^n = \theta^n(\tau, \sigma).$$

Экспериментальные данные показывают, что дилатансия горных пород пропорциональна наибольшему сдвигу $\gamma_{\max} = \varepsilon_1^n - \varepsilon_3^n$ и может быть описана зависимостью

$$\theta^n = \lambda(C)\gamma_{\max},$$

где $\lambda(C)$ – известная функция, определяемая на основе экспериментальных данных.

Для некоторых горных пород экспериментальная зависимость близка к линейной (рис.4). Для таких горных пород обобщенное выражение для дилатансии можно записать как

$$\theta^n = d\gamma_{\max} + d_1,$$

где d, d_1 – константы линейной интерполяции зависимости пластической дилатансии от наибольшего сдвига.

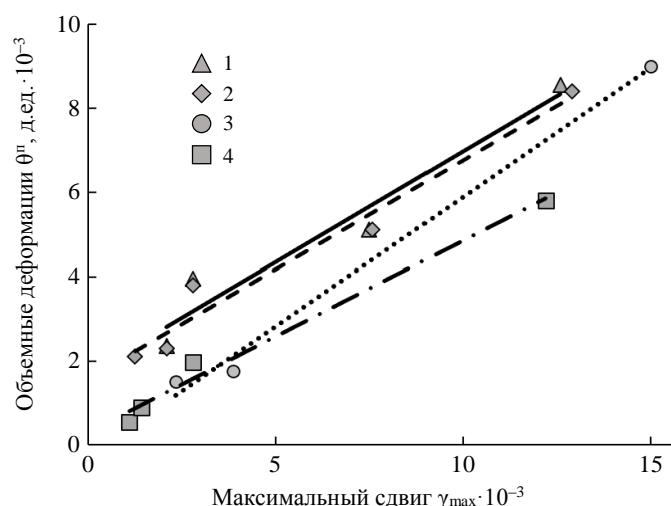


Рис.4. Линейная аппроксимация экспериментальных зависимостей дилатансии от максимального сдвига

1 – мрамор № 1; 2 – мрамор № 2;
 3 – алевролит; 4 – кварцевый диорит



Рассмотрим вопросы применения условия А.Н.Ставрогина для решения прикладных задач. На основании представленных теоретических положений прогноза зон предельного состояния породного массива в окрестности горной выработки и смещений породного контура предложен алгоритм их расчета по выведенным аналитическим формулам с учетом условия А.Н.Ставрогина (см. таблицу) применительно к тестовой задаче. Необходимо оценить размеры зоны предельного состояния и радиальные смещения контура незакрепленной горной выработки кругового очертания радиусом в проходке $r_0 = 5$ м (см. рис.1), расположенной на глубине $H = 1000$ м от земной поверхности в горном массиве со следующими физико-механическими свойствами: $\gamma = 25$ кН/м³; $E_0 = 1000$ МПа; $v = 0,3$; $\tau_n^0 = 8$ МПа; $A = 5$. Задача решается для коэффициентов бокового давления в горном массиве 0,6; 0,8 и 1,0. Дополнительно рассмотрены варианты, когда горный массив не подвержен дилатансии при пластическом деформировании и дилатирующий горный массив с параметрами $d = -0,268$ и $d_1 = 0,615$. Напряженное состояние задавалось через горизонтальную σ_x и вертикальную σ_y компоненты.

Алгоритм прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки

Наименование расчетного этапа	Содержание расчетного этапа
Этап 1. Получение исходных данных	<ul style="list-style-type: none"> Средневзвешенный удельный вес пород γ. Глубина заложения выработки H. Параметры прочности критерия А.Н.Ставрогина τ_n^0 и A. Радиус горной выработки в проходке R_0. Коэффициент бокового распора λ. Модуль деформации E_0. Коэффициент поперечной деформации v. Отпор на контуре горной выработки p_0. Коэффициенты линейной аппроксимации дилатансии горных пород d и d_1.
Этап 2. Расчет зоны предельного состояния вокруг горной выработки	<ul style="list-style-type: none"> Рассчитываются: $\lambda_1 = \frac{1+\lambda}{2} \text{ и } \varepsilon = \frac{1-\lambda}{2}; k;$ $A - N_1 = k(A + N_1), \text{ где } N_1 = \ln \frac{\lambda_1 \gamma H k}{\tau_n^0};$ $p_0 = 2\tau_1 \frac{\left(\ln \frac{\tau_1}{\tau_n^0} \right)}{\left(A - \ln \frac{\tau_1}{\tau_n^0} \right)};$ если выработка не закреплена ($p_0 = 0$), то $\tau_1 = \tau_n^0$; $C_1 = \frac{\tau_1^2}{\tau_n^0} \left(A - \ln \frac{\tau_1}{\tau_n^0} \right)^{2A} \exp \left[-\frac{2A}{\left(A - \ln \frac{\tau_1}{\tau_n^0} \right)} \right];$ $r_0 = \sqrt{\tau_n^0 C_1 \frac{2A}{\left((\lambda_1 \gamma H k)^2 (A - N_1)^{2A} \right)}},$ $r_1 = \frac{2r_0}{\lambda_1 k} \frac{\left[(A - N_1)^2 - A(1 + A - N_1) \right]}{\left[(A - \ln N_1)^2 - 2A(1 + A - N_1) \right]}.$ Построение зоны предельного состояния вокруг горной выработки (при $0 \leq \theta \leq 2\pi$) по формуле $R_L = (r_0 + \varepsilon \eta \cos 2\theta) R_0.$

Наименование расчетного этапа	Содержание расчетного этапа
Этап 3. Расчет смещений контура горной выработки	<ul style="list-style-type: none"> Рассчитываются: $a = kr_0^2;$ $b = \frac{2r_0^2 \left(1 - \frac{\lambda_1 a}{r_0^3} r_1\right) N_1 + \lambda_1 (1+k) \left[\frac{1}{\lambda_1} \left(\frac{1}{k} + \frac{A}{1+k} \right) - \frac{r_1}{r_0} \left(1 + \frac{aA}{r_0^3 (1+k)} \right) \right]}{A - N_1};$ $u_0 = \frac{d_1}{2} r_0^{1+d} + \frac{\gamma H \lambda_1}{2E} r_0^{1+d} \left[(2-v) \left(r_0 + \frac{a}{r_0} \right) - 3v \left(r_0 + \frac{a}{r_0} \right) \right];$ $n_1 = \frac{\gamma H (1+d)}{E} r_0^{-1+d} \left\{ \lambda_1 r_1 \left[(2-v) \left(1 - \frac{a}{r_0^2} \right) - 3v \left(1 + \frac{a}{r_0^2} \right) \right] + \frac{2-v}{3} \left(\frac{5b}{r_0} - 2r_0 \right) - v \left(2r_0 - \frac{b}{r_0} \right) \right\} + 2r_1 (1-d) u_0 r_0^{-\frac{2-d}{1+d}};$ $n_2 = \frac{\gamma H}{2E} r_0^{-1+d} \left[\frac{2-v}{3} \left(4r_0 - \frac{b}{r_0} \right) + 2v \left(2r_0 - \frac{b}{r_0} \right) \right].$ Построение эпюры радиальных смещений контура горной выработки (при $0 \leq \theta \leq 2\pi$) по формуле $u = \left(u_0 - \frac{d_1}{2} \right) R_0 + \frac{(1-\lambda) R_0}{4(1+d)} \left[n_1 \cos(N_3 \ln r_0) - \frac{n_1(1+2d) - 4n_2(1+d)}{\sqrt{2-4d^2}} \sin(N_3 \ln r_0) \right] \cos 2\theta,$ <p>где $N_3 = \frac{\sqrt{3-4d^2}}{1+d}$</p>

Результаты расчетов зоны предельного состояния в окрестности горной выработки представлены на рис.5. Из используемых при расчетах уравнений следует, что параметры дилатансии в рамках заложенных в аналитическую методику гипотез не влияют на размер зоны предельного состояния, а потому было рассмотрено только влияние на него коэффициента бокового распора. На графических зависимостях линейные размеры зоны предельного состояния для удобства анализа представлены в долях радиуса выработки.

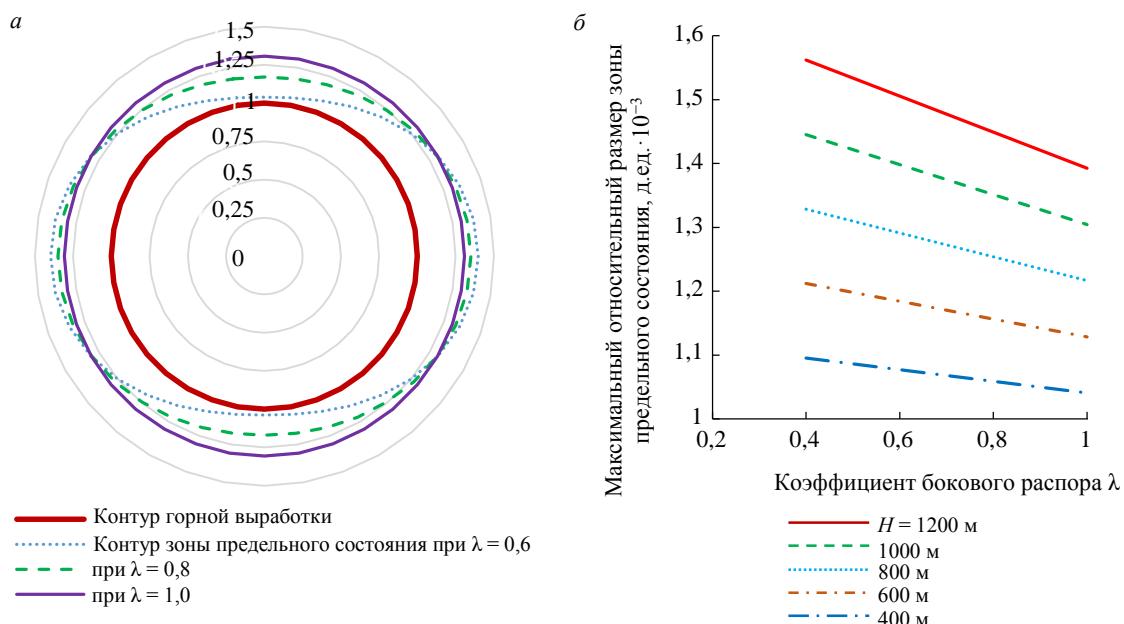


Рис.5. Зона предельного состояния в окрестности горной выработки: закономерности изменения контура (а) и максимального линейного размера (б)

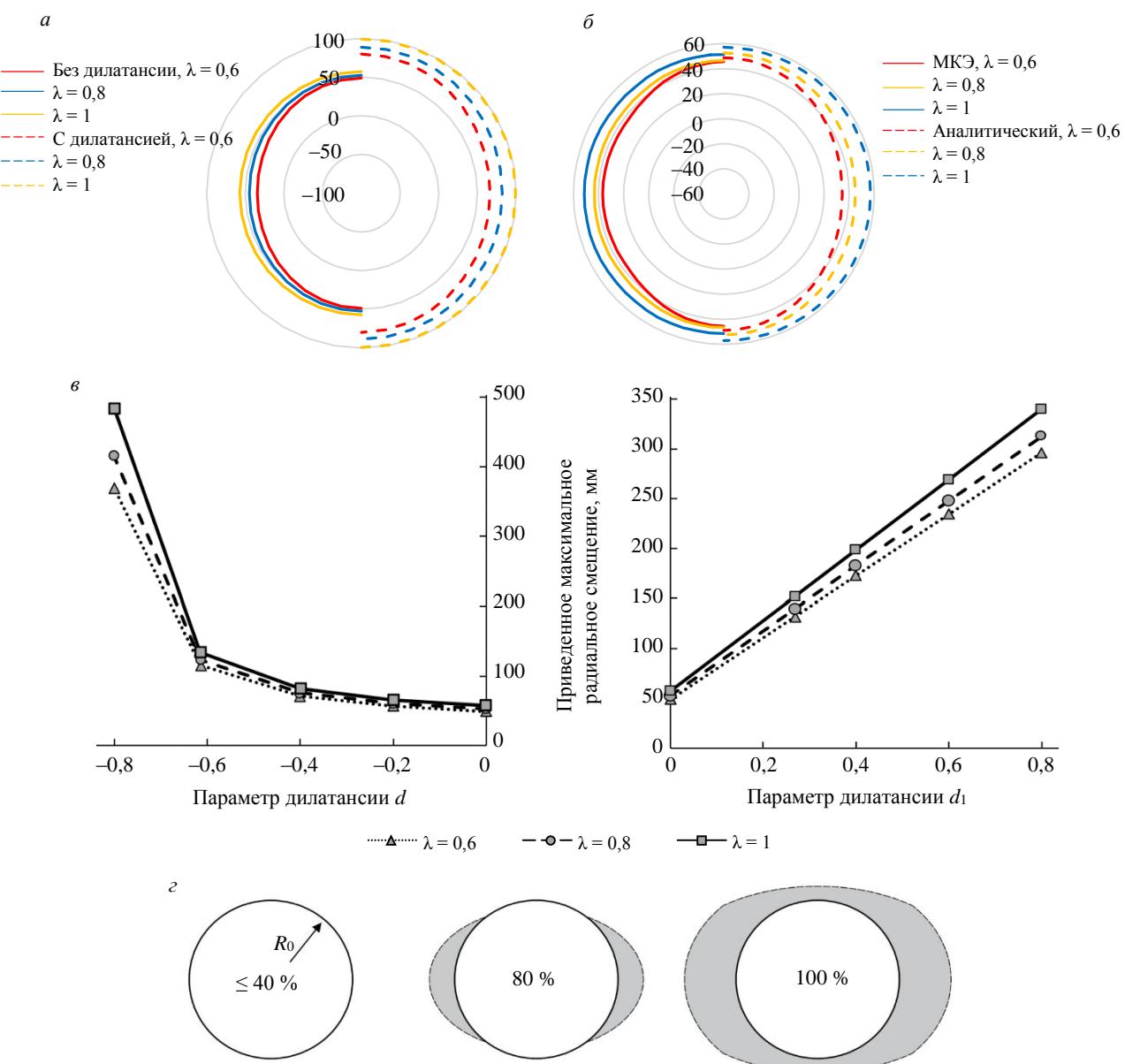


Рис.6. Результаты прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива:
 а – распределение радиальных смещений по контуру; б – сопоставление эпюр радиальных смещений контура выработки без учета дилатансии горных пород, полученных аналитическим и численным методами;
 в – закономерности изменения радиальных смещений от параметров дилатансии; г – формирование зоны предельного состояния вокруг горной выработки, цифрами показана процент перераспределения НДС в окрестности горной выработки (0 – вне зоны влияния выработки;
 100 % – на бесконечности от лба забоя горной выработки)

Наибольший размер зоны предельного состояния при гравитационном поле естественных напряжений ориентирован горизонтально, чем меньше величина коэффициента бокового распора λ , тем более вытянутой в этом направлении становится зона. Анализ выполненных расчетов показывает, что полный охват зоной предельного состояния горной выработки достигается при величинах бокового распора не ниже 0,6, что ограничивает области применения аналитической методики.

Для изложенной в настоящей работе аналитической методики характерной является обратная линейная зависимость наибольшего линейного размера зоны предельного состояния от величины коэффициента бокового распора и от глубины заложения горной выработки, что подтверждается результатами, представленными на рис.5, б.

Результаты расчетов смещений контура горной выработки без учета и с учетом дилатансии горных пород представлены на рис.6, а, б. Для удобства анализа результатов величины смещений на графиках приведены к радиусу горной выработки. Для условий гравитационного поля напряжений

наибольшие величины радиальных смещений возникают в своде горной выработки при коэффициентах бокового распора, отличных от единицы. Учет дилатансии при прогнозе радиальных смещений приводит к значительному росту их величины, при этом закономерности связи с параметрами дилатансии d и d_1 неодинаковы. Анализ показывает, что расчетная величина радиальных смещений контура нелинейно обратно пропорциональна параметру d и линейно прямо пропорциональна параметру d_1 .

Реализация критерия прочности А.Н.Ставрогина в рамках численного моделирования позволяет существенно расширить область решаемых задач геомеханики и механики подземных сооружений. На рис.6, в показан процесс формирования в окрестности горной выработки зоны предельного состояния. Ввиду итерационного характера вычислений при получении численного решения каждая картинка соответствует определенной части полных напряжений, реализованных на модели.

На начальных этапах решения задачи при малых величинах изменения НДС массива зона предельного состояния имеет незамкнутую форму (рис.6, 2), т.е. не охватывает полностью весь контур выработки. Такую картину принципиально нельзя получить с помощью рассмотренного аналитического решения, а значит численное решение обладает более широкой областью применения и его можно использовать для задач прогноза в слабонапряженных или прочных горных массивах, а также в условиях малых коэффициентов бокового распора $\lambda < 0,6$.

Сопоставим результаты расчета радиальных смещений, полученные с применением аналитического метода и метода конечных элементов. Для наглядности эпюры смещений контура горной выработки при решении задачи без учета дилатансии горных пород совмещены на рис.6, б, в. Если выполнить сопоставление по экстремальным значениям прогнозных радиальных смещений, то расхождение между данными прогноза составляет от 3 до 11 %, а в среднем по длине контура горной выработки расхождение находится в диапазоне 6-7 %. Такой результат с учетом принятых допущений при выводе уравнений аналитического решения и упрощений, заложенных в преобразование нелинейного условия прочности А.Н.Ставрогина в форму кусочно-линейной функции в рамках пользовательской подпрограммы для численного решения, можно считать допустимым, а сходимость двух решений удовлетворительной.

Важно отметить, что в рамках численного решения не удалось реализовать учет пластической дилатансии горных пород, так как принятая модель деформирования горной породы не позволяет воспроизводить явления, характерные для породного массива. В связи с этим следует ее совершенствовать в части изменения функции пластического потенциала в зависимости от достигнутых величин сдвиговых и объемных деформаций.

Заключение

Совершенствование методов решения задач геомеханики и механики подземных сооружений направлено на повышение достоверности прогноза за счет постепенного усложнения применяемых моделей и подходов. Это достигается за счет последовательного отказа от некоторых допущений и упрощений. Факт нелинейной связи между средними напряжениями и прочностью горных пород установлен давно, но реализация его в практических задачах становится реальной только в настоящее время ввиду значительного развития расчетных возможностей численных методов. Реализация критерия прочности А.Н.Ставрогина при численном моделировании позволяет получать решение задач прогноза смещений контура горных выработок и размеров зон предельного состояния в их окрестности, сопоставимое по точности с аналитическим решением. Такое решение не имеет существенных ограничений в области применения, характерных для аналитического решения и обусловленных изначальными посылками, заложенными при выводе уравнений. Помимо этого, метод конечных элементов позволяет решать задачи в рамках пространственной постановки, что аналитическим методом невозможно.

При выполнении настоящей работы была выявлена необходимость совершенствования модели деформирования горной породы к виду, в котором в полной мере могут быть учтены особенности объемного деформирования при пластическом сдвиге. Это направление исследований является естественным продолжением работы.



ЛИТЕРАТУРА

1. Басалаева П.В., Курганов А.Д. Оценка влияния угла падения литологически неоднородной прослойки пород на устойчивость горизонтальной горной выработки при ее проходке // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 3. С. 17-30. [DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_17](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_17)
2. Беликов А.А., Беляков Н.А. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков, закрепленных податливой тросовой крепью // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 4. С. 20-34. [DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_4_0_20)
3. 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)
4. Протосеня А.Г., Карасев М.А., Беляков Н.А. Упруго-пластическая задача для выработок различных форм поперечных сечений при условии предельного равновесия Кулона // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 1. С. 71-81.
5. Господариков А.П., Зацепин М.А. Математическое моделирование нелинейных краевых задач геомеханики // Горный журнал. 2019. № 12. С. 16-20. [DOI: 10.17580/gzh.2019.12.03](https://doi.org/10.17580/gzh.2019.12.03)
6. Ильинов М.Д., Коршунов В.А., Постухов Г.Б., Шоков А.Н. Комплексные экспериментальные исследования механических свойств горных пород: проблемы и пути их решения // Горный журнал. 2023. № 5. С. 11-18. [DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02](https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.02)
7. Господариков А.П., Киркин А.П., Трофимов А.В., Ковалевский В.Н. Определение физико-механических свойств горных пород при применении противоударных разгрузочных мероприятий // Горный журнал. 2023. № 1. С. 26-34. [DOI: 10.17580/gzh.2023.01.04](https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.04)
8. Коршунов 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/PML.2023.16](https://doi.org/10.31897/PML.2023.16)
9. Вербило П.Э., Вильнер М.А. Изучение анизотропии прочности и масштабного эффекта трещиноватого массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 47-59. [DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_47](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_47)
10. Ильинов М.Д., Петров Д.Н., Карманский Д.А., Селихов А.А. Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов горных пород при термобарических условиях больших глубин // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 4. С. 290-302. [DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-150)
11. Schwartzkopff A.K., Sainoki A., Bruning T., Karakus M. A conceptual three-dimensional frictional model to predict the effect of the intermediate principal stress based on the Mohr-Coulomb and Hoek-Brown failure criteria // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2023. Vol. 172. № 105605. [DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105605](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105605)
12. Naiyu Liu, Puhui Chen. A failure envelope proposal based on the analysis of the requirements of nonlinear Mohr-Coulomb criteria // Mechanics Research Communications. 2023. Vol. 129. № 104086. [DOI: 10.1016/j.mechrescom.2023.104086](https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2023.104086)
13. Jianbin Tang, Xi Chen, Liusheng Cui, Zongqi Liu. Strain localization of Mohr-Coulomb soils with non-associated plasticity based on micropolar continuum theory // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2023. Vol. 15. Iss. 12. P. 3316-3327. [DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.02.029](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.02.029)
14. Труцко В.Л., Баева Е.К. Обоснование рациональных параметров крепи комплекса горных выработок, проводимых в сложных горно-геологических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12. С. 55-69. [DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_55](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_0_55)
15. Pin-Qiang Mo, Hai-Sui Yu. Plasticity Solutions of an Undrained Cavity Contraction for the Prediction of Soil Behaviour around Tunnels // Fourth Geo-China International Conference, 25-27 July 2016, Shandong, China. American Society of Civil Engineers, 2016. P. 150-157. [DOI: 10.1061/9780784480038.019](https://doi.org/10.1061/9780784480038.019)
16. Yu-Lin Lee, Chih-Sheng Chen, Tseng-Hsing Hsu, Chi-Min Lee. Explicit Analysis for the Ground Reaction of a Circular Tunnel Excavated in Anisotropic Stress Fields based on Hoek–Brown Failure Criterion // Mathematics. 2024. Vol. 12. Iss. 17. № 2689. [DOI: 10.3390/math12172689](https://doi.org/10.3390/math12172689)
17. Kai Guan, Quanyun Zhang, Honglei Liu, Wancheng Zhu. A New Numerical Procedure for the Excavation Response in Mohr–Coulomb Rock Mass Exhibiting Strain-Softening Behavior // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 10. № 872792. [DOI: 10.3389/feart.2022.872792](https://doi.org/10.3389/feart.2022.872792)
18. Yong Li, Shugang Cao, Nicholas Fantuzzi, Yanbao Liu. Elasto-plastic analysis of a circular borehole in elastic-strain softening coal seams // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 80. P. 316-324. [DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.10.002)
19. Jin-feng Zou, Shuai-shuai Li, Yuan Xu et al. Theoretical solutions for a circular opening in an elastic–brittle–plastic rock mass incorporating the out-of-plane stress and seepage force // KSCE Journal of Civil Engineering. 2016. Vol. 20. Iss. 2. P. 687-701. [DOI: 10.1007/s12205-015-0789-y](https://doi.org/10.1007/s12205-015-0789-y)
20. Yuming Sheng, Peng Li, Shutong Yang, Jinfeng Zou. Elastoplastic solutions for deep-buried twin tunnels with arbitrary shapes and various arrangements under biaxial in-situ stress field based on Mohr-Coulomb and generalized Hoek-Brown criteria // Computers and Geotechnics. 2024. Vol. 165. № 105896. [DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105896](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105896)
21. Tianzheng Li, Wenping Gong, Xiaoli Yang. Stability analysis of a non-circular tunnel face in soils characterized by modified Mohr-Coulomb yield criterion // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 109. № 103785. [DOI: 10.1016/j.tust.2020.103785](https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103785)
22. Yuming Sheng, Jinfeng Zou, Yuepeng Dong, Guang-Hui Chen. Novel perturbation solutions for deep-buried non-circular tunnels under biaxial in situ stress field based on Mohr-Coulomb criterion // Applied Mathematical Modelling. 2022. Vol. 110. P. 408-440. [DOI: 10.1016/j.apm.2022.06.006](https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.06.006)
23. Zenghui Zhao, Wei Sun, Shaojie Chen et al. Displacement of surrounding rock in a deep circular hole considering double moduli and strength-stiffness degradation // Applied Mathematics and Mechanics. 2020. Vol. 41. Iss. 12. P. 1847-1860. [DOI: 10.1007/s10483-020-2665-9](https://doi.org/10.1007/s10483-020-2665-9)
24. Hongying Wang, Qiang Zhang, Peinan Wu et al. Elastoplastic solution of a circular tunnel in surrounding rock with any nonlinear yield criteria and plastic flow envelopes // Computers and Geotechnics. 2024. Vol. 166. № 105954. [DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105954](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105954)
25. Yiotu-Mitra P., Sakurai S. Critical strain method incorporating calculation of equivalent H-B strength parameters for back analysis during tunnel excavation // Tunnelling and Underground Space Technology. 2023. Vol. 140. № 105252. [DOI: 10.1016/j.tust.2023.105252](https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105252)

26. *Baotang Shen, Jingyu Shi, Barton N.* An approximate nonlinear modified Mohr-Coulomb shear strength criterion with critical state for intact rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10. Iss. 4. P. 645-652. [DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.04.002](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.04.002)
27. *Pei-Zhi Zhuang, Hai-Sui Yu.* Two-dimensional elastoplastic analysis of cylindrical cavity problems in Tresca materials // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2019. Vol. 43. Iss. 8. P. 1612-1633. [DOI: 10.1002/nag.2925](https://doi.org/10.1002/nag.2925)
28. *Xiongfei Yang, Hong Yuan, Jiayu Wu, Shanqing Li.* Elastoplastic Analysis of Circular Tunnel Based on Drucker-Prager Criterion // Advances in Civil Engineering. 2018. Vol. 2018. № 5149789. [DOI: 10.1155/2018/5149789](https://doi.org/10.1155/2018/5149789)
29. *Zareifard M.R.* Ground response curve of deep circular tunnel in rock mass exhibiting Hoek-Brown strain-softening behaviour considering the dead weight loading // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2021. Vol. 25. Iss. 14. P. 2509-2539. [DOI: 10.1080/19648189.2019.1632745](https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1632745)
30. *Pijush Pal Roy, S. Rama Raju, Dipankar Chattopadhyay.* An Overview of Tunnel Support Systems under Squeezing Rock Condition in Arun Hydroelectric Project, Stage-III, Eastern Nepal // SSRN. 2023. 15 p. [DOI: 10.2139/ssrn.4461004](https://doi.org/10.2139/ssrn.4461004)
31. *Chen Xu, Sheng Wang, Caichu Xia.* Analytical prediction for time-dependent interaction of a circular tunnel excavated in strain-softening rock mass // Rock Mechanics Bulletin. 2024. Vol. 3. Iss. 3. № 100127. [DOI: 10.1016/j.rockmb.2024.100127](https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2024.100127)
32. *Vrakas A., Anagnostou G.* A finite strain closed-form solution for the elastoplastic ground response curve in tunnelling // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2014. Vol. 38. Iss. 11. P. 1131-1148. [DOI: 10.1002/nag.2250](https://doi.org/10.1002/nag.2250)
33. *Vrakas A., Anagnostou G.* Finite strain elastoplastic solutions for the undrained ground response curve in tunnelling // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2015. Vol. 39. Iss. 7. P. 738-761. [DOI: 10.1002/nag.2335](https://doi.org/10.1002/nag.2335)
34. *Galindo R.A., Serrano A., Olalla C.* Ultimate bearing capacity of rock masses based on modified Mohr-Coulomb strength criterion // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2017. Vol. 93. P. 215-225. [DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.12.017](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.12.017)
35. *Arora K., Gutierrez M.* Viscous-elastic-plastic response of tunnels in squeezing ground conditions: Analytical modeling and experimental validation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 146. № 104888. [DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104888](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104888)
36. *Yaocai Ma, Aizhong Lu, Hui Cai, Xiangtai Zeng.* A semi-analytical method for elastic-plastic analysis of a deep-buried elliptical tunnel // Computers and Geotechnics. 2022. Vol. 142. № 104589. [DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104589](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104589)
37. *Yaocai Ma, Aizhong Lu, Hui Cai, Xiangtai Zeng.* Analytical solution for determining the plastic zones around two unequal circular tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022. Vol. 120. № 104267. [DOI: 10.1016/j.tust.2021.104267](https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104267)

Авторы: Анатолий Григорьевич Протосеня, д-р техн. наук, заведующий кафедрой (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-7829-6743>, Максим Анатольевич Карасев, д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Karasev_MA@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8939-0807>, Никита Андреевич Беляков, канд. техн. наук, доцент (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-9754-501X>, Павел Кириллович Тулин, канд. техн. наук, доцент (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-0820-4759>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Результаты исследования петрофизических свойств, механических и прочностных характеристик калькаринитовых пород

Дж.Ф.Андиани

Университет им. Альдо Моро в Бари, Бари, Италия

Как цитировать эту статью: Андиани Дж.Ф. Результаты исследования петрофизических свойств, механических и прочностных характеристик калькаринитовых пород // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 123-139. [EDN NUWMNP](#)

Аннотация

Недавние исследования прогнозирования петрофизических и механических свойств карбонатных пород, объединяющие текстурные и микроструктурные наблюдения с геотехническими измерениями, вызвали бурное обсуждение. Некоторые исследователи представляют надежные экспериментальные методы и новые идеи, другие придерживаются менее строгих подходов. В Средиземноморском регионе мелководные калькариниты обнаруживаются как вдоль береговой линии, так и на суше. Как правило, это мягкие карбонаты с пористостью открытого типа, контролируемые осадочными породами и постседиментационными процессами. Их прочность в первую очередь зависит от типа и количества карбонатного цемента, а на напряженно-деформированное состояние значительно влияет присутствие воды. Прочность и жесткость заметно снижаются при переходе от сухого к насыщенному состоянию. Хорошо сцементированные калькариниты с ранним и поздним диагенетическим цементом хрупкие как в сухом, так и в насыщенном состоянии, тогда как плохо сцементированные типы только с ранней карбонатной цементацией хрупкие в сухом состоянии и от псевдопластичных до пластичных в насыщенном состоянии. В гидравлических свойствах калькаринитов преобладают системы двойной пористости, объединяющие микро- и макропоры, играющие ключевую роль в механизмах и моделях распада. В исследовании литературные данные сравниваются с результатами лабораторных анализов литофаций калькаринита из Апулии и Базиликата (Южная Италия), что дает новое понимание их механических, физических свойств и долговечности.

Ключевые слова

калькаринит; порода; свойства; поровая система; прочность; жесткость; атмосферостойкость; долговечность

Финансирование

Настоящее исследование поддержано MIUR (Министерство образования, университетов и исследований Италии) в рамках гранта 2010 г. ex MURST 60 % «Modelli geologico-tecnici, idrogeologici e geofisici per la tutela e la valORIZZAZIONE delle risorse naturali, ambientali e culturali» (координатор Дж.Ф.Андиани). Исследование профинансирано Европейским сообществом в рамках проекта Interreg III A «WET SYS B» 2000-2006 (ответственный Дж.Ф.Андиани) и регионом Апулия в рамках программы «CT14» (ответственный Дж.Ф.Андиани). Работа выполнена в рамках проекта MIUR (Министерство образования, университетов и исследований Италии) 2017-2018 гг. ex MURST 60 % «Инженерная геология и гидрогеологические исследования, применяемые для защиты, развития и продвижения георесурсов и исторического, художественного и геоэкологического наследия» (ответственный Дж.Ф.Андиани).

Поступила: 17.07.2024

Принята: 16.07.2025

Онлайн: 21.11.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Калькариниты обычно характеризуются промежуточной между почвами и твердыми породами прочностью, а также меняют механические свойства в результате изменения граничных условий, включая напряженное состояние, метод нагрузки и степень насыщения. Они обладают переходными от горных пород к почве свойствами как в крупном, так и в мелком масштабе из-за процессов деструктуризации. Калькариниты характеризуются сложной физико-механической реакцией, контролируемой строением, включая как микроскопическую, так и макроскопическую

текстуру и структуру, а также связность, в основном из-за конседиментационной и диагенетической цементации. Кроме того, в масштабе массива горных пород необходимо учитывать постседиментационные тектонические эпизоды и циркуляцию грунтовых вод. Поэтому существует определенная взаимосвязь между осадочными фациями, постседиментационными процессами и общей прочностью этих материалов, включая устойчивость к выветриванию [1-4]. Кандзи [5] опубликовал синтетическое исследование литературы и физико-механических свойств мягких пород, включая калькарениты и другие литотипы, демонстрирующее объективные проблемы в использовании современных и широко распространенных методов их классификации и характеристики.

Строение пор калькаренитов сложное, поскольку они представляют собой аллохимические зернистые породы, в основном состоящие из ископаемого материала, интракластов, ооидов и пеллоидов, которые внедрены в микритовую матрицу и цемент. Цемент преимущественно состоит из раннего диагенетического кальцита, неоморфного микроспарита и в меньшей степени позднего диагенетического кальцита в форме спарита, т.е. крупнокристаллического кальцита, который заполняет поровое пространство. Несмотря на сложные текстуру и строение пор, многие авторы сходятся во мнении, что эти материалы характеризуются открытой пористостью, хотя она и имеет двойной тип из-за наличия как микро-, так и макропор [6]. Действительно, очень открытая пористая текстура подтверждается многочисленными комбинациями 2D-, 3D-исследований и простых испытаний насыщения водой под вакуумом [2, 7]. Напротив, Феста и др. [8] предполагают преобладание сети закрытых пор, состоящей из внутризеренных и меньше внутриволновых пор и отдельных каверн, хотя это утверждение основано на петрографических 2D-исследованиях шлифов и спорных геотехнических данных, полученных и интерпретированных сомнительным образом [9]. Кроме того, недавние исследования физических и механических свойств некоторых плио-плейстоценовых литофаций калькаренитов, обнажающихся в Апулии и Базиликата, показали различные механизмы ослабления материала при краткосрочном и долгосрочном взаимодействии с водой и проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), ртутной интрузионной порометрии (РИП), анализов шлифов и рентгеновской микроКомпьютерной томографии (МКТ) [1, 2, 7]. Этим сложным механизмам для развития требуются высокооткрытые пористые текстуры и особые типы связности.

Калькарениты распространены по всему миру. Их происхождение обычно связывают с осадочными и диагенетическими процессами как в современных, так и в древних морских и неморских средах. Благодаря пористости и проницаемости они прекрасно аккумулируют жидкости, обладают дренажными свойствами, характерными для важных углеводородных и водных систем в Северной Африке, на Аравийском п-ове, в Мексике, Австралии, Северном море и Средиземноморском бассейне, включая некоторые районы Южной Италии. В Апулии и Базиликата калькаренитовые толщи в особенности обнажаются вдоль береговой линии и внутреннего края Мурдже, по склонам холмов, уступам долин и стенкам карьеров (рис.1). Калькарениты принадлежат в основном свите *Calcarene di Gravina* (средний плиоцен – нижний плейстоцен) и состоят из мелко-, средне- и крупнозернистых пакстоунов и грейстоунов [2, 10]. Олигоцен-миоценовые отложения открытого шельфа, принадлежащие к свитам *Calcareni di Porto Badisco* (верхний олигоцен), *Lecce* (верхний олигоцен – нижний миоцен) и *Pietra Leccese* (верхний бурдигал – нижний мессин), широко обнажены на п-ове Саленто (Южная Апулия). В частности, свита *Pietra Leccese* представлена пористыми биомикритами, мелко- и среднезернистыми пакстоунами-вакстоунами, широко использовавшимися как каменный материал для архитектурного наследия барокко на п-ове Саленто [11, 12]. Можно утверждать, что калькарениты имеют заслуживающее внимания историческое значение, связанное не только с продолжительным использованием их в качестве строительного материала, но и с тем, что древние жилища, скальные церкви, убежища животных и подземные пещеры рыли в этой породе с доисторических времен. Кроме того, калькарениты играют важную роль в формировании ключевых гидрогеологических объектов, которые контролируют пополнение подземных вод и перенос загрязняющих веществ в многослойной системе, включающей широкий глубокий водоносный горизонт, расположенный в мезозойском карбонатном фундаменте [2, 13, 14].

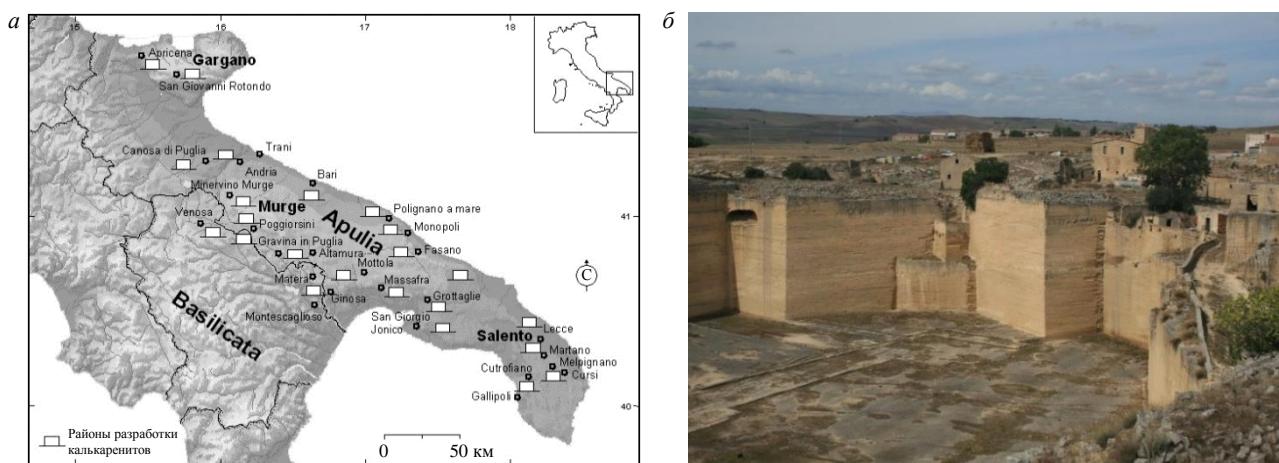


Рис.1. Районы разработки калькаренитов в Апулии и Базиликате (а); выходы четвертичных калькаренитов у стен древнего карьера (б), Поджорсини, местность Гrottelleline, Апулия

Целью исследования являются как новые экспериментальные физические и механические данные о свойствах калькаренитовых пород, так и критический обзор существующей литературы. Используя комбинацию стандартных и нетрадиционных методов испытаний, работа не только представляет новые результаты, но и критически изучает и уточняет существующие концепции в конкретной области. Обзор недавних и исторических исследований, наряду с новыми экспериментальными данными, предполагает, что некоторые фундаментальные концепции, касающиеся физических и механических свойств калькаренитов, требуют уточнения. Анализ подчеркивает связь между этими свойствами и седиментационными, диагенетическими характеристиками калькаренитов, уделяя особое внимание текстурным и структурным особенностям и предлагая новое понимание их свойств. Эти сведения необходимы для широкого спектра геоинженерных работ, особенно в гидрогеологии и вопросах стабильности построек, а также для реставрации и консервации как современных сооружений, так и исторического, художественного наследия.

Методы

Новые экспериментальные результаты анализа калькаренитов из Апулии и Базиликаты и данные предыдущих исследований тех же комплексов и других подобных калькаренитов, обнажающихся в различных регионах, использованы для демонстрации текстурных элементов, которые влияют на механические и физические свойства мягких карбонатных пород. По итогам сравнения и объединения результатов, полученных в рамках настоящего исследования, с литературными данными проведена критическая оценка петрофизических и механических свойств этих материалов, подходящая для поиска соотношений различных параметров и определения восприимчивости породы к выветриванию.

В исследовании применялся междисциплинарный подход с использованием как традиционных, так и новых экспериментальных методов. Отобрано 127 блоков калькарена из карьеров и естественных обнажений в Апулии и Базиликате. В частности, кубические блоки, принадлежащие к свите Calcarenite di Gravina, взяты из карьеров Альтамура, Каноза-ди-Пулья, Гравина-ин-Пулья, Массафра, Матера, Минервино Мурдже, Монтескальозо и Поджорсини. Многогранные блоки, принадлежащие к той же свите, взяты из свежих обнажений на участках Моттола, Монополи и Полиньяно-а-Маре. Кубические блоки, принадлежащие к свите Pietra Leccese, взяты из карьеров Курси и Мельпиньяно. Кроме того, для исследования строения горных пород с помощью оптической поляризационной микроскопии в проходящем свете подготовлены стандартные шлифы. В соответствии со стандартом ASTM D4543-19 подготовлены цилиндры круглого сечения диаметром 54 мм¹. Соотношения длины образца к диаметру составляли от 2,0:1 до 2,5:1. Кажущаяся

¹ ASTM D4543-19. Standard Practices for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019. P. 13. DOI: 10.1520/D4543-19

плотность как в сухом, так и в насыщенном водой состоянии рассчитывалась по соотношению массы к объему в соответствии с методом В стандарта ASTM D7263-16². Определение эффективной пористости образцов получено с использованием метода погружения в воду в соответствии с работами [2, 9]. Для эксперимента требуются аналитические весы грузоподъемностью 2000 г и точностью до одной тысячной для гидростатического взвешивания, цифровая водяная баня, вакуумный насос и вакуумная сушилка. Вначале образцы взвешиваются на воздухе, а затем в дистиллированной воде при температуре 20 °С в течение 48 ч. Это среднестатистическое время, необходимое для получения каждого постоянного значения гидростатического взвешивания. На втором этапе эксперимента образцы полностью насыщаются под вакуумом (80 кПа) без извлечения из водяной бани. Этот метод также позволяет определить водопоглощение и степень насыщения. Полное насыщение ($S_r = 100\%$) достигнуто практически для всех изученных фаций.

Процедура измерения прочности при одноосном сжатии (ПЖ) выполнялась на сухих и насыщенных образцах в соответствии с предложенным Международным обществом механики горных пород методом для неповрежденных пород [15], путем приложения нагрузки с постоянной скоростью напряжения 0,2 МПа/с. Низкая скорость нагрузки выбрана для того, чтобы лучше изучить процесс до разрушения и деформационные свойства этих мягких горных пород. Модуль упругости получен испытанием ПЖ на сухих образцах из наклона кривых напряжение – деформация по касательному модулю (E_t). Из цилиндрических образцов изготовлены шайбы (диаметр 54 мм, отношение высоты к диаметру – 0,5:1) для косвенного испытания прочности на растяжение (бразильское испытание). Для испытания молотком Шмидта использовались кубические (370×150×110 мм) и многогранные (около 1,75 дм³) блоки. Согласно Айдину [16], использовался молоток типа N. Испытания на водопроницаемость проходили в специально построенной камере на цилиндрических образцах породы (диаметр 71 мм, высота 140 мм) с использованием метода убывающего напора. Гидравлическая проводимость k_{20} , нормированная при 20 °С, оценивалась для диапазона гидравлических градиентов от 0,5 до 15 (рис.2). Термальные свойства калькаренитов получены путем измерения коэффициента линейного теплового расширения α_l на основе измерений изменения механической длины при 20, 40, 60 и 80 °С на стержнях породы размером 350×15×15 мм по Попову и др. [17]. Теплопроводность λ в переменном режиме получена на двух образцах для каждого исследованного участка с помощью экспериментального метода «вырезанного керна» [18]; измерения проводились на одних и тех же образцах сначала в сухом, затем в насыщенном состоянии.

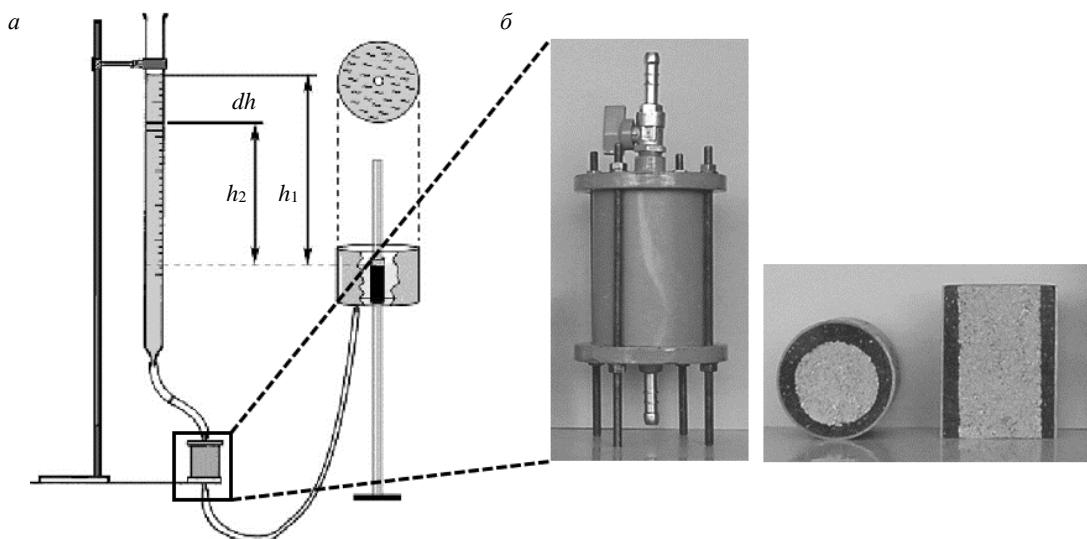


Рис.2. Схема прибора для испытания водопроницаемости (а); камера для определения проницаемости цилиндрических образцов породы и приготовленные в лаборатории поперечные и продольные срезы образцов (б)

² ASTM D7263-16: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016. P. 7. DOI: 10.1520/D7263-09R18E02



Результаты

В табл.1 обобщены основные результаты испытаний калькаренитов из Апулии и Базиликата, проанализированные в настоящем исследовании.

Таблица 1

Физико-механические свойства калькаренитов из Апулии и Базиликата

Свойства	Свита Calcarene di Gravina	Свита Pietra Leccese
Удельный вес G_s (средний)	2,70	2,70
Плотность (сухой) γ_d , кН/м ³	12,0-18,2	15,3-19,0
Плотность (насыщенный) γ_s , кН/м ³	17,6-21,5	19,6-22,0
Общая пористость n , %	33-56	30-43
Водопоглощение w_a , %	18-46	16-28
Степень насыщения Sr , %	100	100
Гидравлическая проводимость k_{20} , $10^{-5} \cdot \text{м}/\text{с}$	1,2-14,0	4,5-7,5
Линейное тепловое расширение α_d , $10^{-6} \cdot \text{К}^{-1}$	1,95-3,50	3,34-5,21
Теплопроводность (сухой) λ_d , $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	0,61-1,13	0,64-1,10
Теплопроводность (насыщенный) λ_s , $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	1,12-1,64	0,82-1,53
Прочность на сжатие (сухой) σ_n , МПа	1,1-7,3	12,8-23,4
Касательный модуль (сухой) E_t , ГПа	0,5-10	3,5-14
Прочность на сжатие (насыщенный) σ_s , МПа	0,7-4,9	7,1-12,2
Косвенная прочность на растяжение (сухой) σ_{td} , МПа	0,11-1,1	1,2-2,7
Косвенная прочность на растяжение (насыщенный) σ_{ts} , МПа	0,08-0,8	0,42-1,5
Число отскоков молотка Шмидта (сухой) R_I	0	10-24

На рис.3, *a*, *б* показаны результаты испытания на одноосное сжатие для образцов из свит Calcarene di Gravina и Pietra Leccese с точки зрения прочности как функции единицы объема. На рис.3, *в*, *г* показаны результаты бразильского испытания на прочность на растяжение для образцов из тех же свит, при этом результаты, полученные для сухих и насыщенных образцов, различаются.

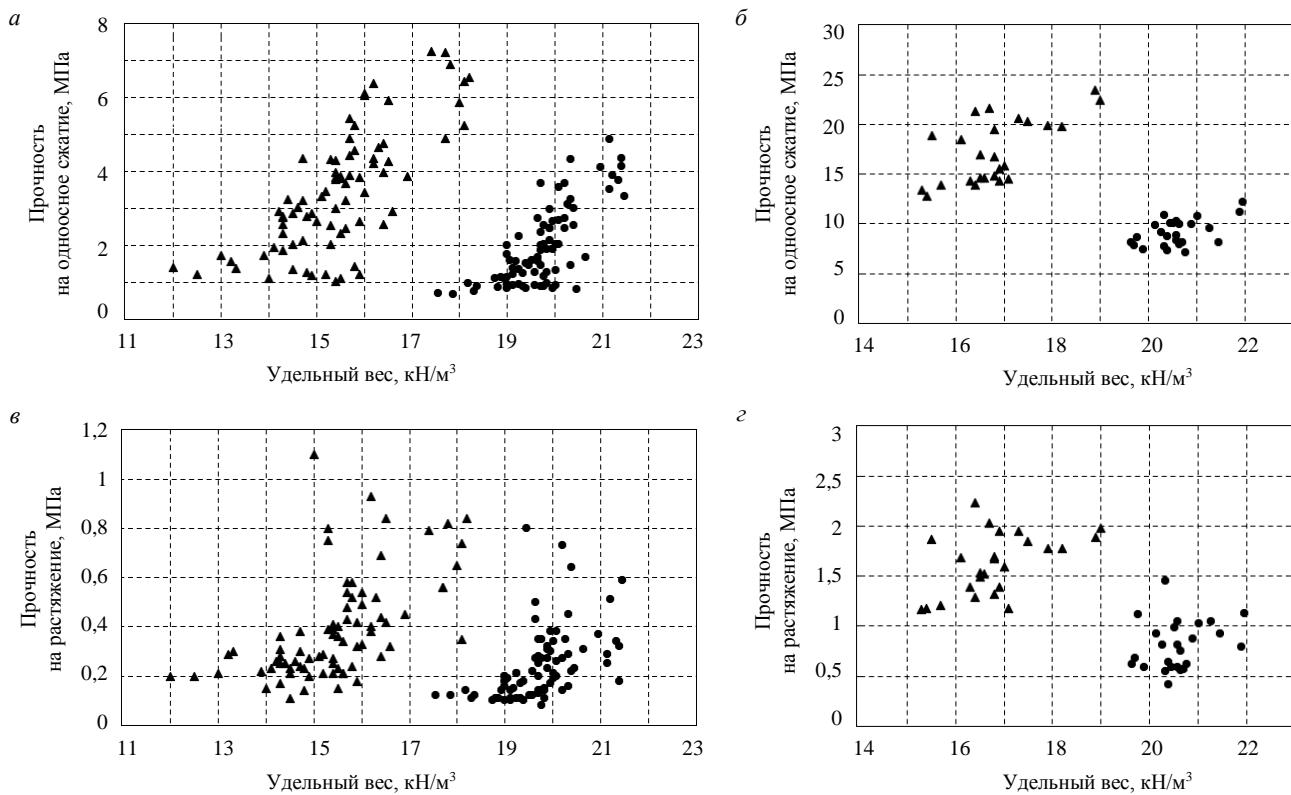


Рис.3. График зависимости прочности на одноосное сжатие от удельного веса для образцов из свит Calcarene di Gravina (*а*) и Pietra Leccese (*б*); график зависимости прочности на растяжение от удельного веса для образцов из Calcarenite di Gravina (*в*) и Pietra Leccese (*г*)

▲ – сухие образцы; ● – насыщенные образцы



Обсуждение

Петрофизические свойства. Калькаренит – это обломочный известняк с размером зерен преимущественно 0,0063-2,00 мм. Согласно Фолку [19], это карбонатный песчаник, состоящий из каркаса зерен кальцита или арагонита, аллохемов. Основные аллохемы состоят из биокластов, гранул, ооидов и интракластов. Пространства между зернами частично или полностью заполнены микритовой матрицей и/или спаритовым цементом. Микритовая матрица представляет собой микрекристаллическую известковую массу с размером частиц менее 30 мкм. Она может быть результатом биологической и/или физической эрозии более крупных карбонатных зерен, посмертного распада арагонитовых известковых водорослей, неорганического осаждения из насыщенных карбонатом вод и биохимического осаждения в результате деятельности водорослей. Везде, где карбонатная матрица затронута процессами перекристаллизации и неоморфизма, ее называют «микропшпат», он встречается в виде мелкозернистых микрекристаллов кальцита размером 4-10 мкм, однородных по форме и размеру. Спаритовый или шпатовидно-карбонатный цемент образуется путем осаждения кальцита из богатых карбонатом растворов, проходящих через поровые пространства в осадочных породах. Он состоит из крупных кристаллов кальцита размером 0,03-1,0 мм, возникающих после осаждения или сразу после захоронения (ранний диагенез), а также спустя долгое время после осаждения и во время захоронения (поздний диагенез). Карбонатные цементы можно подразделить на многочисленные значимые типы на основе соотношения Mg/Ca и солености раствора.

Как правило, блочный или мозаичный цемент, который образуется в пресноводной и фреатической среде, широко распространен в лиофациях, характеризующихся самыми высокими значениями ПЖ и/или косвенно испытанной прочности на растяжение (КПР). В Средиземноморском бассейне большинство поверхностей субаэральных выходов в калькаренитовых толщах встречаются вдоль обнажений морских или долинных уступов и стенок карьеров. В основном это массивные слоисто- или среднеслоистые хорошо отсортированные калькарениты, накопленные в прибрежной зоне пляжа и прибрежных обстановках. Обстановки включают разнообразные физические и биологические процессы, которые порождают осадочные фации, текстурно и структурно отличные и обусловленные рельефом подстилающих коренных пород.

После осаждения, из-за диагенетических процессов, таких как уплотнение, цементация, растворение, перекристаллизация, происходят изменения или облитерации ранее существовавших структур. Распределение пор по размерам, типы пор, топология поровой сети и физические параметры калькаренитов являются результатом как осадочных, так и постседиментационных процессов, включая диагенез и выветривание. Следовательно, поровая система в калькаренитовых породах очень сложна из-за мелкомасштабных фациальных неоднородностей, которые приводят к совместному присутствию как эффективной, так и закрытой пористости, даже если последняя развита меньше или отсутствует. Кроме того, открытая пористость характеризуется в масштабе образца широким диапазоном размеров и типов пор, включая крупные и средние капиллярные поры, а также поры с вовлеченным воздухом, согласно Миндесу и др. [20], и показывает равномерную связность в поровой системе. Поровая структура состоит из сложных и извилистых сетей. В основном это система межзерновых, внутризерновых, внутриполостных, кавернозных, высверленных, норовых и цементно-матричных межкристаллических пор, согласно Шокетту и Прею [21], связанных поровыми каналами, в которых могут встречаться микротрещины (сквозные поры). Размеры и распределение поровых каналов зависят от уплотнения и расположения зерен, размеров, форм зерен и кристаллов, а также энергии осаждения. Обычно они находятся в диапазоне от 0,01 до 5 мкм, хотя микротрещины могут быть больше 63 мкм. Каналы и межкристаллические поры оцениваются с помощью измерений капиллярного давления, поскольку часто слишком малы для шлифового анализа [22].

Преобладающие типы пор различны для разных фаций, но можно утверждать, что межзерновые, внутризерновые и межкристаллические поры присутствуют везде. В частности, поры в структуре почти всех лиофаций в Апулии и Базиликате, особенно в породах свиты *Calcarene di Gravina*, взаимосвязаны и непрерывны. Это сопряжено с тем, что для наиболее распространенных



литофаций, принадлежащих к свите Calcarene di Gravina (мелкозернистый биокластический вакстоун, среднезернистый биокластический или биолитокластический пакстоун, средне- и крупнозернистый биокластический или биолитокластический грейнстоун), степень уплотнения низкая из-за раннего диагенеза, произошедшего во время или вскоре после отложения (рис.4). Поэтому осаждение цемента начинается на ранних стадиях уплотнения или даже до того, как захоронение вызывает повышение давления и температуры. Неудивительно, что ранний менисковый карбонатный цемент присутствует на контактах зерен во многих калькариновых литофациях в Апулии и Базиликате. Этот тип цемента дополняется кромкой из мелких кристаллов кальцита на поверхности зерен, в некоторых местах окруженных скаленоэдрическими или ромбоэдрическими удлиненными кристаллами и микрокристаллами (цемент «собачий клык»). Из этого следует, что низкая степень уплотнения и редкая цементация приводят к высокой связности поровой сети и, следовательно, к масштабной эффективной или открытой пористости и редкой или отсутствующей закрытой пористости. Единственным исключением являются промежутки каличе и рудстоуна, где поры закупорены водозовым блочным карбонатным цементом с низким содержанием Mg, хотя по мнению Райта [23] каличе следует рассматривать отдельно от известковых туфов и подобных материалов.

Принимая во внимание конкретно свиты Pietra Leccese (мелко- и среднезернистый биокластический вакстоун, мелко- и среднезернистый биокластический пакстоун) и Calcarene di Gravina (биокластический пакстоун с преобладанием ила), поровая сеть включает внутризерновые поры и в подчиненном количестве внутриполостные и кавернозные поры. Несмотря на то, что эти литофации в основном характеризуются мелкозернистым песком и поровой структурой с немалым содержанием мелких частиц, можно утверждать, что открытая пористость (взаимосвязанные и доступные поры) обеспечивает важный вклад в общую пористость, в то время как закрытая пористость – очень редка или отсутствует из-за редкой постседиментационной цементации, согласно результатам испытаний на насыщение. В частности, в наиболее распространенных и известных литофациях свиты Pietra Leccese хотя и присутствует множество внутризерновых пор, состоящих из внутренних камер фораминифер, открытая пористость немного меньше или равна общей пористости. Взаимосвязь поровой сети обусловлена межкристаллическими порами и микротрецинами. Последние возникают во время диагенетических фаз захоронения, в основном в межзерновом шпатовом цементе. На рис.5, а представлены результаты экспериментального испытания на насыщение, предложенного в качестве дополнения к стандартному методу по ASTM D2216-19³, для погруженного образца биокластического пакстоуна с преобладанием ила из Массафры, карьер Ка-прочетта (Апулия).

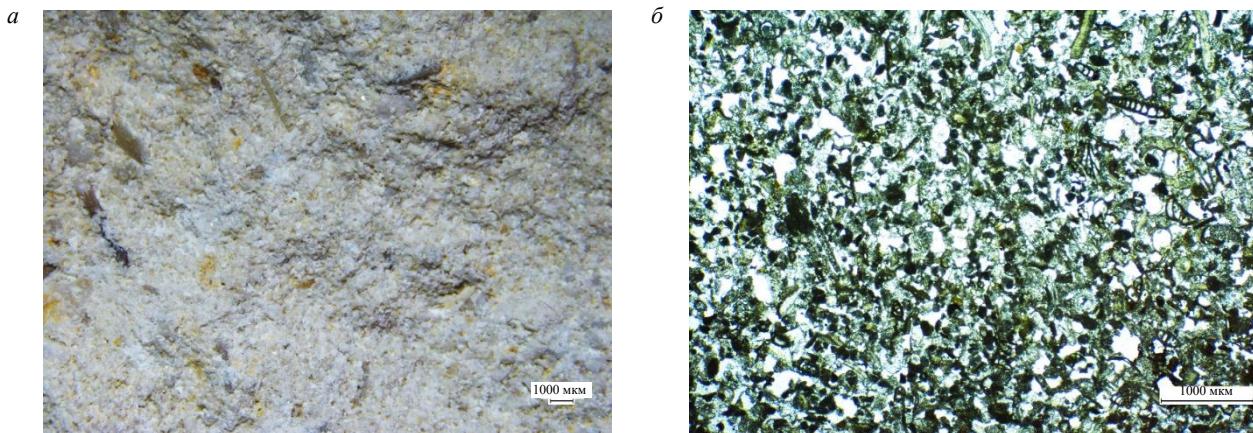


Рис.4. Макроскопический (а) и микроскопический (б) виды (микрофотографии в плоскополяризованном свете) среднезернистого калькарита Монтескальзо, карьер Бонгермино, Базиликата

³ ASTM D2216-19: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019. P. 7. URL: <https://www.astm.org/standards/d2216> (дата обращения 17.07.2024).

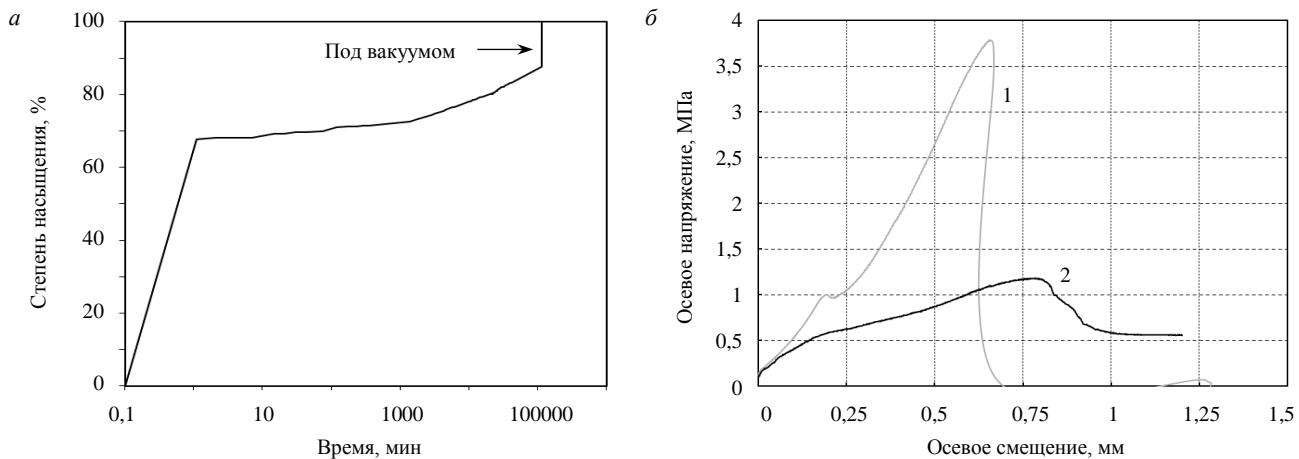


Рис.5. Зависимость степени насыщения от времени, определенная с помощью испытаний на насыщение погруженных в воду образцов калькаренита (а); кривые напряжения и деформации, полученные в результате испытания на одноосное сжатие с сервоуправлением (б); образцы из свиты Calcarene di Gravina, карьер Капрочетта, Массафра, Апулия

1 – образец в сухом состоянии; 2 – образец в условиях насыщения

Для этого погруженного образца при оказываемом только выталкивающей силой давлении получена степень насыщения 88 %. Однако поглощение дополнительной воды при погружении в условиях вакуума (80 кПа) приводит к полному насыщению ($Sr = 100 \%$), что демонстрирует полную взаимосвязь и доступность пор. Кроме того, при давлении, оказываемом только выталкивающей силой, испытанный образец поглощает большую часть воды за несколько минут (68 % примерно за 2 мин), после чего объем поглощенной воды растет очень медленно.

Другие лиофации калькаренита показали схожие тенденции. Многие предыдущие исследования с помощью жидкостной интрузии (например, РИП) отдельно или в сочетании с такими методами, как анализ изображений и СФЕ (смешанные фрактальные единицы) или МКТ (рентгеновская микрокомпьютерная томография) и ИКТ (инфракрасная термография), не говоря о других [1, 2, 7, 24, 25], продемонстрировали значительно или полностью открытую пористость этих материалов. Закрытые поры могут сформироваться в процессе рекристаллизации, которая сильно изменяет структуру материалов из-за длительного диагенеза, что приводит к увеличению жесткости и прочности. Недавно интересный подход был представлен Чантия и др. [7], авторы использовали лиофации калькаренита из разрабатываемых месторождений в Апулии для реконструкции трехмерных текстур с помощью РИП, СЭМ и рентгеновской МКТ.

Строение пор и извилистость поровых каналов отвечают за способность калькаренитов удерживать и передавать воду или другие жидкости, а также проводить, распространять и аккумулировать тепло как в насыщенном, так и в ненасыщенном состоянии. В мезоскопическом масштабе пористость калькаренитов первична и контролируется текстурой, структурная пористость ограничивается синседиментационными и постседиментационными структурами, включая слоистость, биотурбации и микротрещины. Теоретическая база, которую можно использовать для исследования гидравлических свойств калькаренитовых пород в ненасыщенном состоянии, основана на модели пучка пор и концепции двойной пористости в условиях равновесия в испытании инфильтрации с убывающим напором с использованием аддективно-диффузионных форм уравнения Ричардса [6].

В масштабе массива горных пород как первичная, так и вторичная пористость могут играть важную роль в определении общей пористости. В связи с этим необходимо рассмотреть два типа пористости – текстурную и структурную. Текстурная зависит от природы (тип биокластов, лиофации и т.д.), расположения и взаимосвязи зерен. Структурная связана с макроскопическими неслучайными разрывами, например карстовыми образованиями, трещинами и разломами. За исключением некоторых крупнозернистых лиофаций калькаренита с высокими значениями гидравлической проводимости воды, наиболее распространенные лиофации, обнажающиеся в Апулии



и Базиликате, имеют умеренную водопроницаемость. В системах карбонатных пор эффективность типа пор и сложные поровые сети могут объяснить низкую корреляцию между пористостью и проницаемостью.

В лабораторном масштабе гидравлическая проводимость калькаренитов Апулии и Базиликаты в значительной степени зависит от количества и типа цемента, а также распределения пор по размерам, которое, в свою очередь, зависит от распределения по размерам, формы зерен и структуры породы. Иными словами, чем мельче зерна, тем меньше средний размер пор и тем ниже гидравлическая проводимость. Таким образом, калькарениты Апулии и Базиликаты в основном характеризуются сетями открытых пор, а проницаемость не зависит от соотношения между закрытой и открытой пористостью, но она обусловлена структурой пор, включая соотношение между лито-кластами и биокластами, таксономическими группами и первичной минералогией биокластов, а также типом и распределением микрита и цемента. Конкретнее, биокластовый пакстоун с преобладанием ила и биокластовый вакстоун плио-четвертичных калькаренитов характеризуются более низкой гидравлической проводимостью по сравнению с литофациями грейнстоуна и пакстоуна, в основном из-за широкого распространения пор (бимодальных и исключительно trimодальных), которые включают длинные «хвосты» крупных и средних капиллярных пор, согласно Миндесу и др. [20]. В частности, это открытые межкристаллические поры внутри микрита и цемента, невидимые или едва заметные при разрешении оптического микроскопа, обычно используемого для исследования шлифов. Поэтому большая или меньшая гидравлическая проводимость калькаренитов Апулии и Базиликаты, полученная в результате прямых лабораторных измерений на различных литофациях, не должна объясняться четким и разнообразным весом образцов при оценке закрытой и открытой пористости. Она в значительной степени зависит от соотношения между капиллярными и воздушными порами. Иными словами, гидравлическая проводимость выше для литофаций, в которых крупные «хвосты» некапиллярных пор (медленно дренирующие и быстро дренирующие поры) присутствуют на кривых распределения пор. Напротив, гидравлическая проводимость ниже у литофаций с длинными «хвостами» капиллярных пор [6].

Заметное присутствие капиллярных (внутризерновых и межкристаллических) пор в литофациях калькаренитов свиты Pietra Leccese объясняет более низкие значения гидравлической проводимости, чем у основных литофаций плиоцен-четвертичных калькаренитов, хотя обе геологические формации характеризуются открытой пористостью. Для литофаций свиты Pietra Leccese способность пропускать флюиды через поровую сеть зависит от уплотнения, распределения зерен по размерам, включая размеры зерен цемента, которые, в свою очередь, влияют на распределение размера пор в этих породах.

Общая пористость и ее тип также влияют на тепловые свойства данных материалов: способность проводить, распространять и аккумулировать тепло низкая, и это свойство более выражено у плиоценовых фаций (Calcarene di Gravina), чем у миоценовых (Pietra Leccese). В целом, теплопроводность и тепловая диффузия сухих калькаренитов в первую очередь определяются пористостью: они снижаются по мере увеличения пористости и уменьшения степени уплотнения. Обычно заметного прямого влияния размера зерен и пор на тепловые свойства не наблюдается. Напротив, при более высокой степени цементации отмечается более высокие значения тепловых свойств. Влияние открытой и закрытой пористости на тепловые свойства этих материалов все еще остается невыясненным, хотя теплопроводность и тепловая диффузия калькаренитов с пористой структурой, содержащей закрытые поры, при прочих равных условиях должны быть выше, чем у калькаренитов с открытой пористой структурой. До настоящего времени ни одно исследование не изучало этот вопрос для калькаренитов из Апулии и Базиликаты, поскольку пористость этих материалов по существу открытая, что широко освещено в специальной литературе. Кроме того, увеличение теплопроводности и уменьшение тепловой диффузии обнаруживается во всех литофациях с увеличением содержания воды. Таким образом, при одинаковой пористости в условиях насыщения водой теплопроводность и удельная теплоемкость увеличиваются, а тепловая диффузия уменьшается. Эстетическая привлекательность и изоляционные свойства делают эти материалы и сегодня ценным для строительных задач.

Механические свойства. Согласно инженерной классификации пород на основе ПЖ и модуля упругости целых лабораторных образцов, разработанной Диором и Миллером [26], основные



литофации калькаринита из Апулии и Базиликата относятся к классу очень низкой прочности. Их можно считать мягкими породами: прочность на основе ПЖ в сухом состоянии, как правило, менее 25 МПа. В среднем свита Pietra Leccese имеет более высокие значения ПЖ, чем свита Calcarene di Gravina, из-за более высокой степени уплотнения, большего диапазона распределения карбонатного цемента, в частности зернистого кальцита (хотя и меньшего размера, микрошпата). Для свиты Calcarene di Gravina положительная корреляция между плотностью в сухом состоянии или уплотнением зерен и ПЖ не всегда верна. Как правило, тип и количество карбонатного цемента контролируют общую прочность материала, однако трудно количественно оценить вклад каждого элемента. На основании практического опыта, описанного в предыдущих работах, можно сделать вывод, что пакстоуны с преобладанием ила и мелко-, среднезернистые биокластовые вакстоуны с обилием микрошпата, а также средне- или крупнозернистые литофации с дроздовым, зернистым или блочным цементом имеют самые высокие значения ПЖ и КПР.

В массиве горных пород сложные зависящие от времени и пространственно изменчивые физико-механические свойства связаны с крупнозернистыми литофациями из-за неоднородного пространственного распределения цемента, значительно более распространенного в верхних уровнях обнажений. Что касается свиты Calcarene di Gravina, наиболее важными в исторической ретроспективе типами калькаринита для использования в качестве декоративного и строительного камня являются средне- или средне-мелкозернистые пакстоуны или грейнстоуны, характеризующиеся в сухом состоянии ПЖ в диапазоне 3-7 МПа и ПЖ/КПР от 7,5 до 9,0. Последние, как правило, ограничиваются более прочными типами [2, 9]. Кривые напряжения деформации описывают хрупкий материал и демонстрируют линейные и упругие свойства вплоть до точки текучести, которая отмечает начало прогрессирующего разрыва цементных связей, а объемная деформация сжатия становится нелинейной и обычно пластичной [2].

Предел текучести не всегда четко определен, особенно когда начальная часть кривой отклоняется от прямой пропорциональности, а наклон кривой изменяется из-за неравномерного распределения цемента и небольших частичных разрушений в образцах. После достижения предела текучести наклон кривой уменьшается до тех пор, пока не достигает четко выраженного пика, а затем происходит деформационное размягчение (рис.5, б). Характер каждой кривой сильно зависит от цементации, которая преодолевает влияние других элементов структуры. Образцы с однородным распределением цемента и однородной структурой характеризуются протяженной поверхностью разрушения, распространяющейся в направлении приложения максимальной нагрузки. Извилистые или неравномерные поверхности разрушения или две-три пересекающиеся поверхности разрушения могут быть отнесены к анизотропии образцов из-за кластеров с более высокой степенью уплотнения зерен или скоростью цементации.

Как правило, поверхности разрушения проходят через поровое пространство, включающее цемент, без пересечения зерен, несмотря на наличие мелких оболочек (рис.6). Распространение трещин не транскристаллическое (между зернами или вдоль границ зерен), а включает оболочки в фациях с обильным цементом поздней генерации. Особенно важно отметить влияние содержания воды на механические свойства пород, поскольку с увеличением степени насыщения прочность калькаринита по показателям ПЖ и КПР значительно уменьшается, вплоть до снижения более чем на 45 % в условиях насыщения ($Sr = 100 \%$) по отношению к сухому материалу [2, 7]. Таким образом, присутствие воды в порах и способность удерживать ее в поровой сети (последнее напрямую связано с распределением пор по размерам) сильно влияют на механические свойства материалов, при этом прочность и жесткость значительно уменьшаются при переходе от сухих к насыщенным условиям (см. рис.5, б). Кроме того, слабосцементированные калькариниты очень интересны с точки зрения механических свойств, поскольку подвержены хрупкой деформации в сухом состоянии, а также пластичной или псевдопластичной деформации и большему снижению ПЖ или КПР в насыщенных образцах. Материалы характеризуются наличием только раннего карбонатного цемента и широким диапазоном размеров пор, включая капиллярные и некапиллярные поры, поскольку открытая пористость и распределение пор по размерам влияют на поглощение и удержание воды породами. Таким образом, на механические свойства калькаринитов в основном влияют тип, количество цемента и наличие в порах воды [2, 7].

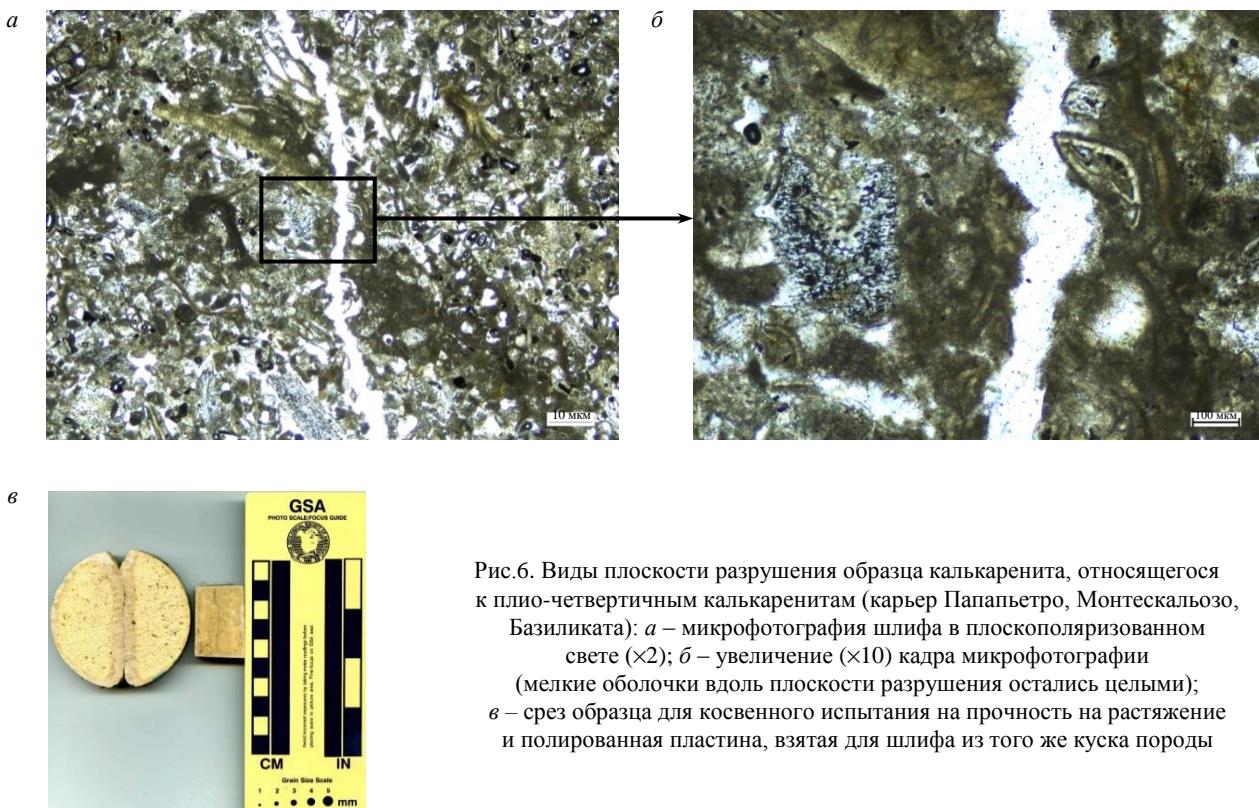


Рис.6. Виды плоскости разрушения образца калькарнита, относящегося к плио-четвертичным калькарнитам (карьер Папапьетро, Монтескальозо, Базиликата): *а* – микрофотография шлифа в плоскополяризованном свете ($\times 2$); *б* – увеличение ($\times 10$) кадра микрофотографии (мелкие оболочки вдоль плоскости разрушения остались целыми); *в* – срез образца для косвенного испытания на прочность на растяжение и полированная пластина, взятая для шлифа из того же куска породы

Мелкозернистые лиофации способны удерживать воду во время испытаний ПЖ и КПР, поддерживая высокую степень насыщения. Крупно- и среднезернистые фации могут внезапно пропускать воду во время испытаний ПЖ или КПР, особенно когда в них присутствует большой процент взаимосвязанных мезо- и макропор с высокими значениями гидравлической проводимости. Воздействие воды на механические свойства этих лиофаций меньше, чем других.

Чантая и др. [7] удачно объяснили и продемонстрировали с помощью серии новых и неклассифицированных испытаний различные механизмы нарушения связности при кратковременном и долгосрочном погружении в воду. Их исследование показывает, что гидро-химико-механическое ослабление калькарнитов связано как со временной (синседиментационный цемент), так и с постоянной (диагенетический цемент) связностью. Они утверждают, что насыщение образцов калькарнита не имеет краткосрочного влияния на диагенетический цемент. Это позволяет сделать три важных вывода. Во-первых, сильное ослабление материала при кратковременном погружении в воду – типичная ситуация, которая возникает во время лабораторных механических испытаний, характерна только для фаций, в которых присутствует почти исключительно цемент первого поколения. Во-вторых, для калькарнитовых скальных массивов надо учитывать влияние химического растворения диагенетического цемента при долгосрочном погружении в воду, механизм, который увеличивает скорость подвижек и эволюцию повреждений. И наконец, долгосрочное химическое растворение кальцитового цемента является основным фактором, влияющим на механическое поведение калькарнитов.

Что касается олиго-миоценовых лиофаций, то для них характерны более низкие общая пористость и проницаемость и более высокая общая прочность, чем для лиофаций плио-четвертичного периода. Эти лиофации характеризуются высокой степенью уплотнения и более широким распространением карбонатного цемента, в частности микрошпата. Тем не менее, для этих материалов не всегда подтверждается положительная корреляция между ПЖ/КПР и плотностью в сухом состоянии или уплотнением зерен. Из этого следует, что основными факторами, влияющими на физические и механические свойства этих материалов, являются количество и тип цемента, распределение пор по размерам. Стоит упомянуть фацию Piromafio, зеленовато-коричневый или зеленовато-серый мелко-среднезернистый глауконитовый и фосфатный биомикрит с макроископаемыми, в частности двустворчатыми и брюхоногими моллюсками, встречающийся в верхней



части свиты Pietra Leccese. Фация Piromafo характеризуется более низкой способностью проводить и распространять тепло и более высокой огнестойкостью по сравнению с другими литофациями свиты Pietra Leccese. Эта особенность может быть обусловлена уже химическим и минералогическим составом материала в нерастворимом остатке, а не различиями в пористости или топологии поровой сети и распределением пор по размерам.

Заключительным наблюдением является больший разброс значений прочности на одноосное сжатие и растяжение в свите Calcarenite di Gravina по сравнению с Pietra Leccese. Calcarenite di Gravina – чрезвычайно неоднородная свита с точки зрения текстуры и микроструктуры. Она включает как высокоэнергетические умеренно-водные биокластические, так и смешанные биокластические-литокластические калькарениты из береговых, прибрежных и морских зон в связи с высокочастотными изменениями уровня моря. В частности, литокласти происходят из меловой известняковой коренной породы. Их принесли на береговую линию пересыхающие реки. Напротив, свита Pietra Leccese – это однородный планктонный фораминиферовый биомикрит, обычно отлагающийся в мелководно-морских обстановках.

На основании изложенных соображений и критического обзора данных, представленных в научной литературе, а также личного опыта, можно предложить новую геотехническую классификацию калькаренитов, использующую значения ПЖ в сухом состоянии, описание структуры и степень цементации, а также поведение материала под действием напряжений и деформаций в сухом и насыщенном состоянии (табл.2). В частности, поведение калькаренитов из Апулии и Базиликата под действием напряжений и деформаций изучено в рамках проекта сотрудничества с участием исследователей и технических специалистов Университета им. Альдо Моро в Бари и Национального исследовательского совета (CNR)-IRPI Департамента Бари. За последнее десятилетие в рамках исследовательской деятельности 484 образца, принадлежащих к основным литофациям калькаренитов из Апулии и Базиликата, классифицированы с помощью петрофизических и механических испытаний в геотехнической лаборатории Университета Бари и геотехнической и геомеханической лаборатории CNR-IRPI. В дополнение к анализу структуры для каждой фации проведены испытания ПЖ и КПР в сухом и насыщенном состоянии, при этом скорость вертикального смещения, измеренная с помощью датчиков смещения, устанавливалась на уровне 1,0 мкм/с, а осевое напряжение измерялось с помощью тензодатчика. Наиболее важная граница пролегает между очень мягкими и мягкими калькаренитами, она отмечена значением ПЖ в сухом состоянии 5 МПа. Ниже этого значения калькарениты хрупкие в сухом состоянии и псевдопластичные или пластичные в насыщенном состоянии. Выше – напряженно-деформационные свойства калькаренитов схожи в сухом и насыщенном состояниях, хотя значение ПЖ в насыщенном состоянии значительно ниже, чем в сухом. Общая прочность калькаренитов в основном контролируется типом и количеством карбонатного цемента, содержанием воды или степенью насыщения и распределением пор по размерам, для чего полезно статистически рассмотреть пространственные тенденции зависимой случайной величины от одной или нескольких независимых случайных величин. Новые исследования свойств материалов могут развиваться в данном направлении.

Выветривание и прочность. При прочих равных условиях, общая прочность и структура пор оказывают наибольшее влияние на выветривание горных пород и долговечность камня. В прочности основополагающую роль играет предел прочности на разрыв, который представляет собой связную прочность материалов и сопоставим с давлением кристаллизации. Кроме того, предел прочности на разрыв тесно связан с особенностями структуры горных пород и, особенно для лито- и/или биокластовых карбонатных материалов, может рассматриваться как прямое выражение количества, типа и распределения цемента. Наиболее опасные процессы выветривания в калькаринатах развиваются в присутствии воды: замерзание/оттаивание, кристаллизация соли, а также растворение материала и биодеградация [9, 24, 27].

Кроме того, эти процессы зависят от скорости инфильтрации, гидродинамических свойств движения, поглощения и удержания воды. Также следует учитывать, что в поровом пространстве могут находиться все три фазы воды (пар, жидкость и лед). Поэтому анализ и характеристика взаимодействия между горной породой и водой играют фундаментальную роль в выяснении причин выветривания горной породы или разрушения камня.



Таблица 2

Классификация калькаренитов Апулии и Базиликата

Группа	Диапазон ПДЖ в сухом состоянии, МПа	Оценка пород по прочности	Характеристики структуры горных пород	Напряженно- деформационные свойства
AC1	10-25	Умеренно мягкая	Крупно- и среднезернистый пакстоун и грейнстоун, пакстоун с преобладанием глины; друзовый и зернистый цемент, частично и полностью заполняющий пустоты; касательные и длинные контакты между зернами. Мелко- и среднезернистый биокластовый вакстоун и пакстоун с преобладанием глины и песчанистого цемента	Хрупкая при различной водности
AC2	5,0-10	Мягкая	Среднезернистый грейнстоун и пакстоун; цемент с частичным заполнением пустот и выстилающим поры «собачьим клыком»; касательные и длинные контакты между зернами	Хрупкая в сухом состоянии, хрупкая или квазихрупкая в насыщенном состоянии
AC3	1,0-5,0	Очень мягкая	Крупнозернистый грейнстоун, среднезернистый пакстоун; редкий цемент, мениковый и микрокристаллический типы; касательные контакты между зернами; средне-мелкозернистый вакстоун с крипто- и/или микрокристаллической основой	Хрупкая в сухом состоянии, пластичная или псевдопластичная в насыщенном состоянии
AC4	0,6-1,0	Чрезвычайно мягкая	Крупнозернистый и среднезернистый пакстоун, очень редкий цемент, микрокристаллический тип; микроспарстоун как результат полной облитерирующей перекристаллизации или замещения; мелкозернистый вакстоун и пакстоун с неравномерным распределением волокнисто-игольчатого цемента и/или прерывистых эпитаксиальных полос; плавающие и касательные контакты между зернами	Хрупкая или квазихрупкая в сухом состоянии, пластичная в насыщенном состоянии

В этой связи поровая структура, с точки зрения распределения пор по размерам, геометрии и топологии поровой сети, представляет собой основной фактор, влияющий на способность калькаренитовой породы поглощать, удерживать воду и, следовательно, выветриваться. В частности, гидравлическая проводимость и удельная площадь поверхности находятся в прямой и обратной зависимости от размера пор. Конденсация и удержание воды внутри пород напрямую связаны с удельной площадью поверхности. В лабораторных исследованиях в масштабе образца отмечалось, что широкий диапазон размеров пор, включающий крепкие крупные и тонкие «хвосты», можно считать важным фактором при оценке атмосферостойкости калькаренитов. Материалы с поровыми сетями крупных пор (до 2,0 мм), связанных со значительным числом пор менее 10 мкм, наиболее подвержены растворению и кристаллизационному выветриванию. Поэтому давление кристаллизации обратно пропорционально размеру пор. Крупные поры обеспечивают проникновение воды в материал, а капиллярные поры удерживают ее. Чем дальше вода остается в материале, тем больше вероятность выветривания. Кроме того, прочность калькаренита на растяжение связана со свойствами цементной связи. Поэтому неравномерно и слабо сцементированные лиофации только с ранними цементными каймами, как тонкая корка мелких кристаллов кальцита, растущих на контакте между зернами или на поверхностях стенок пор, особенно подвержены физическому выветриванию. Иными словами, размеры и связанность типа пор с количеством цемента влияют как на гидравлические свойства калькаренитов с точки зрения сорбционной способности, гигроскопичности, водопоглощения и удержания воды, так и на прочность на растяжение. Поэтому подробная информация о поровой структуре и цементации может быть важна для качественной оценки потенциальной атмосферостойкости калькаренитов.

В памятниках и зданиях, построенных из калькаренита, ухудшение состояния блоков кладки зависит от положения. На внешний вид каменных поверхностей влияют воздействие ветра, дождя, влажности и изменение температуры. Кальцит – единственный минерал, который при нагревании расширяется в одном направлении и сжимается в другом, а при охлаждении сжимается вдоль одной оси и расширяется вдоль других. Все это приводит к возникновению сложных напряжений

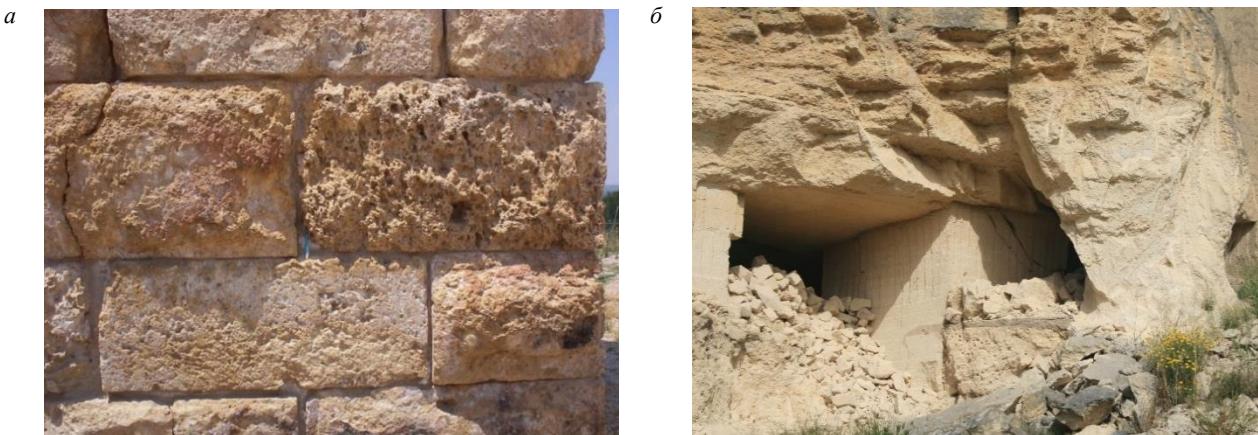


Рис.7. Трещины, ячеистые формы и микробный налёт на кубических блоках древней стены (а); прогрессирующие обрушения кровли и разрушение столбов и стен, обнаруженные в подземных карьерах (б), Пьетра Кадута, Каноза-ди-Пулья, Апулия

растяжения, сжатия и сдвига на границах зерен и вызывает микротрещины, которые увеличивают пористость и слияние которых может привести к разрушению блоков. На археологических памятниках часто можно наблюдать трещины, пересекающие блоки кладки, возникшие в результате длительной перегрузки и подвижек (рис.7, а).

Типичные примеры разрушения калькаренистых блоков кладки представлены убылью материала и отслоением, включая разрушение зерен до песка; выламывание плотных фрагментов камня и образование выемок; дифференциальную эрозию, связанную со слоистостью; биотурбацию; альвеолизацию, обычно приписываемую кристаллизации соли; лишайниковые корки и другие явления биодеградации. Особый интерес представляет влияние времени на прочностные и жесткостные свойства калькаренистых пород в масштабе скального массива (т.е. подвижки). Калькарениты очень часто подвергаются разрушению, вызывающему прогрессирующее ухудшение механических свойств. Во многих местах эти процессы вызывают обрушение скал или подземных полостей, что может привести к гибели людей. Опыт подземных выработок калькаренита показал, что под влиянием подвижек всего скального массива прочность столбов и сводов в карьерах со временем уменьшается [28]. Этот эффект особенно значим во влажных или мокрых местах, а также для мягких пород, подвергающихся гидро- и термоциклированию (рис.7, б).

Выводы

В статье рассматриваются фундаментальные аспекты физико-механических свойств пород калькаренита с помощью новых испытаний и сравнения результатов с имеющимися в литературе. Различные лиофации калькаренита из Апулии и Базиликата подверглись лабораторному анализу. Для описания петрофизических и механических свойств материалов использовались традиционные и нетрадиционные процедуры геотехнических лабораторных испытаний, петрография шлифов и углубленный библиографический анализ. Литературные данные включают результаты исследований, в которых использовались комбинированные методы, такие как интрузия жидкости (РИП), анализ изображений, смешанные фрактальные единицы (СФЕ), рентгеновская микропрограммная томография (МКТ), инфракрасная термография (ИКТ) и др.

Физико-механические свойства карбонатных мягких пород – сложная, но примечательная тема, поскольку задействованы различные факторы с запутанными и порой неочевидными взаимосвязями.

В Средиземноморском бассейне, включая части Южной Италии, калькаренистые толщи обнажаются вдоль склонов холмов, морских или долинных уступов и стенок карьеров. Эти породы в основном массивно- или среднеслоистые, со значительной текстурной и структурной изменчивостью из-за сложных процессов осадконакопления и постседиментационного диагенеза, подверженные влиянию рельефа подстилающих коренных пород. В пределах одного и того же осадочного тела можно обнаружить различные лиофации с различным распределением зерен и пор по размерам, топологией поровой сети и характеристиками связности.



Недавние петрофизические и механические исследования калькаренитов обеспечили более полное понимание их свойств при различных граничных условиях и степени насыщения. Текущие результаты показывают, что сложные физико-механические свойства калькаренитов контролируются структурой, включая как микроскопическую, так и макроскопическую текстуры и строение. В частности, тип и количество цемента, а также распределение пор по размерам, тесно связанные с распределением зерен по размерам, формой зерен, уплотнением и другими процессами, такими как растворение и перекристаллизация, играют важнейшую роль в определении как деформационно-прочностных характеристик, так и гидравлических свойств материала.

Сложная поровая сеть калькаренитов обусловлена мелкими литофационными неоднородностями, которые приводят к одновременному присутствию как микро-, так и макропор, что подчеркивается бимодальным, а иногда trimодальным распределением пор по размерам. Для калькаренитов из Апулии и Базиликата сложность поровой структуры связана с преимущественно открытой пористостью, поскольку все поры соединены очень мелкими капилляроподобными путями, известными как поровые каналы, что подтверждают 2D- и 3D-исследования, а также простые испытания насыщением под вакуумом. Исключения возникают из-за водозных блочных карбонатных цементов с низким содержанием Mg, которые закупоривают поры в промежутках каличе и рудстоуна. При петрографическом анализе с помощью оптического микроскопа, ограниченного разрешением 0,2 мкм, не видно таких деталей строения пор, как поровые каналы и микротрешины, имеющих решающее значение для понимания взаимосвязи пор. Более подробную информацию по данному вопросу, а также о других физико-механических свойствах калькаренитов можно получить, объединив качественные результаты 2D-исследования шлифов и 3D-методов (количественная трехмерная петрография, порометрия и т.д.), сравнив их с данными геотехнических испытаний.

Сложные и извилистые сети пор в некоторых литофациях калькарнита объясняют низкую корреляцию между проницаемостью и пористостью, поскольку способность пропускать жидкость зависит от структуры пор. В частности, бимодальное, а иногда и trimодальное распределение пор по размерам, которое включает крупные и средние капиллярные поры в сочетании с порами с вовлеченным воздухом, безусловно, влияет на гидравлические свойства материала, но в то же время затрудняет фундаментальное понимание процессов дренажа. При одинаковой пористости гидравлические свойства каждой литофации калькарнита сильно зависят от геометрии и топологии сети, а также относительного процентного состава имеющихся пор, т.е. от соотношения капиллярных пор, в которых вода удерживается, и крупных пор, откуда вода изливается под действием силы тяжести. В калькарнитах первичная пористость претерпевает изменения из-за диагенетических процессов после захоронения посредством образования более позднего цемента и постседиментационного растворения. В целом, цементы второго поколения, такие как друзовые, зернистые, блочные и изометричные мозаичные, снижают пористость и проницаемость за счет изменения структуры пор, в частности распределения пор по размерам и связности сети. Эти изменения влияют на инфильтрацию воды, при этом гидравлические свойства, с точки зрения гигроскопичности, сорбционной способности, поглощения и удержания воды, строго контролируются структурой пор, а также типом и количеством карбонатного цемента. Эти свойства и прочность на разрыв, также контролируемая типом и количеством карбонатного цемента, дают качественную оценку потенциальной атмосферостойкости калькарнитов.

Другим важным аспектом, которым не стоит пренебрегать, является влияние содержания воды и степени насыщения на механические свойства материалов. При насыщении большинство калькарнитов демонстрирует снижение ПЖ и прочности на растяжение более чем на 45 % по сравнению с сухим состоянием. Помимо этого, слабосцементированные калькарниты, содержащие только ранний диагенетический цемент, меняют деформационно-прочностные свойства при переходе от сухого состояния к насыщенному, а тип разрушения смещается от хрупкого к псевдовязкому или вязкому.

Закономерности избирательного разрушения, наблюдаемые на обнаженных калькарнитовых блоках, являются результатом сложных химических, физических и биологических процессов. Эти процессы различаются в пространстве и времени в пределах одного объекта из-за таких факторов,

как воздействие солнца, влажность, внутренние микро- и мезоскопические структурные характеристики материала. Хотя основные факторы выветривания и можно выявить в рамках данной окружающей обстановки, прогнозирование конкретного воздействия на каменный материал и выдвижение гипотез о его долговечности, скорости разрушения – нетривиальная задача. Не всегда легко связать каждый физический, химический или биологический процесс с закономерностями разрушения или с уверенностью определить влияние на процесс разрушения каждого фактора. Генезис и закономерности разрушения строго контролируются осадочной и диагенетической структурой каменного материала. Связь между определенными неорганическими и органическими осадочными структурами (например, параллельная и перекрестная слоистость, биотурбация) и закономерностями разрушения очевидна в процессах дифференциальной эрозии.

Хотя мы продвинулись в понимании физико-механических свойств калькаренитов, многое еще предстоит изучить в сложных взаимосвязях текстурных и структурных характеристик, а также эксплуатационных характеристиках этих материалов в различных контекстах применения. Будущие исследования должны быть направлены на дальнейшее изучение этих взаимодействий, особенно в области гидрогеологии, в том числе процессы фильтрации и инфильтрации грунтовых вод, а также их роли в строительной геологии и устойчивости подземных пространств и склонов. Помимо исторического использования в качестве природных строительных материалов в знаковых средиземноморских сооружениях, калькарениты продолжают играть важную роль в современном строительстве. Комплексный подход, объединяющий геологические, структурные и экологические факторы, будет иметь решающее значение как для сохранения культурного наследия, так и для разработки устойчивых решений в геоинженерии.

Автор выражает благодарность Майклу Тарулло из Мичиганского государственного университета за полезные обсуждения настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ciantia M.O., Castellanza R., Crosta G.B., Hueckel T. Effects of mineral suspension and dissolution on strength and compressibility of soft carbonate rocks // *Engineering Geology*. 2015. Vol. 184. P. 1-18. [DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.10.024](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.024)
2. Lollino P., Andriani G.F. Role of Brittle Behaviour of Soft Calcarenites Under Low Confinement: Laboratory Observations and Numerical Investigation // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017. Vol. 50. Iss. 7. P. 1863-1882. [DOI: 10.1007/s00603-017-1188-0](https://doi.org/10.1007/s00603-017-1188-0)
3. Zimbardo M. Mechanical behaviour of Palermo and Marsala calcarenites (Sicily), Italy // *Engineering Geology*. 2016. Vol. 210. P. 57-69. [DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.06.004](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.004)
4. Noël C., Fryer B., Baud P., Violay M. Water weakening and the compressive brittle strength of carbonates: Influence of fracture toughness and static friction // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2024. Vol. 177. № 105736. [DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105736](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105736)
5. Kanji M.A. Critical issues in soft rocks // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014. Vol. 6. Iss. 3. P. 186-195. [DOI: 10.1016/j.jrmge.2014.04.002](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.04.002)
6. Pastore N., Andriani G.F., Cherubini C. et al. Pore network model to predict flow processes in unsaturated calcarenites // *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*. 2024. Special Issue 1. P. 261-273. [DOI: 10.4408/IJEGE.2024-01.S-29](https://doi.org/10.4408/IJEGE.2024-01.S-29)
7. Ciantia M.O., Castellanza R., di Prisco C. Experimental Study on the Water-Induced Weakening of Calcarenites // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015. Vol. 48. Iss. 2. P. 441-461. [DOI: 10.1007/s00603-014-0603-z](https://doi.org/10.1007/s00603-014-0603-z)
8. Festa V., Fiore A., Luisi M. et al. Petrographic features influencing basic geotechnical parameters of carbonate soft rocks from Apulia (southern Italy) // *Engineering Geology*. 2018. Vol. 233. P. 76-97. [DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.12.009](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.009)
9. Andriani G.F. Comment on «Petrographic features influencing basic geotechnical parameters of carbonate soft rocks from Apulia (southern Italy)» [Eng. Geol. 233: 76-97] // *Engineering Geology*. 2021. Vol. 285. № 106053. [DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106053](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106053)
10. Bonomo A.E., Munnecke A., Schulbert C., Prosser G. Microfacies analysis and 3D reconstruction of bioturbated sediments in the calcarenite di Gravina formation (southern Italy) // *Marine and Petroleum Geology*. 2021. Vol. 125. № 104870. [DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104870](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104870)
11. Margiotta S., Sansò P. The Geological Heritage of Otranto – Leuca Coast (Salento, Italy) // *Geoheritage*. 2014. Vol. 6. Iss. 4. P. 305-316. [DOI: 10.1007/s12371-014-0126-8](https://doi.org/10.1007/s12371-014-0126-8)
12. Calia A., Tabasso M.L., Mecchi A.M., Quarta G. The study of stone for conservation purposes: Lecce stone (southern Italy) // *Stone in Historic Buildings: Characterization and Performance*. Geological Society of London, 2014. Vol. 391. P. 139-156. [DOI: 10.1144/SP391.8](https://doi.org/10.1144/SP391.8)
13. Romanazzi A., Gentile F., Polemio M. Modelling and management of a Mediterranean karstic coastal aquifer under the effects of seawater intrusion and climate change // *Environmental Earth Sciences*. 2015. Vol. 74. Iss. 1. P. 115-128. [DOI: 10.1007/s12665-015-4423-6](https://doi.org/10.1007/s12665-015-4423-6)



14. *Balacco G., Alfio M.R., Parisi A. et al.* Application of short time series analysis for the hydrodynamic characterization of a coastal karst aquifer: the Salento aquifer (Southern Italy) // Journal of Hydroinformatics. 2022. Vol. 24. Iss 2. P. 420-443. [DOI: 10.2166/hydro.2022.135](https://doi.org/10.2166/hydro.2022.135)
15. *Zhilei He, Guoli Wu, Jun Zhu.* Mechanical properties of rock under uniaxial compression tests of different control modes and loading rates // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. № 2164. [DOI: 10.1038/s41598-024-52631-1](https://doi.org/10.1038/s41598-024-52631-1)
16. *Aydin A.* ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version // The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. Springer, 2015. P. 25-33. [DOI: 10.1007/978-3-319-07713-0_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0_2)
17. *Popov Y., Beardmore G., Clauser C., Roy S.* ISRM Suggested Methods for Determining Thermal Properties of Rocks from Laboratory Tests at Atmospheric Pressure // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. Iss. 10. P. 4179-4207. [DOI: 10.1007/s00603-016-1070-5](https://doi.org/10.1007/s00603-016-1070-5)
18. *Mongelli F., Loddo M., Tramacere A.* Thermal conductivity, diffusivity and specific heat variation of some Travale field (Tuscany) rocks versus temperature // Tectonophysics. 1982. Vol. 83. Iss. 1-2. P. 33-43. [DOI: 10.1016/0040-1951\(82\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(82)90005-1)
19. *Lokier S.W., Al Junaibi M.* The petrographic description of carbonate facies: are we all speaking the same language? // Sedimentology. 2016. Vol. 63. Iss. 7. P. 1843-1885. [DOI: 10.1111/sed.12293](https://doi.org/10.1111/sed.12293)
20. *Karagiannis N., Karoglou M., Bakolas A., Moropoulou A.* Building Materials Capillary Rise Coefficient: Concepts, Determination and Parameters Involved // New Approaches to Building Pathology and Durability. Springer, 2016. P. 27-44. [DOI: 10.1007/978-981-10-0648-7_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0648-7_2)
21. *Dasgupta T., Mukherjee S.* Porosity in Carbonates // Sediment Compaction and Applications in Petroleum Geoscience. Springer, 2020. P. 9-18. [DOI: 10.1007/978-3-030-13442-6_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13442-6_2)
22. *El Sharawy M.S., Gaafar G.R.* Pore – Throat size distribution indices and their relationships with the petrophysical properties of conventional and unconventional clastic reservoirs // Marine and Petroleum Geology. 2019. Vol. 99. P. 122-134. [DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2018.10.006](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.10.006)
23. *Nash D.J.* Calcretes, Silcretes and Intergrade Duricrusts // Landscapes and Landforms of Botswana. Springer, 2022. P. 223-246. [DOI: 10.1007/978-3-030-86102-5_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86102-5_13)
24. *Pia G., Casnedi L., Sanna U.* Pore Size Distribution Influence on Suction Properties of Calcareous Stones in Cultural Heritage: Experimental Data and Model Predictions // Advances in Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 2016. № 7853156. [DOI: 10.1155/2016/7853156](https://doi.org/10.1155/2016/7853156)
25. *Mineo S., Pappalardo G.* InfraRed Thermography presented as an innovative and non-destructive solution to quantify rock porosity in laboratory // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. Vol. 115. P. 99-110. [DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.01.012](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.01.012)
26. *Tatone B.S.A., Abdelaziz A., Grasselli G.* Novel Mechanical Classification Method of Rock Based on the Uniaxial Compressive Strength and Brazilian Disc Strength // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2022. Vol. 55. Iss. 4. P. 2503-2507. [DOI: 10.1007/s00603-021-02759-7](https://doi.org/10.1007/s00603-021-02759-7)
27. *Hemed S.* Influences of bulk structure of Calcarenous rocks on water storage and transfer in order to assess durability and climate change impact // Heritage Science. 2023. Vol. 11. № 118. [DOI: 10.1186/s40494-023-00949-w](https://doi.org/10.1186/s40494-023-00949-w)
28. *Paraskevopoulou C.* Time-Dependent Behavior of Rock Materials // Engineering Geology. IntechOpen, 2021. 33 p. [DOI: 10.5772/intechopen.96997](https://doi.org/10.5772/intechopen.96997)

Автор Джоаккино Франческо Андриани, заведующий геотехнической лабораторией (Университет им. Альдо Моро в Бари, Бари, Италия), gioacchinofrancesco.andriani@uniba.it, <https://orcid.org/0000-0003-2992-0583>.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.



Алмазоносный гранатовый лерцолит из кимберлитовой трубки им. В.Гриба: взаимосвязь субдукции, мантийного метасоматоза и образования алмаза

Е.В.Агашева¹✉, Н.В.Губанов¹, Д.А.Зедгенизов^{2,3}

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

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

³ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Как цитировать эту статью: Агашева Е.В., Губанов Н.В., Зедгенизов Д.А. Алмазоносный гранатовый лерцолит из кимберлитовой трубки им. В.Гриба: взаимосвязь субдукции, мантийного метасоматоза и образования алмаза // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 140-156. [EDN ХСЕТНQ](#)

Аннотация

Приведены результаты комплексного исследования алмазосодержащего лерцолита из кимберлитовой трубки им. В.Гриба. Состав породообразующих минералов (оливин, ортопироксен, Сг-диопсид, Сг-пироп) по главным элементам преимущественно соответствует минералам из включений в алмазах лерцолитовой ассоциации и алмазосодержащих лерцолитов мира. Повышенное модальное количество ортопироксена (18 об. %), а также концентрация FeO (7,5 мас. %) и значение отношения MgO/SiO₂ (0,89) для лерцолита позволяют отнести его к обогащенным ортопироксеном лерцолитам. Особенности состава Сг-диопсида и Сг-пиропа по редким элементам свидетельствуют о том, что на момент захвата кимберлитом лерцолит сохранил признаки слабого воздействия мантийного метасоматоза. Результаты моделирования позволили предположить в качестве метасоматического агента магнезиокарбонатные и силикатные высокоплотные флюиды (HDF). Признаки влияния протокимберлитового расплава не обнаружены. Степень агрегации азота в алмазе (%B от 6 до 15) указывает на длительное пребывание в мантийных условиях, что исключает формирование незадолго до внедрения кимберлита. Экстремально легкие значения изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C} = -18,59\text{‰}$) свидетельствуют о вовлечении в образование алмаза органического углерода субдукционной природы. Образование алмаза могло быть связано с древним метасоматическим событием, протекающим при ведущей роли низко-Mg силикатно-карбонатных HDF, источником которых были эклогиты и/или содержащие органический углерод субдукционные осадочные отложения. Расчетные P - T параметры (3,7 ГПа, 814 °C) последнего равновесия минеральных фаз лерцолита указывают на его захват с глубины ~118 км, что соответствует участку литосферной мантии (примерно 95-120 км), в пределах которого ранее обнаружены породы, также имеющие признаки специфических преобразований под воздействием субдукционно-связанных флюидов.

Ключевые слова

алмаз; субдукция; геохимия; мантийный метасоматоз; литосферная мантия; кимберлит

Финансирование

Аналитические работы выполнены за счет гранта РНФ 20-77-10018. Отбор образца ксенолита осуществлен в рамках полевых работ по Государственному заданию ИГМ СО РАН № 122041400241-5.

Поступила: 16.01.2025

Принята: 02.07.2025

Онлайн: 04.09.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Идентификация и характеристика пород, являющихся субстратом для образования алмазов в литосферной мантии, возможны благодаря изучению их сингенетических или синхронных минеральных включений [1-3], а также самих алмазосодержащих мантийных пород (перидотитов и эклогитов), которые встречаются в виде ксенолитов в кимберлитах [4-6] и лампроитах [7]. Анализ минеральных включений в алмазах позволяет выявлять особенности среды алмазообразования [1] и оценивать время формирования алмаза [3], а изучение алмазосодержащих мантийных ксенолитов дополнительно дает возможность реконструировать этапы эволюции литосферной мантии до



момента кимберлитового или лампроитового магматизма и устанавливать связь между эпизодами алмазообразования и тектоно-термальными событиями в литосферной мантии и нижней коре [3, 5].

Результаты изучения минеральных включений в алмазах из кимберлитовых трубок месторождений им. М.В.Ломоносова и им. В.Гриба в Архангельской алмазоносной провинции (ААП) [8, 9], расположенной на севере Восточно-Европейской платформы, предполагают перидотиты в качестве доминирующего субстрата для алмазов при подчиненной роли эклогитов [10-12], что характерно для большинства алмазов в мире [1]. Несмотря на многочисленные всесторонние исследования алмазов из месторождений ААП [13-15], данные о концентрациях главных элементов в пиропах и Cr-диопсидах перидотитовой ассоциации ограничены [8, 9], а о содержании редких элементов до сих пор не получены [16]. Это не позволяет достоверно установить взаимосвязь между этапами алмазообразования и определенными метасоматическими событиями в литосферной мантии ААП [16, 17], оценить термальный режим литосферной мантии на этапах алмазообразования и определить диапазон глубин распределения алмазов [18, 19].

В работе представлены результаты комплексного исследования алмазосодержащего лерцолита из кимберлитовой трубы им. В.Гриба, включающие данные о концентрациях главных элементов в породообразующих минералах, редких элементов в Cr-пиропе и Cr-диопсиде, реконструированный валовый химический состав лерцолита и результаты расчета *P-T* параметров последнего равновесия минеральных ассоциаций, а также данные о дефектно-примесном и изотопном составах углерода извлеченного из лерцолита алмаза. Полученная информация используется для реконструкции этапов образования и преобразования лерцолита, а также определения генезиса алмаза.

Методы

Лерцолит G1-3 обнаружен в образце кимберлита диатремовой части трубы им. В.Гриба (глубина отбора 380 м от поверхности) в виде ксенолита округлой формы размером 4×3×1,5 см. Центральная часть ксенолита размером 2×1,5×1 см была аккуратно извлечена для исключения контаминации кимберлитом и вручную измельчена до фракций размером от +2 до –0,1 мм. В минеральной фракции –1 + 0,5 мм обнаружен кристалл алмаза. Из этой же минеральной фракции выбраны по 10 визуально «свежих» зерен пиропа и Cr-диопсида без минеральных включений и вторичных изменений. Отобранные зерна были вставлены в шашки. Все аналитические работы, за исключением определения концентраций редких элементов в пиропе и Cr-диопсиде, выполнены в Аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (Новосибирск).

Минералого-петрографическое изучение лерцолита проводилось в плоскостополированной пластинке с использованием оптического микроскопа ZEISS Axiolab 5, снабженного цифровой фотокамерой высокого разрешения AxioCam 208 color, и сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMU, оснащенного системой микроанализа INCA Energy 450 X-Max 80 (Oxford Instruments Ltd.). Концентрации главных элементов в породообразующих минералах определены на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8100 при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 50 нА и размере пучка 1 мкм. Для калибровки использовались природные минеральные стандарты ИГМ СО РАН. Относительные стандартные отклонения были в пределах 1,5 %. Результаты получены в течение 10 с на пике, а также по 10 с по обе стороны от фона; применена коррекция ZAF. Пределы обнаружения составили < 0,05 мас.% для всех анализируемых элементов, в том числе 0,01 мас.% для Cr и Mn; 0,02 мас.% для Ti и Na; 0,05 мас.% для K.

Определение концентраций редких элементов в пиропе и Cr-диопсиде проводилось в плоскостополированной пластинке и шашке с использованием квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой XSERIES2 (Thermo Fisher Scientific), объединенного с устройством лазерного пробоотбора с длиной волны 213 нм (твердотельный лазер Nd:YAG, New Wave Research), в Аналитическом центре Новосибирского государственного университета. Перед каждым определением анализируемая область минерала проверена в проходящем и отраженном свете на отсутствие трещин, микровключений и вторичных изменений. Анализ проводился на частоте 20 Гц с энергией в импульсе 12 мДж/см² и размером пучка 50 мкм. В качестве газа-носителя использовался

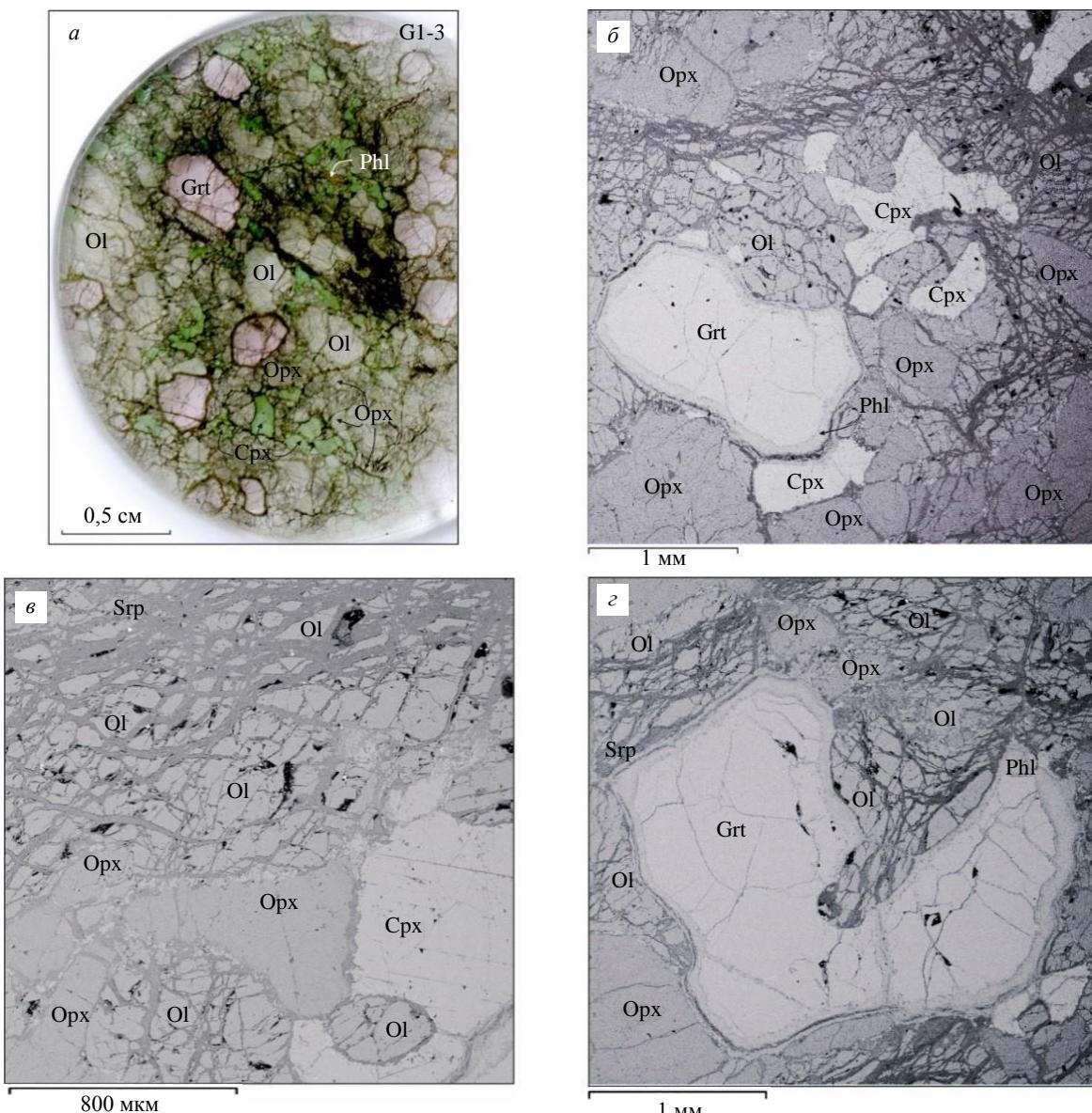


Рис.1. Минералого-петрографические особенности алмазосодержащего лерцолита G1-3 из кимберлитовой трубки им. В.Гриба: *а* – общий вид плоскополированной пластиинки; *б-г* – изображения в обратнорассеянных электронах

Ol – оливин; Opx – ортопироксен; Cpx – клинопироксен; Grt – гранат; Phl – флогопит; Srp – серпентин

гелий. Время сбора данных составляло 90 с на точку, включая 30 с для фона и 60 с для сигнала. Эталонные образцы NIST 612 и NIST 614 использовались в качестве внешних стандартов. Дрейф чувствительности прибора контролировался съемкой NIST 610 в качестве неизвестного образца. Два анализа стандарта NIST 612 были выполнены до и после каждого десяти измерений. Пределы обнаружения составляли: 0,001 ppm для La, Pr, Nb, Tb, Ho, Y, Tm, Lu; 0,002 ppm для Ce, Ta, Th; 0,003 ppm для Eu, Sr; 0,005 ppm для Zr, Nd, Dy, Er, Hf, U; 0,01 ppm для Sm, Yb; 0,02 ppm для V, Ba, Gd; 0,1 ppm для Sc, Mn, Co; 0,6 ppm для Cr, Ni; 1 ppm для Ti. Концентрации Ca, определенные с помощью электронно-зондового анализа, использовались в качестве внутренних стандартов.

Дефектно-примесный состав алмаза изучен с использованием метода инфракрасной (ИК) спектроскопии на спектрометре Bruker Vertex 70, совмещенном с ИК-микроскопом HYPERION 2000. Спектры поглощения регистрировались в центральной и краевой зонах кристалла в волновом интервале 600-4500 cm^{-1} при апертуре 50×50 μm и спектральном разрешении 1 cm^{-1} .



Обработка спектров и нормирование на внутреннее поглощение алмаза осуществлялись в программах OPUS (версия 5.0, BRUKER ОРТИК, США) и SpectrExamination (разработчик О.Е.Ковальчук, НИГП ПАО АЛРОСА). Концентрации азота в виде А- и В1-дефектов рассчитаны с использованием коэффициентов из работы [20].

Идентификация включения в алмазе осуществлялась с использованием рамановского спектрометра Horiba Jobin Yvon LabRAM HR800, оснащенного Nd:YAG лазером 532 нм и микроскопом Olympus BX41. Спектры регистрировались в волновом диапазоне 200-1200 см⁻¹ при выдержке 7 с и увеличении ×50.

Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$) алмаза получен на масс-спектрометре Delta V Advantage. Измерение проводилось в режиме двойного напуска газа. Истертая проба была подвергнута полному объемному окислению в вакуумированном реакторе до CO_2 . Для контроля качества измерений использованы стандарты графита USGS-24 ($\delta^{13}\text{C} = -16,049\ \text{‰}$) и GR-770 ($\delta^{13}\text{C} = -24,65\ \text{‰}$).

Результаты

Ксенолит G1-3 представляет гранат (11 об.%) содержащий лерцолит, состоящий из преобладающего оливина (61 об.%), а также орто- (18 об.%) и клинопироксена (10 об.%). Лерцолит характеризуется крупнозернистой структурой, размеры зерен породообразующих минералов достигают 5 мм (рис.1). В образце обнаружен флогопит (< 1 об.%), который встречается как в виде отдельных крупных (до 2 мм) таблитчатых зерен (рис.1, *a*), так и в виде кайм вокруг зерен граната (рис.1, *б*, *г*). Зерна оливина пронизаны многочисленными трещинами, по которым развивается серпентин (рис.1). Все породообразующие минералы лерцолита однородны по составу без признаков химической зональности (табл.1, рис.2, 3).

Таблица 1

Средние концентрации главных элементов в породообразующих минералах
и реконструированный валовый состав лерцолита G1-3, мас.%

Элемент	Оливин	Ортопироксен	Сг-диопсид	Сг-пироп	Валовый состав породы
SiO_2	41,10	57,72	55,46	41,91	45,62
TiO_2	НД	0,02	0,05	0,07	0,02
Al_2O_3	НД	0,53	2,39	21,81	2,73
Cr_2O_3	b.d.l.	0,15	1,30	2,05	0,38
FeO	8,70	5,54	1,77	9,28	7,50
MnO	0,08	0,12	0,05	0,43	0,12
MgO	49,74	35,77	15,97	19,63	40,53
CaO	0,01	0,18	21,02	4,73	2,66
Na_2O	НД	0,03	1,92	0,02	0,20
NiO	0,39	НД	НД	НД	0,24
Сумма	100,02	100,07	99,94	99,92	100,01
Mg#	91,1	92,0	94,2	79,0	90,6

Примечание. НД – нет данных; b.d.l. – ниже предела обнаружения.

Оливин представлен форстеритом с $\text{Mg\#} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) \times 100 = 91,1$ и концентрацией NiO 0,4 мас.%. По составу оливин соответствует оливинам из флогопит-гранатовых лерцолитов трубки им. В.Гриба (см. рис.2, *a*). Значения Mg# оливина G1-3 соответствуют Mg# оливинов кратонных гранатовых лерцолитов мира ($\text{Mg\#}_{\text{ср}} 91,5 \pm 1,2$ [1]) и оливинов лерцолитовой ассоциации из включений в алмазах мира ($\text{Mg\#}_{\text{ср}} 91,8 \pm 1,0$ [1], см. рис.2, *a*). Значения Mg# оливина G1-3 ниже, чем для большинства оливинов из включений в алмазах из кимберлитовых трубок им. В.Гриба и месторождения им. М.В.Ломоносова (за исключением трех зерен с Mg# 90,5-91,6; см. рис.2, *a*), а также оливинов гарцбургитовой ассоциации из включений в алмазах мира ($\text{Mg\#}_{\text{ср}} 93,1 \pm 0,9$ [1]). Опубликованные данные о составе оливинов из алмазосодержащих перидотитов ограничены

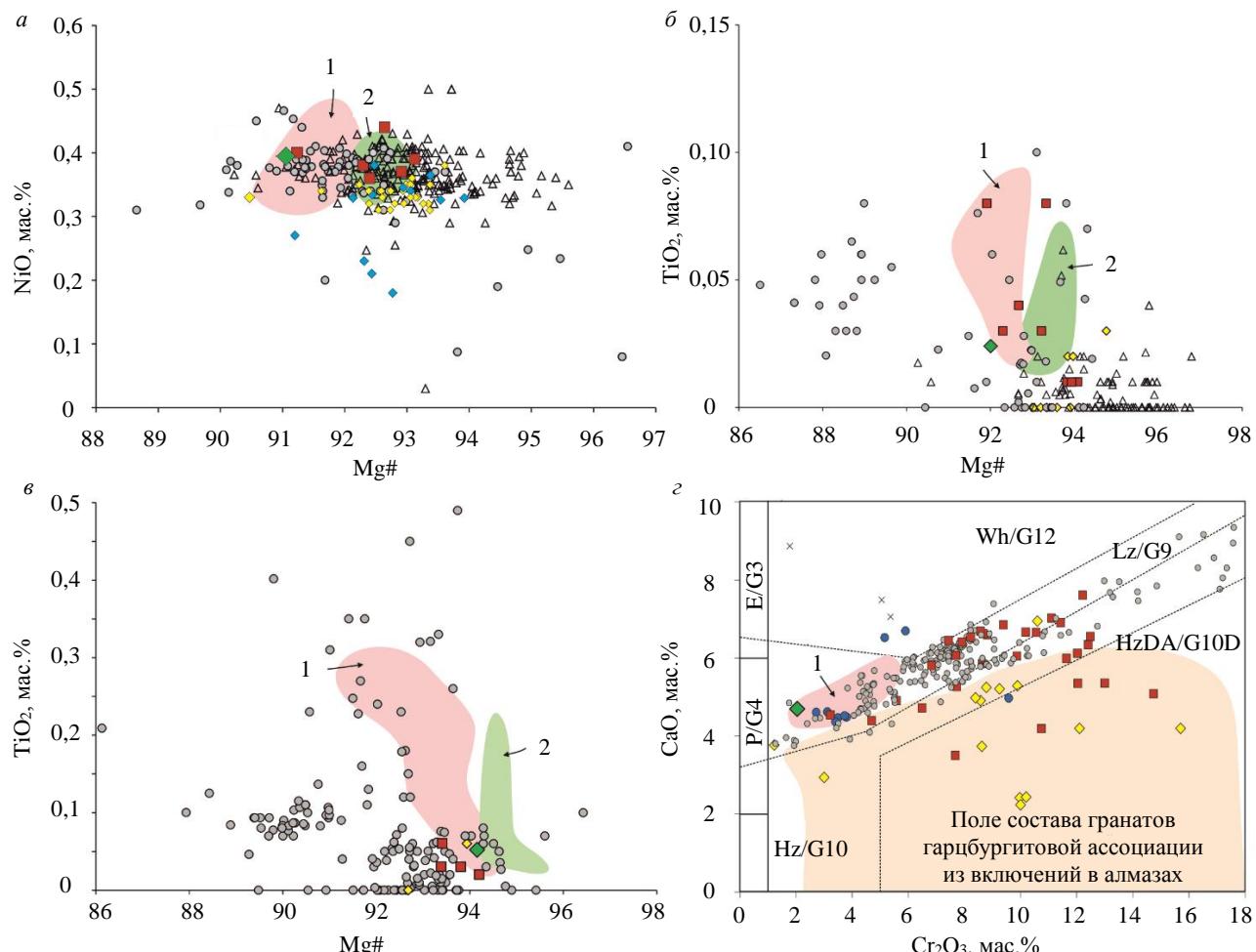


Рис.2. Особенности состава оливина (a), ортопироксена (б), клиногириксена (в) и граната (г) из алмазосодержащего лерцолита G1-3 кимберлитовой трубы им. В.Гриба в сравнении с перidotитами трубы им. В.Гриба [22], алмазосодержащими перidotитами из кимберлитовых трубок Канады [4, 5] и ЮАР [21, 23], из кимберлитовой трубы Удачная (Россия [6]) и лампроитовой трубы Аргайл (Австралия [7]), включениями в алмазах мира [1, 18] и ААП [8, 10, 11]. CaO/Cr₂O₃ диаграмма для гранатов [24] с дополнительными полями из [25].
 HzDA/G10D – гарцбургит-дуниты «алмазной ассоциации»; Hz/G10 – гарцбургит-дуниты; Lz/G9 – лерцолиты; Wh/G12 – варвилиты; E/G3 – эклогиты; P/G4 – низкохромистые пироксениты
 1 – из флогопит-гранатовых лерцолитов трубы им. В.Гриба; 2 – из гранатовых лерцолитов трубы им. В.Гриба

[5, 7, 21], так как в большинстве образцов оливин полностью замещается серпентином [4, 6]. Тем не менее, оливин G1-3 имеет идентичный состав с оливином из алмазосодержащего лерцолита лампроитовой трубы Аргайл [7] (см. рис.2, а).

Ортопироксен представлен энстатитом с Mg# 92,0, что ниже значений Mg# энстатитов из включений в алмазах кимберлитовых трубок месторождения им. М.В.Ломоносова (93,0-94,8 [8]) и алмазах гарцбургитовой ассоциации мира (Mg#_{cp} 94,2±1,1 [1]), а также из гранатовых лерцолитов трубы им. В.Гриба (92,7-93,7 [22]). Однако Mg# соответствует значениям Mg# энстатитов из флогопит-гранатовых лерцолитов трубы им. В.Гриба (91,4-92,9 [22]), а также алмазосодержащих перidotитов (91,9-94,1 [5, 6, 21]) и включений в алмазах лерцолитовой ассоциации (92,4±1,9 [1]) (см. рис.2, б). По концентрациям TiO₂ (0,02 мас.%) и Na₂O (0,03 мас.%) энстатит G1-3 соответствует полю «алмазной ассоциации» (TiO₂ ≤ 0,06 мас.%, Na₂O ≤ 0,16 мас.% [1]).

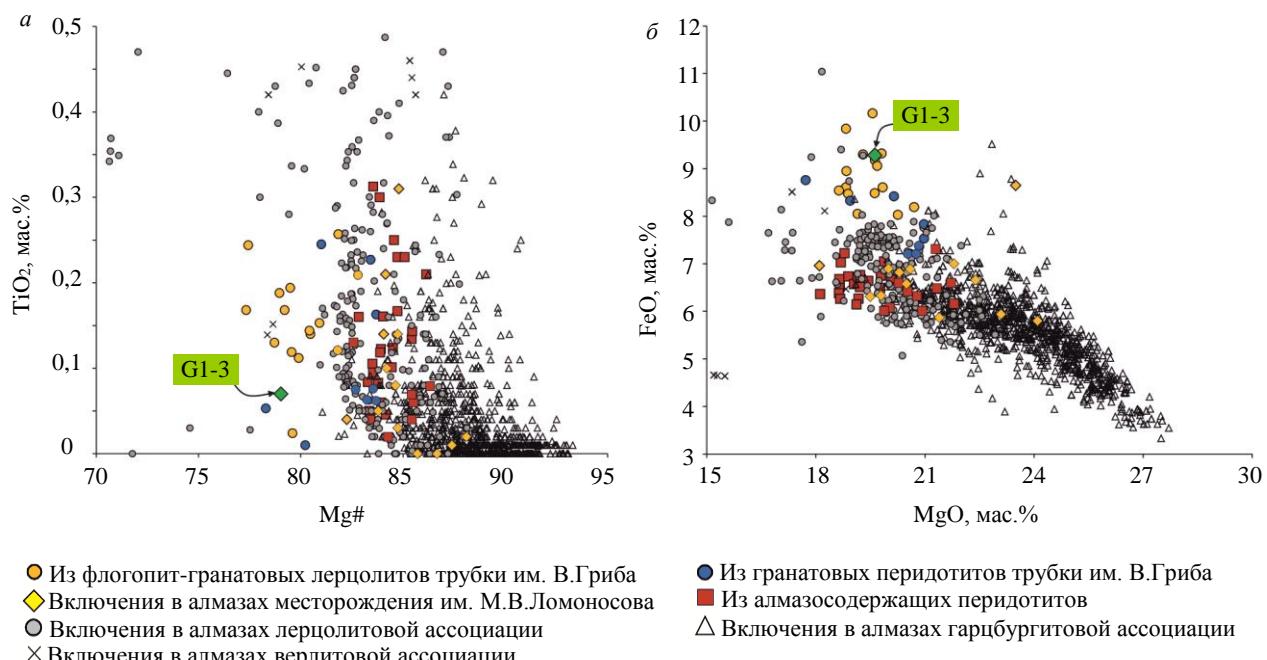


Рис.3. Отношения TiO_2 к $\text{Mg}^{\#}$ (а) и FeO к MgO (б) в Cr-пиропе из алмазосодержащего лерцолита G1-3 кимберлитовой трубы им. В.Гриба в сравнении с перidotитами трубы им. В.Гриба [22] и включениями в алмазах [1, 8]

Таблица 2

Концентрации редких элементов в Сг-диопсиде из лерцолита G1-3, ppm

Элемент	Номер зерна Сг-диопсида								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sc	22,2	19,6	23,6	22,1	20,3	19,9	19,6	19,0	20,8
Ti	309	256	374	377	280	283	321	260	260
V	321,2	269,4	316,3	306,8	326,1	316,5	296,6	306,5	333,3
Cr	8069	6627	8078	7610	7922	7927	7378	7725	8381
Mn	391,1	373,1	413,2	429,4	409,9	436,8	422,7	412,3	425,3
Co	16,5	15,4	16,5	17,7	17,7	18,8	17,7	17,8	17,4
Ni	265,2	262,8	261,3	275,0	305,8	309,3	307,5	305,8	299,3
Sr	29,72	7,77	61,11	30,21	16,71	17,84	40,66	6,57	13,14
Y	0,646	0,631	0,718	0,637	0,520	0,580	0,708	0,583	0,537
Zr	1,023	0,461	1,854	1,597	0,719	0,774	1,635	0,467	0,633
Nb	0,543	0,087	1,295	0,668	0,419	0,449	0,747	0,062	0,565
Ba	9,92	0,37	20,62	18,19	6,27	8,03	13,27	0,11	3,24
La	1,150	0,407	1,658	1,059	0,761	0,573	1,348	0,390	0,665
Ce	1,729	0,767	2,834	2,069	1,330	1,116	2,511	0,667	1,113
Pr	0,172	0,068	0,321	0,231	0,137	0,118	0,254	0,064	0,093
Nd	0,599	0,229	1,135	0,901	0,441	0,369	1,018	0,212	0,404
Sm	0,15	0,12	0,19	0,23	0,17	0,15	0,20	0,14	0,12
Eu	0,072	0,055	0,086	0,073	0,059	0,057	0,073	0,053	0,053
Gd	0,225	0,251	0,306	0,196	0,181	0,187	0,269	0,157	0,176
Tb	0,033	0,035	0,041	0,035	0,034	0,025	0,037	0,034	0,029
Dy	0,209	0,193	0,219	0,181	0,150	0,172	0,157	0,148	0,135
Ho	0,029	0,024	0,041	0,027	0,026	0,023	0,031	0,024	0,024
Er	0,062	0,057	0,058	0,055	0,042	0,034	0,054	0,044	0,033
Tm	0,003	0,005	0,007	0,006	0,008	0,003	0,007	0,006	0,004
Yb	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03
Lu	0,002	0,004	0,003	0,002	0,007	0,001	0,005	0,002	0,002
Hf	0,062	0,052	0,091	0,106	0,059	0,058	0,081	0,034	0,043
Ta	0,032	0,003	0,060	0,024	0,014	0,016	0,029	0,005	0,018
Th	0,066	0,010	0,148	0,078	0,044	0,037	0,120	0,006	0,062
U	0,011	b.d.l.	0,029	0,019	0,013	0,008	0,019	b.d.l.	0,012

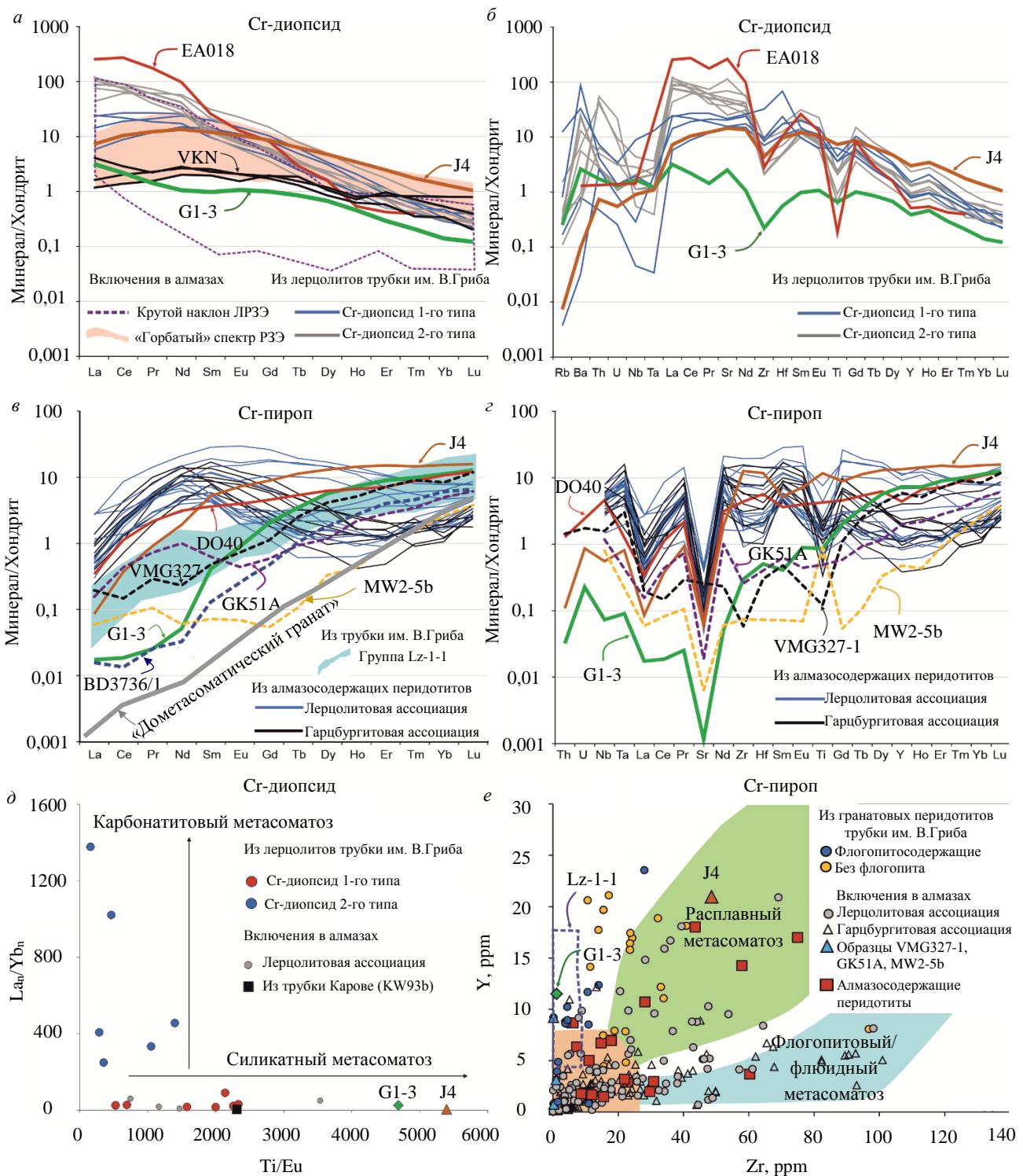


Рис.4. Особенности редкоэлементного состава Cr-диопсида и Cr-пиропа из алмазосодержащего лерцолита G1-3 кимберлитовой трубы им. В.Гриба: *a-d* – нормированные на хондрит C1 [26] концентрации редкоземельных (*a, b*) и редких (*b, e*) элементов; *d* – отношения La_n/Yb_n к Ti/Eu в Cr-диопсиде; *e* – содержание Y и Zr в Cr-пиропе.

Составы Cr-пиропов из перидотитов трубы им. В.Гриба и группы Lz-1-1 [16, 22], алмазосодержащих перидотитов [4, 5, 23], J4 и включений в алмазах [1].

EA018 – гранатовый перидотит трубы Экати (Канада) [5]; VKN – Cr-диопсид из включений в алмазах кимберлитовых трубок Венеция (ЮАР), Карове (Ботсвана) и россыпного месторождения в Намибии [1]; DO40 – алмазосодержащий лерцолит кимберлитовой трубы Премьер (ЮАР); BD3736/1 – Cr-пироп распадного генезиса в мегакристе ортопироксена из кимберлита Джагерсфонтейн (ЮАР) [27]. Включения в алмазах из кимберлитовых трубок Виктор (Канада) – VMG327-1, Гачо Куэ (Канада) – GK51A, Мвадуи (Танзания) – MW2-5b и дометасоматический гранат [1].



Клинопироксен представлен Cr-диопсидом (Cr_2O_3 1,3 мас.%) с Mg# 94,2, что значительно выше, чем у энстатита в лерцолите G1-3, а также выше средних значений Mg# Cr-диопсидов из включений в алмазах (Mg# 92,8) и кратонных лерцолитов (Mg# 92,3) [1]. По концентрациям TiO_2 (0,05 мас.%), Cr_2O_3 и значениям Mg# Cr-диопсид G1-3 соответствует таковым как из алмазосодержащих лерцолитов, так и из включений в алмазах (см. рис.2, в). Cr-диопсид G1-3 имеет более высокие содержания Al_2O_3 (2,4 мас.%) и более низкие концентрации K_2O (< 0,05 мас.%) по сравнению с Cr-диопсидами как из алмазосодержащих лерцолитов (Al_2O_3 0,8-1,4 мас.%, K_2O 0,2-0,4 мас.% [5, 7]), так и из включений в алмазах (Al_2O_3 0,3-4,8 мас.% [1, 18], $\text{Al}_2\text{O}_{3\text{cp}}$ 1,4 мас.% [1]; K_2O до 1,7 мас.%, $\text{K}_2\text{O}_{\text{cp}}$ 0,1 мас.% [1]). Относительно хондриита C1 (табл.2, рис.4, а, б [26]) Cr-диопсид G1-3 слабо обогащен легкими (Л) редкоземельными элементами (РЗЭ) (< 5 хондриевых единиц (х.ед.); $\text{La}_{\text{n}}/\text{Yb}_{\text{n}} = 23$), а также Ba, Sr, Th, U (< 3 х.ед.), обеднен тяжелыми (Т) РЗЭ (0,8-0,1 х.ед.), Zr-Hf (0,2-0,6 х.ед.) и содержит концентрации средних (С) РЗЭ на уровне хондриита C1. Cr-диопсид G1-3 обеднен всеми РЗЭ, а также Sr, Zr и Hf относительно Cr-диопсидов из лерцолитов трубки им. В.Гриба [22], алмазосодержащего лерцолита кимберлитовой трубки Экати (Канада) [5] и перидотита J4 (редкоэлементный состав граната и клинопироксена этого образца близок к примитивному [1]). Тем не менее, близкие к Cr-диопсиду G1-3 концентрации РЗЭ определены для включений Cr-диопсидов в алмазах из кимберлитовых трубок Венеция (ЮАР), Карове (Ботсвана) и россыпного месторождения в Намибии (рис.4, а [1]). В распределении $\text{La}_{\text{n}}/\text{Yb}_{\text{n}}$ и Ti/Eu состав Cr-диопсида G1-3 так же, как и Cr-диопсиды из включений в алмазах и перидотита J4, соответствует полю силикатного метасоматоза (рис.4, д). Cr-диопсид G1-3 характеризуется более высокими значениями отношения Ti/Eu (рис.4, д), при этом содержит гораздо более низкие концентрации TiO_2 по сравнению с Cr-диопсидами 1-го типа (ЛРЗЭ 6-27 х.ед., равновесные с силикатным расплавом, рис.4, а) из лерцолитов трубки им. В.Гриба (TiO_2 0,14-0,23 мас.%).

Гранат представлен Cr-пиропом, который по концентрациям Cr_2O_3 (2,05 мас.%) и CaO (4,7 мас.%) соответствует лерцолитовой ассоциации (см. рис.2, г [24, 25]). Cr-пироп G1-3 имеет низкое значение Mg# (79,0), что не характерно для пиропов как гарцбургитовой, так и лерцолитовой ассоциаций из включений в алмазах и алмазосодержащих перидотитов (см. рис.3, а), но при этом содержит низкие концентрации TiO_2 (0,07 мас.%). Это, в свою очередь, является типичным для пиропов из включений в алмазах и алмазосодержащих перидотитов, но не характерным для пиропов из флогопит-гранатовых лерцолитов трубки им. В.Гриба (см. рис.3, а). Cr-пироп G1-3 содержит более высокие концентрации FeO (9,3 мас.%) по сравнению с пиропами из алмазосодержащих перидотитов, включений в алмазах, в том числе из месторождения им. М.В.Ломоносова, но соответствует таковым из флогопит-гранатовых лерцолитов трубки им. В.Гриба (см. рис.3, б). Относительно хондриита C1 (табл.3, рис.4, в, г [26]) Cr-пироп G1-3 обеднен высокозарядными (HFSE) и крупноионными литофильными (LILE) элементами, а также ЛРЗЭ (0,02-0,03 х.ед.), содержит СРЗЭ на уровне хондриита (0,2-2 х.ед.) и обогащен ТРЗЭ (3-13 х.ед.). В распределении РЗЭ, нормированных на хондриит C1 (рис.4, в, г [26]), наблюдается фракционированный спектр от ЛРЗЭ к ТРЗЭ ($\text{La}_{\text{n}}/\text{Yb}_{\text{n}} = 0,002$; $\text{Gd}_{\text{n}}/\text{Yb}_{\text{n}} = 0,2$). Относительно состава граната J4 [1] Cr-пироп G1-3 обеднен всеми несовместимыми элементами (рис.4, в, г), но с близкими содержаниями ТРЗЭ. Спектр распределения РЗЭ Cr-пиропа G1-3 нетипичен для гранатов как гарцбургитовой, так и лерцолитовой ассоциаций из включений в алмазах и алмазосодержащих перидотитов, которые, как правило, характеризуются синусоидальными (реже «горбатыми») спектрами распределения РЗЭ [1]. Тем не менее, подобные Cr-пиропу G1-3 фракционированные (от СРЗЭ до ТРЗЭ) спектры РЗЭ были идентифицированы для пиропов из алмазоносного лерцолита кимберлитовой трубки Премьер (ЮАР) [23] и пиропов лерцолитовой ассоциации из включений в алмазах кимберлитовых трубок Виктор, Гачо Куз (Канада) и Мвадуи (Танзания) [1] (рис.4, в, г). Cr-пироп G1-3 содержит низкие концентрации Y (11,5 ppm) и Zr (1,2 ppm), типичные для ксенокристов гранатов типа Lz-1-1 из кимберлитовых трубок ААП, но отличные от большинства гранатов из включений в алмазах и алмазосодержащих перидотитов, а также гораздо более низкие по сравнению с гранатом J4 (рис.4, е).

Результаты реконструкции химического состава лерцолита G1-3, основанной на модальном содержании породообразующих минералов и их составов, представлены в табл. 1. Химический состав лерцолита G1-3 идентичен составам флогопит-гранатовых лерцолитов трубки им. В.Гриба,

содержащих > 15 об.% ортопироксена: характерны повышенные концентрации SiO_2 (45,3-46,6 мас.%) при более низких содержаниях MgO (36,6-40,5 мас.%) и значениях $\text{Mg}\#$ (89,4-90,6) (рис.5, *a*). По сравнению с составом примитивной мантии [28], лерцолит G1-3 имеет чуть более высокие концентрации SiO_2 и MgO при более низких содержаниях TiO_2 , Al_2O_3 и CaO .

Таблица 3

Концентрации редких элементов в Cr-пиропе из лерцолита G1-3, ppm

Элемент	Номер зерна Cr-пиропа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Sc	102,4	108,7	107,3	106,6	97,46	95,30	97,84	97,10
Ti	341	348	331	405	366	427	422	404
V	130,5	129,4	122,1	145,9	142,0	161,0	166,6	169,6
Cr	9696	9677	8940	12235	12012	13405	13483	12809
Mn	1300	1114	1117	1154	1259	1266	1415	1402
Co	41,37	39,58	39,90	44,06	46,58	49,67	51,37	52,70
Ni	15,21	14,30	14,61	16,34	16,93	17,87	17,68	19,20
Sr	0,008	0,003	0,020	0,017	0,006	b.d.l.	0,008	0,004
Y	11,87	13,33	12,08	13,26	10,39	11,12	10,37	9,60
Zr	0,889	1,504	1,230	1,496	0,895	1,305	1,112	0,760
Nb	0,020	0,020	0,019	0,020	0,017	0,021	0,011	0,015
Ba	0,02	b.d.l.						
La	0,005	0,004	0,010	0,003	b.d.l.	0,004	0,001	0,002
Ce	0,028	0,007	0,011	0,011	0,005	0,009	0,010	0,008
Pr	0,003	0,002	0,003	0,005	0,001	0,003	0,001	0,001
Nd	0,012	0,009	0,033	0,047	0,009	0,037	0,031	0,013
Sm	0,05	0,06	0,07	0,08	0,04	0,09	0,06	0,07
Eu	0,036	0,049	0,046	0,065	0,053	0,055	0,058	0,050
Gd	0,45	0,51	0,42	0,47	0,34	0,44	0,39	0,32
Tb	0,121	0,150	0,142	0,153	0,119	0,122	0,120	0,109
Dy	1,396	1,622	1,493	1,762	1,262	1,397	1,317	1,232
Ho	0,381	0,497	0,441	0,439	0,375	0,396	0,374	0,319
Er	1,480	1,720	1,588	1,730	1,364	1,405	1,341	1,200
Tm	0,262	0,299	0,259	0,300	0,230	0,226	0,229	0,204
Yb	1,89	2,08	2,06	2,16	1,74	1,71	1,82	1,69
Lu	0,340	0,376	0,319	0,388	0,302	0,317	0,290	0,257
Hf	0,049	0,072	0,057	0,061	0,042	0,061	0,057	0,029
Ta	b.d.l.	b.d.l.	0,002	0,006	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.
Th	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0,003	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.
U	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0,007	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.

Для расчета P - T параметров последнего равновесия использованы комбинация термометра [29] и барометра [30], а также мономинеральный термобарометр для Cr-диопсида [18] и термометр для Cr-пиропа [31]. Результаты расчетов представлены на рис.5, *б*. Комбинация [29, 30] показала результат $T = 814$ °C и $P = 3,7$ ГПа, что соответствует глубине ~118 км. Результаты расчета по [18] дают значения T в пределах 775-800 °C и P от 3,5 до 3,7 ГПа. Значения T для Cr-пиропа [31] варьируются от 830 до 870 °C, что при проецировании на наиболее оптимальную (best-fit) геотерму для литосферной мантии в районе трубки им. В.Гриба (36,2 мВ/м², рис.5, *б* [17]) соответствует P от 3,8 до 4,1 ГПа. Полученные значения P - T расположены вблизи линии фазового перехода графит – алмаз (рис.5, *б*).

Бесцветный алмаз октаэдрического габитуса размером ~500 мкм извлечен из лерцолита G1-3 (рис.6, *a*, *б*). На плоских гранях октаэдра сохранены редкие положительно ориентированные тригональные выступы. Ребра октаэдра незначительно размножены и формируют ступенчатый рисунок, часть вершин механически сколота. По дефектно-примесному составу алмаз относится

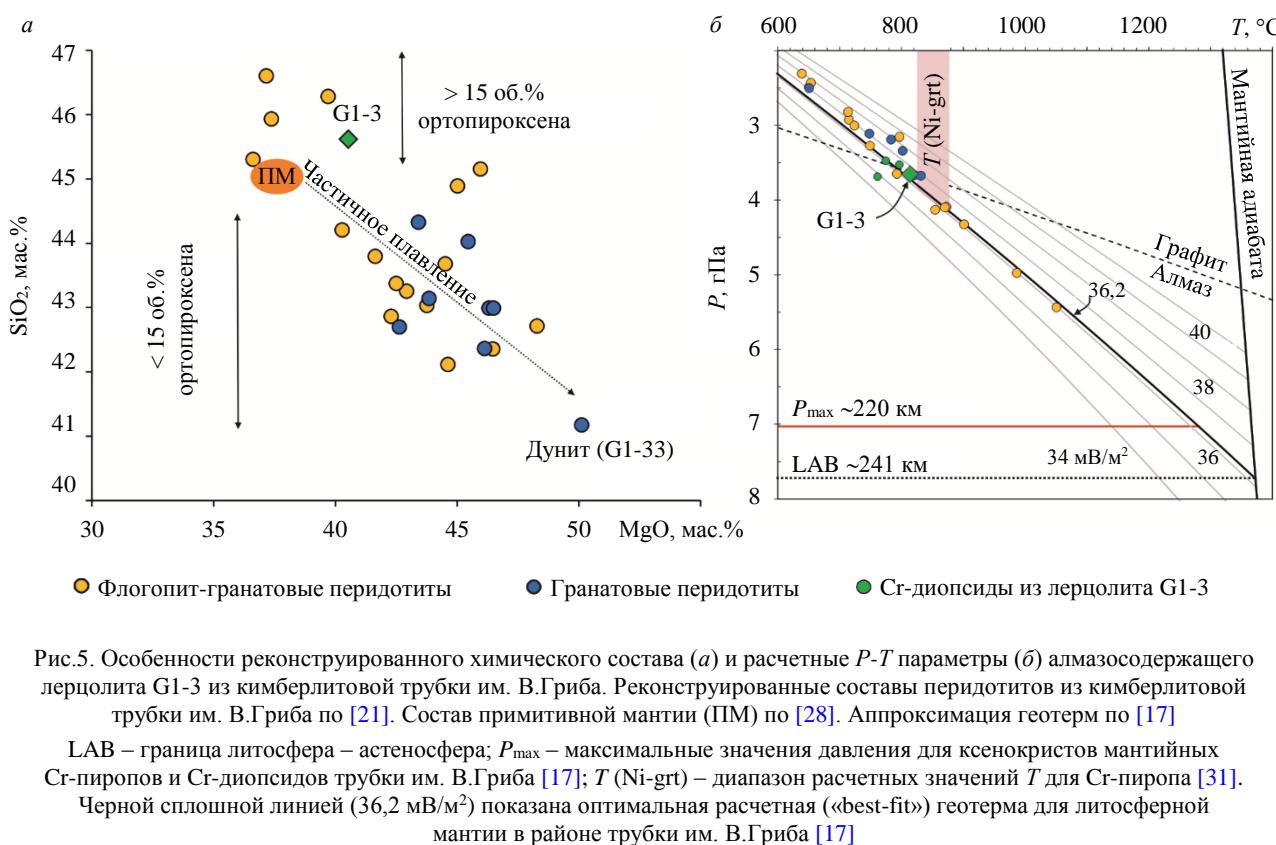


Рис.5. Особенности реконструированного химического состава (*а*) и расчетные *P-T* параметры (*б*) алмазосодержащего лерцолита G1-3 из кимберлитовой трубы им. В.Гриба. Реконструированные составы перидотитов из кимберлитовой трубы им. В.Гриба по [21]. Состав примитивной мантии (ПМ) по [28]. Аппроксимация геотерм по [17] LAB – граница литосфера – астеносфера; P_{\max} – максимальные значения давления для ксенокристов мантийных Сг-пиропов и Сг-диопсидов трубы им. В.Гриба [17]; T (Ni-grt) – диапазон расчетных значений T для Сг-пиропа [31]. Черной сплошной линией (36,2 МВ/м²) показана оптимальная расчетная («best-fit») геотерма для литосферной мантии в районе трубы им. В.Гриба [17]

к наиболее распространенному типу IaAB и содержит азот в форме A- и B-дефектов [32]. Общая концентрация азота (N_{tot}) от центра к краю кристалла уменьшается от 1480 до 1170 ppm, а степень его агрегации (процентное содержание в форме высокоагрегированного дефекта B: $\%B = B/(B + A) \cdot 100$) снижается с 15 до 6 %. Известные данные о дефектно-примесном составе алмазов из месторождений ААП демонстрируют широкие вариации степени агрегации и общего содержания азота кристаллов кимберлитовой трубы им. В.Гриба ($N_{tot} = 637 \pm 534$ ppm, $\%B = 34 \pm 20$ [10, 12, 14]) и более узкий диапазон значений для алмазов из месторождения им. М.В.Ломоносова ($N_{tot} = 955 \pm 323$ ppm, $\%B = 15 \pm 14$ [13, 15]). Алмазы, аналогичные G1-3 по N_{tot} и $\%B$, практически не задокументированы в кимберлитовой трубке им. В.Гриба (рис.6, в), но значительно распространены на месторождении им. М.В.Ломоносова. Коэффициент поглощения линии 3107 cm^{-1} водородсодержащего дефекта N_3VH в алмазе G1-3 составляет $13,4$ и $8,8 \text{ cm}^{-1}$ в центральной и краевой зоне, что выше средних значений (от 2 до 4 cm^{-1}), установленных для алмазов из различных кимберлитовых трубок ААП.

Расчет условий пребывания алмаза G1-3 в мантии, основанный на зависимости агрегации азотных дефектных центров от времени и температуры отжига [33], показал, что при выборе интервала в 1-2 млрд лет, отжиг алмаза G1-3 происходил при температуре 1050-1090 °С (рис.6, в). Изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ алмаза G1-3 показывает экстремально низкое значение $-18,59\text{ \textperthousand}$ относительно стандарта VPDB (рис.6, г). Существующие данные об изотопном составе углерода алмазов кимберлитовых трубок ААП (рис.6, г) ограничены значениями $\delta^{13}\text{C}$ от $-22,1$ до $-2,9\text{ \textperthousand}$ для месторождения им. М.В.Ломоносова [34, 35] и от $-9,6$ до $-2,8\text{ \textperthousand}$ для трубы им. В.Гриба [10, 12]. При этом подавляющее большинство измерений лежит в области среднемантийных значений от -8 до $-3\text{ \textperthousand}$ [1]. Накопленная общемировая база данных указывает на существование сильно облегченного изотопного состава углерода в алмазах из эклогитов, вплоть до значений $\delta^{13}\text{C}$ ниже $-40\text{ \textperthousand}$, что не характерно для алмазов из перидотитов [1]. Редкие экстремально отрицательные значения $\delta^{13}\text{C}$ от -14 до $-26\text{ \textperthousand}$ зафиксированы в перидотитовых алмазах из месторождений кратона Калахари (южная Африка [1]) и Сибирского кратона (Россия [6]). В алмазе G1-3 обнаружено зеленоватое вторичное включение с Mg# 93,6, идентифицированное с использованием рамановской

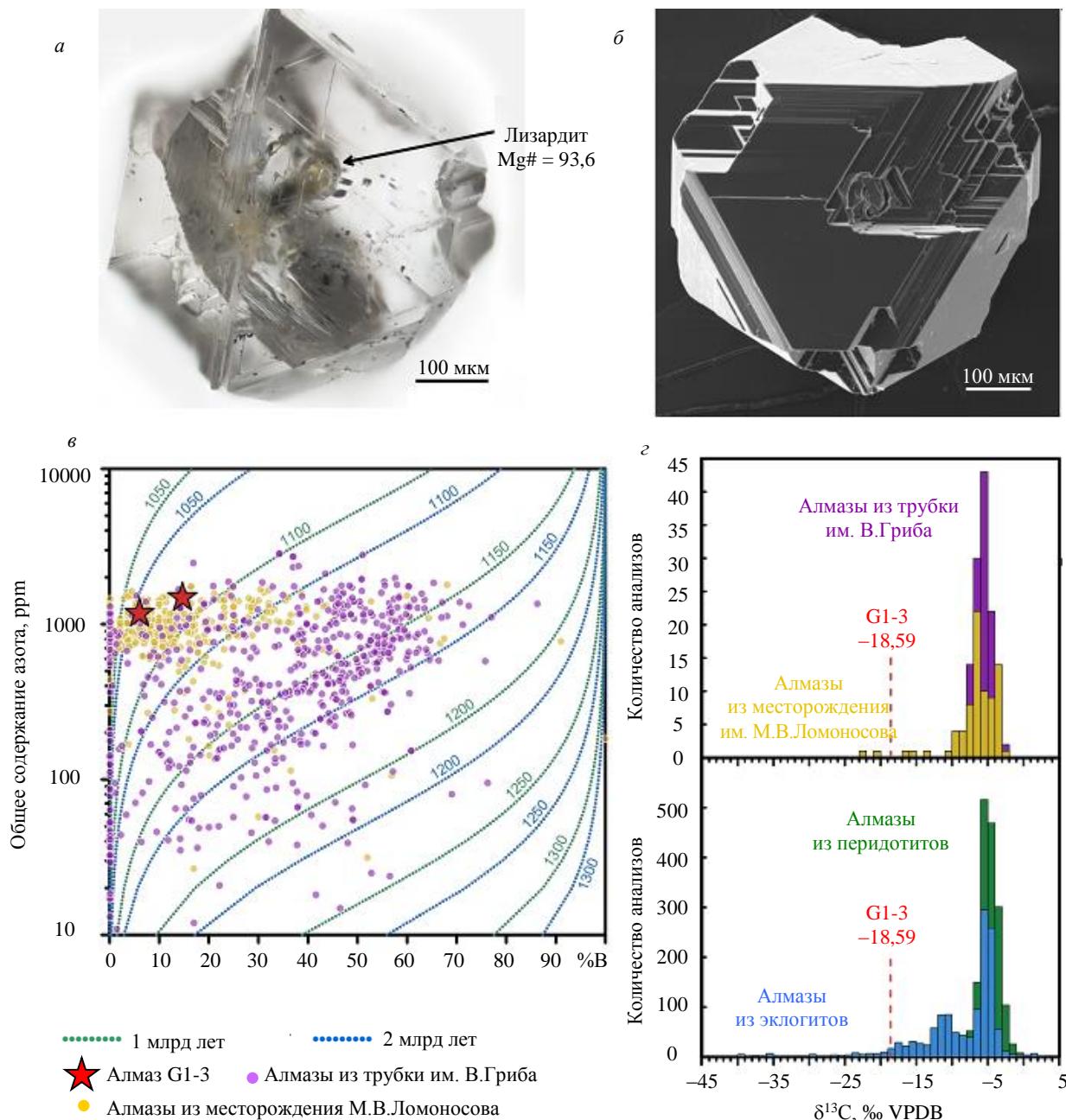


Рис.6. Характеристики алмаза из лерцолита G1-3: *а* – фотография в отраженном свете; *б* – изображение в режиме вторичных электронов (SE); *в* – дефектно-примесный состав; *г* – изотопный состав углерода. Для сравнения на графики нанесены данные общего содержания азота и степени агрегации алмазов из кимберлитовых трубок им. В.Гриба [10, 12] и месторождения им. М.В.Ломоносова [13-15], а также данные изотопного состава углерода в алмазах из этих же трубок [10, 12, 34] и других регионов мира [1]. Изотермы рассчитаны в соответствии с уравнениями [33]

спектроскопии как лизардит (рис.6, *а*). Mg# этого включения значительно отличается от породообразующего оливина (Mg# 91,1), но соответствует Mg# присутствующего в породе серпентина.

Обсуждение результатов

Оливин лерцолита G1-3 характеризуется одними из самых низких значений Mg# (91,1) среди перidotитов трубки им. В.Гриба (Mg# 91,3-92,7 за исключением двух флогопит-гранатовых лерцолитов с Mg# 91,0 [22]). Значения Mg# оливина предполагают степень плавления $\leq 20\%$ при давлении ~ 3 ГПа [36], однако совокупность данных о модальном количестве энстатита 18 об.% с концентрацией FeO 7,5 мас.% и значением отношения MgO/SiO₂ 0,89 для лерцолита G1-3 подтверждает его отношение именно к обогащенным ортопироксеном лерцолитам [37]. Это, в свою очередь, исключает его одноэтапное образование из примитивного мантийного



источника и предполагает возможность добавления энстатита как до, так и после частичного плавления [37].

Низкие значения Mg# оливина лерцолита G1-3 могут быть также связаны с обогащением изначально деплелированного перидотита FeO в результате воздействия высокотемпературного расплавного метасоматоза [36, 37]. В этом случае истинные значения Mg# оливина, отражающие степень плавления, будут скрыты, а полученные значения Mg# могут ложно отражать менее истощенный характер рестита. Оливины из включений в алмазах трубки им. В.Гриба характеризуются более высокими значениями Mg# (92,1-93,9), что свидетельствует о более истощенном характере перидотитов, являющихся субстратами для алмазов (минимум ~40 % при 3 ГПа и от ~30 % до ~50 % при 7 ГПа). Тем не менее, по концентрациям главных элементов и значениям Mg# оливин алмазосодержащего лерцолита G1-3 соответствует оливинам как из включений в алмазах лерцолитовой ассоциации, так и из кратонных лерцолитов (см. рис.2 *а, б*). На уровне парагенезиса это свидетельствует об одинаковой истории истощения лерцолитов – субстрата для алмазов, и лерцолитов, не содержащих алмазы. Анализ и интерпретация данных состава оливинов из включений в алмазах и кратонных лерцолитов [1, 38] исключает широкомасштабное проявление Fe-метасоматоза в литосферной мантии кратонов в период ее эволюции после этапов образования алмазов, но допускает локальные проявления метасоматоза в результате воздействия небольших порций расплава или флюида, в том числе с возможностью сдвигов значений Mg# в оливине. Одним из проявлений такого типа метасоматоза является инфильтрация протокимберлитовых расплавов [36]. Этот тип обогащения перидотитов подтверждается наличием вариаций по концентрациям NiO в оливинах и значениям Mg# (в том числе понижение Mg# менее 90), а также химическим неравновесием между породообразующими минералами [36], что не наблюдается в лерцолите G1-3. Породообразующие минералы лерцолита G1-3 однородны по составу, а содержания NiO в оливине соответствуют содержаниям в перидотитах трубки им. В.Гриба, имеющих более высокомагнезиальный оливин (см. рис.2, *а*).

Влияние высокотемпературного расплавного метасоматоза, безусловно, должно в первую очередь быть отражено на составе Cr-пиропа, а именно – в обогащении TiO₂, Y и Zr [36]. Cr-пироп лерцолита G1-3 содержит низкие концентрации TiO₂ (0,07 мас.%), Y (11,5 ppm) и Zr (1,2 ppm), что не соответствует составам гранатов, испытавшим воздействие расплавного метасоматоза [1, 36]. Низкие значения отношений Zr/Y (0,1) и Zr/Hf (21,4) в Cr-пиропе (см. рис.4, *е*, 7, *а* [1]) вместе с низкими значениями La_n/Yb_n (26) при высоких Ti/Eu (4686) в Cr-диопside (см. рис.4, *д*) также исключают влияние карбонатитового типа мантийного метасоматоза.

Отношения Zr/Hf к Ti/Eu (7400) в Cr-пиропе G1-3 не соответствуют значениям, определенным для гранатов, подвергшихся влиянию карбонатно-силикатного (кимберлитового) расплава (Zr/Hf 30-50 при Ti/Eu 2500-7000). На диаграмме Zr/Hf к Ti/Eu положение точек всех проанализированных зерен Cr-пиропов из лерцолита G1-3 маркирует области как вблизи тренда Fe-Ti-метасоматоза, так и параллельно тренду истощения расплава (рис.7, *а*). Отсутствие явной положительной корреляции между значениями отношений Ti/Eu и содержаниями Ti в Cr-пиропах G1-3 (рис.7, *б*), а также низкие концентрации Ti не позволяют сделать вывод о воздействии Fe-Ti-метасоматоза [39, 40].

Отличительной особенностью Cr-пиропа G1-3 является обеднение всеми несовместимыми элементами относительно граната примитивного состава J4, обеднение ЛРЗЭ, СРЗЭ, HFSE и LILE относительно хондрита C1 и сохранение фракционированного спектра от ЛРЗЭ до ТРЗЭ, что является признаком реститовой природы граната, т.е. пироп может быть охарактеризован как деплелированный [1, 27, 41]. Cr-пиропы такого типа редко встречаются в виде включений в алмазах (см. рис.4, *в, г*) и, подобно Cr-пиропу G1-3, имеют низкие концентрации Zr (≤ 1 ppm) и Y (≤ 10 ppm). По концентрациям TiO₂, CaO, Cr₂O₃, Zr, Y и РЗЭ Cr-пироп G1-3 соответствует Cr-пиропу распадного генезиса в мегакристе ортопироксена кимберлитовой трубки Джагерсфон-стейн, захваченного кимберлитом с глубины ~90 км, и Cr-пиропу из включения в алмазе кимберлитовой трубки Виктор (см. рис.4, *в, г*). Спектр распределения РЗЭ этих гранатов очень близок к рассчитанному для гипотетического «дометасоматического» граната, но отличается от него повышенными концентрациями РЗЭ (см. рис.4, *в*), что не позволяет утверждать абсолютное отсутствие

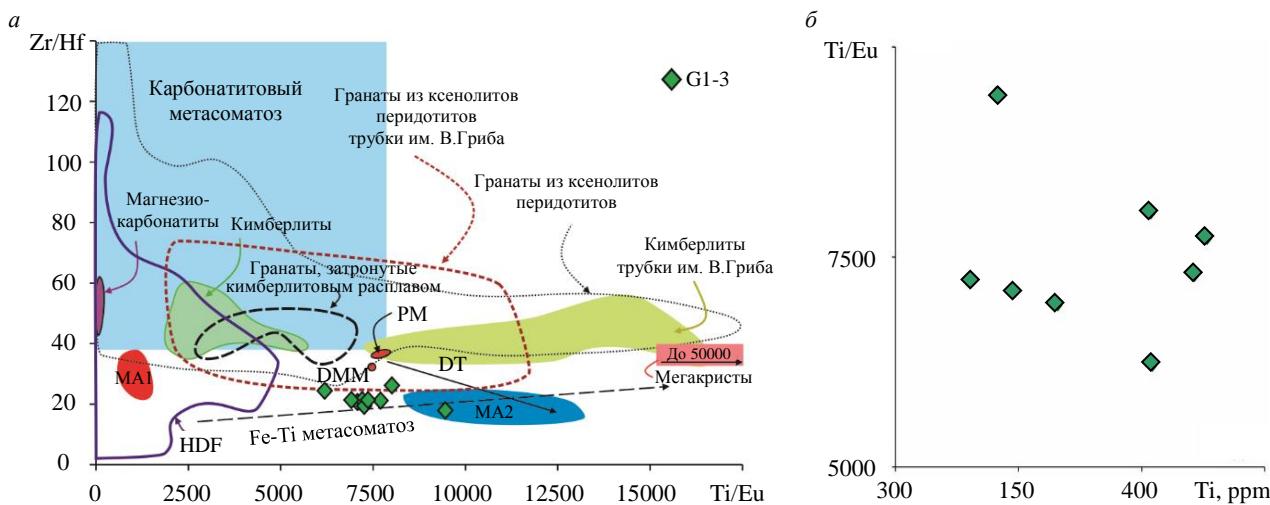


Рис.7. Отношения Zr/Hf к Ti/Eu (а) и Ti/Eu к Ti (б) во всех проанализированных зернах Cr-пиропа алмазосодержащего лерцолита G1-3. Поля и тренды согласно [1]; кимберлиты трубки им. В.Гриба по [16]; гранаты из перидотитов трубки им. В.Гриба по [22]; мегакристы трубки им. В.Гриба по [16]; гранаты, затронутые кимберлитовым расплавом по [41].

HDF [42]; DT – тренд частичного плавления. MA – расчетный состав метасоматического агента, равновесного с составом Cr-пиропа лерцолита G1-3: MA1 – коэффициент распределения [43], MA2 – коэффициент распределения [44]

признаков влияния мантийного метасоматоза на Cr-пироп G1-3. Согласно [41], обогащение «до-метасоматического» граната ЛРЗЭ (до 0,02-1,2 х.ед.) с сохранением фракционирования в области СРЗЭ-ТРЗЭ возможно при добавлении $\leq 1\%$ расплава карбонатового состава $(\text{Sm/La})_n$ от 6 до 20, $(\text{Gd/Sm})_n \sim 1$ [41] или минимального количества ($< 0,00003\%$) высокомагнезиального карбонатитового флюида $(\text{Sm/La})_n \sim 4$, $(\text{Gd/Sm})_n \sim 0,9$ [27], что однако не соответствует составу Cr-пиропа G1-3 $(\text{Sm/La})_{n \text{ cp}} \sim 24$, $(\text{Gd/Sm})_{n \text{ cp}} \sim 5$ (см. рис.4, в).

Расчетные значения Zr/Hf (16-23) и Ti/Eu (9000-13000) в составе гипотетического метасоматического агента, равновесного с Cr-пиропом G1-3, с использованием коэффициента распределения для граната с базальтовым расплавом при 2-3 ГПа (KD [44]) не соответствуют значениям какого-либо природного расплава (рис.7, а). Расчетные отношения Zr/Hf (28-35) и Zr ($< 2 \text{ ppm}$) для состава метасоматического агента (KD [43]), равновесного с Cr-пиропом G1-3, соответствуют как магнезиокарбонатным и силикатным высокоплотным флюидам (HDF, high-density fluids), так и силикатным флюидам [42, 45]. Расчетные значения Zr/Hf (28-35) и Ti/Eu (870-1330) для состава метасоматического агента (KD [43]) также соответствуют значениям для HDF (рис.7, а). Учитывая отсутствие признаков Fe-Ti-метасоматоза в составе Cr-пиропа G1-3, тренд, отражающий его метасоматическое преобразование по Zr/Hf к Ti/Eu, противоположен тренду Fe-Ti-метасоматоза (рис.7, а) и может отражать низкую степень частичного плавления перидотита с сохранением Cr-пиропа и Cr-диопсида, а также последующее метасоматическое обогащение флюидом с высоким отношением ЛРЗЭ/ТРЗЭ. Эта модель согласуется с данными Mg# оливина, что предполагает степень плавления $\leq 20\%$ при давлении $\sim 3 \text{ ГПа}$ [36].

Известно, что HDF способен эффективно переносить углерод и приводить к кристаллизации алмаза при взаимодействии с различными мантийными породами [42]. Основными источниками информации о составе и происхождении HDF являются волокнистые алмазы, образование которых связано как с предкимберлитовыми, так и с более древними метасоматическими событиями [42]. Степень агрегации азота (%B от 6 до 15) алмаза G1-3 указывает на длительное пребывание в мантийных условиях, что исключает формирование непосредственно перед внедрением кимберлита. Экстремально легкие значения изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C} = -18,59\text{‰}$) свидетельствуют о вовлечении в образование алмаза органического углерода субдукционной природы [1]. Исследование микровключений в алмазах из кимберлитовой трубки им. В.Гриба показало, что алмазогенерирующими средами могли быть как высоко-Mg карбонатитовые, так и низко-Mg карбонатно-силикатные HDF [46]. Экспериментальные исследования связывают происхождение



низко-Mg карбонатных и силикатных HDF с частичным плавлением эклогитов и субдукционных осадков с разным соотношением H_2O и CO_2 [42]. В связи с этим, рост алмаза G1-3 мог быть связан с древним метасоматическим событием, протекавшим при ведущей роли низко-Mg силикатно-карбонатных HDF, источником которых были эклогиты и/или содержащие органический углерод субдуцированные осадки. В этом случае взаимодействие таких HDF с лерцолитом G1-3 также привело к незначительному обогащению Cr-пиропа ЛРЗЭ и изменению отношений Zr/Hf и Ti/Eu .

Обогащение кратонных перидотитов ортопироксеном может быть связано с влиянием: субдукционно-связанных расплавов или флюидов, в том числе образованных в результате плавления эклогитов; обогащенных SiO_2 расплавов, образованных при плавлении гарцбургитов; при реакции с коматитовым расплавом при давлениях > 4 ГПа [1, 47]. В случае лерцолита G1-3 нет четких свидетельств в пользу какой-либо из вышеуказанных моделей, так как Cr-пироп и Cr-диопсид не имеют/не сохранили признаки влияния расплавного мантийного метасоматоза. Экспериментальные данные [48] свидетельствуют о том, что водонасыщенные силикатные расплавы, а также богатые водой флюидные фазы, содержащие небольшие количества растворенного силиката или оксида, могут быть средой для зарождения и роста алмаза. Тем не менее, граница устойчивости алмаза в перидотитах определяется буферной реакцией энстатит + магнезит = форстерит + алмаз/графит [48], что, вероятно, указывает на обособленность процессов формирования алмаза от обогащения лерцолита G1-3 ортопироксеном. Таким образом, формирование алмаза могло происходить после этапа обогащения лерцолита ортопироксеном до эпизода частичного плавления, но свидетельства этого периода эволюции/преобразования не сохранились в породе. В этом случае факт сохранности алмаза в лерцолите G1-3 будет свидетельствовать против воздействия высокотемпературного силикатного расплава на породу после этапа образования алмаза, так как это неизбежно привело бы к растворению [48-50].

Расчетные P - T параметры последнего равновесия минеральных фаз лерцолита G1-3 указывают на захват ксенолита кимберлитом с глубины ~ 118 км, что соответствует интервалу глубин (примерно 95-120 км), с которых были захвачены мантийные ксенолиты, имеющие признаки влияния субдукционно-связанного флюида [46], в том числе цирконосодержащие эклогиты, образованные на этапе палеопротерозойской (1,9-1,7 млрд лет) субдукции. Это позволяет предполагать, что породы этого участка литосферной мантии испытали специфические локальные преобразования при ведущей роли субдукционно-связанных флюидов низко-Mg карбонатного и силикатного состава.

Заключение

Настоящее исследование позволило получить первые данные о составе породообразующих минералов, в том числе концентраций редких элементов в Cr-пиропе и Cr-диопсиде, алмазосодержащего лерцолита G1-3 из кимберлитовой трубки им. В.Гриба, а также дефектно-примесный и изотопный составы углерода алмаза, извлеченного из лерцолита.

Анализ данных содержания главных элементов в оливине, ортопироксене, Cr-пиропе и Cr-диопсиде из алмазосодержащего лерцолита G1-3 показал, что состав этих породообразующих минералов соответствует минералам как из включений в алмазах лерцолитовой ассоциации, так и из алмазосодержащих лерцолитов. Тем не менее, концентрации редких и редкоземельных элементов в Cr-пиропе и Cr-диопсиде такие же, как для лерцолита G1-3, и характер спектров их распределений, нормированных на хондрит, к настоящему времени обнаружены в очень ограниченном количестве включений в алмазах.

Значения Mg# оливина предполагают степень плавления $\leq 20\%$ при давлении ~ 3 ГПа для изученного лерцолита. Относительно перидотита J4 Cr-диопсид G1-3 обеднен РЗЭ, Sr, Zr и Hf, а Cr-пироп обеднен всеми несовместимыми элементами, что, учитывая также наличие фракционированного спектра распределения от ЛРЗЭ до ТРЗЭ в Cr-пиропе, позволяет утверждать сохранение лерцолитом G1-3 признаков частичного плавления на момент захвата кимберлитом. Тем не менее, повышенные концентрации РЗЭ в Cr-пиропе G1-3 относительно состава гипотетического «дометасоматического» граната не позволяют утверждать абсолютное отсутствие признаков влияния мантийного метасоматоза на Cr-пироп G1-3. Учитывая низкие концентрации TiO_2 (0,07 мас.-%), Y (11,5 ppm), Zr (1,2 ppm) и низкие значения отношений Zr/Y (0,1) и Zr/Hf (21,4)

в Cr-пиропе, а также низкие значения La_n/Yb_n (26) в Cr-диопсиде G1-3 и расчетные значения Zr/Hf и Ti/Eu для состава гипотетического метасоматического агента, равновесного с Cr-пиропом G1-3, можно предполагать магнезиокарбонатные и силикатные высокоплотные флюиды (HDF) в качестве метасоматического агента, воздействовавшего на лерцолит.

Степень агрегации азота (%B от 6 до 15) алмаза G1-3 указывает на его длительное пребывание в мантийных условиях, что исключает формирование незадолго до внедрения кимберлита. Экстремально легкие значения изотопного состава углерода ($\delta^{13}C = -18,59 \text{ ‰}$) свидетельствуют о вовлечении в образование алмаза органического углерода субдукционной природы. Установлено, что образование алмаза G1-3 могло быть связано с древним метасоматическим событием, протекавшим при ведущей роли низко-Mg силикатно-карбонатных HDF, источником которых были эклогиты и/или содержащие органический углерод субдукционные осадочные отложения. В этом случае рост алмаза и метасоматическое обогащение Cr-пиропа и Cr-диопсида происходили в рамках единого этапа.

Повышенное модальное количество энстатита (18 об.-%), концентрация FeO (7,5 мас.-%) и значение отношения MgO/SiO_2 (0,89) для лерцолита G1-3 подтверждают его связь именно с обогащенными ортопироксеном лерцолитами. Обогащение ортопироксеном могло быть сопряжено с влиянием субдукционно-связанных расплавов или флюидов и обогащенных SiO_2 расплавов. Тем не менее, Cr-пироп и Cr-диопсид лерцолита G1-3 не имеют/не сохранили признаков влияния расплавного мантийного метасоматоза, а процессы формирования алмаза и ортопироксена, вероятно, были обособлены.

Совокупность результатов настоящего и полученных ранее исследований позволяют предполагать, что породы литосферной мантии, захваченные кимберлитом трубы им. В.Гриба с интервалов от ~95 до ~120 км, имеют признаки специфических локальных преобразований при ведущей роли субдукционно-связанных флюидов низко-Mg карбонатного и силикатного состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stachel T., Aulbach S., Harris J.W. Mineral Inclusions in Lithospheric Diamonds // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2022. Vol. 88. P. 307-391. [DOI: 10.2138/rmg.2022.88.06](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.06)
2. Stachel T., Cartigny P., Chacko T., Pearson D.G. Carbon and Nitrogen in Mantle-Derived Diamonds // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2022. Vol. 88. P. 809-875. [DOI: 10.2138/rmg.2022.88.15](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.15)
3. Smit K.V., Timmerman S., Aulbach S. et al. Geochronology of Diamonds // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2022. Vol. 88. P. 567-636. [DOI: 10.2138/rmg.2022.88.11](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.11)
4. Creighton S., Stachel T., McLean H. et al. Diamondiferous peridotitic microxenoliths from the Diavik Diamond Mine, NT // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2008. Vol. 155. Iss. 5. P. 541-554. [DOI: 10.1007/s00410-007-0257-x](https://doi.org/10.1007/s00410-007-0257-x)
5. Aulbach S., Stachel T., Heaman L.M., Carlson J.A. Microxenoliths from the Slave craton: Archives of diamond formation along fluid conduits // *Lithos*. 2011. Vol. 126. Iss. 3-4. P. 419-434. [DOI: 10.1016/j.lithos.2011.07.012](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.012)
6. Логинова А.М., Тэйлор Л.А., Федорова Е.Н. и др. Уникальный ксенолит алмазоносного перидотита из кимберлитовой трубы Удачная (Якутия): роль субдукции в образовании алмазов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 1-2. С. 397-415. [DOI: 10.15372/GiG20150122](https://doi.org/10.15372/GiG20150122)
7. Jaques A.L., O'Neill H.S.C., Smith C.B. et al. Diamondiferous peridotite xenoliths from the Argyle (AK1) lamproite pipe, Western Australia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1990. Vol. 104. Iss. 3. P. 255-276. [DOI: 10.1007/BF00321484](https://doi.org/10.1007/BF00321484)
8. Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Реймерс Л.Ф. и др. Минеральные включения в алмазах Архангельской кимберлитовой провинции // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 2. С. 358-370.
9. Garanin V., Garanin K., Kriulina G., Samosorov G. Diamonds from the Arkhangelsk Province, NW Russia. Springer, 2021. 248 p. [DOI: 10.1007/978-3-030-35717-7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35717-7)
10. Rubanova E.V., Palazhchenko O.V., Garanin V.K. Diamonds from the V.Grib pipe, Arkhangelsk kimberlite province, Russia // *Lithos*. 2009. Vol. 112. Suppl. 2. P. 880-885. [DOI: 10.1016/j.lithos.2009.04.044](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.044)
11. Мальковец В.Г., Зедгенизов Д.А., Соболев Н.В. и др. Содержание элементов-примесей в оливинах из алмазов и ксенолитов перидотитов кимберлитовой трубы им. В. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция) // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436. № 4. С. 515-519.
12. Галимов Э.М., Палажченко О.В., Веричев Е.М. и др. Изотопный состав углерода алмазов Архангельской алмазоносной провинции // Геохимия. 2008. № 10. С. 1027-1036.
13. Васильев Е.А., Криулина Г.Ю., Гаранин В.К. Термическая история алмаза кимберлитовых трубок Архангельская и имени А.П.Карпинского-И // *Записки Горного института*. 2022. Т. 255. С. 327-336. [DOI: 10.31897/PMI.2022.57](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.57)
14. Васильев Е.А., Устинов В.Н., Лешуков С.И. и др. Кристаллы алмаза кимберлитовой трубы им. В.Гриба: морфология и структурно-химические особенности // Литосфера. 2023. Т. 23. № 4. С. 549-563. [DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-4-549-563](https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-549-563)



15. Хачатрян Г.К., Анашкина Н.Е. Соотношение между распределением структурных примесей в кристаллах алмаза и алмазоносностью кимберлитовых трубок (на примере Архангельской области и Якутии) // Руды и металлы. 2021. № 3. С. 114-130. [DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10023](https://doi.org/10.47765/0869-5997-2021-10023)
16. Агашиева Е.В., Гудимова А.И., Червяковский В.С., Агашиев А.М. Контрастная алмазоносность кимберлитов трубок им. В.Гриба и ЦНИГРИ-Архангельская (Архангельская алмазоносная провинция) как следствие различий в составе и эволюции литосферной мантии: данные по концентрациям главных и редких элементов в ксенокристах граната // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 12. С. 1751-1777. [DOI: 10.15372/GiG2023155](https://doi.org/10.15372/GiG2023155)
17. Agasheva E., Gudimova A., Malygina E. et al. Thermal State and Thickness of the Lithospheric Mantle Beneath the Northern East-European Platform: Evidence from Clinopyroxene Xenocrysts in Kimberlite Pipes from the Arkhangelsk Region (NW Russia) and Its Applications in Diamond Exploration // Geosciences. 2024. Vol. 14. Iss. 9. № 229. [DOI: 10.3390/geosciences14090229](https://doi.org/10.3390/geosciences14090229)
18. Nimis P., Preston R., Perritt S.H., Chinn I.L. Diamond's depth distribution systematics // Lithos. 2020. Vol. 376-377. № 105729. [DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105729](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105729)
19. Nimis P. Pressure and Temperature Data for Diamonds // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. P. 533-565. [DOI: 10.2138/rmg.2022.88.10](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.10)
20. Boyd S.R., Kifflaw I., Woods G.S. Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond // Philosophical Magazine B. 1995. Vol. 72. Iss. 3. P. 351-361. [DOI: 10.1080/13642819508239089](https://doi.org/10.1080/13642819508239089)
21. Viljoen K.S., Swash P.M., Otter M.L. et al. Diamondiferous garnet harzburgites from the Finsch kimberlite, Northern Cape, South Africa // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1992. Vol. 110. Iss. 1. P. 133-138. [DOI: 10.1007/BF00310887](https://doi.org/10.1007/BF00310887)
22. Щукина Е.В., Агашиев А.М., Костровицкий С.И., Похilenko Н.П. Метасоматические изменения литосферной мантии в районе кимберлитовой трубки им. В.Гриба, Архангельская алмазоносная провинция // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 12. С. 2153-2172. [DOI: 10.15372/GiG20151204](https://doi.org/10.15372/GiG20151204)
23. Viljoen K.S., Dobbe R., Smit B. et al. Petrology and geochemistry of a diamondiferous lherzolite from the Premier diamond mine, South Africa // Lithos. 2004. Vol. 77. Iss. 1-4. P. 539-552. [DOI: 10.1016/j.lithos.2004.03.023](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.023)
24. Sobolev N.V., Lavrentev Yu.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1973. Vol. 40. Iss. 1. P. 39-52. [DOI: 10.1007/BF00371762](https://doi.org/10.1007/BF00371762)
25. Grüter H.S., Gurney J.J., Menzies A.H., Winter F. An updated classification scheme for mantle-derived garnet, for use by diamond explorers // Lithos. 2004. Vol. 77. Iss. 1-4. P. 841-857. [DOI: 10.1016/j.lithos.2004.04.012](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.012)
26. McDonough W.F., Sun S.-s. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. Vol. 120. Iss. 3-4. P. 223-253. [DOI: 10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
27. Gibson S.A. On the nature and origin of garnet in highly-refractory Archean lithospheric mantle: constraints from garnet exsolved in Kaapvaal craton orthopyroxenes // Mineralogical Magazine. 2017. Vol. 81. Iss. 4. P. 781-809. [DOI: 10.1180/minmag.2016.080.158](https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.158)
28. White W.M. Geochemistry. Wiley-Blackwell, 2020. 960 p.
29. Taylor W.R. An experimental test of some geothermometer and geobarometer formulations for upper mantle peridotites with application to the thermobarometry of fertile lherzolite and garnet websterite // Neues Jahrbuch für Mineralogie. 1998. Vol 172. Iss. 2-3. P. 381-408. [DOI: 10.1127/njma/172/1998/381](https://doi.org/10.1127/njma/172/1998/381)
30. Nickel K., Green D.H. Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds // Earth and Planetary Science Letters. 1985. Vol. 73. Iss. 1. P. 158-170. [DOI: 10.1016/0012-821X\(85\)90043-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90043-3)
31. Sudholz Z.J., Yaxley G.M., Jaques A.L., Chen J. Ni-in-garnet geothermometry in mantle rocks: a high pressure experimental recalibration between 1100 and 1325 °C // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2021. Vol. 176. Iss. 5. № 32. [DOI: 10.1007/s00410-021-01791-8](https://doi.org/10.1007/s00410-021-01791-8)
32. Green B.L., Collins A.T., Breeding C.M. Diamond Spectroscopy, Defect Centers, Color, and Treatments // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. P. 637-688. [DOI: 10.2138/rmg.2022.88.12](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.12)
33. Taylor W.R., Canil D., Milledge H.J. Kinetics of Ib to Ia nitrogen aggregation in diamond // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1996. Vol. 60. Iss. 23. P. 4725-4733. [DOI: 10.1016/S0016-7037\(96\)00302-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00302-X)
34. Галимов Э.М., Захарченко О.Д., Мальцев К.А. и др. Изотопный состав углерода алмазов из кимберлитовых трубок Архангельской области // Геохимия. 1994. № 1. С. 67-73.
35. Криулина Г.Ю., Гаранин В.К., Васильев Е.А. и др. Новые данные о строении кристаллов алмаза кубического габитуса из месторождения им. М.В.Ломоносова // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2012. № 5. С. 12-18.
36. Czas J., Pearson D.G., Stachel T. et al. A Palaeoproterozoic diamond-bearing lithospheric mantle root beneath the Archean Sask Craton, Canada // Lithos. 2020. Vol. 356-357. № 105301. [DOI: 10.1016/j.lithos.2019.105301](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105301)
37. Reisberg L., Aulbach S. Continental lithospheric mantle // Treatise on Geochemistry. Elsevier, 2025. Vol. 1. P. 773-865. [DOI: 10.1016/B978-0-323-99762-1.00079-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99762-1.00079-6)
38. Pearson D.G., Scott J.M., Jingao Liu et al. Deep continental roots and cratons // Nature. 2021. Vol. 596. Iss. 7871. P. 199-210. [DOI: 10.1038/s41586-021-03600-5](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03600-5)
39. Qiwei Zhang, Morel M.L.A., Jingao Liu et al. Re-healing cratonic mantle lithosphere after the world's largest igneous intrusion: Constraints from peridotites erupted by the Premier kimberlite, South Africa // Earth and Planetary Science Letters. 2022. Vol. 598. № 117838. [DOI: 10.1016/j.epsl.2022.117838](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117838)
40. Heckel C., Woodland A.B., Gibson S.A. Cretaceous thinning of the Kaapvaal craton and diamond resorption: Key insights from a highly-deformed and metasomatized ilmenite-dunite xenolith // Lithos. 2025. Vol. 494-495. № 107901. [DOI: 10.1016/j.lithos.2024.107901](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107901)
41. Qiao Shu, Brey G.P. Ancient mantle metasomatism recorded in subcalcic garnet xenocrysts: Temporal links between mantle metasomatism, diamond growth and crustal tectonomagmatism // Earth and Planetary Science Letters. 2015. Vol. 418. P. 27-39. [DOI: 10.1016/j.epsl.2015.02.038](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.02.038)
42. Weiss Y., Czas J., Navon O. Fluid Inclusions in Fibrous Diamonds // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. P. 475-532. [DOI: 10.2138/rmg.2022.88.09](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.09)



43. *Dasgupta R., Hirschmann M.M., McDonough W.F. et al.* Trace element partitioning between garnet lherzolite and carbonatite at 6.6 and 8.6 GPa with applications to the geochemistry of the mantle and of mantle-derived melts // *Chemical Geology*. 2009. Vol. 262. Iss. 1-2. P. 57-77. [DOI: 10.1016/j.chemgeo.2009.02.004](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.02.004)
44. *Johnson K.T.M.* Experimental determination of partition coefficients for rare earth and high-field-strength elements between clinopyroxene, garnet, and basaltic melt at high pressures // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1998. Vol. 133. Iss. 1-2. P. 60-68. [DOI: 10.1007/s004100050437](https://doi.org/10.1007/s004100050437)
45. *Gibson S.A., McMahon S.C., Day J.A., Dawson J.B.* Highly Refractory Lithospheric Mantle beneath the Tanzanian Craton: Evidence from Lashaine Pre-metasomatic Garnet-bearing Peridotites // *Journal of Petrology*. 2013. Vol. 54. Iss. 8. P. 1503-1546. [DOI: 10.1093/petrology/egt020](https://doi.org/10.1093/petrology/egt020)
46. *Агащева Е.В., Михайленко Д.С., Корсаков А.В.* Ассоциация кварца, Сг-пиропа и Сг-диопсида в мантийном ксенолите из кимберлитовой трубки им. В.Гриба (север Восточно-Европейской платформы): генетические модели // *Записки Горного института*. 2024. Т. 268. С. 503-519.
47. *Tomlinson E.L., Kamber B.S.* Depth-dependent peridotite-melt interaction and the origin of variable silica in the cratonic mantle // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. № 1082. [DOI: 10.1038/s41467-021-21343-9](https://doi.org/10.1038/s41467-021-21343-9)
48. *Luth R.W., Palyanov Yu.N., Bureau H.* Experimental Petrology Applied to Natural Diamond Growth // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2022. Vol. 88. P. 755-808. [DOI: 10.2138/rmg.2022.88.14](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.14)
49. *Howarth G.H., Kahle B., Janney P.E. et al.* Caught in the act: Diamond growth and destruction in the continental lithosphere // *Geology*. 2023. Vol. 51. № 6. P. 532-536. [DOI: 10.1130/G51013.1](https://doi.org/10.1130/G51013.1)
50. *Howarth G.H., Giuliani A., Bussweiler Y. et al.* Kimberlite pre-conditioning of the lithospheric mantle and implications for diamond survival: a case study of olivine and mantle xenocrysts from the Koidu mine (Sierra Leone) // *Mineralium Deposita*. 2024. Vol. 60. Iss. 4. P. 677-695. [DOI: 10.1007/s00126-024-01312-0](https://doi.org/10.1007/s00126-024-01312-0)

Авторы: Елена Владимировна Агащева, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), shchukinalena@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9396-8568>, Николай Васильевич Губанов, младший научный сотрудник (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-0718-8021>, Дмитрий Александрович Зедгенизов, д-р геол.-минерал. наук, профессор РАН, директор (Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заваринского УрО РАН, Екатеринбург, Россия), заведующий кафедрой (Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-5934-9122>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



О необходимости совершенствования методов трехосных испытаний при исследовании механического поведения соляных пород и геоматериалов

Е.Я.Козловский^{1,2}✉, М.А.Журавков¹, С.И.Богдан²¹ Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь² ООО «ПроТех Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Козловский Е.Я., Журавков М.А., Богдан С.И. О необходимости совершенствования методов трехосных испытаний при исследовании механического поведения соляных пород и геоматериалов // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 157-169. [EDN SHGZSG](#)

Аннотация

Рассматривается необходимость совершенствования стандартных методов трехосных испытаний для описания механического поведения соляных пород. Трехосные испытания являются важным инструментом для определения прочностных и деформационных характеристик горных пород, однако существующие стандарты часто не учитывают специфические особенности солей, такие как значительная пластичность, ползучесть, чувствительность к температурным изменениям, способность залечивания дефектов. В работе подчеркивается критическая важность учета больших деформаций и изменений объема образцов в ходе испытаний, что позволяет более точно моделировать поведение соляных пород. Предлагается введение в стандарты известных коррекционных уравнений для учета объемных деформаций и использования меры деформации Генки. Результаты экспериментальных исследований образцов природных соляных пород и техногенных геоматериалов на их основе демонстрируют существенные погрешности в определении напряженно-деформированного состояния при применении традиционных методов обработки данных без учета специфики солей. Выводы работы предполагают необходимость пересмотра существующих стандартов на трехосные испытания с учетом предложенных подходов, что позволит повысить точность и воспроизводимость данных, критически важных для математического моделирования геомеханических процессов и проектирования в целом.

Ключевые слова

лабораторные испытания; трехосные испытания; соляные породы; механика горных пород; стандарты

Поступила: 26.08.2024

Принята: 16.07.2025

Онлайн: 03.12.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Для выполнения корректного механико-математического моделирования важным представляется наличие качественных и репрезентативных исходных данных относительно физико-механических характеристик материалов, а также их корректная интерпретация для определения характеристик исследуемого объекта в целом. Не являются исключением и геоматериалы – необходимость изучения механизмов деформирования подобных сред актуальна для широких интервалов напряжений и видов напряженных состояний [1, 2]. В число основных видов механических испытаний в сложном напряженно-деформированном состоянии (НДС) входят осесимметричные трехосные испытания по схемам Т. von Kármán и R. Böker [3, 4], согласно которым на подготовленные образцы сначала воздействуют всесторонним давлением $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ в гидравлической камере. После этого увеличивают девиатор напряжений, приводя образец в состояние обобщенного сжатия или растяжения путем изменения нагрузки вдоль оси образца или давления жидкости в камере. Соответствие напряженного состояния при основных стандартных испытаниях параметру Надаи – Лоде μ_σ и девиаторному полярному углу Лоде θ : при трехосном сжатии по схеме НДС $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$, $\mu_\sigma = 1$, $\theta = \pi/6$; при трехосном растяжении по схеме НДС $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$, $\mu_\sigma = -1$, $\theta = -\pi/6$. Наибольший интерес при этом составляет широко стандартизованный метод трехосного сжатия.

Как правило, методики испытания на трехосное сжатие разделяются и устанавливаются в соответствии с группой природных геоматериалов:

- мерзлые – с криогенными структурными связями;
- скальные – с преобладанием структурных связей химической природы прочностью более 5 МПа;
- дисперсные – с преобладанием механических, физических и физико-химических структурных связей;
- полускальные – с промежуточными свойствами между скальными и дисперсными грунтами, часто представляют собой рыхлые или слабосцементированные породы прочностью менее 5 МПа.

Соляные породы занимают при этом особое место, так как их прочности могут достигать и даже превышать 40 МПа, в то же время для них характерно пластическое поведение, связанное с ярко выраженной ползучестью, что обычно объясняется совокупностью различных механизмов [5]. Среди данных механизмов в интервалах напряжений и температур, характерных для большинства горно-строительных работ, в настоящее время принято выделять основные:

- дислокационная ползучесть, вызываемая дефектами внутри зерен (кристаллов) и сопровождаемая динамической рекристаллизацией [6, 7];
- диффузионная ползучесть, реализующаяся за счет массопереноса в твердой фазе [6];
- рекристаллизационная (solution-precipitation) ползучесть [6] характеризующаяся растворением нагруженных контактов, диффузией вещества в тонких пленках раствора и осаждением на разгруженных гранях [8, 9] в рамках сложного и до конца не исследованного физико-химического процесса [5, 10]. Феноменологически, как правило, описывается совместно с диффузионной ползучестью;
- накопление повреждений, в рамках которого подразумевается, что микротрещины и поры вследствие деформирования могут увеличиваться и развиваться вплоть до раскрытия межзерновых контактов или разрушения зерен [7, 11, 12].

Подобное механическое поведение наблюдается задолго до достижения предела прочности и при трехосных испытаниях демонстрирует выраженную пластичность [13, 14] и дилатансию. Увеличение объема образца при испытаниях на сжатие в этом случае наблюдается вплоть до высоких напряжений обжатия, а его начало обычно характеризуется границей дилатанции [11]. Механизмы ползучести также подразумевают, что образцами могут быть достигнуты большие деформации не только при высоких интенсивностях напряжений, но при достаточной продолжительности с малыми интенсивностями напряжений.

Необходимо отметить важность температурного режима при испытаниях. Температура горных пород в природном состоянии или при эксплуатации сооружения может существенно отличаться от комнатной в лаборатории. Известно, что с увеличением глубины температуры природной среды могут значительно повышаться. Даже в проектах, реализующих шахтный способ добычи с учетом современных глубин ведения горных работ, температуры в массиве могут достигать *in situ* 35-60 °С [15-17]. При этом рассматриваемые породы являются весьма чувствительными к изменениям температуры [18]. В частности, процессы, происходящие при ползучести, существенно ускоряются, а скорости деформирования при подобных различиях условий могут отличаться в несколько раз [19, 20]. Влияние оказывается также и на условно-мгновенные характеристики – как деформационные, так и прочностные [21].

Важно отметить и другую особенность соляных пород вследствие диффузионной и рекристаллизационной ползучести [22, 23] – способность к восстановлению своей структуры и залечиванию накопленных дефектов [20, 24], которые могут появиться в том числе во время бурения и оказать существенное влияние на результаты испытаний [25, 26]. Использование эффекта восстановления породы может применяться в лаборатории и рекомендуется многими исследователями в качестве дополнительной стадии испытания – процедуры реконсолидации [22, 27] путем предварительного обжатия образца в камере некоторым, не всегда изотропным, давлением и выдерживанием под нагрузкой некоторое время до достижения выбранного критерия окончания процедуры, после чего можно приступить к стандартной стадии девиаторного нагружения. Подобные вспомогательные этапы реконсолидации образца обычно проводят при природном уровне напряжений и температур, они могут длиться весьма продолжительное время. Некоторые исследователи



рекомендуют процедуру, ограничивающуюся несколькими часами [28], другие выдерживают образцы до 10 сут для испытаний с уровнем девиаторных напряжений выше 10 МПа и рекомендуют еще более длительную реконсолидацию для изучения ползучести в более низком диапазоне напряжений [22]. Иногда реконсолидация состоит из нескольких подстадий [29]. Для ускорения таких продолжительных процессов иногда прибегают к повышению средних напряжений либо температур выше природного уровня [30].

Отмеченные аспекты существенно отличают большинство соляных пород от группы скальных, результаты испытания которых даже при высоких обжатиях, как правило, позволяют работать с допущениями о малости деформаций и отсутствии формоизменения [4]. При этом очевидно, что названные допущения могут существенно завышать уровень напряжений в образце и приводить в последующем к искажению оценок поведения массива и чрезмерно оптимистичным инженерным решениям. Таким образом становится актуальным аргументированное обоснование необходимости внесения дополнений в методы обработки и интерпретации данных, а также необходимости дополнений самих испытаний специальными процедурами с позиций требования сохранения физической репрезентативности.

Методы

Согласно основным распространенным стандартам на осесимметричное трехосное сжатие, к которым можно отнести ASTM¹, ГОСТ², рекомендации ISRM [31, 32] и т.д., проведение и обработка испытаний предполагается с определением деформаций как относительных:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}, \quad (1)$$

где L_0 , L – начальная длина и длина деформированного образца соответственно.

Единственными широко распространенными стандартами-исключениями являются ASTM¹. Несмотря на использование начальной конфигурации образца в качестве основной, они допускают (но не обязывают и не рекомендуют как лучшую практику³) учет больших деформаций и формоизменения. Подобная исключительность этого стандарта вызвана его распространением в том числе на трехосные испытания при высоких температурах, т.е. случаев, когда дополнительно стимулируется переход механизма деформирования горных пород из хрупкого в пластический. При этом стандарт не дает рекомендаций по обработке измерений, способам учета больших деформаций и формоизменения, достаточных для независимого воспроизведения в различных лабораториях.

Таким образом, традиционно форма образцов для прочных горных пород (не дисперсных и не полускальных) лабораториями принимается постоянной. Одновременно с этим для дисперсных грунтов при больших деформациях предложены и повсеместно разными системами нормирования рекомендуются подходы коррекции размера сечения образца [33, 34] прямыми измерениями либо введением поправки на площадь поперечного сечения следующего вида⁴:

$$A_1 = A_0 \frac{1}{1 + b \varepsilon_a}; \quad (2)$$

$$A_2 = A_0 \frac{1 + \varepsilon_v}{1 + b \varepsilon_a}, \quad (3)$$

где A_0 , A_1 , A_2 – начальная и конечные (при предположениях неизменности и изменения объема) площади образца поперечного сечения соответственно; ε_a – осевая деформация образца; ε_v – объемная деформация образца; b – коэффициент неравномерности расширения образца.

¹ ASTM D7012-23 Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures.

ASTM D7070-16 Standard Test Methods for Creep of Rock Core Under Constant Stress and Temperature.

² ГОСТ 28985-91 Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.

ГОСТ 21153.8-88 Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии.

ГОСТ Р 70697-2023 Грунты. Определение характеристик прочности скальных грунтов методом трехосного сжатия.

³ Form and Style Manual for ASTM Standards. ASTM International, 2023. 110 р.

⁴ ГОСТ 12248.3-2020 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия.

Допущение о малости деформаций и неизменности формы для прочных пород используется в силу удобства, исходя из того, что подавляющее большинство горных пород достигает предела прочности при весьма низких деформациях – нередко в абсолютной величине менее 1 % даже при весьма высоких обжатиях, а при высоких обжатиях начинают деформироваться пластиично и могут не достигнуть предела прочности в принципе [4].

Однако даже прочные, достигающие предела прочности на одноосное сжатие в 40 МПа и выше соляные породы в своем большинстве проявляют яркие пластические свойства уже при малых обжатиях. При этом прочность может достигаться в интервалах абсолютных величин сжимающих деформаций от 5 до 30 % [35] либо вовсе не достигаться с характерным графиком упрочнения [36]. Очевидно, подобные результаты испытаний требуют учета больших деформаций.

За пределами исследований горных пород в области высоких давлений и температур одними из первых работ, специально затронувших вопрос учета больших деформаций при испытаниях стали публикации исследователей из Германии [27], которые в дальнейшем легли в основу рекомендуемых методик с акцентом на необходимости учета «истинных» деформаций и их скоростей. Тем не менее в них сохранялось допущение о неизменности объема образцов при испытаниях с использованием функции коррекции, аналогичной формуле (2) [22, 27]. Подобные выводы были получены и при изучении поведения образцов солей, отобранных в провинциях Jiangsu и Jianghan Китая [37]. Некоторыми исследователями было предложено вести расчет не только в логарифмических деформациях, но также проводить коррекцию образца согласно формулам [38, 39]:

$$A = A_0 \frac{1}{1 + \bar{\varepsilon}_a}; \quad \bar{\sigma}_a = \frac{F}{A}, \quad (4)$$

где $\bar{\varepsilon}_a$ – осевые деформации Генки; $\bar{\sigma}_a$ – «истинные» напряжения; F – сила на штоке прибора.

Авторы данной работы, аналогично многим предшествующим исследователям, предлагают при интерпретации данных принять меру деформаций Генки:

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{dL}{L}; \quad \bar{\varepsilon} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right); \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}_i = \ln\lambda_i,$$

где $\bar{\varepsilon}_i$ – главные деформации; λ_i – главные удлинения (кратности).

Объемные деформации определяются таким образом:

$$\bar{\varepsilon}_v = \ln(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3) = \bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2 + \bar{\varepsilon}_3.$$

Вместе с тем предлагается в общем случае учитывать изменение поперечного сечения по экспериментальным измерениям в поперечном направлении или совместным измерениям в осевом направлении и объема образца в камере с введением соответствующих поправок из предположения

$$A = A_0 \lambda_r^2 = A_0 \frac{J}{\lambda_a}, \quad (6)$$

согласно

$$A_{\max} = A_0 \lambda_{r,e}^2 = A_0 \exp[2\bar{\varepsilon}_r]; \quad A_{\text{mean}} = A_0 \frac{J_e}{\lambda_{a,e}} = A_0 \frac{\exp[\bar{\varepsilon}_v]}{\exp[\bar{\varepsilon}_a]}, \quad (7)$$

где A_{\max} , A_{mean} – наибольшая и средняя по высоте площади поперечного сечения образца соответственно; A_0 и A – начальная и конечная площадь поперечного сечения образца; λ_r , λ_a , $\lambda_{r,e}$, $\lambda_{a,e}$ – главные удлинения в радиальном и осевом направлениях и их экспериментально полученные величины; J – якобиан, относительное изменение объема, $J = \det(F) = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$; $\bar{\varepsilon}_r$ – поперечные деформации; $\bar{\varepsilon}_a$ – осевые деформации; $\bar{\varepsilon}_v$ – объемные деформации.



Оба подхода в случае формы, близкой к идеальному цилинду, будут давать близкие величины напряжений

$$\bar{\sigma}_a = \frac{F}{A}$$

либо в зависимости от конструкции прибора

$$\bar{\sigma}_a = \frac{F - p_h (A_s - A)}{A},$$

где F – нагрузка на шток; p_h – гидростатическое давление в камере; A_s – полная площадь штока.

При необходимости следует использовать дополнительные известные коэффициенты по корректировке, исходя из наблюдаемых дефектных форм деформирования. Вопрос коррекции напряжений в образцах неправильной формы рассматривался начиная с классических работ 40-х годов, различные аспекты этой проблемы изучались многими исследователями [33, 34, 40], они в различном виде широко отражены в рекомендациях по испытаниям дисперсных грунтов.

Уравнения (7) приведены исключительно для удобства работы в одной мере деформации. Если используются ε_r или ε_a и ε_v , полученные прямыми измерениями, то конечные величины, согласно равенству (6), будут полностью аналогичны используемой для грунтов функции (3), так как они эквивалентны, в отличие от формулы (4).

Значения будут полностью совпадать и с расчетными величинами, если учесть формоизменение вследствие больших перемещений:

$$\varepsilon_{v, \max} = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r + 2\varepsilon_a\varepsilon_r + \varepsilon_r^2 + \varepsilon_a\varepsilon_r^2; \quad (8)$$

$$\varepsilon_{r, \text{mean}} = \sqrt{\frac{1 + \varepsilon_v}{1 + \varepsilon_a}} - 1, \quad (9)$$

где $\varepsilon_{v, \max}$ – максимальная (в случае «бочкования») относительная объемная деформация, полученная по прямым измерениям ε_a и ε_r ; $\varepsilon_{r, \text{mean}}$ – средняя относительная поперечная деформация по высоте образца по прямым измерениям ε_a и ε_v .

Различие в формуле (7) между использованием прямых измерений $\bar{\varepsilon}_r$ и прямых измерений $\bar{\varepsilon}_a$ и $\bar{\varepsilon}_v$, будет, как правило, только при отклонении конечной формы от цилиндра, так как расчет через изменение объема в камере приводит к средней площади по всей длине образца, а через прямые изменения поперечного сечения – к более пессимистичным оценкам в случае «бочкования» образца. Основное отличие от стандартных подходов интерпретации данных с датчиков будет заключаться в следующих факторах:

- представление результатов с использованием меры деформации Генки при построении диаграмм «напряжение – деформации» и определении характерных точек на них (деформации, соответствующие переходу к дилатансии, пиковая прочность, достижение остаточной прочности и т.д.);

- учет формоизменения, что является распространенным для соляных пород в мировой практике, но не широко стандартизованным;

- учет изменения объема, что в установившейся мировой практике является нехарактерным для горных пород, в том числе для соляных.

Типовые результаты стандартных испытаний соляных пород на трехосное сжатие, выполненные в трех различных лабораториях, объединены в четыре группы:

- группа 1 – условно-мгновенные трехосные испытания каменной соли с предварительной реконсолидацией образцов, отобранных в глубоких скважинах;

- группа 2 – условно-мгновенные трехосные испытания каменной соли без предварительной реконсолидации образцов, отобранных в глубоких скважинах;

- группа 3 – условно-мгновенные трехосные испытания техногенного геоматериала, искусственно сформованного и представляющего собой смесь соляных отходов [41] и цементов [42-44];

- группа 4 – длительные трехосные испытания каменной соли и сильвинита без предварительной реконсолидации.

Представление результатов основано на сопоставлении основных для испытания исходных диаграмм с диаграммами после дополнительной постобработки результатов со сравнением трех подходов:

- подход 1 – мера деформаций (1) без корректировки напряжений;
- подход 2 – мера деформаций (5) и корректировка напряжений (7) с допущением $\bar{\varepsilon}_v = 0$;
- подход 3 – мера деформаций (5) и корректировка напряжений (7) с учетом фактических величин $\bar{\varepsilon}_v$.

Обсуждение результатов

Из-за невозможности графического представления полных результатов испытаний и их интерпретации, а также для воспроизведения исходные данные ε_a , ε_r , σ_1 , σ_3 для групп 1-3, в том числе t , ε_a , ε_r , σ_1 , σ_3 для группы 4 в электронном виде доступны по ссылке: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/supplementary/16534/63891>.

Группа 1. Испытания образцов каменной соли, отобранных в глубокой скважине, были выполнены при величинах обжатия ($p_h = -\sigma_1 = -\sigma_2$), равных 0, 2, 3, 7 и 15 МПа соответственно. Напряжения в природном состоянии превышают величины обжатия на стадии девиаторного нагружения. Перед основной стадией увеличения девиатора напряжений в образце производилась реконсолидация [22, 23, 27]. Для рассматриваемых образцов была проведена экспресс-консолидация продолжительностью 2 ч при повышенном уровне средних напряжений 60 МПа (природный уровень – 25 МПа). Изменение объема для образцов данной группы учитывалось посредством измерения продольного перемещения штока по главной оси и объема масла в камере.

Результаты обработки представлены на рис.1, относительная погрешность определялась согласно следующей формуле, в которой за эталонную величину принималось значение подхода 3:

$$\delta = \left| \frac{\sigma_3 - \sigma_{3, ref}}{\sigma_{3, ref}} \right|,$$

где σ_3 – величина наименьшего главного напряжения согласно подходу; $\sigma_{3, ref}$ – эталонная величина наименьшего главного напряжения.

Во всех испытаниях наблюдался выраженный переход к дилатансии при всех величинах обжатия, что является типичным для деформирования подобных геоматериалов [11, 45, 46]. Величина относительной погрешности по отношению к эталонному методу для подхода 1 составила 24,8 %, а для подхода 2 – 2,5 %.

Группа 2. Испытания образцов каменной соли, отобранных в глубоких скважинах, были выполнены при величинах обжатия ($p_h = -\sigma_1 = -\sigma_2$), равных 5, 10 и 15 МПа. Напряжения в природном состоянии превышают величины обжатия. Реконсолидацию при этих испытаниях лаборатория не выполняла. Изменение объема учитывалось по данным систем измерения продольных и окружных деформаций на полномостовых тензометрических датчиках.

Результаты обработки представлены на рис.2 в форме, аналогичной группе 1. Образцы данной группы даже при низких обжатиях на всем интервале деформирования испытывали контракцию (уменьшались в объеме), что обычно нехарактерно для каменной соли, но фиксировалось на большом объеме испытаний. В таком случае учет $\bar{\varepsilon}_v$ приводит к менее консервативным величинам по сравнению с коррекцией при $\bar{\varepsilon}_v = 0$. Предположительно, подобное поведение вызвано технологической нарушенностью образцов.

Также во время испытаний происходил срыв датчиков поперечных деформаций, а изменение объема жидкости в камере не протоколировалось, что не позволяет произвести коррекцию напряжений во всем диапазоне деформирования. В связи с этим величины относительной погрешности и график рис.2, δ представлены для момента, предшествующего срыву датчика. При этом, очевидно, величины погрешности будут существенно занижены.

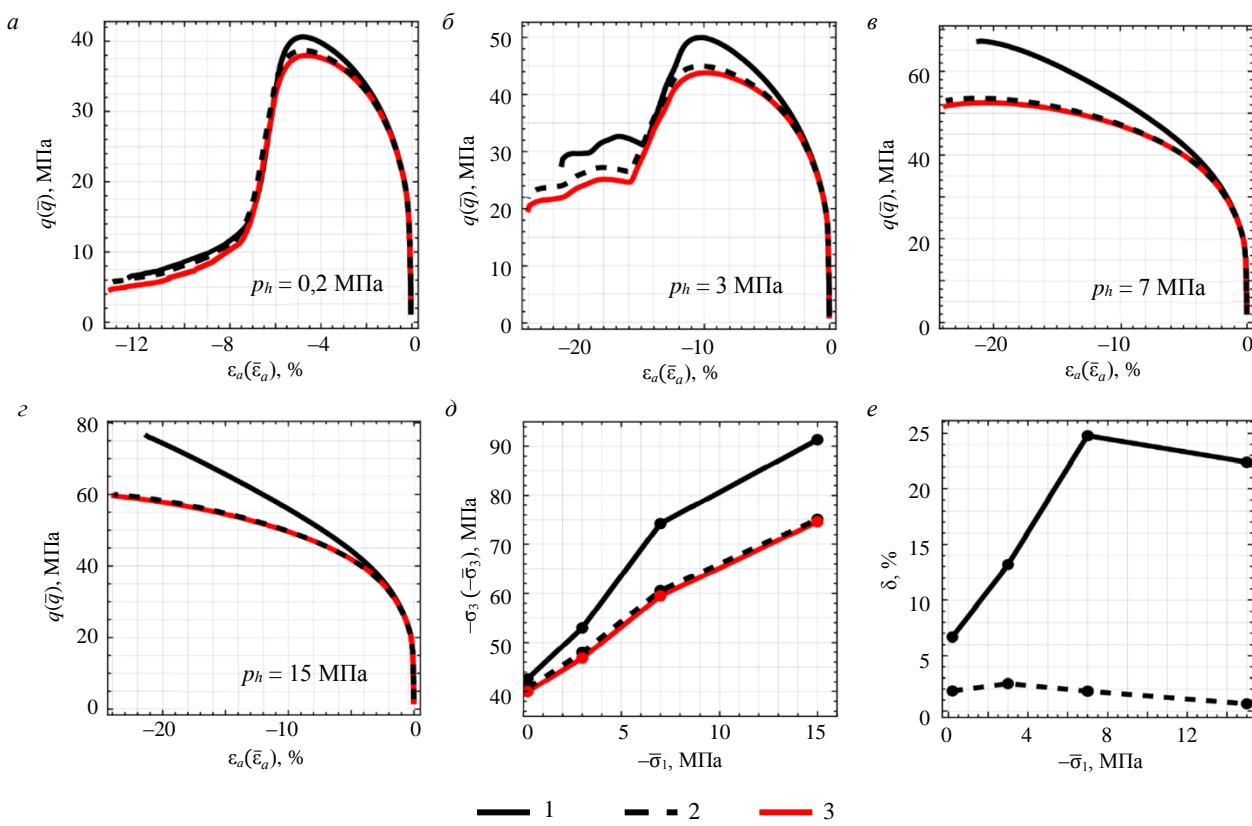


Рис.1. Результаты обработки трехосных испытаний группы 1: кривые деформирования для различных величин обжатия (a-*г*); графики прочности в главных напряжениях (*д*) и относительной погрешности подходов (*е*)

1 – подход 1 (исходная кривая); 2 – подход 2 (коррекция при $\bar{\varepsilon}_v = 0$); 3 – подход 3 (при $\bar{\varepsilon}_v \neq 0$)

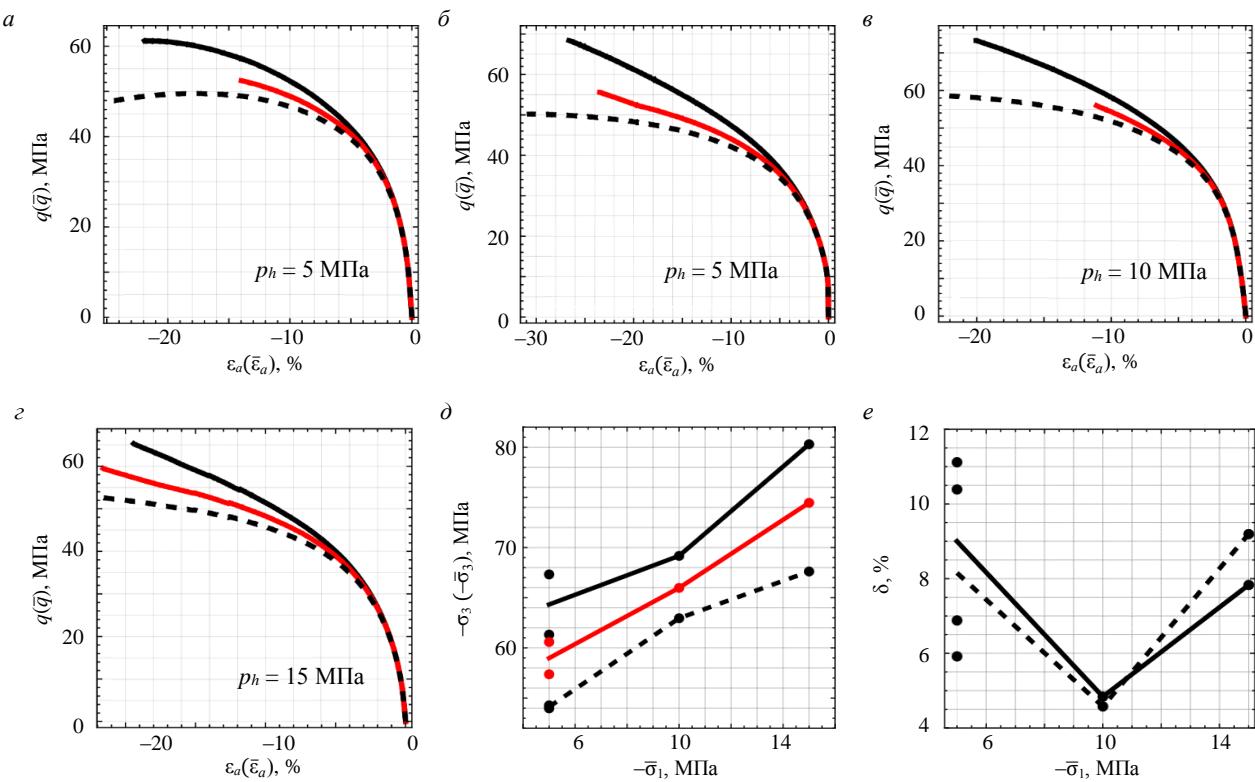


Рис.2. Результаты обработки трехосных испытаний группы 2: кривые деформирования для различных величин обжатия (a-*г*); графики прочности в главных напряжениях (*д*) и относительной погрешности подходов (*е*)

Условные обозначения см. на рис.1

Группа 3. Испытания техногенного геоматериала, который представлял собой искусственно сформованную смесь соляных отходов и небольшого количества цементов и добавок на сроке твердения 28 сут. Испытания образцов были выполнены при величинах обжатия ($p_h = -\sigma_1 = -\sigma_2$), равных 2, 6, 7 и 12 МПа. Изменение объема учитывалось по данным с систем измерения продольных и окружных деформаций на полномостовых тензометрических датчиках, а также объема масла в камере.

Так как образцы до исследования не испытывали никаких нагрузок, то наблюдалась затухающая объемная ползучесть образцов на стадии приложения всесторонней нагрузки. Для устранения влияния ползучести образцы перед испытанием стабилизировались путем консолидации в течение 15 мин при заданной для испытания величине обжатия. Поскольку образцы в данной группе состояли из различных смесей с некоторым отличием механического поведения, результаты приведены обобщенно, что соответствует целям и задачам статьи.

Результаты обработки представлены на рис.3 в форме, аналогичной группе 1. Интервалы деформаций схожи и с исследованиями других составов солесодержащих техногенных материалов [47], а также могут идеализированно отражать механическое поведение природных смешанных горных пород со скелетом из хрупких и прочных пород с высоким содержанием включений соляных пород.

Группа 4. Длительные трехосные испытания образцов соляных пород, выполненные при величинах обжатия ($p_h = -\sigma_1 = -\sigma_2$), равных 2 МПа для каменной соли и 6 МПа для сильвинита. Дополнительная стадия реконсолидации в образцах не проводилась. Изменение объема учитывалось по данным систем измерения продольных и окружных деформаций на полномостовых тензометрических датчиках.

Результаты обработки представлены на рис.4 для каменной соли и рис.5 – для сильвинита. Относительная погрешность определялась для действующих осевых напряжений, а эталонным принимались значения подхода 1, так как они характеризуют целевые величины напряжений (схема испытания подразумевала поддержание постоянного уровня напряжений). Таким образом графики рис.4, *в*, *е*, *и* и рис.5, *в* следует интерпретировать как величины относительных потерь наименьшего главного напряжения σ_3 по отношению к требуемому заданному уровню напряжений из-за отсутствия коррекции в процессе испытания.

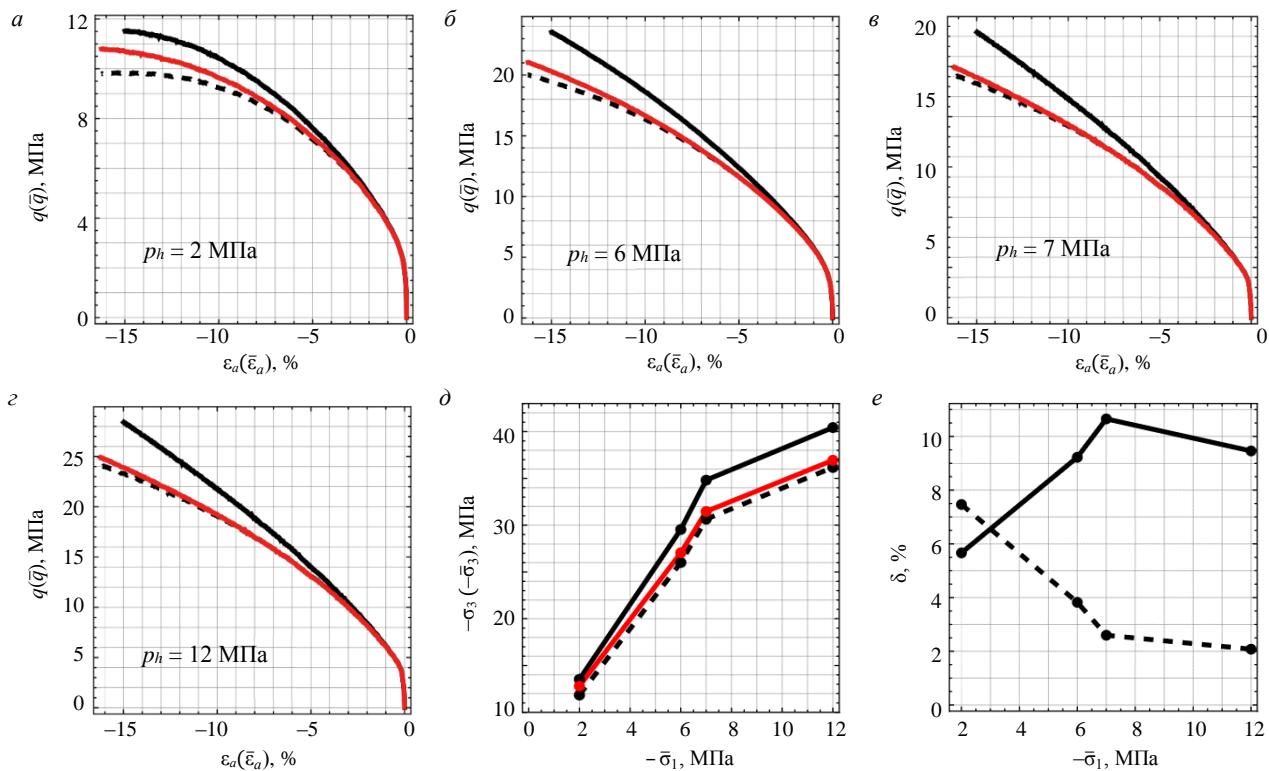


Рис.3. Результаты обработки трехосных испытаний группы 3: кривые деформирования для различных величин обжатия (a-*в*); графики прочности в главных напряжениях (*д*) и относительной погрешности подходов (*е*)

Условные обозначения см. на рис.1

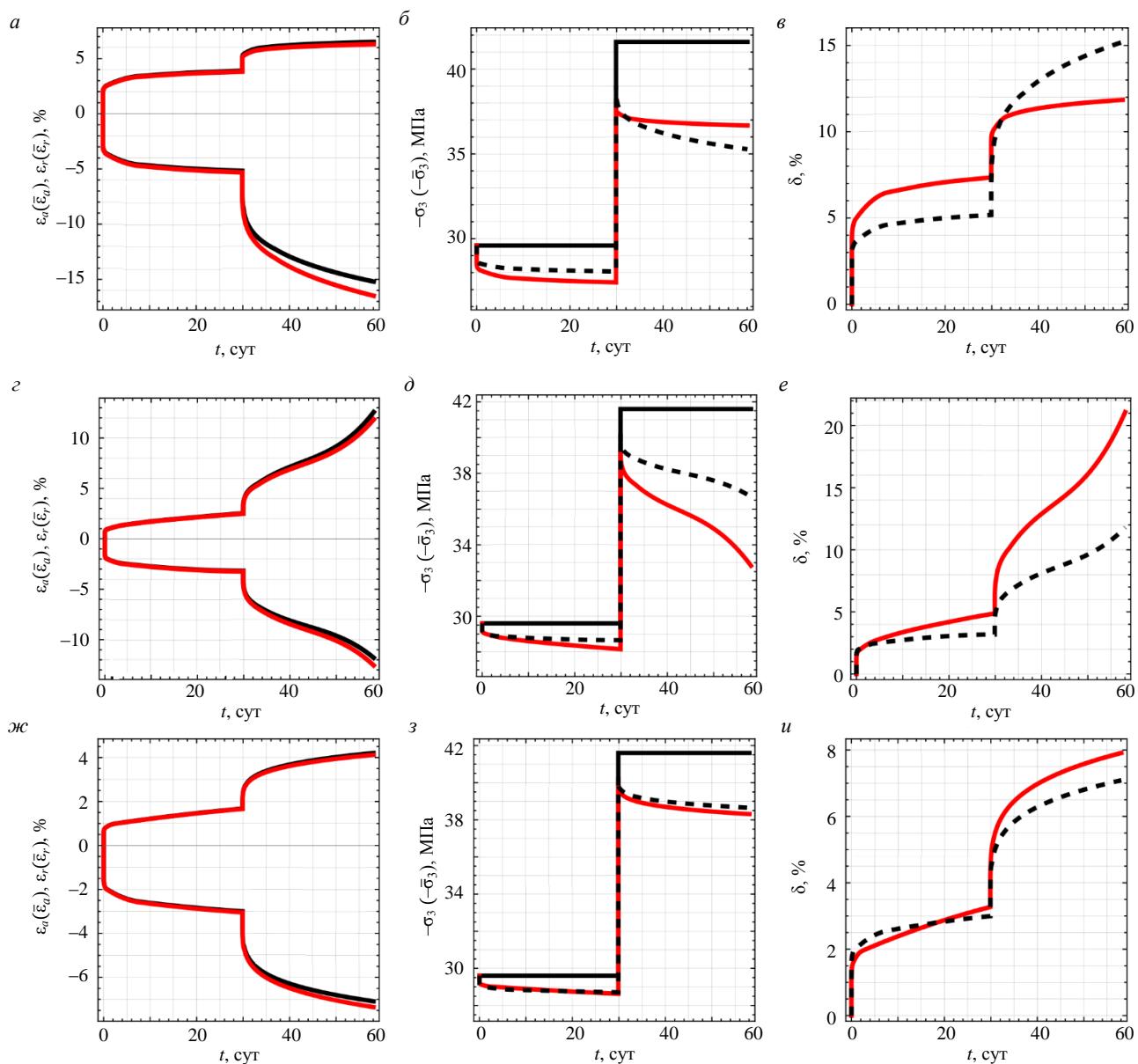


Рис.4. Результаты обработки трехосных испытаний группы 5 (каменная соль): кривые деформирования (a, c, jc), соответствующие им действующие осевые напряжения (b, d, z), относительные потери напряжений (e, e, u) при $p_h = 2$ МПа

Условные обозначения см. на рис.1

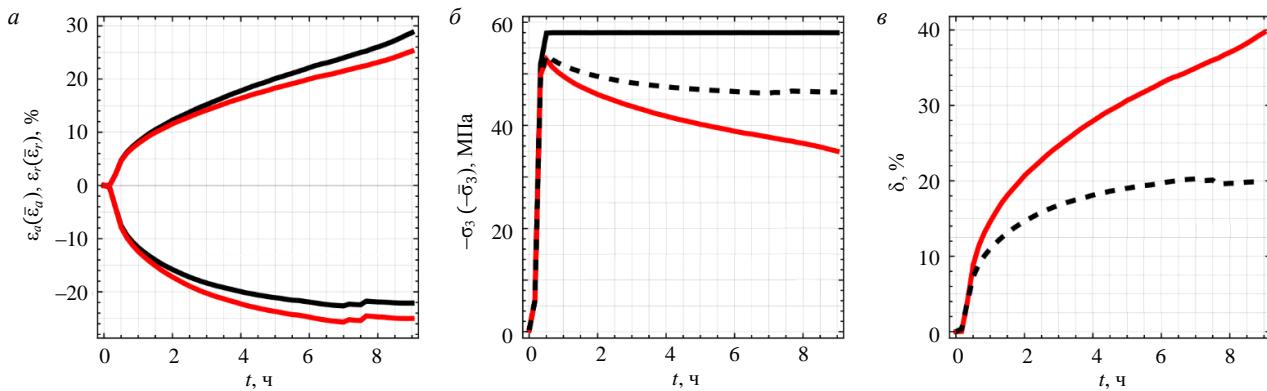


Рис.5. Результаты обработки трехосных испытаний группы 5 (сильвинит): кривые деформирования (a), соответствующие им действующие осевые напряжения (b) и относительные потери напряжений (c) при $p_h = 6$ МПа

Условные обозначения см. на рис.1

Выводы

Точка зрения авторов на основании использования исходных данных базируется на следующих положениях:

- Трехосные испытания соляных пород по методикам основных стандартов без дополнений и/или отступлений могут приводить к нефизическим величинам в протоколах испытаний. Использование подобных конечных результатов, полученных без учета рассмотренных особенностей соляных пород, может приводить к существенным рискам при реализации инженерных проектов.
- Нестандартизированность подобных отступлений и дополнений приводит к увеличению вариаций результатов (при работе с различными лабораториями) вплоть до их полной несопоставимости.
- При определении механического поведения соляных пород необходимо учитывать формоизменение образцов в процессе деформации. Этого можно достичь путем введения уравнений коррекции. В мировой практике для соляных пород наиболее часто применяется уравнение, использующее подход неизменности объема образца. Пренебрежение объемными деформациями может давать высокие погрешности, что не позволяет игнорировать их во всех случаях.
- В уравнения коррекции должны вводиться известные коэффициенты для учета дефектных форм («бочкование» всего образца или его участка) при их реализации.
- Нехарактерная контракция образцов при испытаниях (группа 2) связана с техногенными дефектами и разуплотнением по сравнению с природным состоянием. Так как соляные породы в некоторой степени позволяют залечивать подобные дефекты, в нормативных документах должны приводиться рекомендации к проведению стадии реконсолидации и критериям ее окончания. Разработка таких рекомендаций требует дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.
- Так как трехосные испытания соляных пород нередко связаны с деформациями уровня 20-30 % [48], применение меры деформаций Генки при протоколировании испытаний несколько упрощает анализ и интерпретацию результатов, их дальнейшее использование при математическом моделировании [49-51]. При сохранении в стандартах исключительно одного подхода с использованием номинальной относительной деформации (1) требуется учитывать эффекты формоизменения при больших деформациях, рассмотренных в формулах (1), (8) и (9). Предлагается рекомендовать протоколирование результатов с мерой деформаций на выбор заказчика – при указании принятой меры в протоколе.
- Температура соляных массивов в природных условиях и при эксплуатации сооружений способна существенно отличаться от температуры в лаборатории, что может оказать значительное влияние на результаты испытаний, особенно длительных. Температура испытания должна обязательно указываться в протоколах, а также при необходимости в составе задания для лаборатории. Учитывая значимость данного фактора, проведение дополнительных исследований для его количественных оценок представляется актуальным, особенно в контексте повсеместного увеличения глубин освоения подземного пространства.
- Важной частью результатов испытаний соляных пород являются не только характеристики прочности, но и деформируемости. Это обуславливается современными техническими вызовами, требующими применения весьма продвинутых математических моделей. Кроме того, предельная нагрузка не всегда может быть достигнута в физически обоснованном диапазоне деформаций, что не делает результаты испытания менее ценными.
- Обновленные стандарты на трехосное сжатие должны описывать методы определения не только условно-мгновенных характеристик прочности и деформируемости, а также дополняться методическими требованиями к длительным испытаниям.
- В настоящее время активно развивается нормирование в области методов испытаний [52, 53]. Тем не менее действующий межгосударственный стандарт на трехосное сжатие серии «Породы горные» не соответствует современной и уже установившейся инженерной практике. Современный национальный стандарт серии «Грунты», несмотря на существенные дополнения, не отражает некоторые особенности, связанные с соляными или смешанными с ними породами. Ввиду широкой распространенности подобных пород видится необходимым учет указанных положений при доработке стандарта в области трехосного сжатия и утверждения его в статусе межгосударственного.



Заключение

В статье показана критическая важность пересмотра существующих стандартов в части испытаний соляных и солесодержащих пород и геоматериалов, обладающих аналогичными механическими особенностями. Анализ типовых результатов испытаний различных лабораторий выявил значительные недостатки существующих методик трехосных испытаний соляных горных пород. Установлено, что использование традиционных подходов, не учитывающих формоизменение, значительные пластические деформации, изменения объема, фактических температурных условий эксплуатации и возможности применения специфических свойств подобных материалов для заlewивания техногенных дефектов образцов может приводить к значительным ошибкам. Представлены экспериментальные данные с переинтерпретацией и сравнением результатов, которые показывают численно высокие величины относительной ошибки и подтверждают необходимость внедрения усовершенствованных методик для обеспечения более точных и надежных данных.

Доступ к данным

Материалы результатов испытаний (исходные данные ε_a , ε_r , σ_1 , σ_3 для групп 1-3, а также t , ε_a , ε_r , σ_1 , σ_3 для группы 4) для интерпретации и воспроизведения доступны по ссылке: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/supplementary/16534/63891>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карев В.И., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Экспериментальные исследования процессов деформирования, разрушения и фильтрации в горных породах // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2021. № 5. С. 3-26. DOI: 10.31857/S0572329921050056
2. Hunsche U., Albrecht H. Results of true triaxial strength tests on rock salt // Engineering Fracture Mechanics. 1990. Vol. 35. Iss. 4-5. P. 867-877. DOI: 10.1016/0013-7944(90)90171-C
3. Ильинов М.Д., Петров Д.Н., Карманский Д.А., Селихов А.А. Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов горных пород при термобарических условиях больших глубин // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 4. С. 290-302. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150
4. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб: Наука, 2001. 343 с.
5. Shi-Yuan Li, Urai J.L. Rheology of rock salt for salt tectonics modeling // Petroleum Science. 2016. Vol. 13. Iss. 4. P. 712-724. DOI: 10.1007/s12182-016-0121-6
6. Константинова С.А., Аптуков В.Н. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород. Новосибирск: Наука, 2013. 191 с.
7. Зильберштейн В.Г., Зильберштейн В.В., Наймарк О.Б. Разрушение соляных пород. М.: Наука, 1992. 142 с.
8. Schleider Z., Burliga S., Urai J.L. Dynamic and static recrystallization-related microstructures in halite samples from the Kłodawa salt wall (central Poland) as revealed by gamma-irradiation // Neues Jahrbuch für Mineralogie. 2007. Vol. 184. Iss. 1. P. 17-28. DOI: 10.1127/0077-7757/2007/0079
9. Urai J.L., Spiers C.J. The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation // The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt. CRC Press, 2007. P. 149-158. DOI: 10.1201/9781315106502
10. Скворцова З.Н. Рекристаллизационная ползучесть как форма адсорбционного пластифицирования // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2013. Т. 49. № 5. С. 471-478. DOI: 10.7868/S0044185613050082
11. van Oosterhout B.G.A., Hangx S.J.T., Spiers C.J. Mechanisms of dilatancy in rock salt at the grain-scale and implications for the dilatancy boundary // The Mechanical Behavior of Salt X. CRC Press, 2022. P. 25-37. DOI: 10.1201/9781003295808-03
12. Vandeginste V., Yukun Ji, Buysschaert F., Anoyatis G. Mineralogy, microstructures and geomechanics of rock salt for underground gas storage // Deep Underground Science and Engineering. 2023. Vol. 2. Iss. 2. P. 129-147. DOI: 10.1002/dug2.12039
13. Fan Yang, Jinyang Fan, Zhenyu Yang et al. Plasticity analysis and constitutive model of salt rock under different loading speeds // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 67. № 107583. DOI: 10.1016/j.est.2023.107583
14. Lu Wang, Jianfeng Liu, Huining Xu, Yangmengdi Xu. Research on Confining Pressure Effect on Mesoscopic Damage of Rock Salt Based on CT Scanning // Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Rock Mechanics and Rock Engineering. Springer, 2018. P. 254-262. DOI: 10.1007/978-981-13-0113-1_28
15. Holländer R., Schröter U.-C., Wilke F.H. Experiences with slim Solution Mining Caverns for ventilation purposes in a potash mine // Kali und Steinsalz. Verband der Kali- und Salzindustrie, 2012. Iss. 1. P. 32-37.
16. Woods P.J.E. The geology of Boulby Mine // Economic Geology. 1979. Vol. 74. № 2. P. 409-418. DOI: 10.2113/gsecongeo.74.2.409
17. Баряж А.А., Смирнов Э.В., Квяткин С.Ю., Тенисон Л.О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования // Горная промышленность. 2022. № 1. С. 41-50. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-41-50
18. Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л. Особенности деформирования каменной соли при повышенных температурах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 1. С. 69-76. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-69-76

19. Шкуратник В.Л., Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л. Экспериментальное исследование зависимостей акусто-эмиссионных и реологических характеристик каменной соли от напряжений и температуры // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 4. С. 20-26. [DOI: 10.15372/FTP_RPI_2019_0403](https://doi.org/10.15372/FTP_RPI_2019_0403)
20. Salzer K., Günther R.-M., Minkley W. et al. Joint project III on the comparison of constitutive models for the mechanical behavior of rock salt II. Extensive laboratory test program with clean salt from WIPP // Mechanical Behaviour of Salt VIII. CRC Press, 2015. P. 3-12. [DOI: 10.1201/b18393](https://doi.org/10.1201/b18393)
21. Sriapai T., Walsri C., Fuenkajorn K. Effect of temperature on compressive and tensile strengths of salt // ScienceAsia. 2012. Vol. 38. P. 166-174. [DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2012.38.166](https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2012.38.166)
22. Günther R.-M., Salzer K., Popp T., Lüdeling C. Steady-State Creep of Rock Salt: Improved Approaches for Lab Determination and Modelling // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015. Vol. 48. Iss. 6. P. 2603-2613. [DOI: 10.1007/s00603-015-0839-2](https://doi.org/10.1007/s00603-015-0839-2)
23. Hansen F., Popp T., Wieczorek K., Stührenberg D. Salt reconsolidation applied to repository seals // Mechanical Behaviour of Salt VIII. CRC Press, 2015. P. 179-189. [DOI: 10.1201/b18393](https://doi.org/10.1201/b18393)
24. Fuenkajorn K., Phueakphum D. Laboratory assessment of healing of fractures in rock salt // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2011. Vol. 70. Iss. 4. P. 665-672. [DOI: 10.1007/s10064-011-0370-y](https://doi.org/10.1007/s10064-011-0370-y)
25. Ильинов М.Д., Карташов Ю.М., Карманский А.Т., Козлов В.А. Влияние нарушенности горных пород на их реологические свойства // Записки Горного института. 2010. Т. 185. С. 31-36.
26. Антуков В.Н., Волегов С.В. Моделирование процесса формирования остаточных напряжений и поврежденности в образцах соляных пород, полученных из керна // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 3. С. 3-11. [DOI: 10.15372/FTP_RPI_2020_0301](https://doi.org/10.15372/FTP_RPI_2020_0301)
27. Hunsche U. Uniaxial and Triaxial Creep and Failure Tests on Rock: Experimental Technique and Interpretation // Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials. Springer, 1994. P. 1-53. [DOI: 10.1007/978-3-7091-2710-0_1](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2710-0_1)
28. Тавостин М.Н., Кошелев А.Е., Осипов Ю.В. Исследование физико-механических свойств каменной соли с учетом предварительного всестороннего нагружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 2. С. 89-96.
29. Wolters R., Sun-Kurczinski J.Q., Düsterloh U. et al. WEIMOS: Laboratory investigation and numerical simulation of damage reduction in rock salt // The Mechanical Behavior of Salt X. CRC Press, 2022. P. 190-199. [DOI: 10.1201/9781003295808-18](https://doi.org/10.1201/9781003295808-18)
30. Lüdeling C., Günther R.-M., Hampel A. et al. WEIMOS: Creep of rock salt at low deviatoric stresses // The Mechanical Behavior of Salt X. CRC Press, 2022. P. 130-140. [DOI: 10.1201/9781003295808-13](https://doi.org/10.1201/9781003295808-13)
31. Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: Revised version // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1983. Vol. 20. Iss. 6. P. 285-290. [DOI: 10.1016/0148-9062\(83\)90598-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)90598-3)
32. Aydan Ö., Ito T., Özbay U. et al. ISRM Suggested Methods for Determining the Creep Characteristics of Rock // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014. Vol. 47. Iss. 1. P. 275-290. [DOI: 10.1007/s00603-013-0520-6](https://doi.org/10.1007/s00603-013-0520-6)
33. La Rochelle P., Leroueil S., Trak B. et al. Observational Approach to Membrane and Area Corrections in Triaxial Tests // Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock. ASTM International, 1988. P. 715-731. [DOI: 10.1520/STP29110S](https://doi.org/10.1520/STP29110S)
34. Lade P.V. Triaxial Testing of Soils. Wiley-Blackwell, 2016. 432 p. [DOI: 10.1002/9781119106616](https://doi.org/10.1002/9781119106616)
35. Паньков И.Л., Морозов И.А. Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 510-519. [DOI: 10.31897/PMI.2019.5.510](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.510)
36. Асанов В.А., Баряж А.А., Жигалкин В.М. и др. Лабораторное исследование деформирования соляных пород // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 14-18.
37. Guan Wang, Wei Xing, Jianfeng Liu, Lingzhi Xie. Comparison of Triaxial Compression Short-Term Strength Tests and Data Processing Methods for Rock Salt // Clean Energy Systems in the Subsurface: Production, Storage and Conversion. Springer, 2013. P. 305-315. [DOI: 10.1007/978-3-642-37849-2_25](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37849-2_25)
38. Renbo Gao, Fei Wu, Jie Chen et al. Accurate characterization of triaxial deformation and strength properties of salt rock based on logarithmic strain // Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 51. № 104484. [DOI: 10.1016/j.est.2022.104484](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104484)
39. Yu Bian, Jianfeng Liu, Guosheng Ding et al. Different Methods to Evaluate Strength from Compression Tests for Rock Salt // Clean Energy Systems in the Subsurface: Production, Storage and Conversion. Springer, 2013. P. 281-291. [DOI: 10.1007/978-3-642-37849-2_23](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37849-2_23)
40. Rouabhi A., Labaune P., Tijani M. et al. Phenomenological behavior of rock salt: On the influence of laboratory conditions on the dilatancy onset // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 4. P. 723-738. [DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.12.011](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.12.011)
41. Карапев М.А., Селихов А.А., Бычин А.К. Лабораторные исследования и анализ математических моделей деформирования раздробленных соляных пород // Известия Уральского государственного горного университета. 2023. Вып. 4 (72). С. 94-105. [DOI: 10.21440/2307-2091-2023-4-94-105](https://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-4-94-105)
42. Hinze M., Sinan Xiao, Schmidt A., Nowak W. Experimental evaluation and uncertainty quantification for a fractional viscoelastic model of salt concrete // Mechanics of Time-Dependent Materials. 2023. Vol. 27. Iss. 1. P. 139-162. [DOI: 10.1007/s11043-021-09534-9](https://doi.org/10.1007/s11043-021-09534-9)
43. Sturm P., Moye J., Gluth G.J.G. et al. Properties of alkali-activated mortars with salt aggregate for sealing structures in evaporite rock // Open Ceramics. 2021. Vol. 5. № 100041. [DOI: 10.1016/j.oceram.2020.100041](https://doi.org/10.1016/j.oceram.2020.100041)
44. Jantschik K., Czaikowski O., Moog H.C., Wieczorek K. Investigating the sealing capacity of a seal system in rock salt (DOPAS project) // Kerntechnik. 2016. Vol. 81. Iss. 5. P. 571-585. [DOI: 10.3139/124.110721](https://doi.org/10.3139/124.110721)
45. Баряж А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 204 с.
46. Хлопцов В.Г., Семёнова М.В., Хлопцов Д.В. Механические свойства каменной соли. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2022. 104 с.
47. Карапев М.А., Селихов А.А., Бычин А.К. Лабораторное исследование закладочного материала на основе галитовых отходов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 23. С. 180-188. [DOI: 10.26160/2658-3305-2023-23-180-188](https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-23-180-188)



48. Осипов Ю.В., Вознесенский А.С. Определение реологических свойств бишофита по данным трехосных испытаний // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 6. С. 15-26. [DOI: 10.15372/FTPRPI20220602](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220602)
49. Козловский Е.Я., Журавков М.А. Исследование напряженно-деформированного состояния различных типов крепи шахтного ствола в массиве карналлитовых пород // Механика машин, механизмов и материалов. 2023. № 2 (63). С. 53-60. [DOI: 10.46864/1995-0470-2023-2-63-53-60](https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-53-60)
50. Аптуков В.Н., Волегов С.В. Моделирование процесса деформирования и разрушения образцов соляных пород при сжатии // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2017. Вып. 3 (38). С. 49-54. [DOI: 10.17072/1993-0550-2017-3-49-54](https://doi.org/10.17072/1993-0550-2017-3-49-54)
51. Karasev M.A., Protosenya A.G., Katerov A.M., Petrushin V.V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2022. Vol. 37. № 1. P. 151-162. [DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13](https://doi.org/10.17794/rgn.2022.1.13)
52. Труфанов А.Н., Ростовцев А.В. Актуальные изменения в области стандартов по определению механических характеристик грунтов // Международный строительный конгресс. Наука. Инновации. Цели. Строительство: Сборник тезисов докладов. М.: НИЦ «Строительство», 2023. С. 118-119. [DOI: 10.37538/2949-219X-2023-118-119](https://doi.org/10.37538/2949-219X-2023-118-119)
53. Ильинов М.Д., Корицунов В.А., Постухов Г.Б., Шоков А.Н. Комплексные экспериментальные исследования механических свойств горных пород: проблемы и пути их решения // Горный журнал. 2023. № 5. С. 11-18. [DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02](https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.02)

Авторы: Евгений Ярославович Козловский, аспирант (Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь), эксперт (ООО «ПроТех Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия), jkazlouski@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-9496-7148>, Михаил Анатольевич Журавков, д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой (Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь), <https://orcid.org/0000-0002-7420-5821>, Сергей Иванович Богдан, канд. техн. наук, руководитель управления (ООО «ПроТех Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0009-0001-3636-7483>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Ассоциация грейзенов (цвиттеров) и турмалинитов в гранитах plutона Северный (Чукотка, Россия)

В.И.Алексеев¹✉, Ю.Б.Марин¹, И.А.Бакшев²

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

² Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Алексеев В.И., Марин Ю.Б., Бакшев И.А. Ассоциация грейзенов (цвиттеров) и турмалинитов в гранитах plutона Северный (Чукотка, Россия) // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 170-183. [EDN ACOLQC](#)

Аннотация

В plutоне Северный на Чукотке с помощью геологического картирования и минералого-петрографических исследований установлена ассоциация редкометалльно-оловоносных топаз-циннвальдитовых грейзенов (цвиттеров) и турмалиновых метасоматитов, которые генетически связаны с магматизмом, продуцирующим интрузии Li-F гранитов. Исследованы размещение, состав цвиттеров и мусковит-кварц-турмалиновых метасоматитов, образующих ореолы вокруг кварц-турмалиновых жил. Установлен широкий спектр минеральных видов турмалина, встречающегося в пегматоидных гнездах лейкогранитов (турмалин I), дорудных жилах кварц-турмалиновых метасоматитов с флюоритом (турмалин II), раннерудных жилах кварц-турмалиновых метасоматитов (турмалин III), рудных турмалиновых и кварцевых жилах (турмалин IV). Выявлена эволюция турмалина от Sc-содержащего фтор-шерла в дорудных метасоматитах до окси-шерла и оловосодержащего ферро-бозитита в оловорудных метасоматитах при постепенном повышении содержания лития и переменной степени окисления железа. В цвиттерах, мусковит-кварц-турмалиновых метасоматитах и жилах турмалинитов отмечено сочетание оловянной и редкометалльной минерализации. Результаты исследования могут быть использованы для оценки минерагенического потенциала и разработки критериев прогнозирования редкометалльного (Nb, Ce, Y, W, Bi) оруденения plutона Северный.

Ключевые слова

грейзен; цвиттер; турмалинит; циннвальдит; турмалин; шерл; фойтит; ферро-бозит; рудоносность; олово; редкие металлы; литий-фтористый гранит; Чукотка

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты 11-05-00868-а, 14-05-00364, 20-15-50064), Минобрнауки (Государственный контракт № 14.740.11.0192, Государственное задание № 5.2115.2014/К), госбюджетной темы «Минералогическое изучение месторождений Арктической зоны России с целью их комплексного освоения» (№ 121061600049-4).

Поступила: 16.05.2024

Принята: 16.07.2025

Онлайн: 19.12.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

Дальний Восток лидирует в России по запасам стратегических видов минерального сырья, таких как олово, золото, флюорит; намечаются перспективы выявления редкометалльного оруденения [1, 2]. Большой интерес представляют рудные районы Чукотки: Баймская рудная зона (крупное Au-Mo-Cu месторождение Песчанка), Кайемравеемский рудный узел (крупное Au-Ag месторождение Купол), Иультинский рудный узел (крупное Sn-W месторождение Светлое), Ичувеем-Паляваамский рудный район (крупное Au месторождение Майское) [3-5]. Внимание геологоразведчиков привлекает гранитный plutон Северный в Чаунском районе Чукотки [6], южнее которого расположена группа крупных месторождений олова – Пыркакайские штокверки [1].

Наряду с совершенствованием добычи и переработки полезных ископаемых, важным направлением развития минерально-сырьевой базы является «диверсификация минерагенического потенциала территорий. Планирование поисковых работ на нетрадиционные геолого-промышленные типы месторождений для отдельных районов с целью выявления крупных и уникальных объектов» [1]. Научно-методическим обеспечением таких работ служат данные о составе и рудоносности гидротермально-метасоматических образований территорий [7].



В 1990-2011 гг. Санкт-Петербургским горным университетом были проведены экспедиции на Чукотку под руководством профессора Ю.Б.Марина. В гранитном plutоне Северный выполнено крупномасштабное геологическое картирование метасоматитов. На ряде поисковых участков закартированы поля цвиттеров и изучены жилы оловорудных турмалинитов, выявленные Чунским горно-геологическим предприятием. Цвиттеры – наиболее высокотемпературные и высокофтористые метасоматиты семейства грэзенов, составляющие основу многих редкометалльных и вольфрамово-оловорудных месторождений [8, 9]. Турмалиниты – существенно турмалиновые метасоматиты, характерные для крупных оловорудных месторождений. Сочетание цвиттеров и турмалинитов наблюдается на крупных редкометалльно-оловянных месторождениях [6, 10, 11]. Цель статьи – минералого-петрографическая характеристика ассоциации цвиттеров и турмалинитов гранитного plutона Северный как основа оценки минерагенического потенциала района.

Фактический материал и методы

По методике, рекомендованной в [11, 12], проведены минералого-петрографические исследования более 3000 образцов и 2000 шлифов и аншлифов (микроскопы ПОЛАМ Р-312, Leica DM2500 M, Olympus BX51). В основу исследований заложена структурно-геологическая, петрографическая, минералогическая, геохимическая и минерагеническая информация, полученная при крупномасштабном геологическом картировании.

С целью диагностики и фациального расчленения метасоматитов исследованы их структурно-текстурные особенности, состав и анатомия породообразующих (темные слюды, турмалин) и акцессорных (касситерит, вольфрамоиксиолит, алланит и др.) минералов с учетом работ [13-15]. Как показывает практика, генетическое исследование минералов и минеральных агрегатов позволяет получить информацию о происхождении и условиях образования минералов [16-18]. Для установления генезиса и эволюции метасоматитов использованы принципы онтогенетического анализа минеральных индивидов и агрегатов, разработанные научной школой Санкт-Петербургского горного университета [14, 19].

Изучение акцессорных и породообразующих минералов метасоматитов выполнено методом SEM-EDS на электронных микроскопах JEOL JSM-6460LV, JSM-7001F, LB-4500, Cameca MS-46 Горного университета и Института Карпинского при ускоряющем напряжении 15-30 кВ, токе – 1,5 нА. Интерпретация – с помощью программного обеспечения INCA Energy (Oxford Instruments Ltd.). Составы темных слюд измерены электронно-зондовым микроанализатором JEOL JXA-8230 в Санкт-Петербургском горном университете (аналитик Е.В.Пигова). Условия съемки – ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока 100 нА. В качестве стандартов использованы роговая обманка (Si, Al, Ca, Mg, Fe), ортоклаз (K), альбит (Na), спессартин (Fe, Mn, Al), пирофанит (Mn, Ti), апатит (P), флюорит (F, Ca). Для расчета поправок использовался метод ZAF из программного обеспечения JEOL. Примеси определены методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (спектрометр ICPE-9000) и атомно-абсорбционной спектрометрии (спектрометры AA6300, AAS5EA) в ЦКП Санкт-Петербургского горного университета; пределы обнаружения – 0,001 %. Содержание Li, Rb, Cs в слюдах определено с помощью пламенной фотометрии на приборе ПФМ в Институте наук о Земле (аналитик О.В.Волина). Использован геотермометр Ti-in-biotite [20]. Классификация слюд выполнена с учетом [21]. Состав акцессорных тантало-ниобатов определен на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8230 в ЦКП Санкт-Петербургского горного университета (аналитик Е.В.Пигова). Режим WDS-анализа – ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 100 нА. В качестве стандартов использованы: колумбит (Nb), синтетический $ScVO_4$ (Sc), касситерит (Sn), $SrSO_4$ (Sr), синтетический Ta_2O_5 (Ta), TiO_2 (Ti), металлический W (W), синтетический Y-гранат (Y), циркон (Zr).

Составы турмалинов определены с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-IT500, оборудованного энергодисперсионной приставкой INCA Energy 350, в Лаборатории локальных методов исследования на кафедре петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова (аналитики Н.Н.Коротаева, В.О.Япаксурт). Условия съемки – ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока ~2 нА, диаметр пучка электронов 3 мкм. Использованы стандарты: флюорит M9 (F, Ca), жадеит M3 (Na, Al, Si), энстатит M12 (Mg), волластонит M8 (Ca), $ScPO_4$ (Sc), гематит O21 (Fe), касситерит O1 (Sn). Погрешность измерения главных и второстепенных элементов составила для оксидов 1,5 и 5 отн.%. Для процедуры коррекции использованы



ХПР поправки. Классификация турмалинов выполнена с учетом [22]. Содержание Li в турмалине измерено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерным пробоотбором с использованием масс-спектрометра Element-XR, а также приставки для лазерной абляции LSX-213 G2+ в ГЕОХИ РАН (аналитик М.О.Аносова). При измерении содержания лития использован калибровочный стандарт синтетического стекла NIST-610.

Геологическая характеристика plutona Северный

Район исследований расположен на северо-западе Чукотского автономного округа, на побережье Чаунской губы и Восточно-Сибирского моря. История его изучения началась в 1927 г. со знаменитых экспедиций С.В.Обручева. В 1936-1939 гг. экспедиции Арктического института Главсевморпути добыли сведения о россыпной и коренной оловоносности восточного побережья Чаунской губы, в том числе об оловорудных проявлениях в западном контакте plutона Северный. В южном экзоконтакте plutона открыто крупнейшее в России Пыркакайское месторождение олова.

Район исследований находится в Чаунской зоне Новосибирско-Чукотской складчатой системы, включающей верхнетриасовые сланцево-алевролитовые и верхнеюрские песчаные складчатые толщи. Зона гранитоидного магматизма, ограниченная Чаунским и Пытлянским разломами, подстилается полосой гранитизированного фундамента и включает Чаунский криптобатолит с обнаженными на поверхности выступами, среди которых гранитные plutоны Северный, Пырканаянский, Инргинайский, Янранайский, Куйвивеемский, Шелагский [6, 23]. Плутон Северный площадью 308 км² вытянут в северо-западном направлении, совпадающем с направлением складчатости. Судя по наличию останцов ороговикованной кровли и пологому (40-45°) падению контактов под вмещающие породы, глубина эрозионного среза plutона невелика. По геофизическим и структурным данным он представляет собой пластообразное тело мощностью 2-3 км с пологой кровлей.

Плутон Северный является полиформационным и образован породами четырех интрузивных комплексов: пургинского комплекса биотит-рогообманковых гранитов; ичувеемского дайкового комплекса монцогранитов, граносиенитов; чаунского комплекса, включающего главную фазу крупно- и среднезернистых лейкогранитов и дополнительную фазу мелкозернистых резкопорфировидных лейкогранитов (89,4±0,7 млн лет); пыркакайского комплекса, включающего первую фазу – штоки среднезернистых литий-фтористых гранитов (ЛФГ), и вторую фазу – силлы мелкозернистых ЛФГ мощностью 1-50 м [24]. Преобладают лейкограниты чаунского комплекса. Пыркакайский комплекс возрастом 88,0±0,7 млн лет входит в состав Дальневосточного пояса ЛФГ и является рудоносным (рис.1).

Внутри гранитного plutона развиты разрывные нарушения северо-западного и субмеридионального направлений, а также оперяющие субширотные сдвиги-сбросы и пологозалегающие разрывные нарушения. Флюидоконтролирующими и рудолокализующими являются субмеридиональные разрывные нарушения в верховьях рек Ергувеем и Глубокая (рис.1).

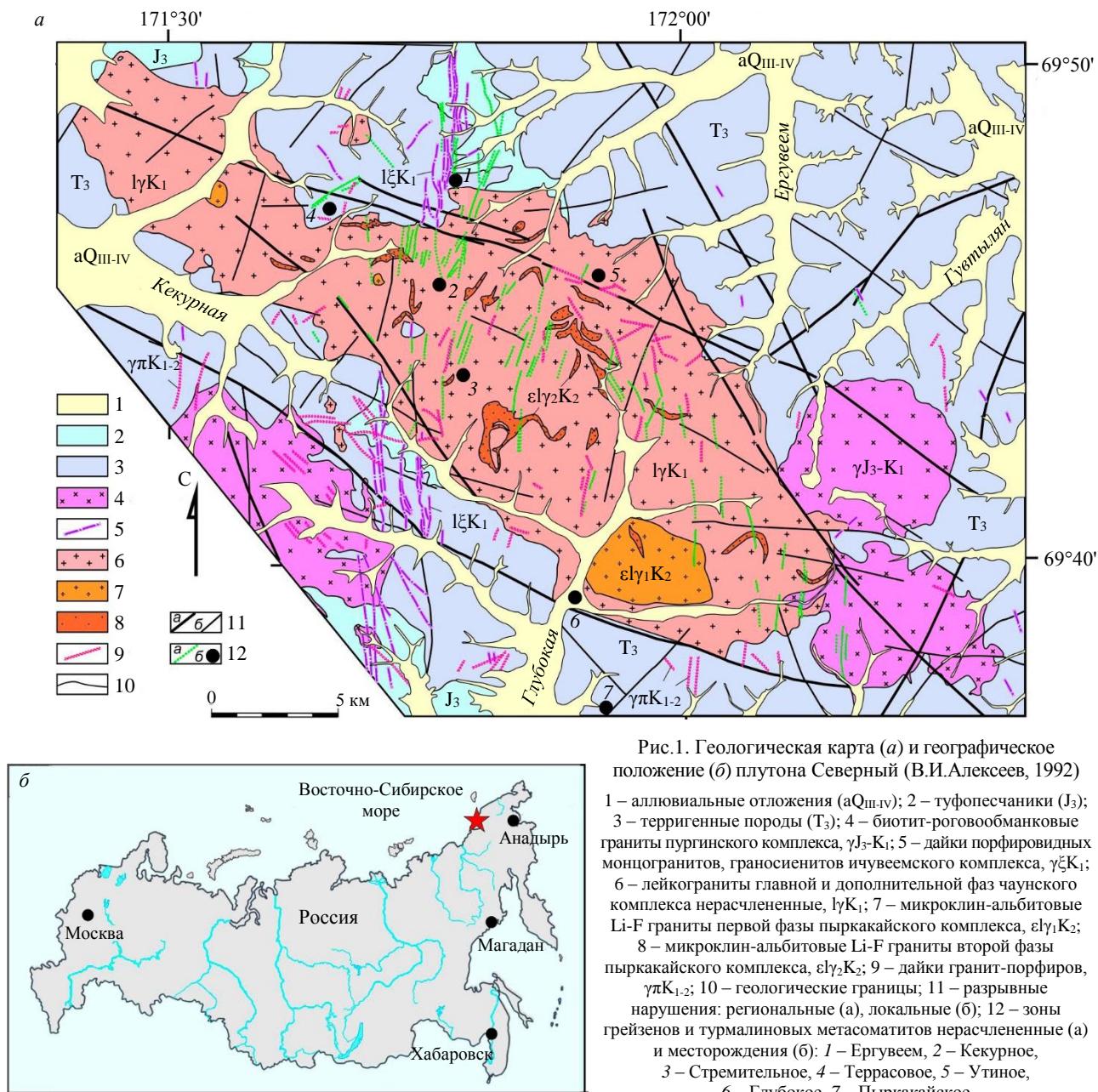
Петрографическая характеристика цвиттеров и турмалинитов

В результате полевых и камеральных исследований в plutоне Северный установлены пять групп метасоматитов: альбититы, грэйзены (цвиттеры), турмалиниты, хлорититы, аргиллизиты. Наиболее распространены и являются предметом исследования редкометалльные цвиттеры и редкоземельно-оловоносные турмалиниты.

Цвиттеры представляют собой специфические темнослюдистые метасоматиты, состоящие из триоктаэдрических слюд циннвальдита* (литиевого сидерофиллита), кварца и топаза [9]. Главный объем этой минерализации распределен по всей площади главного купола plutона Северный в виде слабых изменений лейкогранитов чаунского комплекса. Содержание новообразованных минералов в биотитовых лейкогранитах, %: кварц 1-10, циннвальдит 1-5, топаз 0,1-3, флюорит 0-0,6. Установлены признаки цвиттеризации биотитовых лейкогранитов чаунского комплекса [16, 25]:

- Наличие двух видов слюды – темно-бурого биотита и более светлого оранжево-бурого циннвальдита II (метасоматический циннвальдит цвиттеров). Реликты первичного биотита наблюдаются

* Циннвальдит – темная триоктаэдрическая Li-содержащая слюда ряда сидерофиллита $KFe^{2+}Al[Al_2Si_2O_{10}](OH)_2$ – полилионит $KLi_2Al[Si_4O_{10}]F_2$.



в циннвальдитовых псевдоморфозах (рис.2, б) и в виде включений в первичном магматическом кварце. Циннвальдит II образует прожилковидные агрегаты с кварцем, флюоритом и топазом, замещает биотит, плагиоклаз, реже ортоклаз.

• Присутствие двух генераций кварца – первичного дипирамидального кварца I (размер кристаллов – 2,5 мм; содержание – 37 % объема гранита) и вторичного метасоматического гранобластового кварца II (0,3-1,5 мм; 5-10 %, редко до 60-70 %). Кварц II замещает ортоклаз и плагиоклаз, образует линзы и гнезда с циннвальдитом и топазом, нарушающие структуру гранита. Кварц I в измененных гранитах дислоцирован и перекристаллизован.

• Наличие зерен топаза двух типов – относительно крупных (0,2-2,0 мм) ксеноморфных зерен в составе гнезд, линз цвиллеров и мелких (0,03-0,3 мм) изометрических или угловатых зерен, замещающих магматический плагиоклаз совместно с кварцем, циннвальдитом II и флюоритом (до 5-10 % объема) (рис.2, а). Гранулометрические исследования показали, что размер зерен топаза не коррелирует с размерами зерен полевого шпата и кварца.

По данным бурения, цвиллеровые изменения биотитовых лейкогранитов достигают глубины 280-400 м. Масштабы слабой цвиллеризации таковы, что при содержании вторичных минералов 3 % объем постмагматической минерализации в plutоне достигает почти 1 млрд м³. Цвиллеризация

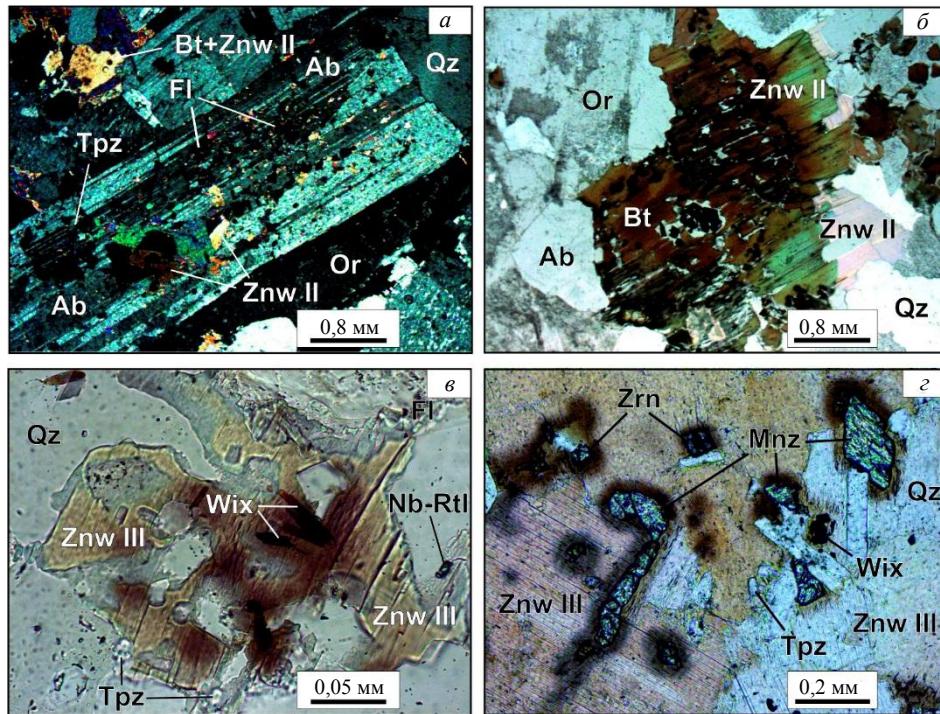


Рис.2. Цвиттеры plutона Северный, фотографии шлифов с анализатором (а); без анализатора (б-г): а – замещение альбита циннвальдитом II, флюоритом, топазом в лейкограните чаунского комплекса (Дайковое); б – замещение биотита циннвальдитом II в лейкограните чаунского комплекса (месторождение Кекурное); в – топаз-кварц-циннвальдитовый цвиттер с вольфрамоиксиолитом, Nb-содержащим рутилом (рудопроявление Стремильное); г – топаз-кварц-циннвальдитовый цвиттер с монацитом-(Ce), Hf-содержащим цирконом, вольфрамоиксиолитом (рудопроявление Валунное). Здесь и далее аbbreviatury mineralov po [26]

определяет измененный внешний облик и геохимические особенности лейкогранитов plutона Северный. Это заставило некоторых исследователей представить измененные породы главной фазы чаунского комплекса как ЛФГ [25].

В plutоне Северный закартированы поля полнопроявленных цвиттеров площадью от 200-500 м² до 1-2 км², развивающихся по лейкогранитам и Li-F-гранитам. Наиболее крупные поля цвиттеров установлены на месторождениях Кекурное и Глубокое. По данным бурения, плащеобразные ареалы цвиттеров мощностью 5-15 м приурочены к висячим контактам силлов ЛФГ. Отдельные тела представлены небольшими пластовыми залежами, гнездами и субвертикальными зонами мощностью 0,1-4,5 м, длиной 1-70 м, северо-северо-восточного и субширотного простирания. По составу выделены циннвальдит-кварцевые и топаз-кварцевые цвиттеры. Циннвальдит-кварцевые разности состоят из кварца (70-90 %), циннвальдита III или Li-содержащего сидерофиллита (10-20 %), топаза и флюорита (1-10 %). Топаз-кварцевые цвиттеры сложены кварцем (60-90 %) и топазом (20-30 %), содержат примесь флюорита и циннвальдита (1-10 %). В цвиттерах фиксируются сильно корродированные зерна плаgliоклаза и ортоклаза исходных гранитов (рис.2, в, г).

В агрегатах цвиттеров неправильные или гипидиоморфные зерна циннвальдита III образуют цепочки и гнезда в гранобластовом кварцевом агрегате, реже слагают прожилковидные обособления с кварцем и топазом. Топаз распределен по границам слюды и кварца, иногда обрастает слюду, срастается с флюоритом. Флюорит цвиттеров, в отличие от флюорита ЛФГ, почти не встречается в виде включений в слюде. Текстура полнопроявленных цвиттеров массивная, структура мелко- и среднезернистая (0,5-3 мм), лепидогранобластовая. Аксессорные минералы (монацит-(Ce), Sn-Nb-W-содержащий рутил, вольфрамоиксиолит, W-содержащий колумбит-(Mn) и др.) тяготеют к слюдяным и топазовым обособлениям [24] (рис.3, а, б).

Турмалиниты слагают жильные тела переменного состава и строения, пересекающие залежи цвиттеров. Наиболее распространены мусковит-кварц-турмалиновые метасоматиты, развитые в центральной части plutона в виде кругозалегающих зональных тел мощностью 1,5-2,5 м. Тыловая

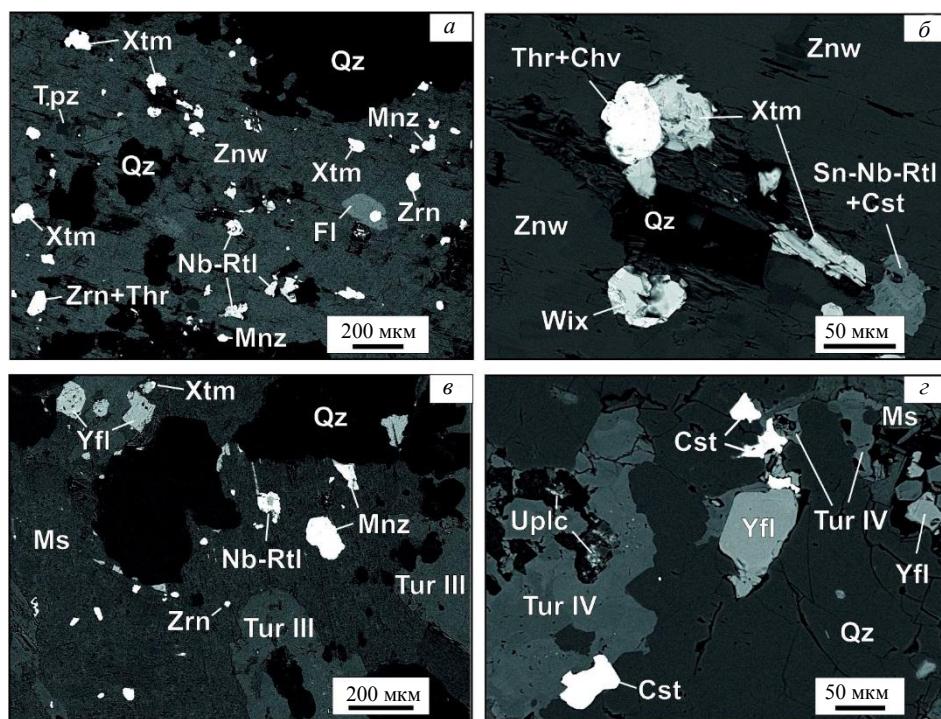


Рис.3. Оловянно-редкometальные минералы цвиттеров и турмалинитов plutона
Северный (изображения в обратнорассеянных электронах):

- а – топаз-кварц-циннвальдитовый цвиттер с Nb-содержащим рутилом, ксенотимом-(Y),
монацитом-(Ce), Hf-содержащим цирконом, торитом (месторождение Кекурное);
б – включения в циннвальдите цвиттера вольфрамоиксиолита, ксенотима-(Y),
Nb-W-Sn-содержащего рутила, торита, черновита-(Y), касситерита (Кекурное);
в – кварц-турмалин-мусковитовый метасоматит с монацитом-(Ce), ксенотимом-(Y),
иттроверфилюоритом и Hf-цирконом (Стремительное); г – касситерит, уранополиокраз,
иттроверфилюорит в рудной турмалин-кварцевой жиле (Утиное)

зона сложена микрозернистым агрегатом турмалина, кварца, касситерита; промежуточная – мелкозернистым кварцем и турмалином с примесью мусковита и флюорита; фронтальная – микро- и мелкозернистым агрегатом мусковита, кварца, флюорита, турмалина. Зоны турмалинитов пересекают гранитоидные интрузии всех комплексов. Во многих случаях турмалинитовые жилы образуются вдоль разрывных нарушений в зальбандах и осевой части даек гранит-порфиров, монцогранит-порфиров (см. рис.1). Многократно отмечены случаи пересечения цвиттеров кварц-турмалиновыми жилами и сопряженными с ними кварц-мусковитовыми метасоматитами с формированием гетерогенных метасоматитов, сложенных псевдоморфозами мусковита по циннвальдиту и топазу, содержащих реликты топаза, арсенопирита и минералы Nb, Ta, REE, Y, W, Bi.

Все турмалиновые образования plutона разделены с учетом их рудоносности и особенностей турмалина на четыре группы: 1) шлиры турмалина I в пегматоидных гнездах; 2) дорудные жилы с турмалином II и флюоритом; 3) раннерудные жилы с турмалином III; 4) рудные жилы с турмалином IV.

1. Многочисленные шлиры турмалина I с кварц-мусковитовыми ореолами приурочены к пегматоидным гнездам размером до 10 см в биотитовых лейкогранитах по всей площади plutона. Шлиры содержат флюорит, топаз, монацит-(Ce), циркон, торит, рутил. Турмалин I образует ксеноморфные и шестоватые сложнозональные кристаллы с поперечником до 5 мм, которые плеохроируют от бледно-бурового и бесцветного до голубого. По краям иногда развита темно-синяя неплеохроирующая кайма.

2. Дорудные жилы с турмалином II и флюоритом представляют собой редкие тела мощностью 2-80 см и протяженностью до 5-8 м. Жилы сложены гетерогранобластовым агрегатом кварца размером 0,1-2 см с густой вкрапленностью турмалина. Турмалин ксеноморфный размером 0,5-5 мм или шестоватый поперечником 1-3 мм и длиной до 2-3 см. Сложнозональные кристаллы турмалина II плеохроируют от светло-коричневого (почти бесцветного) до бурого, от сероватого до

сине-зеленого. С ними ассоциируют полихромный флюорит, топаз, фенгит, иногда мельчайший темно-бурый касситерит (рис.4, *a*). В кристаллах турмалина II наблюдаются микропрожилки и каемки темно-синего неплеохроирующего турмалина.

3. Раннерудные жилы с турмалином III мощностью до 0,1 м и длиной в первые метры встречаются относительно редко по всей площади plutона. Жилы сложены черными мелко- и среднезернистыми кварц-турмалиновыми метасоматитами массивной текстуры. Турмалин III образует призматические или игольчатые кристаллы поперечником 0,1-0,5 мм, длиной до 5 мм. Окраска турмалина III зональная: темно-бурая в осевой части и темно-синяя по краям. Наблюдаются мелкие (длиной несколько десятков мкм и шириной несколько мкм) кристаллы синего и зеленого неплеохроирующего турмалина IV, которые нарастают на крупные кристаллы турмалина III (бассейны руч. Стремительный и Гусиный) (рис.4, *в*). Турмалин III ассоциирует с акцессорными иттрофлюоритом, топазом, касситеритом, монацитом-(Ce), Nb-содержащим рутилом, алланитом-(Ce), алланитом-(Y) (см. рис.3, *в*, рис.4, *б*, *в*).

4. Жилы с турмалином IV имеют субмеридиональное простиранье, крутое падение (80-85°), мощность от первых см до 0,5 м, в раздувах до 1,5 м, длина жил до 200 м. Системы параллельных жил протягиваются на сотни метров и первые километры (см. рис.1). Околожильные изменения гранитов представлены турмалин-кварц-мусковитовыми метасоматитами. Турмалин жил и турмалин околожильных мусковит-кварц-турмалиновых метасоматитов не отличаются по составу и описаны как турмалин IV. Жилы имеют темно-серую окраску, пятнистое или брекчиевидное строение, содержат иттрофлюорит. В жилах, особенно в брекчиевидных разностях, содержится в промышленном количестве касситерит, ассоциирующий с монацитом-(Ce) и апатитом (см. рис.3, *г*, рис.4, *г*). Турмалин IV образует синевато-зеленые слабозональные кристаллы длиной до 1 мм, а шириной от нескольких до нескольких сотен мкм. На месторождениях Пыркакайское, Глубокое, Утиное жилы с турмалином IV имеют существенно кварцевый состав. В среднезернистом кварцевом агрегате наблюдаются линзы и прожилки мелко-среднезернистого кварца с вкраплениями радиально-лучистых агрегатов игольчатого густо-синего турмалина IV, зеленого флюорита и микрозернистого (десятые доли мм) касситерита. Содержание касситерита от 0,1 до 5-15 % объема жил.

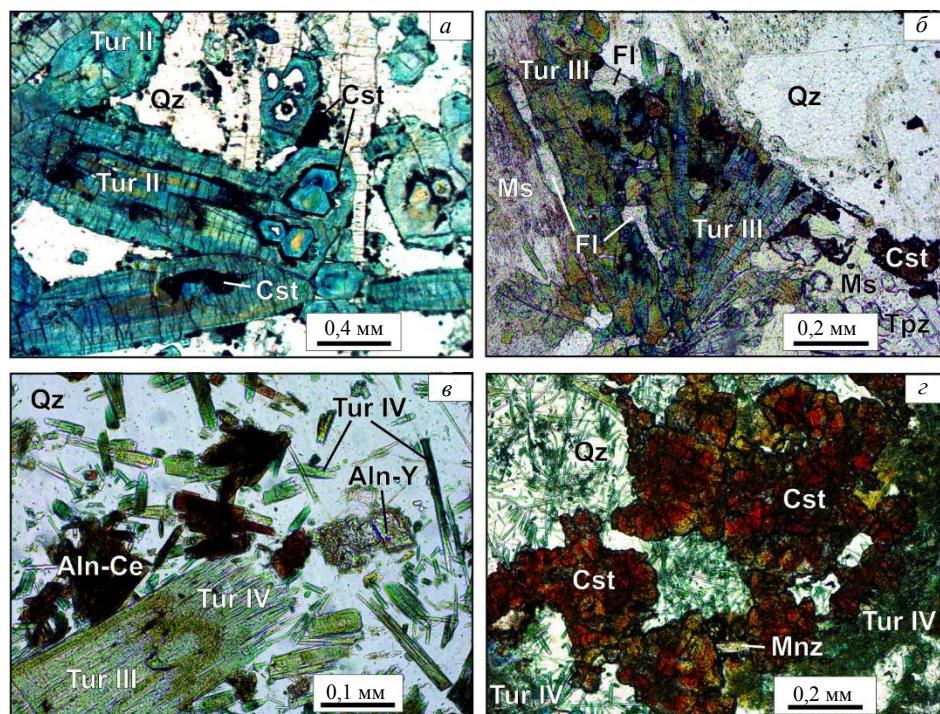


Рис.4. Турмалиниты plutона Северный (фотографии шлифов без анализатора):
а – турмалин II с включениями касситерита в дорудной жиле 2-й группы (рудопроявление Стремительное); *б* – флюорит-мусковит-кварцевый метасоматит с турмалином III и касситеритом в раннерудной жиле 3-й группы (месторождение Кекурное); *в* – турмалин III с нарастающим турмалином IV в раннерудной жиле 3-й группы с алланитом-(Ce), алланитом-(Y) (Кекурное); *г* – турмалин IV, касситерит и монацит-(Ce) в рудной жиле 4-й группы (Кекурное)



Минералогические особенности цвиттеров и турмалинитов

Цвиттеры сложены циннвальдитом III, содержащим редкие щелочи (табл.1) и примеси редких металлов (Nb_2O_5 – 0,03-0,14; Ta_2O_5 – 0,001-0,002; Y_2O_3 – 0,01-0,03; Yb_2O_3 – 0,003-0,005 мас. %), для которого характерны высокая железистость и глиноземистость. По данным геотермометра Ti-in-biotite [20], температура кристаллизации циннвальдита цвиттеров – 430 °С. Температура кристаллизации циннвальдита, замещающего магматический биотит в цвиттеризированных гранитах, также < 500 °С.

Цвиттеры содержат вольфрам-редкометалльную акцессорную минерализацию: иттрофлюорит, монацит-(Ce), Sn-Nb-W-содержащий рутил, вольфрамоиксиолит, W-содержащий колумбит-(Mn), W-содержащий ильменит, берилл, ксенотим-(Y), черновит-(Y), ишикаваит, висмутопирохлор, уранополикраз, кассiterит [24] (см. рис.2, в, г, рис.3, а, б).

Таблица 1

Химический состав слюд ряда сидерофиллит – полилитионит
в цвиттеризированных лейкогранитах и цвиттерах plutona Северный, мас. %

Компонент	Группы проб				Компонент	Группы проб			
	1	2	3	4		1	2	3	4
SiO_2	40,16	43,31	44,81	42,09	Si	3,02	3,18	3,26	3,10
TiO_2	0,45	0,23	0,16	0,38	Ti	0,03	0,01	0,01	0,02
Al_2O_3	20	19,17	18,93	19,39	Al	1,77	1,66	1,62	1,68
Fe_2O_3	2,1	1,6	1,51	1,45	Fe^{3+}	0,12	0,09	0,08	0,08
FeO	19,21	14,72	14,04	15,73	Fe^{2+}	1,21	0,91	0,85	0,97
MnO	0,62	1,02	0,51	0,64	Mn	0,04	0,06	0,03	0,04
MgO	0,6	0,49	0,63	0,89	Mg	0,07	0,05	0,07	0,10
CaO	0,68	0,57	0,51	0,65	Ca	0,05	0,04	0,04	0,05
Na_2O	0,86	0,93	0,87	0,81	Na	0,08	0,09	0,08	0,08
K_2O	8,57	9,11	8,97	9,21	K	0,82	0,85	0,83	0,86
Li_2O	1,55	2,83	3,01	3,13	Li	0,47	0,84	0,88	0,93
Rb_2O	0,53	0,78	0,92	1,12	Rb	0,03	0,04	0,04	0,05
Cs_2O	0,033	0,041	0,046	0,055	OH	1,06	0,87	0,86	0,83
F	3,94	4,87	4,96	5,03	F	0,94	1,13	1,14	1,17
O=F	1,66	2,05	2,09	2,12					
Сумма	100,17	99,98	100,18	100,80					
<i>n</i>	3	3	2	4					

Примечания. *n* – число проб; 1-4 – средний состав слюды (1 – измененный биотит в слабо цвиттеризированных (15 %) лейкогранитах, 2 – умеренно цвиттеризированных (40 %) лейкогранитах, 3 – циннвальдит в сильно цвиттеризированных (70 %) лейкогранитах, 4 – цвиттерах). Расчет формул выполнен для 12 атомов кислорода на формульную единицу ($\text{O}=\text{F}_2$).

Установлены виды турмалина из описанных выше четырех групп турмалиновых образований:

- Турмалин I из шлиров в пегматоидных гнездах в основном относится в фтор-шерлу, некоторые составы классифицируются как фтор-дравит, шерл, фойтит, окси-шерл и окси-фойтит (рис.5, а, в, д). Отношение $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{общ}}$ в турмалине шлиров составляет 9-10 %.

- Турмалин II из жил с флюоритом по химическому составу относится в фтор-шерлу и шерлу; некоторые составы классифицируются как фойтит, окси-шерл и окси-фойтит (рис.5, а, в, д). Турмалин II содержит Sc (до 0,24 мас. % Sc_2O_3) – это наиболее высокая концентрация элемента, когда либо зафиксированная в турмалине. Другая особенность турмалина II – высокое содержание Li – 135-163 г/т. Отношение $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{общ}}$ составляет 7-11 %.

- Турмалин III по составу отнесен к фтор-шерлу, шерлу, окси-шерлу, фойтиту, окси-фойтиту и дравиту (рис.5, а, в, д). Отношение $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{общ}}$ варьируется от 3 до 9 %.

- Турмалин IV можно отнести по химическому составу к шерлу, окси-шерлу и, вероятно, ферро-бозииту; меньшее число составов отвечает дравиту, окси-дравиту, фтор-шерлу, фойтиту (рис.5, б, г, е). Ферро-бозиит, слагающий каймы кристаллов, оловосодержащий – до 1,28 мас. % SnO_2 . Отношение $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{общ}}$ достигает 14 %.

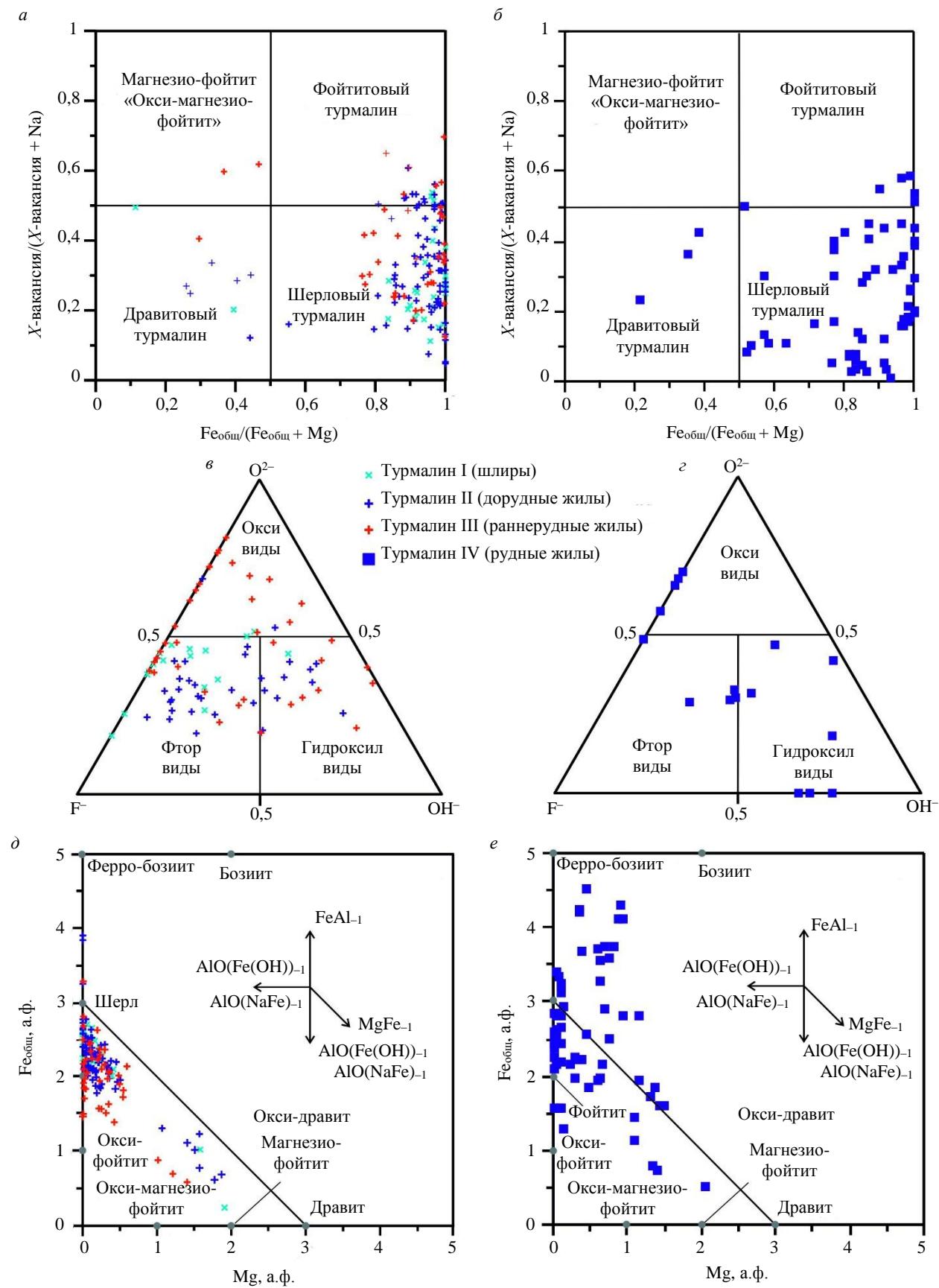


Рис.5. Двойные и треугольные диаграммы [22], иллюстрирующие составы турмалина
плутона Северный и возможные замещения:

а, б – $\text{Fe}_{\text{общ}}/(\text{Fe}_{\text{общ}} + \text{Mg})$ – $X_{\text{vac}}/(X_{\text{vac}} + \text{Na})$;
в, г – O^{2-} – F^- – OH^- в позиции W; д, е – $\text{Mg} – \text{Fe}_{\text{общ}}$



Обобщая данные о минералогии турмалина плутона Северный, отметим, что вариации его состава заключены в пределы шерла, фойтита и бозиита. От дорудных турмалинитов к рудным наблюдается уменьшение роли фтор-шерла и возрастание значения окси-шерла и ферро-бозиита при постепенном повышении содержания лития и переменном отношении $Fe^{3+}/Fe_{общ.}$.

В дорудных жилах с турмалином II наблюдаются монацит-(Ce), торит, рутил и очень редко мелкий (0,01-0,3 мм) кассiterит (см. рис.4, а). Раннерудные жилы с турмалином III содержат редкоземельно-оловянную акцессорную минерализацию: кассiterит, монацит-(Ce), висмутопирохлор, ксенотит-(Y), апатит-(CaF), флюоцерит-(Ce), иттрофлюорит, алланит-(Ce), алланит-(Y) (табл.2), ишикаваит, арсенаты Y, Cu, Fe – черновит-(Y), агардит-(Y) и др. (см. рис.3, в, рис.4, б, в). Акцессорные и рудные минералы жил с турмалином IV: кассiterит, монацит-(Ce), апатит, олово-вольфрам-ниобиевый рутил, флюоцерит-(Ce), иттрофлюорит, поликраз, уранополикраз, халькопирит, пирит, сакураит (см. рис.3, г, рис.4, г).

Таблица 2

**Химический состав алланита-(Ce) и алланита-(Y)
в турмалиновых метасоматитах плутона Северный [27], мас.%**

Компонент	Алланит-(Ce)				Алланит-(Y)			
	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	35,55	37,59	35,54	35,28	35,61	33,97	35,22	35,79
Al ₂ O ₃	14,42	13,91	13,53	14,43	–	0,83	0,42	0,54
FeO*	17,37	15,61	19,18	17,27	9,38	8,88	7,72	8,94
CaO	12,59	9,72	14,15	11,75	12,31	10,66	8,06	10,56
La ₂ O ₃	4,69	4,84	4,82	4,99	–	–	–	–
Ce ₂ O ₃	11,28	13,61	12,47	12,63	–	0,27	–	0,06
Nd ₂ O ₃	3,81	3,41	2,68	3,05	–	0,69	1,15	0,54
Sm ₂ O ₃	–	–	–	–	–	1,83	0,89	0,54
Gd ₂ O ₃	–	–	–	–	–	1,42	3,12	0,86
Dy ₂ O ₃	–	–	–	–	–	3,55	3,83	1,61
Er ₂ O ₃	–	–	–	–	–	3,45	–	0,51
Yb ₂ O ₃	–	–	–	–	–	2,89	–	0,42
Y ₂ O ₃	–	–	–	–	42,34	30,77	38,05	38,69
ThO ₂	–	–	–	0,01	–	–	–	0,03
Сумма	99,71	98,69	100,39	99,41	99,64	99,21	98,47	99,09
Si	3,28	3,48	3,15	3,28	3,53	3,55	3,63	3,59
Al	1,57	1,52	1,50	1,58	–	0,10	0,05	0,06
Fe*	1,34	1,21	1,51	1,34	0,78	0,78	0,67	0,75
Σ M	2,91	3,03	3,01	2,92	0,78	0,88	0,72	0,81
Ca	1,25	0,96	1,42	1,17	1,31	1,19	0,89	1,14
La	0,16	0,17	0,17	0,17	–	–	–	–
Ce	0,38	0,46	0,43	0,43	–	0,01	–	0,00
Nd	0,13	0,11	0,09	0,10	–	0,03	0,04	0,02
Sm	–	–	–	–	–	0,07	0,03	0,02
Gd	–	–	–	–	–	0,05	0,11	0,03
Dy	–	–	–	–	–	0,12	0,13	0,05
Er	–	–	–	–	–	0,11	–	0,02
Yb	–	–	–	–	–	0,09	–	0,01
Y	–	–	–	–	2,23	1,71	2,09	2,07
Th	–	–	–	0,00	–	–	–	0,00
Σ A	1,92	1,70	2,11	1,87	3,54	3,38	3,29	3,36

Примечания. 1-3, 5-7 – представительные микрорентгеноспектральные анализы (Санкт-Петербургский горный университет) алланита-(Ce) и алланита-(Y) в турмалинитах; 4, 8 – средний состав алланита-(Ce) и алланита-(Y) (33 и 12 анализов); прочерк – элемент не обнаружен; $FeO^* = FeO + Fe_2O_3$. Расчет формул выполнен для 8 катионов с уравновешиванием на 12,5 ионов O.



Жилы с турмалином III являются главными оловорудными образованиями plutона Северный и содержат до 5-15 % кассiterита (см. рис.4, б, в). Характерные примеси в кассiterите турмалиновых жил: FeO – 0,82-1,52; WO₃ – 0,00-0,37; TiO₂ – 0,04-0,12; Nb – 0,01-0,11; In – 0,00-0,02; Ce – 0,00-0,03; Sc – 0,00-0,02 % (табл.3). По составу кассiterит Северного plutона близок к кассiterиту грейзеновых месторождений, связанных с ЛФГ: Альтенберг (Германия), Орловское (Забайкалье), Кестер (Якутия). Наблюдается сходство с кассiterитом грейзеновых месторождений Дальнего Востока (Карадубское, Правоурмийское, Приамурье).

Таблица 3

Химический состав кассiterита в турмалиновых метасоматитах и жилах Северного массива

Компонент	Пробы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SnO ₂ , %	99,58	98,93	98,04	99,08	97,26	97,65	97,29	99,45	99,62	99,78
WO ₃ , %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃ , %	0,00	0,82	1,59	1,09	2,51	2,01	0,00	0,00	0,00	0,00
TiO ₂ , %	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,13	0,00
Be, г/т	0,00	14	20	11	31	8	37	100	9	20
Sc, г/т	0,01	30	45	15	20	17	10	200	50	260
Ce, г/т	0,03	60	90	30	50	1600	110	1000	210	70
In, г/т	0,01	170	150	74	60	80	49	50	20	24
Nb, г/т	0,09	210	280	100	230	230	200	1100	550	380
Сумма	99,73	99,92	99,69	100,19	99,81	99,71	98,45	99,80	99,83	99,83
Nb/In	6,43	1,24	1,87	1,35	3,83	2,88	4,10	22,00	27,50	15,83

Примечания. 1-10 – представительные анализы кассiterита месторождений (1-6 – Кекурное, 7 – Стремильное, 8-10 – Утиное). Sn, W, Fe, Ti – рентгеноспектральный анализ (СПбГУ, аналитик Е.В.Савва). Be, Sc, Ce, In, Nb – SEM-EDS (Санкт-Петербургский горный университет, аналитик Е.В.Пигова).

Встречаются турмалиновые жилы с богатой редкоземельной минерализацией – алланитом-(Ce) и замещающим его флюоцеритом-(Ce). В сростках с алланитом-(Ce) установлен Nd-содержащий алланит-(Y) (см. рис.4, г).

Об ассоциации грейзенов и турмалинитов plutона Северный

Установленная в plutоне Северный ассоциация минерализованных грейзенов (цвиттеров) и турмалинитов заслуживает внимания и требует минералого-петрографической и минерагенической оценок, так как подобные комплексы характерны для крупных редкометалльно-оловорудных месторождений. К ним относятся Правоурмийское (Приамурье) [6], Ярославское (Приморье) [7], Кугарок и Лост-Ривер (Аляска) [28, 29], Сент-Остелл и Трегоннинг-Годольфин (Англия) [30, 31], Эренфридерсдорф (Германия) [32], Викманов (Чехия) [33], Панаскейра (Португалия) [34] и др.

Главная особенность выявленной ассоциации заключается в пространственной связи рудоносных метасоматитов с ЛФГ, в эндоконтакте и экзоконтакте интрузий которых располагаются залежи цвиттеров, а зоны турмалиновых метасоматитов – в ареалах распространения ЛФГ и цвиттеров (см. рис.1). Если для цвиттеров генетическая связь с ЛФГ установлена [8, 9], то генезис турмалинитов требует изучения. Кварц-турмалиновые жилы и окологильные турмалин-кварц-мусковитовые метасоматиты иногда ошибочно относят к «турмалиновым грейзенам» [31, 35]. Несостоятельность такого определения турмалинитов показал Д.В.Рундквист с соавторами, отмечавший, что «разделение грейзеновых и кассiterит-турмалин-хлоритовых типов месторождений вызывает значительные трудности, имеющие, с одной стороны, исторические корни, с другой – объективные причины из-за широкого распространения турмалина как в типичных грейзеновых, так и в кассiterит-турмалин-хлоритовых месторождениях...» [36].

Цвиттеры и турмалиниты plutона Северный являются ассоциацией, возникшей в связи с магматизмом, продукцирующим интрузии Li-F гранитов. Генетическое родство метасоматитов отражается в сходстве геохимической специализации цвиттеров (Nb, W, Y, Ce, Li, Sn, Th, As) и турмалинитовых метасоматитов (Sn, Ce, Y, W, Sc, Li). Аргументом в пользу принадлежности цвиттеров



и турмалинитов к единой гидротермальной системе служит наличие бора во флюидных включениях в кварце цвиттеров. При ведущей роли в составе летучих компонентов фтора концентрация бора в цвиттерах, по данным анализа водных вытяжек из кварца, составляет $1\pm0,3$ г/кг воды. Рамановская спектроскопия многофазовых включений в кварце цвиттеров показала наличие включений борной кислоты [24]. На связь ассоциации цвиттеры – турмалиниты с ЛФГ указывают и данные о высокой концентрации бора в расплавных включениях ЛФГ известных массивов: Орловский (Восточное Забайкалье, до 2,09 мас.% B_2O_3) [37], Ары-Булак (Восточное Забайкалье, до 1138 г/т В) [38], Циннвальд (Германия, до 640 г/т В) [39] и др.

Характерной особенностью турмалинитов, ассоциирующих с цвиттерами, является разнообразие минеральных видов турмалина. В пегматоидных шлирах и дорудных жилах турмалин I относится к шерловым и фойтитовым видам при существенной роли фтор-шерла. Турмалин II дорудных жил содержит повышенную концентрацию скандия. Турмалин III раннерудных жил – это преимущественно окси-шерл и окси-фойтит. Турмалин IV рудных жил представлен окси-шерлом, шерлом и оловосодержащим ферро-бозиитом. От дорудного турмалина I шлиров до синрудного турмалина IV наблюдается усиление отрицательной корреляции между $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и $\text{Al}_{\text{общ}}$: $-0,49 \rightarrow -0,52 \rightarrow -0,77 \rightarrow -0,86$. Отношение $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{общ}}$ изменяется, %: 9-10 \rightarrow 7-11 \rightarrow 3-9 \rightarrow 14, что указывает на кристаллизацию турмалина при переменном окислительном потенциале минералообразующего флюида.

На связь турмалинитов с ЛФГ и цвиттерами указывают высокие содержания Li и F в турмалине. В целом более низкое содержание F и более высокое Li в турмалине раннерудных и рудных жил по сравнению с турмалином шлиров и дорудных жил указывает на снижение фугитивности фтора и повышение активности Li в процессе минералообразования. Не исключено, что снижение $f_{\text{F}2}$ могло быть одним из факторов, обусловивших начало отложения кассiterита в раннерудных жилах. В работе [40] показано, что с ростом содержания фтора в гранитном расплаве увеличивается растворимость SnO_2 . Вполне возможно, что фтор аналогичным образом влияет на растворимость SnO_2 и в гидротермальном флюиде. Учитывая наличие ферро-бозиита в рудных жилах, можно предположить увеличение окислительного потенциала растворов, что привело к кристаллизации кассiterита в жилах с турмалином IV. Возможность кристаллизации кассiterита в окислительных условиях показана в статье [41].

Ассоциация цвиттеров и турмалинитов plutона Северный характеризуется комплексной редкометалльно-оловянной рудоносностью. Оловорудная минерализация, разведенная на ряде месторождений, приурочена к кварцевым жилам (месторождения Пыркакайское, Утиное, Глубокое и др.). В жилах турмалинитов наиболее оловоносными являются брекчиевидные агрегаты, в которых кассiterит концентрируется в кварцевых гнездах и прожилках (месторождения Ергувеем, Кекурное, Стремительное). Редкометалльная минерализация сопровождает цвиттеры (Nb, Ce, Y, W, Bi) и турмалиниты (Y, Ce). С учетом редкометалльной минерализации цвиттеров и редкоземельно-оловянной минерализации турмалинитов полученные результаты можно использовать для оценки минерагенического потенциала и разработки критериев прогнозирования редкоземельно-редкометалльного (Nb, Ce, Y, W, Bi) оруденения plutона Северный.

Заключение

В plutоне Северный установлена ассоциация редкометалльно-оловоносных метасоматитов, связанных с магматизмом, продуцирующим интрузии Li-F гранитов. Для выявленной метасоматической ассоциации характерны особенности:

- Сонахождение залежей цвиттеров, тел турмалиновых метасоматитов и малых интрузий Li-F гранитов в общих ареалах в центральной части plutона.
- Широкий спектр минеральных видов турмалина в составе турмалинитовых жил и околоводорудных турмалинодержащих метасоматитов, связанный с широкими вариациями содержания воды, фтора и лития, а также степени окисления железа.
- Эволюция турмалина от Sc-содержащего фтор-шерла в дорудных метасоматитах до окси-шерла и оловосодержащего ферро-бозиита в оловорудных метасоматитах при постепенном повышении содержания лития и переменной степени окисления железа.
- Сочетание в цвиттерах и турмалинитах кассiterитовой и редкометалльной минерализации.

Результаты проведенных комплексных структурно-геологических, петрографических и минералогических исследований цвиттеров и турмалинитов plutона Северный могут быть использованы для оценки минерагенического потенциала района и разработки критериев прогнозирования редкометалльного (Nb, Ce, Y, W, Bi) оруденения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году. М.: Роснедра, 2021. 572 с.
2. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В. и др. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. [DOI: 10.31897/PMI.2022.100](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100)
3. Артемьев Д.С., Крымский Р.Ш., Беляцкий Б.В., Ашихмин Д.С. Возраст оруденения Майского золоторудного месторождения (Центральная Чукотка): результаты Re-Os изотопного датирования // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 266-278. [DOI: 10.31897/PMI.2020.3.266](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.266)
4. Дашико Р.Э., Романов И.С. Прогнозирование горно-геологических процессов на основе анализа подземного пространства рудника Купол как многокомпонентной системы (Чукотский автономный округ, Анадырский р-н) // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 20-32. [DOI: 10.31897/PMI.2021.1.3](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.3)
5. Евдокимов А.Н., Фокин В.И., Шануренко Н.К. Золото-редкометальное и сопутствующее оруденение западной части острова Большевик, архипелаг Северная Земля // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 687-697. [DOI: 10.31897/PMI.2022.94](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.94)
6. Геодинамика, магматизм и металлогенез Востока России. В 2 книгах. Кн. 1 / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 527 с.
7. Rizvanova N.G., Alenicheva A.A., Skublov S.G. et al. Early Ordovician Age of Fluorite-Rare-Metal Deposits at the Voznesensky Ore District (Far East, Russia): Evidence from Zircon and Cassiterite U-Pb and Fluorite Sm-Nd Dating Results // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 11. № 1154. [DOI: 10.3390/min1111154](https://doi.org/10.3390/min1111154)
8. Коваленко В.И., Кузьмин М.И., Козлов В.Д., Владыкин Н.В. Метасоматические цвиттеры и связанное с ними редкометальное оруденение (на примере месторождений Монголии и Чехословакии) // Метасоматизм и рудообразование. М.: Наука, 1974. С. 42-53.
9. Бородкин Н.А., Приставко В.А. Выделение цвиттеров по петрохимическим и геохимическим критериям // Отечественная геология. 2012. № 4. С. 49-56.
10. Томсон И.Н., Тананаева Г.А. Базовая формация оловорудных цвиттеров и их соотношение с сопутствующими жильными месторождениями // Этапы образования рудных формаций. М.: Наука, 1989. С. 72-78.
11. Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В. Металлогенез гидротермально-метасоматических образований. СПб: ВСЕГЕИ, 2012. 560 с.
12. Плющев Е.В., Ушаков О.П., Шатов В.В., Беляев Г.М. Методика изучения гидротермально-метасоматических образований. Л.: Недра, 1981. 262 с.
13. Войтеховский Ю.Л., Захарова А.А. Петрографические структуры и равновесия Харди – Вайнберга // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 133-138. [DOI: 10.31897/PMI.2020.2.133](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.133)
14. Марин Ю.Б. О минералогических исследованиях и использовании минералогической информации при решении проблем петро- и рудогенеза // Записки Российского минералогического общества. 2020. Ч. 149. № 4. С. 1-15. [DOI: 10.31857/S0869605520040048](https://doi.org/10.31857/S0869605520040048)
15. Кривовицhev В.Г., Гульбин Ю.Л. Рекомендации по расчету и представлению формул минералов по данным химических анализов // Записки Российского минералогического общества. 2022. Ч. 151. № 1. С. 114-124. [DOI: 10.31857/S0869605522010087](https://doi.org/10.31857/S0869605522010087)
16. Луфуанди Матондо И.П., Иванов М.А. Состав и вероятный коренной источник колумбита из аллювиальных отложений района Маюко (Республика Конго) // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 139-149. [DOI: 10.31897/PMI.2020.2.139](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.139)
17. Gawad A.E.A., Ene A., Skublov S.G. et al. Trace Element Geochemistry and Genesis of Beryl from Wadi Nugrus, South Eastern Desert, Egypt // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 2. № 206. [DOI: 10.3390/min12020206](https://doi.org/10.3390/min12020206)
18. Gvozdenko T.A., Baksheev I.A., Khanin D.A. et al. Iron-bearing to iron-rich tourmalines from granitic pegmatites of the Murzinka pluton, Central Urals, Russia // Mineralogical Magazine. 2022. Vol. 86. Iss. 6. P. 948-965. [DOI: 10.1180/mgm.2022.104](https://doi.org/10.1180/mgm.2022.104)
19. Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. Львов: Изд-во Львовского университета, 1961. 284 с.
20. Chun-Ming Wu, Hong-Xu Chen. Revised Ti-in-biotite geothermometer for ilmenite- or rutile-bearing crustal metapelites // Science Bulletin. 2015. Vol. 60. Iss. 1. P. 116-121. [DOI: 10.1007/s11434-014-0674-y](https://doi.org/10.1007/s11434-014-0674-y)
21. Rieder M., Cavazzini G., Dyakonov Y.S. et al. Nomenclature of the Micas // Clays and clay minerals. 1998. Vol. 46. Iss. 5. P. 586-595. [DOI: 10.1346/CCMN.1998.0460513](https://doi.org/10.1346/CCMN.1998.0460513)
22. Henry D.J., Novák M., Hawthorne F.C. et al. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals // American Mineralogist. 2011. Vol. 96. Iss. 5-6. P. 895-913. [DOI: 10.2138/am.2011.3636](https://doi.org/10.2138/am.2011.3636)
23. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист R-58-(60) – Билино. Объяснительная записка. СПб: ВСЕГЕИ, 1999. 146 с.
24. Кургузова А.В. Условия формирования цвиттеров и турмалинитов Северного массива (Чукотка): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: Национальный минерально-сырьевая университет «Горный», 2014. 20 с.
25. 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)
26. Дудкинский Д.В., Ефремов С.В., Козлов В.Д. Литий-фтористые граниты Чукотки и их геохимические особенности // Геохимия. 1994. № 3. С. 393-402.
27. Алексеев В.И., Марин Ю.Б., Гембицкая И.М. Парагенезис алланита-(Y) и алланита-(Ce) в турмалинитах Северного массива (Чукотка) и соотношение иттрия и лантаноидов в алланите // Записки Российского минералогического общества. 2015. Т. 144. № 6. С. 83-93.
28. Dobson D.C. Geology and alteration of the Lost River tin-tungsten-fluorine deposit, Alaska // Economic Geology. 1982. Vol. 77. № 4. С. 1033-1052. [DOI: 10.2113/gsecongeo.77.4.1033](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.4.1033)
29. Soloviev S.G., Kryazhev S., Dvurechenskaya S. Geology, igneous geochemistry, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Kougarok tin-tantalum-lithium prospect, Seward Peninsula, Alaska, USA // Mineralium Deposita. 2020. Vol. 55. Iss. 1. P. 79-106. [DOI: 10.1007/s00126-019-00883-7](https://doi.org/10.1007/s00126-019-00883-7)
30. Duchoslov M., Marks M.A.W., Drost K. et al. Changes in tourmaline composition during magmatic and hydrothermal processes leading to tin-ore deposition: The Cornubian Batholith, SW England // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 83. P. 215-234. [DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.11.012](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.012)



31. *Dehaine Q., Filippov L.O., Glass H.J., Rollinson G.* Rare-metal granites as a potential source of critical metals: A geometallurgical case study // *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 104. P. 384-402. [DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.11.012](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.012)
32. *Seifert Th., Kempe U.* Sn-W-Lagerstatten und spätvariszische Magmatite des Erzgebirges // Beiheft zu European Journal of Mineralogy. 1994. Vol. 6. № 2. P. 125-172.
33. *Štemprok M., Pivec E., Langrová A.* The petrogenesis of a wolframite-bearing greisen in the Vykmanov granite stock, Western Krušné hory pluton (Czech Republic) // *Bulletin of Geosciences*. 2005. Vol. 80. № 3. P. 163-184.
34. *Marignac C., Cuney M., Cathelineau M. et al.* The Panasqueira Rare Metal Granite Suites and Their Involvement in the Genesis of the World-Class Panasqueira W-Sn-Cu Vein Deposit: A Petrographic, Mineralogical, and Geochemical Study // *Minerals*. 2020. Vol. 10. Iss. 6. № 562. [DOI: 10.3390/min10060562](https://doi.org/10.3390/min10060562)
35. *Грачева О.С.* Грейзены Северо-Востока СССР. М.: Недра, 1974. 172 с.
36. *Рундквист Д.В., Денисенко В.К., Павлова И.Г.* Грейзеновые месторождения (онтогенез и филогенез). М.: Недра, 1970. 328 с.
37. *Баданина Е.В., Сырицо Л.Ф., Волкова Е.В. и др.* Состав расплава Li-F гранитов и его эволюция в процессе формирования рудоносного Орловского массива в Восточном Забайкалье // *Петрология*. 2010. Т. 18. № 2. С. 139-167.
38. *Кузнецов В.А., Андреева И.А., Коваленко В.И. и др.* Содержание воды и элементов-примесей в онгонитовом расплаве массива Ары-Булак, Восточное Забайкалье (данные изучения расплавных включений) // *Доклады Академии наук*. 2004. Т. 396. № 4. С. 524-529.
39. *Webster I., Thomas R., Förster H.-J. et al.* Geochemical evolution of halogen-enriched granite magmas and mineralizing fluids of the Zinnwald tin-tungsten mining district, Erzgebirge, Germany // *Mineralium Deposita*. 2004. Vol. 39. Iss. 4. P. 452-472. [DOI: 10.1007/s00126-004-0423-2](https://doi.org/10.1007/s00126-004-0423-2)
40. *Bhalla P., Holtz F., Linnen R.L., Behrens H.* Solubility of cassiterite in evolved granitic melts: effect of T , $f\text{O}_2$, and additional volatiles // *Lithos*. 2005. Vol. 80. Iss. 1-4. P. 387-400. [DOI: 10.1016/j.lithos.2004.06.014](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.06.014)
41. *Schmidt S., Gottschalk M., Rongqing Zhang, Jianjun Lu.* Oxygen fugacity during tin ore deposition from primary fluid inclusions in cassiterite // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 139. Part A. № 104451. [DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104451](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104451)

Авторы: Виктор Иванович Алексеев, д-р геол.-минерал. наук, профессор (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Alekseev_VI@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1512-9347>, Юрий Борисович Марин, д-р геол.-минерал. наук, профессор (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-8287-872X>, Иван Андреевич Бакшеев, канд. геол.-минерал. наук, доцент (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6920-427X>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Исследование применения осадкообразующих составов с целью выравнивания профиля приемистости паронагнетательных скважин

Д.Ю.Саврэй✉, И.Ф.Чупров

Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Республика Коми, Россия

Как цитировать эту статью: Саврэй Д.Ю., Чупров И.Ф. Исследование применения осадкообразующих составов с целью выравнивания профиля приемистости паронагнетательных скважин // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 184-196. [EDN LCEBHL](#)

Аннотация

Наиболее промышленно освоенными методами интенсификации добычи высоковязких нефти и природных битумов являются тепловые методы воздействия на пласт: пароциклические обработки добывающих скважин, термогравитационное дренирование пласта и площадная закачка теплоносителя. К тепловым также относят термошахтный метод разработки, который подразумевает строительство горных выработок с галереей добывающих скважин и системой паротеплового воздействия. Пример использования термошахтного метода – Ярегская площадь Ярегского месторождения. При разработке Ярегской площади постоянно совершенствуются технологии термошахтного метода. Наиболее распространен подземно-поверхностный метод: теплоноситель закачивается с поверхности через вертикальные паронагнетательные скважины, добыча нефти – в нефтешахте через полого-восходящие добывающие скважины. Практика площадной закачки теплоносителя и результаты геофизических исследований паронагнетательных скважин показали, что при использовании подземно-поверхностного метода разработки Ярегской площади теплоноситель поступает в верхнюю часть пласта, что подразумевает неравномерную выработку запасов по толщине. Для вовлечения запасов сверхвязкой нефти в процесс паротеплового воздействия необходимо повышение давления закачки пара. Однако увеличение давления закачки теплоносителя в ряде случаев проблематично ввиду наличия неоднородностей в пласте (тектонические нарушения через каждые 20-25 м, а также многочисленные микротрецины с различной раскрытистью). В работе представлены результаты экспериментального исследования применения осадкообразующих составов при закачке пара в разных термобарических условиях. Научная новизна состоит в оценке эффективности применения осадкообразующих составов при закачке теплоносителя в зонально-неоднородные насыпные модели пласта. В качестве осадкообразующих составов выбраны растворы сульфата железа, карбоната натрия и хлорида кальция. В результате выполнения трех обработок осадкообразующими составами средняя проницаемость неоднородной насыпной модели пласта была снижена на 55 % при закачке пара с температурой более 170 °C. Эффективный поровый объем при закачке пара увеличен на 70,6 %, что при промысловых испытаниях влияет на увеличение коэффициента охвата паротепловым воздействием и, как следствие, повышение нефтеизвлечения.

Ключевые слова

высоковязкая нефть; площадная закачка пара; термошахтный метод; паронагнетательная скважина; неоднородный коллектор; эффективный поровый объем; осадкообразующий состав; фильтрационный поток

Поступила: 16.07.2024

Принята: 09.10.2025

Онлайн: 19.12.2025

Опубликована: 29.12.2025

Введение

При разработке месторождений высоковязких нефти и природных битумов в основном применяются тепловые методы увеличения нефтеотдачи (МУН) [1, 2]. Мировой опыт разработки трудноизвлекаемых запасов тяжелой нефти показал, что доля применяемых тепловых МУН достигает 67 % от всех применяемых технологий на данных объектах разработки [3]. Помимо тепловых МУН используются химические методы, закачка углеводородного или углекислого газа и другие менее распространенные методы воздействия [4-6].

К тепловым МУН относят такие технологии, как площадная закачка пара (площадное паротепловое воздействие) [7], пароциклические обработки скважин [8], термогравитационное дренирование пласта [9], внутрипластовое горение [10], термошахтный способ добычи [11] и др. Ключевым фактором любого теплового воздействия является снижение вязкости нефти и увеличение ее подвижности [12]. Несмотря на высокую эффективность тепловых МУН, происходит постоянное



совершенствование технологий воздействия с целью снижения затрат на добычу углеводородного сырья.

Примером использования тепловых МУН в Республике Коми является Ярегское нефтетитановое месторождение. Нефтяной пласт приурочен к отложениям верхнего и среднего девона, залегает на небольшой глубине – кровля отмечается в интервале глубин 140-210 м. Начальные геологические запасы составляют более 200 млн т нефти аномальной вязкости (12-14 Па·с в пластовых условиях). В пределах Ярегской площади Ярегского месторождения применяются технологии термошахтной разработки [13], на Лыаельской площади – термогравитационное дренирование пласта [14].

На начальном этапе с 1932 г. Ярегская площадь Ярегского месторождения разрабатывалась «классическим» методом – вскрытием залежи с поверхности вертикальными скважинами и добычей нефти за счет растворенного в ней газа. При фонтанировании добывающих скважин на опытно-промышленных участках в период 1935-1945 гг. удалось добыть 38,5 тыс. т сверхвязкой нефти, что соответствовало нефтеотдаче менее 2 %. Для повышения эффективности нефтеизвлечения в 1939 г. разработан проект строительства трех нефтешахт. В период 1939-1972 гг. разработка шахтных полей велась на естественном режиме, в результате которого удалось повысить коэффициент извлечения нефти (КИН) до 6 %. В результате истощения продуктивной залежи пластовое давление было снижено с 1,4 МПа до атмосферного, что способствовало внедрению тепловых МУН [15].

С начала внедрения термошахтного метода разработки в период 1972-2002 гг. коэффициент извлечения нефти удалось увеличить до 53 % при паронефтяном отношении (ПНО) 2,7 т/т. Основными проблемами разработки с использованием паротеплового воздействия на залежь сверхвязкой нефти стали естественная неоднородность коллектора (наличие тектонических нарушений через каждые 20-25 м); наличие многочисленных скважин, пробуренных при разработке на естественном режиме; высокая температура в горных выработках; прорывы пара в добывающие скважины и горные выработки. Ввиду высокой стоимости строительства и обустройства нефтяных шахт с системой паронагнетания было решено производить закачку теплоносителя с поверхности. Подземно-поверхностный метод термошахтной разработки предполагает лишь добычу нефти в шахте через систему пологонаправленных скважин. Закачка пара при этом осуществляется вертикальными скважинами с поверхности по контуру нефтяной галереи, что предполагает снижение температуры в горных выработках и увеличение давления закачки теплоносителя до 1,6 МПа и, как следствие, увеличение зоны теплового воздействия. При повышении давления закачки пара увеличивается и его температура, что благоприятно сказывается на нефтеотдаче [16].

С начала внедрения термошахтного метода введено в разработку 75 уклонных блоков с геологическими запасами 105 млн т нефти. Под уклонным блоком понимается обособленная нефтяная галерея с определенным видом паронагнетания в зависимости от системы термошахтной разработки. Основным термошахтным методом в настоящее время является подземно-поверхностный метод, по которому освоено семь уклонных блоков с начальными геологическими запасами 4,2 млн т нефти. Средний КИН по выведенным из разработки блокам составил 62,2 %, среднее ПНО – 2,6 т/т.

Постановка проблемы

Несмотря на высокую эффективность подземно-поверхностной системы термошахтной разработки, существует ряд факторов, которые были выявлены при разработке уклонных блоков. При паротепловом воздействии с поверхности теплоноситель преимущественно концентрируется около кровли нефтяного пласта, что приводит к ряду осложнений при разработке: неравномерная выработка запасов по толщине пласта [17]; прорыв теплоносителя к пологовосходящим добывающим скважинам и горным выработкам [18]; отсутствие возможности повышения давления закачки теплоносителя до 1,6 МПа в паронагнетательных скважинах.

В качестве метода контроля приемистости теплоносителя по толщине пласта выполняются геофизические исследования паронагнетательных скважин [19]. Согласно результатам механической расходометрии данных исследований в большинстве паронагнетательных скважин подтверждается прикровельный прогрев пласта. Низкий коэффициент охвата теплоносителем призабойной зоны паронагнетательных скважин обусловлен как низким давлением закачки, так и преобладанием гравитационных сил.

Еще одной проблемой паротеплового воздействия при подземно-поверхностной системе термошахтной разработки является гидродинамическая связь между паронагнетательными скважинами. Ввиду слабой сцепментированности терригенного коллектора при высоких темпах закачки



теплоносителя образуются каналы с низким фильтрационным сопротивлением [20], которые преимущественно распространяются около кровли пласта. При таких условиях также происходит снижение прочностных свойств коллектора, сопровождающиеся пескопроявлением [21], которые могут быть как в пологовосходящих добывающих скважинах, так и в соседних паронагнетательных скважинах. Наличие интервалов притока теплоносителя в призабойной зоне остановленных паронагнетательных скважин в ряде случаев превышает 50 % от вскрытой толщины пласта, что существенно снижает эффективность теплового воздействия вглубь пласта в направлении к нефтяной галерее уклона блока.

Зоны коллектора с тектоническими дизъюнктивными нарушениями и скважины, пробуренные по Ухтинской системе, препятствуют распространению зоны паротеплового воздействия. Расширение теплового фронта происходит в основном за счет теплопроводности на начальном этапе паротеплового воздействия, вытеснение нефти в таком случае – преимущественно за счет теплового расширения, а без создания должного градиента давления от кровли к подошве пласта разработка ведется на гравитационном режиме.

Для изоляции высокопроницаемых зон пласта предлагается рассмотреть ряд технологических решений, направленных на выравнивание профиля приемистости теплоносителя и вовлечение в разработку неохваченных зон пласта процессом вытеснения. Существует несколько технологий, направленных на изоляцию высокопроницаемых интервалов пласта. Данные методы могут носить как селективный, так и неселективный характер [22]. При разработке месторождений сверхвязкой нефти тепловыми МУН неселективные технологии изоляции интервалов пласта нецелесообразны. Изоляция вскрытого интервала пласта может существенно повлиять на приемистость теплоносителя, которая напрямую влияет на КИН. Поэтому стоит рассматривать исключительно селективные методы изоляции, их использование позволит снизить проницаемость только в водонасыщенных зонах пласта.

Ограничение водопритока к добывающим от нагнетательных скважин достигается применением различных методов [23], таких как закачка гелеобразующих составов [24-26], полимерно-дисперсных систем [27-29], эмульсионных составов [30, 31], силикатных растворов [32], осадкообразующих составов [33] и др. В табл.1 представлена краткая сравнительная характеристика применяемых химических соединений для выравнивания профиля приемистости (ВПП) нагнетательных скважин.

Таблица 1

Сравнение химических соединений для выравнивания профиля приемистости

Типы соединений	Достоинства	Недостатки
Полимерно-дисперсные системы и гелеобразующие соединения	Различная вязкость состава в зависимости от концентрации полимера (гелеобразующего соединения) и дисперсных частиц, а также возможность регулирования времени образования гелеобразующей системы за счет температуры или сшивателя. Высокая эффективность ВПП за счет создания гидродинамического барьера полимерной или гелеобразующей системой в призабойной зоне пласта	Высокая стоимость реагентов. Механическая и химическая деструкция полимерных молекул в зависимости от природы полимера и типа коллектора. Относительно низкая термостойкость (стабильность растворов редко достигает 120-130 °C). Постепенная потеря вязкости образованной структуры за счет процесса диффузии
Силикатные соединения	Низкая стоимость. Образование геля или осадка в зависимости от используемого реагента. Подвижность в поровом пространстве	Невозможность использования в условиях выше 95 °C. Низкая эффективность ВПП в высокопроницаемых коллекторах
Осадкообразующие составы	Низкая стоимость. Высокая термостойкость. Подвижность в поровом пространстве	Низкая эффективность ВПП по сравнению с полимерными или гелеобразующими соединениями. Продолжительность эффекта ВПП в зависимости от свойств коллектора и пластовой воды
Оксиды металлов (наночастицы)	Преимущественно используются в составе других типов химических соединений для ВПП. Высокая термостойкость	Высокая стоимость. Низкая эффективность ВПП и кольматации порового пространства

Технологии ВПП постоянно совершенствуются с целью повышения эффективности и снижения стоимости геолого-технических мероприятий. В качестве метода повышения эффективности полимерных систем используются различные поверхностно-активные вещества (ПАВ), способствующие



увеличению подвижности системы для более глубокой обработки пласта [34]. Комбинированные составы полимерно-дисперсных и силикатных систем также позволяют воздействовать на призабойную и удаленную зону пласта, тем самым изменения фильтрационный поток закачиваемой воды [35]. Наночастицы чаще всего используются в качестве реагента МУН из-за нефтеотесняющей способности и снижения смачиваемости полимерно-дисперсных систем [36, 37].

При использовании газовых МУН возможны прорывы газа к добывающим скважинам, что существенно снижает эффективность процесса добычи нефти, поэтому разрабатываются вязкие пенообразующие составы на основе различных ПАВ, способствующие перераспределению газа в менее проницаемые участки трещинно-порового коллектора [38].

Перечисленные методы имеют свои достоинства и недостатки, но есть одно сходство – это использование водных растворов в определенных температурных условиях. Для высокотемпературных условий разрабатываются и постоянно совершенствуются термостойкие гелеобразующие системы [39-41], направленные на блокирование фильтрационного потока теплоносителя. К сожалению, использование пенообразующих систем в условиях закачки водяного пара маловероятно ввиду низкой термостойкости, а также фильтрации двух фаз – пара и горячей воды.

На практике уже существуют технологии ограничения водопритока к добывающим скважинам и выравнивания профиля приемистости теплоносителя в условиях пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения. Использование гелеобразующей (термотропной) [42] и нефтеотесняющей [43] композиций позволило повысить эффективность добычи нефти при пароциклических обработках добывающих скважин. Для повышения эффективности предусмотрено добавление поверхностно-активных веществ и растворителей [44, 45]. Применение данных технологий в термошахтных условиях проблематично из-за возможности попадания газообразных продуктов химических реакций в рудничную атмосферу.

В качестве метода ограничения притока теплоносителя в виде пара или горячей воды предлагается рассмотреть осадкообразующие составы, которые при перемешивании в воде образуют мелкодисперсные осадки с высокой глубиной проникновения в поровую структуру коллектора, вызывающие потокоотклоняющий эффект [46].

Ионообменные реакции при использовании осадкообразующих составов образуют водорастворимые соли и нерастворимые осадки, которые кольматируют поровое пространство. Ярким примером использования осадкообразующих растворов являются растворы карбоната натрия и хлорида кальция, которые при смешивании образуют нерастворимый в воде карбонат кальция и растворимый в воде хлорид натрия. Дополнительным эффектом применения осадкообразующих составов является рост сцепленности коллектора за счет увеличения карбонатности [47], что в перспективе может снизить пескобояния в скважинах при использовании паротепловых МУН.

Цель и задачи работы

Для предупреждения возможных осложнений при разработке Яргской площади подземно-поверхностным методом и повышения эффективности паротеплового воздействия существует необходимость проведения геолого-технических мероприятий, направленных на выравнивание профиля приемистости теплоносителя. Не все применяемые технологии по выравниванию профиля приемистости подойдут для использования в термошахтных условиях, например из-за наличия газообразных продуктов химических реакций или отсутствия термостойкости. Поэтому подбор эффективных осадкообразующих составов (ООС) для увеличения охвата тепловым воздействием является актуальным.

Цель исследования – оценка эффективности применения осадкообразующих составов при закачке теплоносителя. Для выполнения поставленной цели решается ряд задач:

- Формирование зонально-неоднородной насыпной модели пласта Яргской площади Яргского месторождения.
- Определение порового объема модели и коэффициента открытой пористости при насыщении дистиллированной водой.
- Проведение закачки осадкообразующих составов при фильтрации теплоносителя с разными темпами закачки и термобарическими условиями.
- Оценка изменения контролируемых параметров после закачки осадкообразующих составов с пароводяной смесью.
- Определение изменения эффективного порового объема при определенной скорости фильтрации после закачки ООС.

Научная новизна работы – использование ООС в горной породе при закачке пароводяной смеси с температурой до 200 °С. В рамках определения эффективности использования осадкообразующих составов в пористой среде использован метод оценки измерения эффективного порового объема за счет перераспределения фильтрационного потока.

Методология исследования

Исследование выполнено с использованием основных узлов фильтрационной установки ПИК-ОФП/ЭП-К-Т, проточного парогенератора-перегревателя, двухплунжерного насоса ЛН-800-100 и измерителя иммитанса «ПетроОм» с кюветой для определения электрического сопротивления жидкости. Для создания неоднородных насыпных моделей используется естественный помол керна в соотношении наиболее распространенных фракций коллектора Яргского месторождения с диаметром частиц 0,1-0,25 мм – 45 % и диаметром частиц 0,25-0,5 мм – 55 %, а также экстрагированные керновые образцы диаметром 30 мм, распиленные вдоль своей оси.

Габаритные размеры стальной трубы с внутренней резьбой: длина 500 мм, диаметр 30 мм, объем 353,25 мл. Формирование неоднородной насыпной модели пласта состоит из следующих шагов:

- погружение полосы фильтровальной бумаги в стальную трубу насыпной модели и закрытие выходного торца модели;
- погружение полуцилиндрических керновых образцов при угле наклона стальной трубы около 10°;
- засыпка песка во вторую половину насыпной модели в вертикальном положении и его дальнейшая усадка за счет собственной массы с помощью ударов резиновой киянкой по силовым элементам стальной трубы.

Для нижней части насыпной модели выбраны керновые образцы с абсолютной проницаемостью по газу (гелию) до продольного распиления: № 13 – 9913,3 мД; № 45 – 5262,4 мД; № 33 – 2320,0 мД; № 101 – 1078,0 мД. Средняя проницаемость керновых образцов по длине модели составляет около 5500 мД. Полуцилиндрические керновые образцы расположены с увеличением проницаемости к выходу модели, т.е. с созданием максимальной разницы проницаемостей на входе между погружной «керновой» частью и засыпанным песком.

Суммарная масса горной породы насыпной модели составила 655,88 г (407,75 г – засыпанный естественный помол керна и 248,13 г – суммарная масса керновых образцов). Подготовленная модель пласта в вертикальном положении с помощью соединительной трубы входного торца снизу подсоединялась к насосу ЛН-800-100 для насыщения дистиллированной водой с объемным расходом 0,2 мл/мин. Выходная трубка из модели пласта погружена в измерительный цилиндр для оценки объема воды, прошедшего через насыпную модель. Процесс насыщения можно считать завершенным, когда объем закачанной воды по данным телеметрии равен набранному объему на выходе в измерительном цилиндре. В конце насыщения выходной торец модели закрывается и проводится опрессовка модели до 2 МПа с целью определения герметичности всех соединений, выдержка давления в течение 4 ч, постепенное стравливание сверху модели в измерительный цилиндр, прокачка воды до стабилизации объемного расхода на входе и выходе модели. В результате насыщения дистиллированной водой поровый объем ($V_{\text{пор}}$) составил 93,4 мл (открытая пористость модели 26,4 %).

После определения порового объема модели пласта выполняется ее перевод в горизонтальное положение с подключением к фильтрационной установке согласно гидравлической схеме (рис.1). Для оценки изменения проницаемости используется дифференциальный манометр, для измерения температуры – термопары на входе и выходе модели. Для контроля выхода продуктов химических реакций ООС предусмотрено постоянное отслеживание электрического сопротивления жидкости в измерительной кювете прибора «ПетроОм». Наличие нерастворимых частиц в выходящем конденсате определялось путем пропускания всего объема конденсата из резервуара через бумажный фильтр с последующей его сушкой и определением массы. Для фазового перехода «пар-конденсат» в емкости с хладагентом подсоединялась гибкая полиуретановая трубка длиной около 4 м и объемом 12 мл.

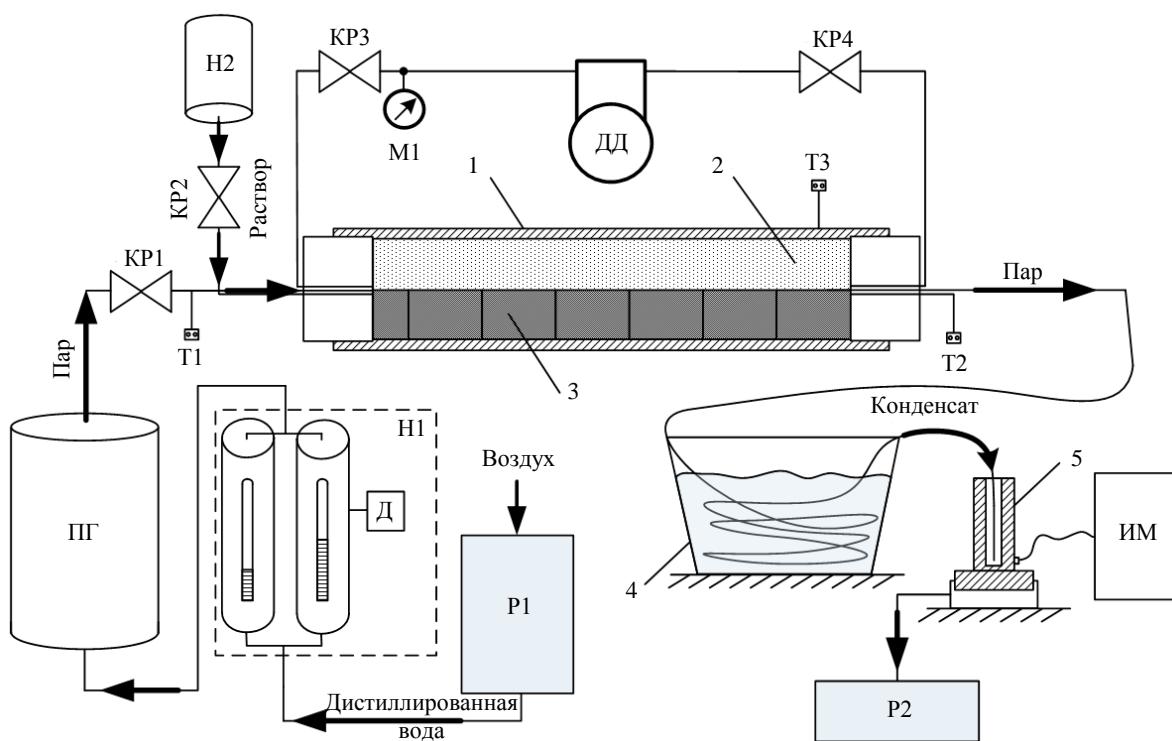


Рис.1. Гидравлическая схема эксперимента по закачке осадкообразующих составов в неоднородную насыпную модель

1 – труба с внутренней резьбой для фильтрационных сопротивлений; 2 – естественный помол керна; 3 – полуцилиндрические керновые образцы; 4 – емкость с хладагентом для фазового перехода теплоносителя; 5 – кювета измерителя иммитанса (ИМ); Р1 – резервуар с дистиллированной водой; Н1 – двухпунжерный насос для подачи дистиллированной воды с датчиком Д давления и объемного расхода; ПГ – проточного парогенератор-перегреватель; Н2 – насос для закачки осадкообразующих растворов и раствора хлорида натрия; М1 – давление закачки пара; ДД – дифференциальное давление; Т1, Т2 – температура теплоносителя на входе и выходе насыпной модели; Т3 – температура стальной трубы насыпной модели около выхода; КР1, КР2, КР3, КР4 – гидравлические краны; Р2 – резервуар для сбора конденсата

В качестве ООС используются растворы сульфата железа, карбоната натрия и хлорида кальция концентрациями 0,45 г/мл (максимальная концентрация реагентов). Объемы растворов неорганических солей составляют 3, 6 и 3 мл. Алгоритм обработки модели ООС:

- остановка закачки пара, закачка раствора сульфата железа с последующей закачкой пара в течение 2 мин с 50 % от установленного темпа закачки до начала обработки;
 - остановка закачки пара, закачка идентичного объема технической воды для промывки нагнетательной линии с продолжением подачи 50 % объемного расхода теплоносителя;
 - аналогично выполняется закачка раствора карбоната натрия с 75 % от установленного до обработки осадкообразующими составами объемного расхода;
 - закачка раствора хлорида кальция с последующей закачкой пара с объемным расходом до выполнения обработки ООС.

После обработки горной породы ООС изменяется давление при различных режимах закачки теплоносителя (объемных расходах дистиллированной воды в парогенератор). Всего предусмотрено шесть режимов фильтрации теплоносителя с объемным расходом 3; 5; 8; 10; 13 и 15 мл/мин.

Измерение эффективного порового объема горной породы при определенной скорости фильтрации теплоносителя выполняется следующим образом:

- закачка с постоянным объемным расходом пароводяной смеси до стабилизации электрического сопротивления конденсата на выходе;
 - остановка закачки пара, закачка раствора хлорида натрия с концентрацией 0,01 г/мл объемом 2 мл согласно гидравлической схеме (рис.1);
 - продолжение закачки пара с отслеживанием изменения электрического сопротивления конденсата по мере прокачки поровых объемов теплоносителя в водном эквиваленте;
 - закачка ООС, закачка пара до полного выхода продуктов химических реакций и стабилизации электрического сопротивления конденсата на выходе;

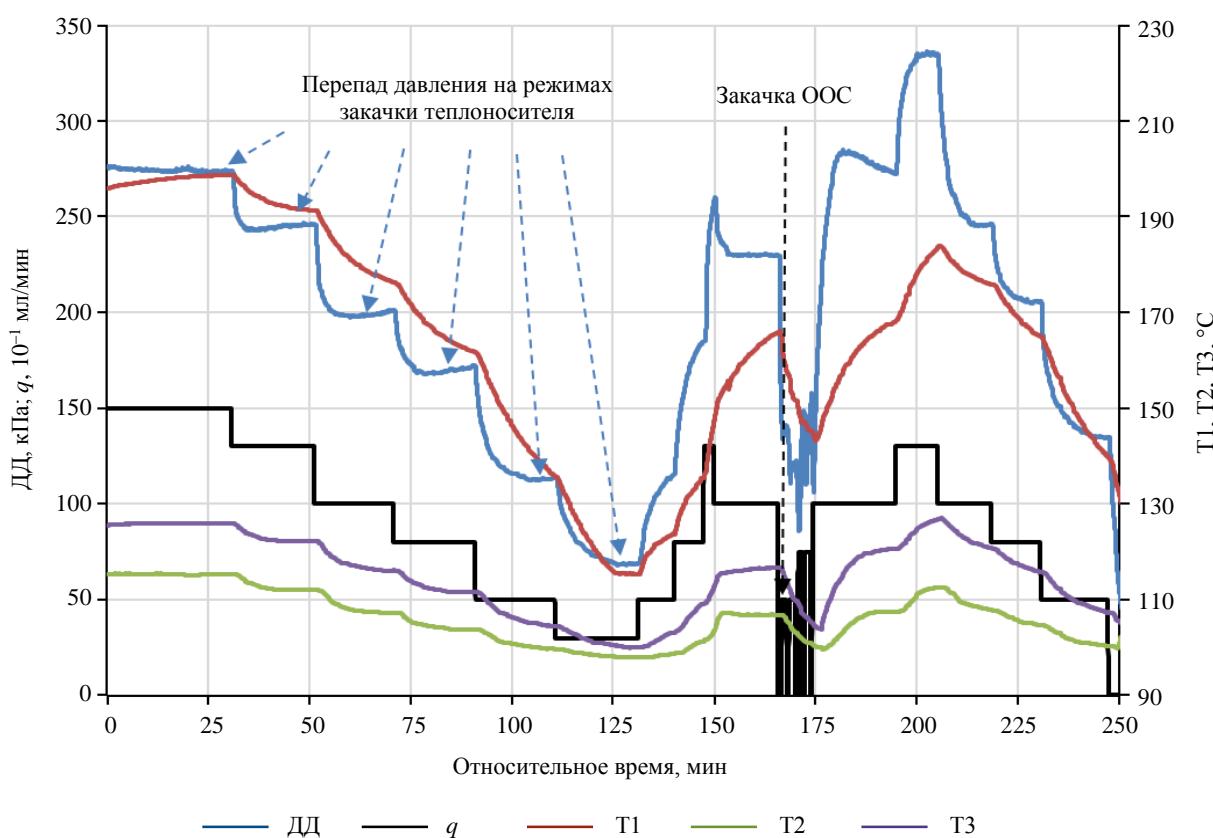


Рис.2. Результаты создаваемого перепада давления при разных объемных расходах дистиллированной воды в парогенератор и закачка ООС

- закачка раствора хлорида натрия с концентрацией 0,01 г/мл объемом 2 мл и отслеживание динамики электрического сопротивления при идентичном объемном расходе теплоносителя;
- сравнение динамики зафиксированного выхода ионов хлорида натрия при постоянном объемном расходе теплоносителя до и после закачки ООС с оценкой изменения эффективного порового объема в водном эквиваленте.

Под эффективным поровым объемом понимается объем пустотного пространства, по которому двигается закачиваемый раствор хлорида натрия с теплоносителем. При использовании ООС должно происходить уменьшение пустотного пространства за счет образованных нерастворимых частиц в сообщающихся порах, участвующих в фильтрации.

Обсуждение результатов

При концентрации растворов ООС с объемами 3; 6; 3 мл в результате химических реакций возможно получить 2,7 г осадков – карбоната железа, карбоната кальция с возможными включениями гидроксида железа и малорастворимого сульфата кальция.

На рис.2 представлена динамика основных показателей до и после выполнения закачки ООС. В качестве объемного расхода перед выполнением обработки ООС выбрано $q = 10$ мл/мин, поскольку при меньших расходах температура на выходе насыпной модели была близка к 100 °C из-за высоких теплопотерь. Температура теплоносителя на входе в насыпную модель при объемном расходе 10 мл/мин составляла 173,4 °C, а температура на выходе – 106,7 °C.

После закачки ООС наблюдался кратковременный выход нерастворимых осадков карбоната железа. После фильтрации сконденсированного теплоносителя через бумажный фильтр (белая лента) масса вышедших из модели осадков составила 0,21 г. После закачки ООС подача теплоносителя останавливалась до полного остывания модели, затем модель прогревалась теплоносителем с последующим определением перепада давления от объемного расхода воды в парогенератор с момента осуществления обработки ООС (рис.3). Выполнялась оценка устойчивости к «вымыванию» образованных осадков при нестационарных термобарических условиях в зависимости от количества прокачанных поровых объемов теплоносителя.

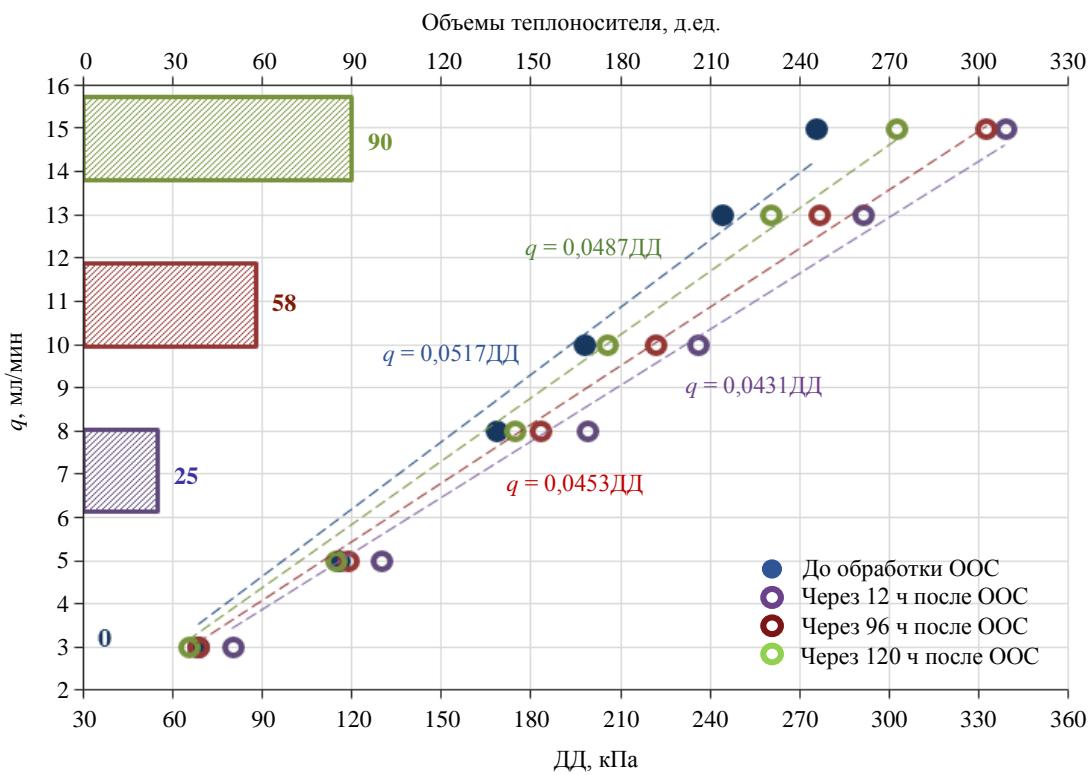


Рис.3. Зависимость объемного расхода дистиллированной воды от дифференциального давления до и после первой обработки ООС с течением времени и количеством прокачанных поровых объемов теплоносителя в водном эквиваленте

В результате закачки теплоносителя при различных объемных расходах дистиллированной воды в проточный парогенератор-перегреватель зафиксировано изменение зависимости перепада давлений с увеличением объема прокачки теплоносителя (рис.3). Отмечается изменение динамики перепада давлений при тех же объемных расходах теплоносителя, вызванное преимущественно количеством прокачанных поровых объемов теплоносителя после полного остыивания модели. Так, при закачке $25V_{\text{пор}}$ теплоносителя в водном эквиваленте перепад давления в среднем на всех режимах больше на 19,1 % по сравнению с динамикой до обработки ООС. При суммарной прокачке теплоносителя $90V_{\text{пор}}$ перепад давления в среднем больше на 4,9 %. Максимальный прирост дифференциального давления наблюдается при высоких скоростях фильтрации.

Согласно полученным результатам после первой обработки ООС выполнены повторные закачки реагентов для оценки увеличения перепада давлений на каждом режиме закачки теплоносителя.

После второй обработки ООС в вышедшем конденсате отмечается осадки бежевого оттенка (карбоната кальция) с общей массой 0,17 г. Аналогично первой обработке ООС выход осадков наблюдается в течение 4-8 мин после закачки последнего раствора – хлорида кальция. В результате третьей обработки ООС наличие нерастворимых осадков того же карбоната кальция в конденсате наблюдается через 5-7 мин после начала закачки теплоносителя с объемным расходом 10 мл/мин. Если после первой обработки ООС прокачано $90V_{\text{пор}}$ теплоносителя в водном эквиваленте, то после второй закачано $163V_{\text{пор}}$, а после третьей – $185V_{\text{пор}}$ (рис.4).

Наращивание количества прокачки пара после закачки ООС объясняется вероятностью выхода осадков после предыдущей обработки ООС. В результате прокачки теплоносителя на различных скоростях фильтрации подтверждается устойчивость осадков в порах насыпной модели пласта, так как в выходящем конденсате не отмечено нерастворимых частиц. Кратковременный выход осадков после применения ООС можно объяснить прорывом осадкообразующих растворов к выходу насыпной модели и их образованию при смещивании в выходящем конденсате.

По величинам перепада давления от обработки к обработке ООС (рис.4) наблюдается аналогичная ситуация, что и при прокачке теплоносителя после первой закачки ООС – изменение среднего дифференциального давления. При сравнительном анализе полученных результатов эффективность

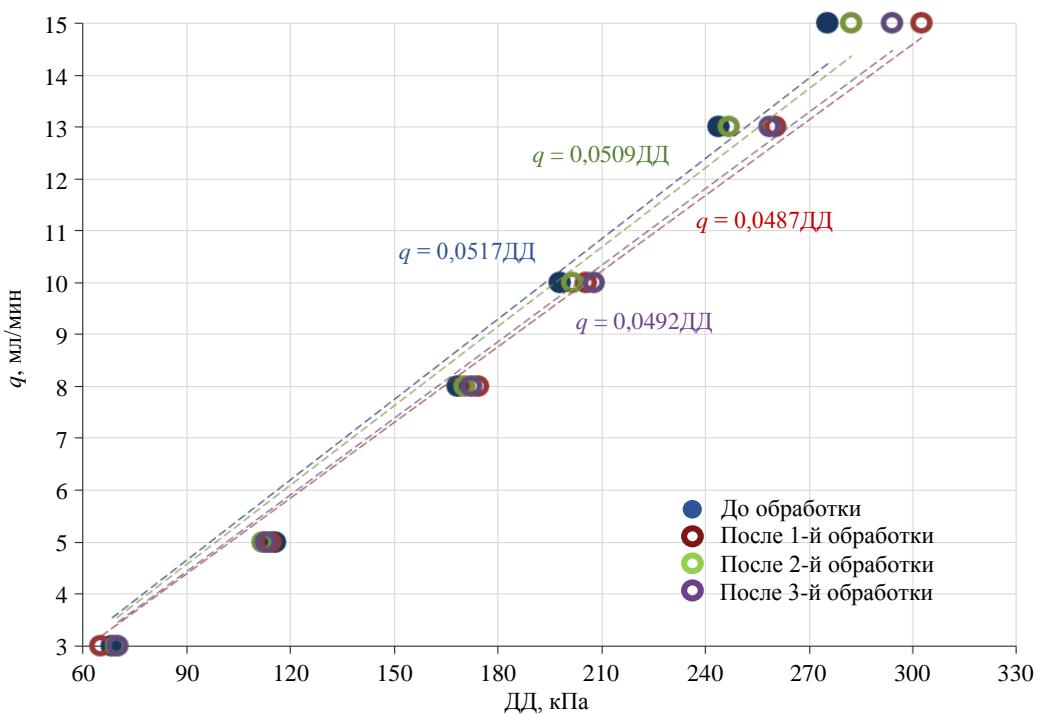


Рис.4. Зависимость объемного расхода дистиллированной воды от дифференциального давления до и после обработок ООС с прокачкой теплоносителя

каждой обработки прослеживается слабо, поскольку дифференциальное давление – это разница давлений на входе и выходе модели, которые могут увеличиваться одновременно в случае осадкообразования по всей длине модели.

При визуальном осмотре торцов насыпной модели после остановки закачки теплоносителя наблюдается процесс осадконакопления на выходе (рис.5). Параллельно выполняется оценка давления закачиваемого теплоносителя (рис.6), а также исследование эффективного порового объема теплоносителя после закачки ООС с прокачкой теплоносителя.

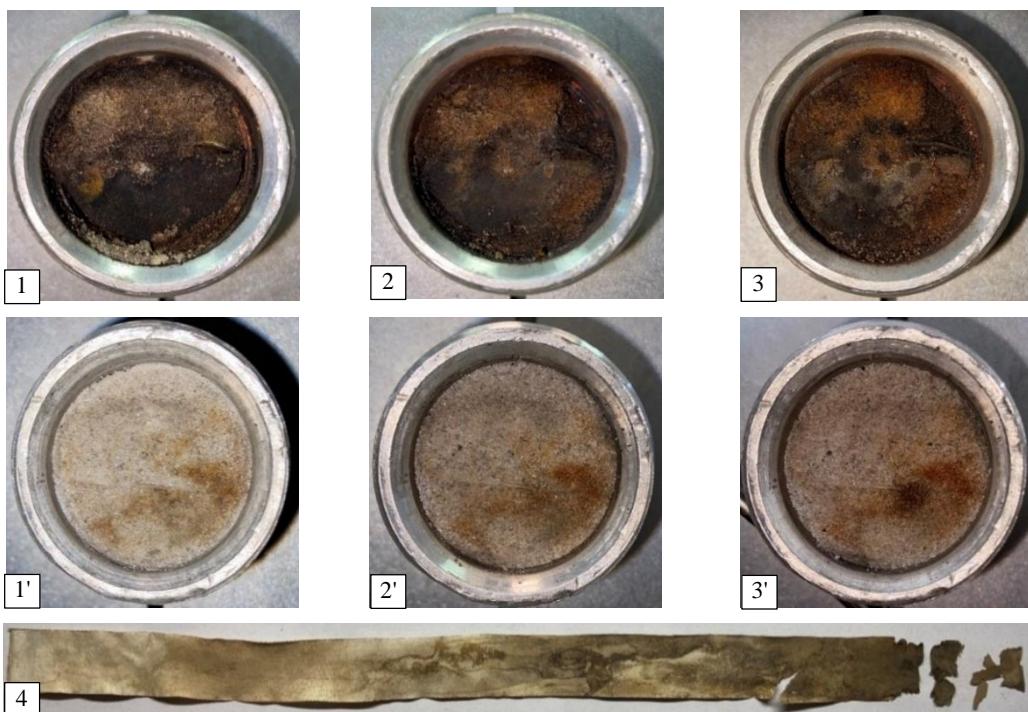


Рис.5. Торцы модели после применения ООС:

1 и 1' – вход и выход модели после 1-й закачки ООС; 2 и 2' – вход и выход модели после 2-й закачки ООС; 3 и 3' – вход и выход модели после 3-й закачки ООС; 4 – полоса фильтровальной бумаги, контактируемая с песком

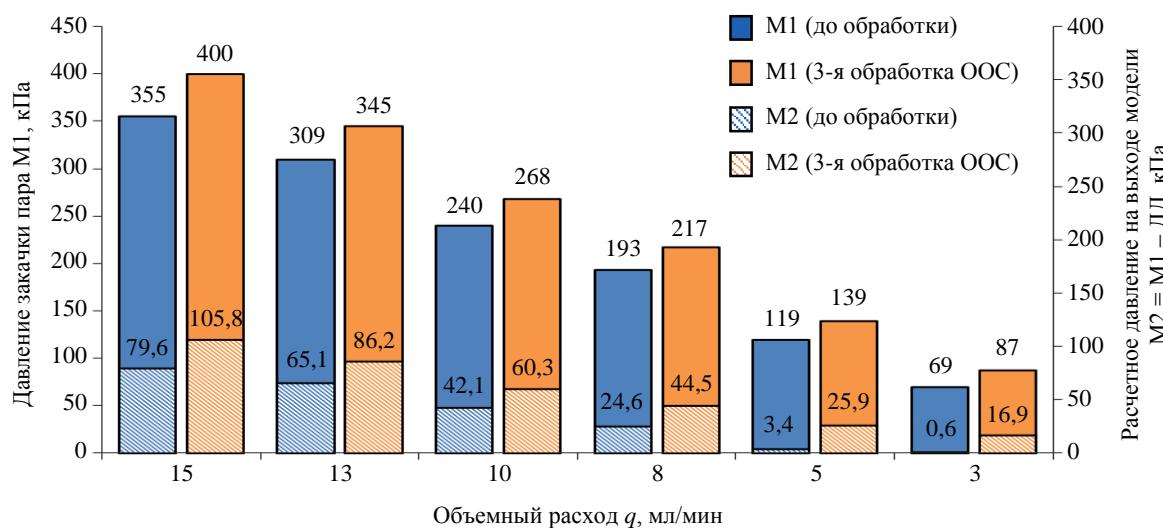


Рис.6. Давления закачки пара на входе и расчетные давления на выходе насыпной модели при объемных расходах закачки теплоносителя

Расчетные давления на выходе насыпной модели указывают на существенный прирост к начальным значениям при расходах теплоносителя менее 8 мл/мин. При данных расходах за счет теплопотерь ближе к выходу насыпной модели наблюдается фазовый переход закачиваемого пара в горячую воду, на всех режимах закачки теплоносителя – прирост давления на выходе при каждой закачке ООС. Фильтровальная бумага (см. рис.5) после разбора модели подтверждает осадконакопление почти по всей длине насыпной модели пласта (более 90 % всей длины фильтровальной бумаги со стороны контакта с песком).

После каждой обработки ООС наблюдается постепенное снижение давления закачки пара и дифференциального давления при прокачке объемов теплоносителя. Данный процесс вызван уплотнением мелкодисперсных осадков на входе в модель, что приводит к постепенному прорыву пара через зоны с искусственно созданным фильтрационным сопротивлением.

При исследовании эффективного порового объема после обработок ООС и прокачки теплоносителя отмечается изменение динамики электрического сопротивления выходящего конденсата (рис.7). Структура порового пространства существенно изменяется после первой обработки ООС, эффективный поровый объем увеличивается на 70,6 % по сравнению с начальным.

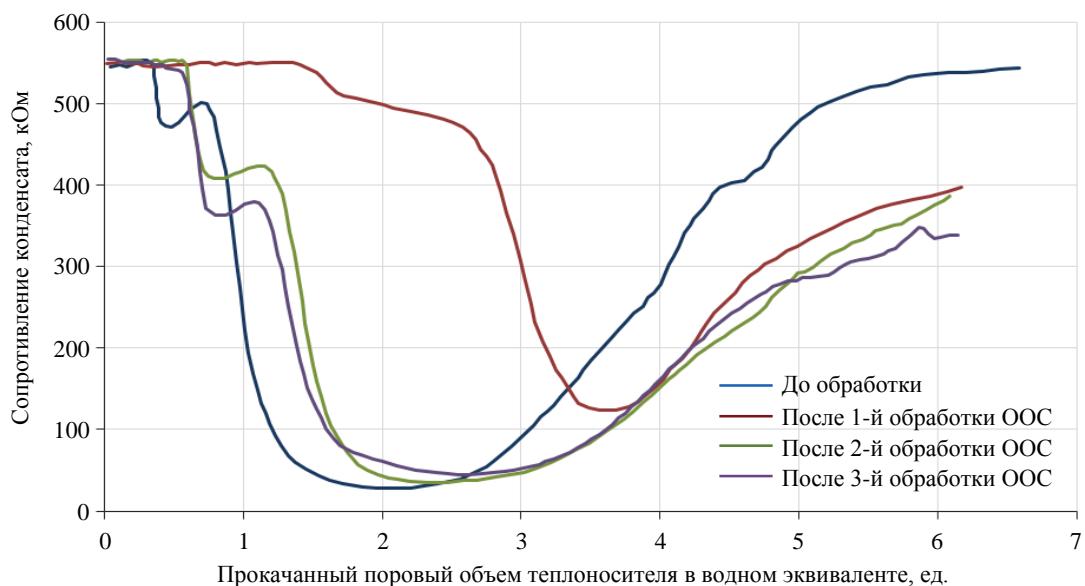


Рис.7. Изменение электрического сопротивления выходящего конденсата после закачки раствора хлорида натрия от прокачанных поровых объемов теплоносителя при постоянном объемном расходе 10 мл/мин



Все результаты экспериментального исследования по закачке ООС сведены в табл.2. Эффективность использования ООС при закачке теплоносителя прослеживается при выполнении исследования фильтрационного потока (определении эффективного порового объема модели). Видно, что после всех закачек осадкообразующих растворов, несмотря на происходящие геомеханические процессы, наблюдается стабильность эффективного порового объема после третьей закачки ООС и прокачки теплоносителя объемом $185V_{\text{пор}}$.

Таблица 2

Результаты исследования эффективности применения ООС
при объемном расходе теплоносителя 10 мл/мин

Параметр	Значение			
	До ООС	Закачка ООС		
		1	2	3
Масса образованных осадков в модели пласта, г	–	2,49	2,53	2,55
Количество прокачанных поровых объемов теплоносителя после закачки ООС, ед.	–	90	163	185
Давление закачки пара, кПа	240	254	265	268
Дифференциальное давление, кПа	197,9	205,5	201,6	207,7
Расчетное давление на выходе модели, кПа	42,1	48,5	58,4	60,3
Температура закачки пара, °C	173,4	173,5	174,8	174,3
Температура стальной трубы в конце насыпной модели, °C	116,9	118,4	117,8	118,8
Температура теплоносителя на выходе из модели, °C	106,8	107,7	107,8	108,6
Минимальное сопротивление конденсата, кОм	28,7	113,6	35,3	44,4
Начало снижения сопротивления конденсата в поровых объемах (эффективный поровый объем), д.ед.	0,35	1,41	0,59	0,59
Минимальное сопротивление раствора, зафиксированное в поровых объемах, д.ед.	1,96	3,57	2,49	2,59
Максимальная концентрация NaCl в конденсате, г/л	0,14	0,04	0,12	0,11

Концентрации ООС были максимальными ввиду растворимости в технической или пресной воде карбоната натрия. Очевидно, что концентрация реагентов ООС может быть скорректирована в меньшую сторону, но соотношение их объемов должно оставаться неизменным 1:2:1 с целью полного реагирования между собой и образования нерастворимых осадков. Закачка буферной жидкости (технической воды) приводит к диффузии ионов и снижению концентрации в начале модели. За счет изменения скорости фильтрации (температура закачки теплоносителя) первый раствор ООС реагирует со вторым в поровом объеме, а после закачки третьего раствора происходит окончательный ионный обмен с оставшимися карбонат-ионами, образование осадков и их седimentация внутри пор. Таким образом, за счет изменения скорости фильтрации и диффузии ионов происходит кольматация осадков по всей длине насыпной модели пласта.

Заключение

Результаты исследования применения осадкообразующих составов при закачке теплоносителя в различных скоростях фильтрации и термобарических условиях показали следующее:

- Снижение средней проницаемости по длине модели на 21,1 % после первой обработки ООС. Эффективный поровый объем при этом изменился на 303 % (на $1,06V_{\text{пор}}$), что обусловлено созданием фильтрационных сопротивлений в поровом пространстве на пути движения теплоносителя.
- После обработок ООС зафиксировано изменение эффективного порового объема и средней проницаемости по длине модели от прокачки теплоносителя при перераспределении осадка в порах. После второй обработки ООС проницаемость снизилась на 47,1 %, после третьей – на 55,0 %. Окончательный эффективный поровый объем в результате обработок ООС увеличен на 70,6 %.

Можно сделать вывод, что применение ООС в условиях паронагнетательных скважин Яргской площади может способствовать перераспределению теплоносителя за счет создания дополнительных фильтрационных сопротивлений в призабойной и удаленной зонах пласта. Термоустойчивость и низкая стоимость реагентов ООС предполагает высокую рентабельность при использовании в



паронагнетательных скважинах. Однако для подсчета коммерческой эффективности от применения ООС требуется проведение опытно-промышленных работ по совместной закачке пара и осадкообразующих составов в условиях разработки трещинно-порового пласта Ярегского месторождения.

Эффективность применения ООС будет зависеть от минерального состава горной породы, что может стать ограничивающим фактором по внедрению технологий. Проведение дополнительных экспериментальных исследований, направленных на определение прочностных свойств после применения ООС, а также изменение смачиваемости горных пород позволит расширить достоинства предлагаемой технологии ВПП в терригенных коллекторах при использовании паротепловых МУН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gomaa S., Salem K.G., El-hoshoudy A.N.* Enhanced heavy and extra heavy oil recovery: Current status and new trends // Petroleum. 2024. Vol. 10. Iss. 3. P. 399-410. [DOI: 10.1016/j.petlm.2023.10.001](https://doi.org/10.1016/j.petlm.2023.10.001)
2. *Раупов И.Р., Сытник Ю.А.* Повышение нефтеотдачи пласта на месторождениях высоковязкой и сверхвязкой нефти // Neftegaz.RU. 2022. № 7 (127). С. 14-22.
3. *Mokheimer E.M.A., Hamdy M., Abubakar Z. et al.* A Comprehensive Review of Thermal Enhanced Oil Recovery: Techniques Evaluation // Journal of Energy Resources Technology. 2019. Vol. 141. Iss. 3. № 030801. [DOI: 10.1115/1.4041096](https://doi.org/10.1115/1.4041096)
4. *Yibo Li, Zhiqiang Wang, Zhiming Hu et al.* A review of in situ upgrading technology for heavy crude oil // Petroleum. 2021. Vol. 7. Iss. 2. P. 117-122. [DOI: 10.1016/j.petlm.2020.09.004](https://doi.org/10.1016/j.petlm.2020.09.004)
5. *Guodong Cui, Ting Liu, Jingyu Xie et al.* A review of SAGD technology development and its possible application potential on thin-layer super-heavy oil reservoirs // Geoscience Frontiers. 2022. Vol. 13. Iss. 4. № 101382. [DOI: 10.1016/j.gsf.2022.101382](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101382)
6. *Vijitha Mohan, Yi Su, Jingyi Wang, Gates I.D.* Rich solvent – Steam assisted gravity drainage (RS-SAGD): An option for clean oil sands recovery processes // Cleaner Engineering and Technology. 2022. Vol. 8. № 100463. [DOI: 10.1016/j.clet.2022.100463](https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100463)
7. *Kirmani F.U.D., Raza A., Gholami R. et al.* Analyzing the effect of steam quality and injection temperature on the performance of steam flooding // Energy Geoscience. 2021. Vol. 2. Iss. 1. P. 83-86. [DOI: 10.1016/j.engeos.2020.11.002](https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.11.002)
8. *Huanquan Sun, Haitao Wang, Xulong Cao et al.* Innovations and applications of the thermal recovery techniques for heavy oil // Energy Geoscience. 2024. Vol. 5. Iss. 4. № 100332. [DOI: 10.1016/j.engeos.2024.100332](https://doi.org/10.1016/j.engeos.2024.100332)
9. *Zhi Yang, Xingge Sun, Chihui Luo et al.* Vertical-well-assisted SAGD dilation process in heterogeneous super-heavy oil reservoirs: Numerical simulations // Underground Space. 2021. Vol. 6. Iss. 6. P. 603-618. [DOI: 10.1016/j.undsp.2020.12.003](https://doi.org/10.1016/j.undsp.2020.12.003)
10. *Anbari H., Robinson J.P., Greaves M., Righy S.P.* Field performance and numerical simulation study on the toe to heel air injection (THAI) process in a heavy oil reservoir with bottom water // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2023. Vol. 220. Part B. № 111202. [DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111202](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111202)
11. *Рузин Л.М., Чупров И.Ф., Морозюк О.А., Дуркин С.М.* Технологические принципы разработки залежей аномально вязких нефтей и битумов. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. 476 с.
12. *Xiaohu Dong, Huiqing Liu, Zhangxin Chen et al.* Enhanced oil recovery techniques for heavy oil and oilsands reservoirs after steam injection // Applied Energy. 2019. Vol. 239. Iss. 1. P. 1190-1211. [DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.244](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.244)
13. *Дуркин С.М.* Совершенствование методов нефтешахтной разработки месторождений. Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2022. 128 с.
14. *Дуркин С.М., Меньшикова И.Н., Рузин Л.М., Терентьев А.А.* Опыт разработки Лыасельской площади Ярегского месторождения высоковязкой нефти с применением различных технологий // Нефтяное хозяйство. 2019. № 10. С. 62-67. [DOI: 10.24887/0028-2448-2018-10-62-67](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-10-62-67)
15. *Коноплев Ю.П., Герасимов И.В.* 80 лет добычи нефти на Ярском месторождении высоковязкой нефти // Нефтяное хозяйство. 2017. № 7. С. 30-32. [DOI: 10.24887/0028-2448-2017-7-30-32](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-7-30-32)
16. *Нор М.А., Коноплев Ю.П., Митрошин А.В., Андреев Д.В.* Основы термошахтной разработки. Сыктывкар: Коми республиканская типография, 2022. 240 с.
17. *Коноплев Ю.П., Буслаев В.Ф., Ягубов З.Х., Цхадая Н.Д.* Термошахтная разработка нефтяных месторождений. М.: Недра, 2006. 288 с.
18. *Нор М.А., Нор Е.В., Цхадая Н.Д.* Источники нагревающего микроклимата при разработке месторождений высоковязких нефтей термошахтным способом // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 360-363. [DOI: 10.18454/PMI.2017.3.360](https://doi.org/10.18454/PMI.2017.3.360)
19. *Ирбахтин А.Н., Саврей Д.Ю.* Анализ результатов геофизических исследований скважин, предназначенных для пароциклических обработок с использованием метода термометрии // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2020. № 12 (348). С. 27-32. [DOI: 10.30713/2413-5011-2020-12\(348\)-27-32](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2020-12(348)-27-32)
20. *Dong Zhao, Jian Hou, Qingjun Du et al.* Pore-Throat Structure Changes During Steam Flooding: An Experimental Study Based on Micro-CT Scanning // SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition, 24-26 January 2023, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, 2023. № SPE-212705-MS. [DOI: 10.2118/212705-MS](https://doi.org/10.2118/212705-MS)
21. *Soroush M., Roostaei M., Hosseini S.A. et al.* Challenges and Potentials for Sand and Flow Control and Management in the Sandstone Oil Fields of Kazakhstan: A Literature Review // SPE Drilling & Completion. 2023. Vol. 36. Iss. 1. P. 208-231. [DOI: 10.2118/199247-РА](https://doi.org/10.2118/199247-РА)
22. *Земцов Ю.В., Мазаев В.В.* Современное состояние физико-химических методов увеличения нефтеотдачи: литературно-патентный обзор. Екатеринбург: Издательские решения, 2021. 240 с.
23. *Земцов Ю.В., Мазаев В.В.* К вопросу критериев выбора технологий малообъемных химических МУН в различных геолого-промышленных условиях пластов // Нефть. Газ. Новации. 2021. № 7 (247). С. 54-59.
24. *Karadkar P., Almohsin A., Bataweel M., Jin Huang.* In-Situ Pore Plugging Using Nanosilica-Based Fluid System for Gas Shutoff to Maximize Oil Production // SPE Production & Operations. 2023. Vol. 38. Iss. 1. P. 104-112. [DOI: 10.2118/197578-РА](https://doi.org/10.2118/197578-РА)

25. *Wei-Peng Wu, Ji-Rui Hou, Ming Qu et al.* A novel polymer gel with high-temperature and high-salinity resistance for conformance control in carbonate reservoirs // *Petroleum Science*. 2022. Vol. 19. Iss. 6. P. 3159-3170. [DOI: 10.1016/j.petsci.2022.05.003](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.05.003)
26. *Qian-Hui Wu, Ji-Jiang Ge, Lei Ding, Gui-Cai Zhang.* Unlocking the potentials of gel conformance for water shutoff in fractured reservoirs: Favorable attributes of the double network gel for enhancing oil recovery // *Petroleum Science*. 2023. Vol. 20. Iss. 2. P. 1005-1017. [DOI: 10.1016/j.petsci.2022.10.018](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.10.018)
27. *Мамбетов С.Ф., Земцов Ю.В.* Исследование устойчивости дисперсных систем для физико-химических методов увеличения нефтеотдачи в присутствии гидрофобного наполнителя // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2023. № 4 (160). С. 42-51. [DOI: 10.31660/0445-0108-2023-4-42-51](https://doi.org/10.31660/0445-0108-2023-4-42-51)
28. *Zahirovic I., Danilovic D., Šuput Vranjin M., Tripkovic M.* Laboratory Testing of Nanosilica-Reinforced Silicate and Polyacrylamide Gels // *SPE Journal*. 2023. Vol. 28. Iss. 3. P. 1241-1249. [DOI: 10.2118/214294-PA](https://doi.org/10.2118/214294-PA)
29. *Shehbaz S.M., Bera A.* Effects of nanoparticles, polymer and accelerator concentrations, and salinity on gelation behavior of polymer gel systems for water shut-off jobs in oil reservoirs // *Petroleum Research*. 2023. Vol. 8. Iss. 2. P. 234-243. [DOI: 10.1016/j.ptlrs.2022.06.005](https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2022.06.005)
30. *Белов В.И., Зарипов А.Т., Береговой А.Н. и др.* Применение эмульсионных систем для увеличения нефтеотдачи в условиях заводнения пластов на месторождениях ПАО «Татнефть» // *Нефтяное хозяйство*. 2021. № 7. С. 32-35. [DOI: 10.24887/0028-2448-2021-7-32-35](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-7-32-35)
31. *Jie Wang, Ting Wang, Hualei Xu, Houshun Jiang.* Graded regulation technology for enhanced oil recovery and water shutoff in pore-cavity-fracture carbonate reservoirs // *Arabian Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 15. Iss. 7. № 103907. [DOI: 10.1016/j.arabjc.2022.103907](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103907)
32. *Songxia Liu, Ott W.K.* Sodium silicate applications in oil, gas & geothermal well operations // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 195. № 107693. [DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107693](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107693)
33. *Федоров К.М., Шевелев А.П., Выдыш И.В. и др.* Методика оценки и прогнозирования реакции добывающих скважин на обработку нагнетательных скважин по технологии выравнивания профиля приемистости // *Нефтяное хозяйство*. 2022. № 9. С. 106-110. [DOI: 10.24887/0028-2448-2022-9-106-110](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-9-106-110)
34. *Rodriguez F., Belhaj H., Morales R. et al.* Chemical Enhanced Oil Recovery (CEOR) Applications for Extra-Heavy Oil Reservoirs in the Eastern Venezuela Basin: The First Surfactant-Polymer Pilot Test // *SPE Advances in Integrated Reservoir Modelling and Field Development Conference and Exhibition*, 2-4 June 2025, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, 2025. № SPE-225344-MS. [DOI: 10.2118/225344-MS](https://doi.org/10.2118/225344-MS)
35. *Lifeng Chen, Feiyang Huang, Gang Li et al.* Experimental Study on Fiber Balls for Bridging in Fractured-Vuggy Reservoir // *SPE Journal*. 2023. Vol. 28. Iss. 4. P. 1880-1894. [DOI: 10.2118/214315-PA](https://doi.org/10.2118/214315-PA)
36. *Aboahmed A., Mohanty K.* Chemical Huff and Puff for Shale Oil Recovery Using Surfactants, Nanoparticles and Ketones // *SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference*, 9-11 June 2025, Houston, TX, USA. OnePetro, 2025. № URTEC-4235291-MS. [DOI: 10.15530/urtec-2025-4235291](https://doi.org/10.15530/urtec-2025-4235291)
37. *Pakeer A.A., Baouchi Y., Hashmet M.R., Alblooshi Y.* Laboratory and Simulation Studies of Novel Hybrid Nano-Polymer EOR in Carbonate Reservoirs // *SPE Advances in Integrated Reservoir Modelling and Field Development Conference and Exhibition*, 2-4 June 2025, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, 2025. № SPE-225353-MS. [DOI: 10.2118/225353-MS](https://doi.org/10.2118/225353-MS)
38. *Singh R., Yifan Wang, Katiyar A. et al.* Novel Foaming Formulations Development to Enable Gas Huff-N-Puff Field Pilots // *SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference*, 9-11 June 2025, Houston, TX, USA. OnePetro, 2025. № URTEC-4246479-MS. [DOI: 10.15530/urtec-2025-4246479](https://doi.org/10.15530/urtec-2025-4246479)
39. *Zhan-Xi Pang, Qian-Hui Wang, Qiang Meng et al.* The mechanisms of thermal solidification agent promoting steam diversion in heavy oil reservoirs // *Petroleum Science*. 2024. Vol. 21. Iss. 3. P. 1902-1914. [DOI: 10.1016/j.petsci.2024.01.001](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2024.01.001)
40. *Yongqing Bai, Zonglun Cao, Yongfeng Hu et al.* Highly thermoconductive biogel for enhancing thermal efficiency and soil self-remediation in heavy oil recovery // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 398. № 136643. [DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136643](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136643)
41. *Sijia Liu, Xiaodong Wu, Yanhan Li et al.* Hydrophobic in-situ $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ composite aerogel for heavy oil thermal recovery: Synthesis and high temperature performance // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 190. № 116745. [DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116745](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116745)
42. *Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Кувшинов И.В.* Применение термопроточных композиций для увеличения нефтеотдачи при пароциклических обработках скважин на пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. 2019. № 12 (1). С. 136-143. [DOI: 10.17516/1998-2836-0113](https://doi.org/10.17516/1998-2836-0113)
43. *Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Кувшинов И.В. и др.* Физико-химические и комплексные технологии увеличения нефтеотдачи пермо-карбоновой залежи высоковязкой нефти Усинского месторождения // *Нефтяное хозяйство*. 2017. № 7. С. 26-29. [DOI: 10.24887/0028-2448-2017-7-26-29](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-7-26-29)
44. *Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Стасьева Л.А. и др.* Нефтеустойчивая композиция ПАВ с регулируемой вязкостью для увеличения нефтеотдачи залежей высоковязких нефей // *Георесурсы*. 2016. Т. 18. № 4. Ч. 1. С. 281-288. [DOI: 10.18599/grs.18.4.5](https://doi.org/10.18599/grs.18.4.5)
45. *Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Стасьева Л.А., Кувшинов И.В.* Увеличение нефтеотдачи залежей высоковязких нефей кислотными композициями на основе поверхностно-активных веществ, координирующих растворителей и комплексных соединений // *Георесурсы*. 2019. Т. 21. № 4. С. 103-113. [DOI: 10.18599/grs.2019.4.103-113](https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.103-113)
46. *Кладова А.В., Шамсутдинова Е.В., Узяркина Е.Г.* Технологические требования к осадкообразующим составам для повышения нефтеотдачи пластов // *Нефтепромысловое дело*. 2023. № 10 (658). С. 46-49. [DOI: 10.33285/0207-2351-2023-10\(658\)-46-49](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-10(658)-46-49)
47. *Qiang Wang, Yuhuan Bu, Chang Lu.* Reinforcement Methods and Key Materials for Sand Control in Weakly Cemented Sandstone // *The 35th International Ocean and Polar Engineering Conference*, 1-6 June 2025, Seoul, Korea. OnePetro, 2025. № ISOPE-I-25-013

Авторы: Дмитрий Юрьевич Саврей, заведующий лабораторией (Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Республика Коми, Россия), dsavrey@ugtu.net, <https://orcid.org/0009-0009-9433-9446>, Илья Федорович Чупров, д-р техн. наук, профессор (Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Республика Коми, Россия), <https://orcid.org/0009-0004-3648-3144>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.