

Издается Санкт-Петербургским
горным университетом

С 1907 ГОДА

E-ISSN 2541-9404
ISSN 2411-3336

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



ТОМ 262

№ 4 • 2023

ИНДЕКСИРУЕТСЯ
SCOPUS (Q1)
WEB OF SCIENCE (ESCI)

WWW.PMI.SPMI.RU



Научный журнал «Записки Горного института» с 1907 года издается Санкт-Петербургским горным университетом – 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 горно-заводского дела.

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

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

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

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

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

Статьи публикуются на безвозмездной основе. Перевод предоставляется автором.

На обложке экспонат Горного музея – апатит – зелено-синие призматические полупрозрачные кристаллы в желто-розовом кальците с флогопитом (Слюдянское месторождение, Мамско-Чуйский р-н, Иркутская обл., Россия). Образец поступил в 1974 г. как один из подарков к 200-летию ЛГИ. Апатит является сырьем для производства фосфорных удобрений, фосфора и фосфорной кислоты, его применяют в черной и цветной металлургии, в производстве керамики и стекла. Минерал редко используется ювелирами из-за его невысокой твердости и хрупкости.

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

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА



РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1907 года

ISSN 2411-3336
e-ISSN 2541-9404

Том 262

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • 2023

Учредитель Санкт-Петербургский горный университет

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Разделы

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-70453 от 20.07.2017

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.02

Редакция: начальник РИЦ В.Л.Лебедев, редакторы Е.С.Дрибинская, М.Г.Хачирова, В.Е.Филиппова, Л.В.Набиева, М.В.Скворцова
Компьютерная верстка Н.Н.Седых, В.И.Каширина

© Санкт-Петербургский горный университет, 2023

Подписано к печати 28.08.2023. Формат 60 × 84/8. Уч.-изд.л. 34.
Тираж 300 экз. Заказ 597. Отпечатано в РИЦ СПбГУ.
Цена свободная.

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



СОДЕРЖАНИЕ

Геология

<i>Алексеев В.И.</i> Воджинит как минерал-индикатор танталоносных пегматитов и гранитов	495
<i>Салимгараева Л.И., Березин А.В.</i> Гранатиты из эклогитового комплекса Марун-Кей (Полярный Урал): геохимия и проблемы образования.....	509
<i>Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Усачева О.О., Рычкова Т.В., Карташова Е.В., Назарова М.А., Кузьмина А.А.</i> Влияние вторичного минералообразования на показания Na-K-геотермометра на примере гидротермальной системы Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка)	526

Геотехнология и инженерная геология

<i>Александров В.И., Ватлина А.М., Махараткин П.Н.</i> Обоснование и выбор расчетных параметров гидрофицированного комплекса оборудования для получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения.....	541
<i>Бурдонов А.Е., Лукьянов Н.Д., Пелих В.В., Салов В.М.</i> Применение метода опорных векторов для обработки результатов обогащения оловянных руд методом центробежной концентрации	552
<i>Выстрчил М.Г., Гусев В.Н., Сухов А.К.</i> Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофото-съемки с беспилотного воздушного судна	562
<i>Господариков А.П., Ревин И.Е., Морозов К.В.</i> Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит».....	571
<i>Индрупский И.М., Ибрагимов И.И., Цаган-Манджиев Т.Н., Лутфуллин А.А., Чиркунов А.П., Шакиров Р.И., Алексеева Ю.В.</i> Лабораторная, численная и промысловая оценка эффективности циклического геомеханического воздействия на карбонатном коллекторе турнейского яруса.....	581
<i>Кашиников А.В., Круглов Ю.В.</i> Стратегия управления проветриванием рудника в оптимальном режиме с использованием аппарата нечеткой логики	594
<i>Коршунов В.А., Павлович А.А., Бажуков А.А.</i> Оценка сдвиговой прочности горных пород по трещинам на основе результатов испытаний образцов сферическими инденторами.....	606
<i>Протосеня А.Г., Беляков Н.А., Буслова М.А.</i> Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением	619

Экономика сырьевых отраслей

<i>Череповицын А.Е., Третьяков Н.А.</i> Разработка новой системы оценки применимости цифровых проектов в нефтегазовой сфере	628
---	-----



Обзорная статья

Воджинит как минерал-индикатор танталоносных пегматитов и гранитов

В.И.АЛЕКСЕЕВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Алексеев В.И. Воджинит как минерал-индикатор танталоносных пегматитов и гранитов // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 495-508. EDN RJACLL. DOI: 10.31897/PMI.2023.19

Аннотация. В составе тантало-ниобатов выделены оловосодержащие минералы группы воджинита (МГВ): воджинит, титановоджинит, ферроводжинит, ферротитановоджинит, литиоводжинит, танталоводжинит, «вольфрамоводжинит». Выполнен обзор мировых исследований МГВ. Создана база данных, включающая 698 анализов из 55 источников и авторские данные. МГВ приурочены к Li-F пегматитам и Li-F гранитам; наиболее распространен воджинит: 86,6 % в пегматитах и 78,3 % в гранитах. Встречаемость МГВ в гранитах и пегматитах отличается: в гранитах в три раза чаще встречаются титановоджинит и «вольфрамоводжинит», совсем не встречаются литиоводжинит и танталоводжинит. Отличие МГВ гранитов состоит в более мелком размере зерен; повышенном содержании Sn, Nb, Ti, W, Sc; пониженном – Fe^{3+} , Ta, Zr, Hf; высоком значении $\text{Mn}/(\text{Mn} + \text{Fe})$ и низком – Zr/Hf. Ряды эволюции МГВ в пегматитах: ферроводжинит → ферротитановоджинит → титановоджинит → «вольфрамоводжинит» → воджинит → танталоводжинит; в гранитах: ферроводжинит → ферротитановоджинит → «вольфрамоводжинит» → воджинит → титановоджинит. МГВ служат индикаторами танталоносных пегматитов и гранитов. В России перспективными источниками тантала являются месторождения Дальневосточного пояса Li-F гранитов, содержащих воджинит.

Ключевые слова: группа воджинита; титановоджинит; ферроводжинит; «вольфрамоводжинит»; редкометалльный литий-фтористый гранит; редкометалльный пегматит; тантал; редкометалльные месторождения; типоморфизм; изоморфизм

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-15-50064.

Поступила: 22.08.2022

Принята: 02.02.2023

Онлайн: 20.04.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Современное развитие металлургии и аккумуляторной промышленности определяет устойчивый рост потребления тантала. Европейская комиссия отмечает критическое экономическое значение и дефицит танталового сырья, неравномерное географическое распределение его мировых запасов. Тантал входит в список стратегических видов полезных ископаемых, учтенных Указом Президента РФ «О применении специальных экономических мер...» от 05.08.2022 в условиях санкционного режима. Увеличение добычи тантала сопровождается изменениями в экономической геологии редкометалльного сырья. Во-первых, наряду с пегматитовыми месторождениями Австралии, Канады, Бразилии все большее промышленное значение приобретают месторождения в редкометалльных Li-F гранитах Египта, Китая и других стран [1-3]. Во-вторых, возрастает экономическое значение оловянно-танталовых руд, сложенных касситеритом и воджинитом.

Наименее изученным промышленным минералом тантала является воджинит, о котором накоплена эмпирическая информация, требующая систематизации. Последние обзоры минералогии воджинита выполнены в 1989-1992 гг. для пегматитовых месторождений [4, 5]. Особенно актуальным является исследование воджинита в России, где он описан всего в четырех районах в 1960-1980 гг. [6-8]. Исследование акцессорных минералов позволяет получить важную информацию о формационной принадлежности магматических пород, условиях их образования и возможности межрегиональной корреляции магматических комплексов [9, 10]. При этом важнейшее значение приобретают методы локального анализа вещества [11, 12]. Данная статья представляет



собой современный научный обзор результатов мировых исследований минералов группы воджинита (МГВ) со времени открытия воджинита в 1963 г. Новизна работы состоит в обобщении новейших материалов XXI в., уточнении ранее сделанных выводов и оценке возможности использования МГВ в качестве индикаторов танталоносных пегматитов и гранитов, а также промышленных источников редких металлов. Уделено внимание воджиниту России, использованы данные автора о месторождениях Дальнего Востока.

Современное состояние исследования минералов группы воджинита. Главными промышленными минералами тантала являются минералы ряда танталит – колумбит, минералы группы микролита, Та-касситерит и воджинит. За полуторавековой период изучения тантало-ниобатов накоплен богатый материал, создана стройная классификация Та-Nb оксидов. В реферативной базе данных Scopus содержится 634 источника по этой тематике, а воджиниту посвящена лишь 81 публикация. Воджинит – $\text{MnSnTa}_2\text{O}_8$ – впервые описан как иксиолит в 1909 г. на танталовом месторождении Воджина (Австралия) [13]. В 1963 г. Э.Г.Никель с соавторами нашли аналогичный минерал в литий-цезиевых пегматитах месторождения Берник-Лейк (Канада) и назвали его по месту находки воджинитом [14].

В настоящее время воджинит является титульным минералом группы относительно редких оловосодержащих тантало-ниобатов, входящих в качестве аксессуаров в состав редкометалльных пегматитов (далее пегматитов) Австралии, Бразилии, Китая, Центральной Африки, Канады, Европы и др. [1, 4, 15] (табл.1). На этапе разработки классификации МГВ были известны в 37 проявлениях [5]. После открытия на месторождении Берник-Лейк (Канада) воджинит-танталитовых руд воджинит приобрел статус промышленного минерала. Это увеличило интерес к МГВ, и сегодня известно более 79 пунктов их проявления [16]. Постепенно возрастает промышленное значение воджинита на танталовых месторождениях провинций Борборема (Бразилия), Гуарда-Бельмонте (Португалия), Дамара (Намибия), Кибара (Конго), Масвинго (Зимбабве), Супериор, Сепаратион Рэпидс (Канада), Бастар-Малкангири (Индия), Катазия (Китай), Балингуп, Воджина (Австралия), Калба-Нарым (Казахстан) и др.

В XX в. воджинит был известен только в пегматитах, но с 2002 г. нарастает поток информации об аксессуарных МГВ в редкометалльных литий-фтористых гранитах (далее гранитах) Алжира (Эбелекан, Филфила), Египта (Абу-Даббаб, Нувеиби, Муэйльха), Испании (Пенута), Китая (Ичунь, Дацишань), Чехии (Хуб) [1, 3, 17] (рис.1, табл.2). Причинами позднего обнаружения МГВ в гранитах являются их незначительный размер и визуальное сходство с танталитом. Установлены перспективы танталоносности воджинитсодержащих гранитов Аравийско-Нубийского щита (Египет), Магрибского пояса (Алжир, Марокко), Иберийского массива (Испания) и Катазии (Китай).

В России МГВ исследованы недостаточно: они найдены лишь в пегматитах Кольского полуострова (Вороньи тундры, Кейвы), Восточного Саяна (Вишняковское, Малореченское), Урала (Тайгинское) и Восточного Забайкалья [18-20]. В гранитах России воджинит описан только на Вознесенском месторождении (Приморье) [21, 22]. Нами установлено наличие воджинита в гранитах месторождения Кестер (Якутия) [23].

Фактический материал и методы. В обзоре исследований воджинита использованы опубликованные данные за период 1963-2022 гг. и авторские материалы по редкометалльно-оловянным месторождениям Дальнего Востока и Египта. Информация о составе, физических свойствах и структуре минералов упорядочена в виде сводной базы данных, включающей 470 анализов (44 источника) МГВ из пегматитов; 228 анализов (11 источников) МГВ из гранитов, полученных в основном методом ЕРМА. Следует отметить, что реальное количество анализов, положенных в основу обзора, существенно больше, так как в использованных публикациях приведены представительные анализы из массивов объемом в десятки и сотни проб. В статье задействованы оригинальные авторские данные, полученные при исследовании гранитов Арга-Ыннах-Хайского массива в Якутии с Sn-Ta месторождением Кестер, массивов Абу-Даббаб и Нувеиби с одноименными Sn-Ta месторождениями в Египте.

Выполнена оценка изученности МГВ, статистика их встречаемости, состав и физические свойства. Проведен сравнительный анализ параметров одноименных минералов в пегматитах и гранитах. Статистически обработаны данные с учетом распределения параметров [24], с использованием программ Microsoft Excel 2010 и Statistica 8.0. Изучение свойств МГВ при решении генетических задач основывалось на принципах, изложенных в [25].



Таблица 1

Химический состав (мас. %) минералов группы воджинита в редкометалльных пегматитах мира

Месторождение	N	MnO	FeO	SnO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	Li ₂ O	WO ₃	ZrO ₂	HfO ₂	CaO	Sc ₂ O ₃	Источник
Воджинит															
Кейвы, Россия	1	10,88	0,54	17,50	1,45	0,33*	62,94	4,92	—	1,07	—	—	—	—	[18]
Калба, Казахстан	1	10,91	3,06	10,26	0,81	3,23*	67,50	7,09	—	—	—	—	—	—	[6]
Вост. Саян, Россия	2	7,96	—	6,66	1,58	4,37	73,20	4,56	—	—	—	—	0,81	—	[7]
Вишняковское, Россия	36	9,76	0,81	12,30	0,32	0,10*	71,03	3,06	—	0,00	—	—	0,07	—	[19]
Чалланпара, Индия	1	9,74	1,73	11,79	1,45	0,89*	67,96	3,06	—	0,68	1,31	0,00	—	—	[26]
Серидозиньо, Бразилия	1	7,20	4,80	13,10	0,10	1,31*	68,40	3,50	—	—	1,50	—	—	—	[27]
Пирлесс, США	4	10,30	0,28	17,10	0,10	0,45	66,50	4,30	—	—	—	—	—	—	[28]
Варутреск, Швеция	2	10,14	0,26	10,70	0,02	—	65,34	9,70	—	0,01	2,05	0,82	0,01	—	[29]
Ред-Кросс-Лейк, Канада	3	11,01	0,03	16,13	0,03	—	64,02	6,27	—	0,00	1,21	0,24	0,03	—	[30]
Воджина, Австралия	1	10,70	—	13,00	1,40	0,80	68,60	4,00	—	—	—	—	—	—	[31]
Мухембе, Руанда	1	4,30	6,30	14,50	0,90	1,70	61,10	10,90	0,20	—	0,00	—	—	0,00	[15]
Наньпин, Китай	1	9,00	1,30	14,00	0,10	2,00	67,00	5,90	0,17	—	0,00	—	—	0,00	[15]
Карибиб, Намибия	1	11,00	—	14,50	—	—	68,90	4,40	—	—	—	—	—	0,00	[15]
Тахара, Япония	1	9,60	1,60	7,40	4,70	0,10	71,00	0,80	—	0,60	0,20	—	—	1,70	[15]
Танко, Канада	1	8,90	2,30	8,80	5,50	1,20	60,40	11,10	0,14	—	0,00	—	—	—	[15]
Гуарда-Бельмонте, Португалия	3	6,88	7,70	10,73	4,01	2,96*	59,10	11,58	—	—	—	—	—	—	[32]
Ла-Викита, Аргентина	8	5,43	2,32	10,03	1,39	1,60	71,28	3,23	0,19	0,05	0,99	—	0,02	0,00	[33]
Леггия-валли, Швейцария	2	8,40	3,79	14,53	0,54	1,43*	68,50	3,04	—	0,84	—	—	0,00	0,00	[34]
Эммонс, США	3	9,63	1,64	16,44	0,32	0,54*	69,23	3,55	0,05	—	—	—	—	—	[35]
Аклэр, Ирландия	1	7,73	4,89	12,78	1,18	1,53	64,35	8,65	—	—	—	—	0,09	—	[36]
Виитаниеми, Финляндия	1	8,80	1,20	11,80	0,30	—	70,60	5,50	—	—	—	—	1,20	—	[37]
Нумби, Конго	1	6,42	4,67	14,12	0,49	1,60	61,14	7,46	—	0,70	1,11	—	—	—	[38]
Пустервальд, Австрия	1	8,17	5,10	15,96	0,44	2,07*	59,75	9,81	—	—	—	—	0,82	—	[39]
Энни Клайм, Канада	2	10,84	1,01	14,83	0,07	0,00	62,62	7,25	—	0,11	1,85	0,45	0,01	0,00	[40]
Берник-Лейк, Канада	1	9,04	1,87	13,20	2,39	0,27*	70,05	1,35	—	—	—	—	—	—	[14]
Говиндпал, Индия	6	10,04	0,95	15,78	0,68	0,07*	65,60	4,95	—	0,17	0,35	—	0,05	—	[41]
Наньпин, Китай	2	9,64	0,84	15,83	0,25	1,36*	67,72	4,18	0,11	0,04	—	—	—	0,17	[42]
Пендалрас, Индия	12	8,87	2,67	12,99	0,93	0,92*	60,70	5,07	—	2,70	1,08	0,32	0,12	—	[26]
Воджина, Австралия	1	10,47	1,34	8,92	0,00	0,96*	70,49	7,63	—	—	—	—	0,42	—	[13]
Тин-Маунтин, США	7	7,85	2,60	15,33	0,31	1,44	65,40	4,80	—	—	—	—	—	—	[43]
Муссельуайт, Канада	5	11,05	0,29	14,36	0,55	0,48*	68,08	3,84	—	0,30	0,99	—	0,07	0,15	[44]
Рубеллитовая дайка, Канада	3	10,56	0,69	15,54	0,85	0,51*	68,03	3,31	—	0,14	—	—	0,02	0,18	[45]
Сепаратион Рэпидс, Канада	5	9,66	1,69	15,32	0,89	1,78	62,29	6,87	0,04	1,31	—	—	—	0,02	[46]
Танко-Ловер, Канада	164	8,89	2,05	13,10	2,50	1,12	64,60	6,18	0,07	0,06	—	—	—	0,15	[47]
Херб № 2, США	4	8,13	3,30	12,30	3,65	0,45	67,18	5,25	—	—	—	—	—	—	[48]
Титановоджинит															
Фонте-дель-Прете, Италия	3	11,06	—	6,76	9,63	—	64,08	5,64	—	0,31	—	—	—	—	[49]
Фейо, Бразилия	1	0,20	12,96	2,79	10,59	0,93*	68,07	5,71	—	—	0,26	—	0,00	0,29	[50]
Нанси, Аргентина	5	7,52	4,94	0,03	11,88	1,44	66,56	6,94	—	0,22	—	—	0,10	—	[51]
Сепаратион Рэпидс, Канада	2	8,59	4,30	7,75	8,68	1,00	54,95	14,29	0,00	0,07	—	—	—	0,05	[46]
Ферроводжинит															
Кейвы, Россия	1	0,87	17,81	10,88	0,39	7,23*	51,18	18,96	—	—	—	—	0,00	—	[18]
Вост. Забайкалье, Россия	1	6,94	5,26	9,44	0,93	7,89	63,16	7,21	—	—	—	—	—	—	[8]
Кап-де-Креус, Испания	1	5,25	6,29	11,82	0,53	1,92	64,90	6,63	—	—	—	—	—	—	[52]
Борборема, Бразилия	3	3,16	11,07	12,40	0,82	3,01*	60,53	11,21	—	—	0,73	—	0,00	0,16	[53]
Серидозиньо, Бразилия	1	3,50	9,10	13,10	0,10	1,13*	59,40	12,80	—	—	1,50	—	—	—	[27]
Ла-Викита, Аргентина	3	5,43	2,32	10,03	1,39	1,60	71,28	3,23	0,19	0,05	0,99	—	0,02	0,00	[33]
Нумби, Конго	1	5,23	6,33	12,33	2,10	2,06	56,37	10,91	—	1,69	0,69	—	—	—	[38]
Энни-Клайм, Канада	2	5,05	6,73	11,63	0,02	0,50	59,58	8,71	—	0,67	4,95	1,18	0,03	0,00	[40]
Пишава-Гурна, Польша	4	3,13	9,05	12,50	1,63	2,13	55,21	13,86	—	2,06	0,51	—	—	0,12	[54]
Наньпин, Китай	6	5,36	5,94	14,54	1,16	1,72	62,13	8,08	0,01	0,02	—	—	—	0,16	[42]
Сепаратион Рэпидс, Канада	4	3,00	9,13	13,02	2,44	2,32	54,85	13,53	0,01	1,58	—	—	—	0,03	[46]
Ньянга 2, Уганда	1	6,00	6,70	8,60	2,30	1,63*	68,00	7,70	—	—	—	—	—	—	[55]
Сукула, Финляндия	3	3,00	7,00	10,00	3,00	0,23*	62,00	12,67	—	—	—	—	—	—	[56]
Ферротитановоджинит															
Сан-Элиас, Аргентина	9	2,48	8,96	3,04	7,31	1,76	67,97	7,32	—	0,03	0,09	—	0,01	0,00	[57]
Ла-Каландрия, Аргентина	7	4,58	7,29	4,57	7,90	4,31	44,04	23,62	—	1,24	0,62	—	0,02	—	[58]
Нанси, Аргентина	3	3,95	8,07	0,05	9,20	2,70	71,00	4,12	—	0,07	—	—	0,18	—	[51]
Сепаратион Рэпидс, Канада	2	2,57	10,39	8,23	8,37	1,05	62,99	11,97	0,00	0,03	—	—	—	0,05	[46]
«Вольфрамоводжинит»															
Сепаратион Рэпидс, Канада	5	11,57	1,23	9,37	0,70	3,75	46,27	10,39	0,06	16,01	—	—	—	0,05	[46]

Примечания. Приведены средние содержания по данным источников (N – количество анализов). Для выборок более 10 проб приведены медианы содержания [24]. Прочерк – нет данных. Fe₂O₃* – расчетное значение.

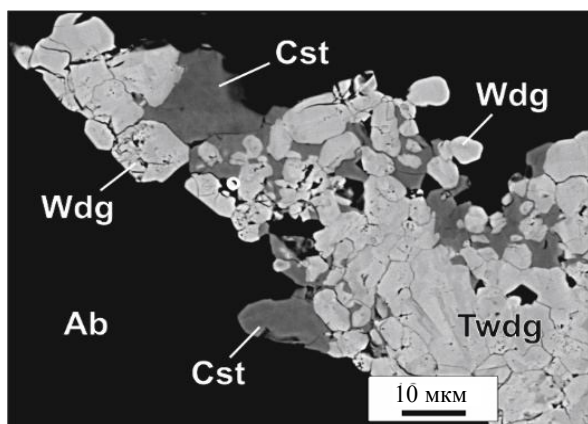


Рис.1. Воджинит (Wdg), титановоджинит (Twdg) и касситерит (Cst) в альбитовом (Ab) редкометальном граните месторождения Нувейби, Восточный Египет. Изображение в обратнорассеянных электронах

Классификация, структура и свойства минералов группы воджинита. По действующей классификации Международной минералогической ассоциации (ММА) [16] выделяются следующие минералы группы воджинита: воджинит $MnSnTa_2O_8$ [14]; титановоджинит $MnTiTa_2O_8$ [5]; ферроводжинит $FeSnTa_2O_8$ [5]; ферротитановоджинит $FeTiTa_2O_8$ [57]; литиоводжинит $LiTaTa_2O_8$ [59]; танталоводжинит $(Mn_{0,5}\square_{0,5})TaTa_2O_8$ [35]; «вольфрамороджинит» (неутвержденный минеральный вид) $MnTi(Ta,W)_2O_8$ [46] (табл.1, 2). Разновидности МГВ различаются соотношением главных и малых элементов ($> 0,01\%$) W, Fe^{3+} , Ca, Sc, Zr, Hf.

История расшифровки структуры воджинита изложена в статье [31]. Выделены три позиции катионов в шестерной координации: A (Mn), B (Sn)

и C (Ta). Кислородные октаэдры образуют зигзагообразные цепочки с реберным сочленением, соединенные в ритмично повторяющиеся слои трех типов: $ABA - CCC - BAB - CCC$. Общее распределение катионов: ABC_2O_8 ($Z = 4$). Таким образом, кристаллическая решетка воджинита является производной от неупорядоченной по слоям решетки иксиолита и более упорядоченной, чем решетка колумбита-танталита AB_2O_6 , состоящая из слоев октаэдров ABB . Воджинит можно рассматривать как максимально упорядоченный иксиолит с увеличенной вчетверо элементарной ячейкой [60-62]. Это подтверждено экспериментально: иксиолит, содержащий SnO_2 (до 19,5 %) и TiO_2 (до 15,8 %), при нагревании переходит в воджинит. Тип структуры воджинита промежуточный между слоистым и каркасным, в зависимости от соотношения катионов в формуле ABC_2O_8 , что отразилось в структуре литиоводжинита, где $B = C$ и состав минерала описывается формулой AB_3O_8 [59].

Таблица 2

Химический состав (мас.%) минералов группы воджинита в редкометальных гранитах мира

Месторождение	N	MnO	FeO	SnO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	Li ₂ O	WO ₃	ZrO ₂	HfO ₂	CaO	Sc ₂ O ₃	Источник
Воджинит															
Кестер, Якутия	12	9,95	3,36	11,46	1,23	1,95*	58,93	12,72	—	1,76	—	—	—	—	Данные автора
Абу-Даббаб, Египет	128	10,63	1,80	13,60	2,27	1,21*	62,63	7,97	—	—	—	—	—	—	Данные автора
Пенута, Испания	6	6,51	4,59	15,18	0,10	1,48	62,62	6,92	—	0,33	0,46	0,67	0,05	0,13	[63]
Грир-Лейк, Канада	2	10,95	0,00	15,10	0,10	0,65	67,75	3,90	—	—	—	—	—	—	[64]
Нувейби, Египет	3	7,38	5,14	13,23	0,38	1,45*	62,50	8,93	—	—	0,65	0,72	—	—	[65]
Эбелекан, Алжир	4	10,60	1,07	11,98	3,02	1,15	59,86	10,36	0,01	0,81	—	—	0,06	0,30	[66]
Ичунь, Китай	5	10,16	0,82	15,46	0,76	1,18	65,47	4,87	—	0,27	—	—	—	0,45	[17]
Нувейби, Египет	43	10,25	1,43	13,56	0,42	1,19*	65,95	4,96	—	—	—	—	—	—	[3]
Гедонпин, Китай	2	10,45	3,61	10,36	1,73	3,25*	64,57	6,91	—	1,16	—	—	—	0,00	[67]
Дацзишань, Китай	2	11,54	1,27	9,52	1,05	1,66*	57,95	14,08	—	2,12	—	—	—	—	[68]
Суншуган, Китай	3	4,12	9,90	6,38	7,31	1,77*	53,89	15,22	0,03	1,93	—	—	—	0,21	[69]
Титановоджинит															
Вознесенское, Россия	1	7,90	3,70	6,90	10,90	—	51,20	16,80	—	1,90	—	—	—	—	[21]
Эбелекан, Алжир	1	9,97	2,11	7,90	8,13	0,26	57,13	11,76	0,03	1,48	0,00	0,00	0,00	0,36	[66]
Ичунь, Китай	5	11,07	0,54	4,52	7,66	0,61	65,39	9,58	—	0,19	—	—	—	0,47	[17]
Ферроводжинит															
Хуб, Чехия	3	5,62	6,66	9,33	2,58	1,83	57,36	10,91	—	3,36	0,29	—	—	0,16	[70]
Суншуган, Китай	3	4,98	11,37	5,90	4,59	3,75*	41,22	28,03	0,02	2,30	—	—	—	0,26	[69]
Ферротитановоджинит															
Гедонпин, Китай	2	4,43	9,29	8,19	5,01	2,18*	54,91	12,75	—	2,10	—	—	—	0,00	[67]
Нувейби, Египет	2	6,30	6,20	11,73	3,48	0,73*	58,75	13,00	—	—	—	—	—	—	Данные автора
«Вольфрамороджинит»															
Суншуган, Китай	3	8,33	8,85	4,35	1,68	0,43*	38,97	17,98	0,21	18,39	—	—	—	0,79	[69]

* См. примечания к табл.1.



Изоморфизм МГВ. Полиэлементный изоморфизм в трех позициях кристаллической структуры *A*, *B* и *C* определяет различие минеральных видов МГВ: $A = (\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Li}, \text{Ca}, \square)$, $B = (\text{Sn}^{4+}, \text{Ti}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ta}, \text{Sc}, \text{Zr})$, $C = (\text{Ta}, \text{Nb}, \text{W}^{6+})$ [4, 15, 60]. Позиция *A* заселена в воджините и титановоджините (> 50 %) катионами Mn, которые в соответствующих условиях замещаются катионами Fe^{2+} с образованием ферроводжинита и ферротитановоджинита [15]. Характерной особенностью низковалентной позиции *A* является наличие значительного количества вакансий, компенсирующих избыток зарядов высоковалентных катионов (Ta^{5+} , W^{6+}), заселяющих позиции *B*, *C* в танталоводжините, литиоводжините и «вольфрамоводжините» [15, 29, 63] (табл.1, 2). Позиция *B* в МГВ кристаллохимически нестабильна вследствие конкуренции гетеровалентных катионов Sn^{4+} , Ti^{4+} , Fe^{3+} , Ta^{5+} , Sc^{3+} , Zr^{4+} . Состав октаэдрического слоя *B* имеет важное значение для классификации МГВ и генетических исследований [59, 46, 60]. Главную кристаллохимическую роль играет олово – активатор полиморфного превращения неупорядоченной иксиолитовой структуры в упорядоченную воджинитовую. При нагревании иксиолита с содержанием $\text{SnO}_2 < 0,2\%$ формируется ромбический колумбит-танталит, а при $\text{SnO}_2 \geq 9-10\%$ – моноклинный воджинит [59]. Заменителями олова в воджинитовой структуре служат Ti , Fe^{3+} , Ta , Sc , Zr [8, 71] (табл.1, 2).

В тантало-ниобатах обычно велика роль титана, но в МГВ изоморфизм $\text{Ti} \leftrightarrow \text{Ta}$ ограничен. Наиболее эффективным способом встраивания Ti в структуру служит $\text{Ti}^{4+} \leftrightarrow \text{Sn}^{4+}$ с образованием титановоджинита [15, 60] (табл.1, 2, рис.1). Главная схема изоморфизма в ряду танталит → воджинит, титановоджинит → микролит: ${}^A[\text{Fe}, \text{Mn}]^{2+} + 2{}^C[\text{Nb}, \text{Ta}]^{5+} \leftrightarrow 3{}^B[\text{Sn}, \text{Ti}]^{4+}$ [27, 28]. Воджинит и титановоджинит резко различаются по концентрации SnO_2 и TiO_2 , что указывает, возможно, на разрыв смесимости между МГВ с составами $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{SnTa}_2\text{O}_8$ и $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{TiTa}_2\text{O}_8$, но требует дальнейшего изучения [17].

Поскольку воджинит образуется в окислительных условиях, небольшая часть железа в нем находится в виде катионов Fe^{3+} [4, 70, 71] (табл.1, 2). Отношение $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ в воджините имеет более высокое значение, чем в танталите [41]. Катионы Sn^{4+} и Fe^{3+} являются взаимозаменяемыми в структуре воджинита и при недостатке олова его роль играет Fe^{3+} [8, 61, 62]. В железистых видах МГВ – ферроводжините, ферротитановоджините, «вольфрамоводжините» – сохранение электронейтральности достигается путем заселения в позицию *B* части катионов тантала: $2{}^B[\text{Sn}^{4+}] \leftrightarrow {}^B[\text{Fe}^{3+}] + {}^B[\text{Ta}^{5+}]$ [15, 59].

Во всех видах МГВ, особенно в танталоводжините и литиоводжините, наблюдается избыток катионов $(\text{Ta} + \text{Nb})$ в позиции *C*, доходящий до 3,7 катионов на ф.е. [15, 60]. Та внедряется в позицию *B* (табл.3) по схеме: $2{}^B\text{Ta}^{5+} + {}^A\square \leftrightarrow {}^A\text{Mn}^{2+} + 2{}^B\text{Sn}^{4+}$ [41]. В литиоводжините избыток положительного заряда катионов Ta^{5+} в позиции *B* регулируется механизмом: ${}^A[\text{Mn}^{2+}] + {}^B[\text{Sn}^{4+}] \leftrightarrow {}^A[\text{Li}^{+}] + {}^B[\text{Ta}^{5+}]$ [15].

В позиции *C* доминируют Ta и Nb , образующие слои октаэдров NbO_6 и TaO_6 – наиболее стабильный элемент слоистой структуры МГВ. Залогом высокоупорядоченной структуры воджинита является преобладание неискаженных Ta-O октаэдров [59]. Изоморфизм $\text{Ta} \leftrightarrow \text{Nb}$ ограничен величиной 8 катионов на ф.е. [15, 60]. В позицию *C* способен заселяться тяготеющий к ниобию вольфрам [59]. Экспериментально зафиксировано родство структуры воджинита и вольфрамита [72]. Присутствие в воджините существенной примеси WO_3 и корреляция ее содержания с $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ отмечены в гранитах [63, 68] и пегматитах [26, 46]. Выдвинуто предположение о существовании «вольфрамоводжинита», описанного в пегматитах Сепаратив Рэпидс (Канада) [46] и гранитах Суншуган (Китай) [69]. Для железистых разновидностей МГВ предложен механизм заселения вольфрама: ${}^B[\text{Sn}^{4+}] + {}^C[\text{Ta}^{5+}] \leftrightarrow {}^B[\text{Fe}^{3+}] + {}^C[\text{W}^{6+}]$; для марганцовистых разновидностей: ${}^B[\text{Sn}^{4+}] + 2{}^C[\text{Ta}^{5+}] \leftrightarrow {}^B[\text{Mn}^{2+}] + 2{}^C[\text{W}^{6+}]$; для Li -содержащего воджинита: $2{}^A[\text{Li}^{+}] + 2{}^A[\text{Mn}^{2+}] \leftrightarrow {}^C[\text{W}^{6+}]$ [46] (см. табл.1, 2).

Физические свойства МГВ. Свойства МГВ изучены в основном на примере воджинита пегматитов, который представлен гипидиоморфными призматическими и клиновидными кристаллами темно-красновато-бурого или черного цвета; блеск жирный, полуметаллический. Нередко минерал слагает неправильные выделения в интерстициях полевого шпата, альбита и слюды или микровключения в колумбите-танталите, касситерите, микролите. Размеры кристаллов МГВ в пегматитах колеблются от 2-10 мкм в микровключениях до 13 см в альбитовых агрегатах, составляя в среднем ≈ 1 см. В гранитах размеры зерен существенно меньше: 1-100 мкм, в среднем 27 мкм.



Таблица 3

Распределение главных катионов в структуре минералов группы воджинита из редкометалльных пегматитов и гранитов мира

Катион в позиции	Воджинит				Титановоджинит				Ферроводжинит				Ферротитановоджинит			
	Ме(612)	Мин	Макс	IQR	Ме(18)	Мин	Макс	IQR	Ме(36)	Мин	Макс	IQR	Ме(17)	Мин	Макс	IQR
Пегматиты																
A: Mn	0,86	0,38	1,03	0,20	0,66	0,02	0,94	0,29	0,35	0,07	0,67	0,22	0,28	0,20	0,37	0,14
Fe ²⁺	—	—	0,42	0,11	—	—	1,05	0,35	—	—	0,93	0,61	—	—	—	0,00
Li	—	—	0,04	0,00	—	—	—	0,00	—	—	0,01	0,00	—	—	—	0,00
B: Sn	0,58	0,30	0,75	0,15	0,19	—	0,30	0,20	0,51	0,36	0,62	0,10	0,15	—	0,30	0,11
Ti	0,06	—	0,42	0,10	0,75	0,62	0,87	0,09	0,09	—	0,23	0,14	0,58	0,57	0,72	0,05
Fe ³⁺	0,07	—	0,37	0,10	0,07	—	0,11	0,03	0,16	—	0,68	0,08	0,17	0,07	0,31	0,12
Ta	0,20	0,09	0,50	0,09	0,05	0,02	0,08	0,02	0,22	0,15	0,34	0,11	0,20	0,09	0,25	0,04
C: Ta	1,79	1,51	1,77	0,21	1,71	1,41	1,71	0,10	1,49	1,22	1,63	0,29	1,55	1,05	1,75	0,45
Nb	0,24	0,04	0,52	0,16	0,28	0,25	0,62	0,13	0,52	0,24	0,85	0,23	0,42	0,19	1,02	0,33
W	—	—	0,08	0,00	—	—	0,01	0,00	—	—	0,05	0,02	—	—	0,03	0,01
Граниты																
A: Mn	0,93	0,33	1,03	0,17	0,82	0,62	0,93	0,16	0,44	0,39	0,50	0,06	0,46	0,38	0,54	0,08
Fe ²⁺	0,06	—	0,66	0,12	—	—	0,28	0,14	0,30	—	0,61	0,30	0,54	0,46	0,62	0,08
Li	—	—	0,01	0,00	—	—	0,01	0,00	—	—	—	0,00	—	—	—	0,00
B: Sn	0,56	0,24	0,67	0,16	0,25	0,18	0,31	0,06	0,30	0,22	0,39	0,09	0,40	0,33	0,47	0,07
Ti	0,08	0,01	0,53	0,11	0,59	0,57	0,75	0,09	0,26	0,20	0,32	0,06	0,32	0,26	0,38	0,06
Fe ³⁺	0,12	0,05	0,26	0,03	0,02	—	0,05	0,02	0,20	0,14	0,26	0,06	0,11	0,06	0,17	0,06
Ta	0,23	0,11	0,36	0,07	0,06	0,02	0,19	0,08	0,25	0,25	0,25	0,00	0,17	0,15	0,19	0,02
C: Ta	1,58	1,29	1,69	0,07	1,46	1,26	1,57	0,24	1,08	0,78	1,39	0,31	1,39	1,36	1,41	0,04
Nb	0,40	0,20	0,66	0,22	0,52	0,43	0,70	0,14	0,84	0,52	1,16	0,32	0,59	0,58	0,59	0,00
W	0,01	—	0,06	0,04	0,04	—	0,05	0,02	0,07	0,05	0,09	0,02	0,03	—	0,06	0,03

Примечания. Приведены формульные коэффициенты катионов (ф.к.) в позициях A, B, C, рассчитанные на формулу ABC₂O₈. Прочерк – ф.к. < 0,005. Ме – медианное значение ф.к. (в скобках – количество проб). Мин и Макс – минимальное и максимальное значения ф.к. IQR – межквартильный размах ф.к. [24].

Сингония МГВ моноклинная (C2/c). Характерны простые и полисинтетические двойники. Спайность несовершенная. Плотность 7,03-7,81 г/см³; твердость 5,5-6. Оптические свойства: $N_p = 2,14-2,20$, $N_g = 2,23-2,27$, $\Delta = 0,07-0,09$, (+), $c:N_g = 26^\circ$. Под микроскопом плеохроирует от светло-желтого до красновато-коричневого цвета; имеет концентрически-зональную и секториальную окраску [4, 7, 16].

Минералы группы воджинита – индикаторы танталовых пегматитов и гранитов.

Материнские породы и парагенезисы МГВ. Выявление в последние 20 лет двух типов промышленно важных МГВ в танталовых пегматитах и гранитах повлекло за собой необходимость изучения типоморфных особенностей одноименных МГВ из этих пород. Воджинит и другие МГВ встречаются в виде акцессорных минералов в редкометалльных литиевослюдистых пегматитах Li-Cs-Ta геохимического типа (LCT пегматитах) [29, 73]. С учетом важнейшей роли фтора в редкометалльно-пегматитовом минералогенезе [29, 30, 69] материнские породы с МГВ можно назвать литий-фтористыми пегматитами. Внутригранитные и экзоконтактовые тела пегматитов на месторождениях Воджина (Австралия), Берник-Лейк (Канада), Коктокай (Китай), Бикита (Зимбабве), Варутреск (Швеция), Вишняковское (Россия) и других размещаются на кристаллических щитах, в каледонских и герцинских складчатых толщах и имеют докембрийский или палеозойский возраст [1, 4, 7]. Встречаются мезозойские и кайнозойские пегматиты, содержащие воджинит [34, 35].

Минералы группы воджинита сосредоточены в лепидолит- и мусковит-альбитовых агрегатах промежуточных зон, реже в кварцевых ядрах и миароловых занорышах пегматитов. В составе пегматитов наблюдаются такие акцессорные и промышленные минералы, как амблигонит-монтебразит, поллуцит, сподумен, петалит, гранат (спессартин-альмандин), турмалин (шерл-эльбаит), берилл, топаз, литиофилит, трифилин, триплит, эосфорит, эвкрипит, хризоберилл, ильменит, циркон, торит, уранинит, монацит, ксенотим, Ве-силикаты (бертрандит, бавенит, миларит, гелвин),



сульфиды (арсенопирит, леллингит, герценберgit, станнин, кестерит, молибденит). К постоянным спутникам МГВ относятся Та-касситерит, фторапатит, Hf-циркон и тантало-ниобаты: танталит-(Mn), колумбит-(Mn), иксиолит, минералы группы микролита, тапиолит. Эпизодически встречаются другие Та-Nb оксиды: Та-рутил, ильменорутит, ринерсонит, ферсмит, эвксенит-(Y), поликраз-(Y), тантит, симпсонит, уранмикролит, стибимикролит, пироклор, симпсонит, самарскит, фергусонит. Некоторые минералы-спутники (касситерит, тапиолит, минералы группы микролита, минералы ряда танталит – колумбит и др.) сопровождают МГВ, замещая их [1, 43, 47]. Описаны параллельные и незакономерные сростки МГВ с тапиолитом [27, 47, 51], ритмично-зональные сростки с танталитом-(Mn) [32, 37, 45]; встречаются каймы и вроски воджинита в Та-рутите [51, 53, 58]. Нередким является сонахождение воджинита и других МГВ – титановоджинита, ферроводжинита, танталоводжинита, ферротитановоджинита, описанное в пегматитах Аргентины (Сан-Элиас, Ла-Каландрия, Нанси), Бразилии (Ронкадейра, Серидозиньо), Индии (Говиндпал), Канады (Берник-Лейк, Сепаратион Рапидс, Пирлесс, Энни Клайм), Китая (Наньпин), Конго (Нумби), Польши (Пилава-Гурна), США (Эммонс) [1, 40, 46]. Взаимоотношение видов МГВ исследовано недостаточно.

Воджинит встречается в касситерите пегматитов в виде включений, отражающих состав примесей в минерале-хозяине, что приводит исследователей к выводу о распаде твердого раствора воджинит – касситерит [2, 32, 54]. Выделения воджинита в касситерите ксеноморфные, преимущественно гомогенные; встречаются включения по сети обогащенных танталом зон, разделенных зонами деплетированного касситерита [40]. Описаны субмикроскопические (< 0,1 мкм) выделения в касситерите танталатов (ферроводжинита, тапиолита-(Fe), колумбита-(Mn) – продуктов распада твердого раствора дискредитированного «старингита» [53]. Признаком первичного акцессорного воджинита служит ростовая зональность: изменение от ядра к периферии содержания Та, Mn, Sn, Nb, Fe, Ti [32, 59, 66].

В последние годы МГВ установлены в танталоносных гранитах Li-F геохимического типа на месторождениях Нувеиби (Египет), Ичунь (Китай), Пенута (Испания), Вознесенское (Россия) и др. (рис.1). Граниты слагают небольшие фанерозойские интрузивы в герцинских и мезозойских складчатых толщах [65, 69, 74]. Минералы группы воджинита входят в состав светлослюдистых кварц-микроклин-альбитовых агрегатов со структурой «снежного кома», включающих топаз, флюорит, спессартин, турмалин, берилл, амблигонит-монтебразит и др. Акцессорные минералы – постоянные спутники воджинита в гранитах: колумбит-(Mn), танталит-(Mn), Та-касситерит, микролит, фторапатит, Hf-циркон. В эту ассоциацию иногда входят: тапиолит-(Fe), стибитотанталит, вольфрамит, монацит, ксенотим, пиррофанит, ураноторит, уранинит, эвксенит, поликраз-(Y), оксиды Fe, Mn, сульфиды (пирит, галенит, сфалерит, висмутин). Довольно редким является сочетание в гранитах воджинита и титановоджинита [17, 66, 67] (рис.1); воджинита, ферроводжинита и «вольфрамоводжинита» [69]. Характерны сростки (включения, обрастание и т.п.) МГВ с касситеритом и танталитом-(Mn) гранитов [3, 75, 76]. Минералы группы воджинита образуют каймы в танталите-(Mn) [65] и Та-рутите [21]; описано развитие воджинита вдоль поверхностей нарастания ребер Та-рутила, подчеркивающее секториальное строение последнего [74].

Таким образом, МГВ приурочены к Li-F пегматитам и Li-F гранитам, которые входят в состав сходных парагенезисов: Та-касситерит, фторапатит, Hf-циркон, танталит-(Mn), колумбит-(Mn), иксиолит, минералы группы микролита, тапиолит и МГВ. Оценка относительной встречаемости МГВ по литературным данным показала, что в пегматитах резко преобладает воджинит: воджинит – 86,6 %; ферроводжинит – 6,4 %; титановоджинит – 2,4 %; ферротитановоджинит – 2,8 %; «вольфрамоводжинит» – 0,9 %; танталоводжинит – 0,9 %; литиеводжинит – 0,2 %. Встречаемость МГВ в гранитах заметно отличается; при ведущей роли воджинита в гранитах в три раза чаще встречаются титановоджинит и «вольфрамоводжинит» и совсем не встречаются литиеводжинит и танталоводжинит: воджинит – 78,3 %; титановоджинит – 7,6 %; ферроводжинит – 6,5 %; ферротитановоджинит – 4,4 %; «вольфрамоводжинит» – 3,3 % (рис.2). В целом среди МГВ наиболее распространен воджинит: 86,6 % в пегматитах и 78,3 % в гранитах.

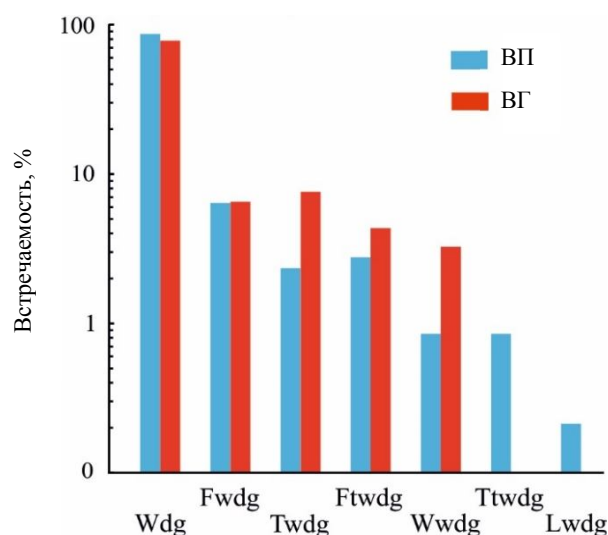


Рис. 2. Относительная встречаемость минералов группы воджинита в редкометалльных пегматитах (BP) и гранитах (BG) мира: Fwdg – ферроводжинит, Ftwdg – ферротитановоджинит, Wwdg – «вольфрамоводжинит», Ttwdg – танталоводжинит, Lwdg – литиоводжинит

Химический состав минералов группы воджинита в пегматитах и гранитах. При сравнении МГВ из пегматитов и гранитов наиболее информативен их химический состав. Главными компонентами МГВ являются Ta, Sn, Nb, Mn, Fe²⁺, Ti, Li, W. Наиболее важные элементы-примеси (>0,01 %): Ca, Sc, Zr, Hf (см. табл. 1, 2). На основе базы данных рассчитан состав минеральных видов МГВ (табл. 3, 4). В расчетах не учитывались данные о малых концентрациях неформульных элементов – F, Na, Mg, Al, Si, Zn, As, Sr, Y, Sb, REE, Pb, Bi, Th, U [16], которые могли явиться результатом замещения микролитом [46, 51, 58], захвата микрозондом минеральных включений и иных аналитических ошибок [3, 26, 65]. Наш обзор показывает удовлетворительное соответствие опубликованных составов МГВ (см. табл. 1, 2) классификации минералов ММА [16] (рис. 3). Установлены тренды симбатного изменения в МГВ атомного количества катионов Ta и Mn в процессе дифференциации

пегматитов и гранитов. Ряд эволюции МГВ пегматитов: ферроводжинит → ферротитановоджинит → титановоджинит → «вольфрамоводжинит» → воджинит → танталоводжинит. Ряд эволюции МГВ гранитов: ферроводжинит → ферротитановоджинит → «вольфрамоводжинит» → воджинит → титановоджинит. Характерно, что точки состава железистых видов воджинита занимают поле разрыва смесимости тапиолита-(Fe) – танталита-(Fe) (рис. 4), что отмечено в статье [53].

Таблица 4

Вариации главных компонентов в минералах группы воджинита из редкометалльных пегматитов и гранитов мира

Компонент	Воджинит			Титановоджинит			Ферроводжинит			Ферротитановоджинит			«Вольфрамоводжинит»		
	Me (612)	Мин	Макс	Me (18)	Мин	Макс	Me (36)	Мин	Макс	Me (17)	Мин	Макс	Me (7)	Мин	Макс
Пегматиты															
MnO	9,19	4,30	12,40	7,73	0,20	11,29	4,22	0,67	6,94	3,73	0,67	7,10	10,74	8,55	16,54
FeO	1,39	0,00	10,86	4,86	0,00	12,96	7,40	0,54	17,81	7,34	5,43	10,91	0,00	0,00	3,10
SnO ₂	13,58	6,22	19,20	2,79	0,00	8,65	12,54	8,13	18,80	5,89	0,00	8,94	8,10	4,85	17,50
TiO ₂	0,49	0,00	5,50	10,62	7,52	12,95	1,29	0,01	6,48	7,00	5,77	12,99	0,08	0,05	1,80
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00	4,72	1,02	0,00	2,19	1,62	0,00	7,89	2,61	0,44	7,83	2,58	0,33	7,05
Ta ₂ O ₅	67,17	55,55	85,04	65,18	53,68	68,95	60,13	48,78	68,00	49,38	38,90	75,02	44,55	34,67	62,94
Nb ₂ O ₅	4,62	0,00	14,47	6,64	4,08	15,66	10,33	3,83	18,96	19,77	2,78	26,72	7,27	4,00	17,97
Li ₂ O	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,16
WO ₃	0,00	0,00	3,82	0,14	0,00	0,58	0,00	0,00	3,25	0,62	0,00	2,42	12,54	1,07	34,63
Граниты															
MnO	10,28	3,95	12,55	11,04	7,90	11,30	5,36	4,27	6,15	5,32	4,34	6,49	7,77	5,93	11,29
FeO	1,59	0,00	10,46	0,57	0,36	3,70	9,11	5,46	11,91	7,85	5,92	9,36	8,76	7,19	10,61
SnO ₂	13,58	4,50	17,31	5,05	3,73	7,90	7,47	3,23	11,48	9,53	6,97	13,80	3,77	0,86	8,42
TiO ₂	1,55	0,00	7,55	7,92	7,12	10,90	3,14	1,83	6,20	4,30	2,41	5,97	0,79	0,79	3,45
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00	3,52	0,68	0,00	0,72	0,82	0,00	1,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ta ₂ O ₅	63,21	47,32	71,00	67,86	51,20	66,04	53,95	31,10	58,47	57,36	53,50	59,09	35,33	34,69	46,89
Nb ₂ O ₅	7,63	1,20	20,94	10,14	8,07	16,80	14,75	9,97	38,59	13,00	11,77	13,72	19,89	13,49	20,57
Li ₂ O	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,18	0,15	0,29
WO ₃	0,00	0,00	3,33	0,22	0,02	1,90	2,84	1,30	4,42	0,77	0,00	2,65	18,03	13,22	23,93

Примечания. Me – медианное значение (в скобках – количество проб); Мин и Макс – минимальное и максимальное содержание компонента, мас. %.



В ранее опубликованных обзорах [4, 15] представлены зауженные интервалы содержания компонентов МГВ по сравнению с новейшими данными (см. табл. 1-4) и нет информации о большинстве видов МГВ. По составу МГВ прежде всего являются оксидами тантала и олова. В отмеченных эволюционных рядах МГВ концентрации Ta и Sn нарастают и достигают в воджините пегматитов значений: Ta_2O_5 67,74 (85,04) %* и SnO_2 13,12 (19,20) %; в гранитах соответственно 63,13 (71,00) % и 13,33 (17,31) % (табл. 4, рис. 3, 4). Отношение $Ta/(Ta + Nb)$ в этих рядах увеличивается, коррелируя с $Mn/(Mn + Fe)$, и в воджините достигает соответственно 0,90 и 0,82 (рис. 4). Содержание ниобия в воджините минимальное: в пегматитах Nb_2O_5 4,68 (14,47) %, в гранитах 8,11 (20,94) %; отношение $Ta/(Ta + Nb)$ составляет 0,90 и 0,82. Предельное содержание Ta_2O_5 наблюдается в пегматитах: в танталоводжините 80,71 (81,02) % и литиоводжините 97,80 % [16, 35]. Минимум содержания Ta_2O_5 характерен для «вольфрамоводжинита»: 46,27 % в пегматитах и 38,97 % в гранитах.

Наибольшее содержание MnO наблюдается в воджините пегматитов и гранитов: 9,16 (12,40) % и 9,85 (12,55) %. По этому параметру выделяется «вольфрамоводжинит»: соответственно 11,57 (16,54) % и 8,33 (11,29) % (табл. 4). Марганцовистость $Mn/(Mn + Fe)$ чаще увеличена в МГВ гранитов, по сравнению с МГВ пегматитов (рис. 4). В 1992 г. были утверждены МГВ с высоким содержанием FeO и TiO_2 , найденные на пегматитовых месторождениях Сукула (Финляндия), Берник-Лейк (Канада), Сан-Элиас (Аргентина) (см. табл. 1) и названные ферроводжинитом, ферротитановоджинитом и титановоджинитом [15, 57] (см. рис. 3). В 2002-2022 гг. эти минералы были найдены в гранитах Китая (Суншуган, Ичунь и др.), Алжира (Эбелекан), Египта (Нувейби), Чехии (Хуб), России (Вознесенское) (см. табл. 2, рис. 1).

В Fe- и Ti-содержащих МГВ изоморфно замещаются Mn, Sn, Ta. В ферроводжините и ферротитановоджините пегматитов и гранитов концентрации FeO 7,80-8,08 (10,91-17,81) % и 7,75-9,02 (9,36-11,91) %. В титановоджините TiO_2 соответственно 10,57 (12,95) % и 8,19 (10,90) % (см. табл. 1, 2, 4). Железистые и титанистые виды тяготеют к геохимически примитивным пегматитам, а на дифференцированных пегматитовых месторождениях их находят в ранних интрузивных фазах [64]. По мере магматической дифференциации возрастают химические потенциалы Ta и Sn и аксессуарный ферроводжинит пегматитов

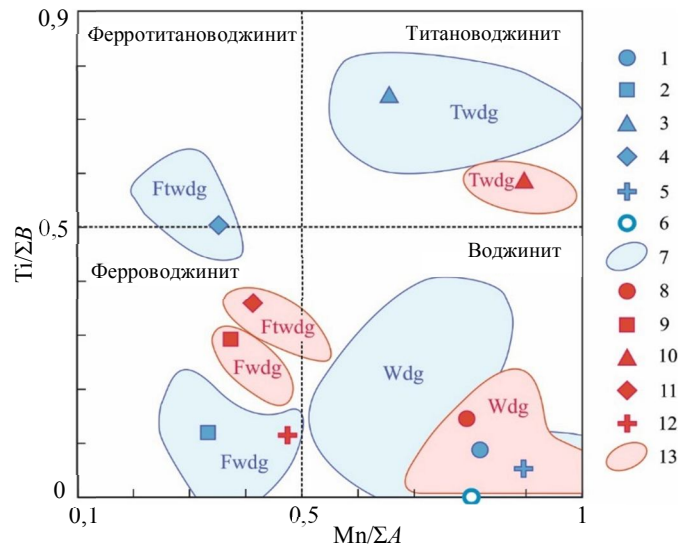


Рис. 3. Вариации состава минералов группы воджинита в редкометалльных пегматитах (1-7) и гранитах (8-13) мира

1-6 – средние доли катионов Ti и Mn в минералах пегматитов: воджините (1), ферроводжините (2), титановоджините (3), ферротитановоджините (4), «вольфрамоводжините» (5), танталоводжините (6); 7 – поля катионных отношений в минералах пегматитов; 8-12 – средние доли катионов Ti и Mn в минералах гранитов: воджините (8), ферроводжините (9), титановоджините (10), ферротитановоджините (11), «вольфрамоводжините» (12); 13 – поля катионных отношений в минералах гранитов; ΣA , ΣB – суммы катионов в позиции A (Mn^{2+} , Fe^{2+} , Li, Ca), B (Sn^{4+} , Ti, Fe^{3+} , ^{99}Ta , Sc, Zr)

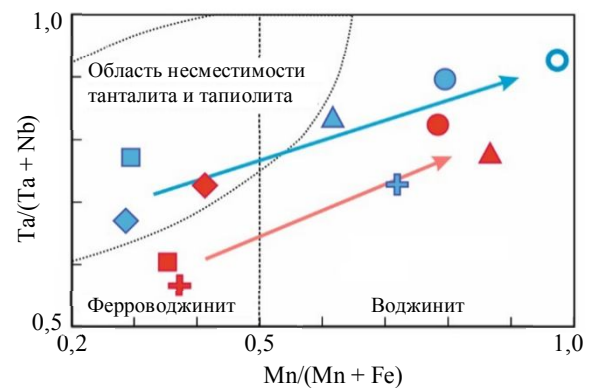


Рис. 4. Вариации состава минералов группы воджинита в редкометалльных пегматитах и гранитах мира на диаграмме «колумбитовый четырехугольник»

Показано соотношение атомного количества главных катионов в минералах (условные обозначения см. на рис. 3). Стрелками обозначены тенденции эволюции состава минералов в пегматитах (синяя) и гранитах (красная)

* Здесь и далее указано среднее, в скобках – максимальное содержание элемента.



последовательно сменяется титановоджинитом, «вольфрамоводжинитом» и воджинитом [15]. Иная закономерность отмечена и в гранитах Египта и Китая: ферроводжинит гранитов сменяется «вольфрамоводжинитом», воджинитом и титановоджинитом [17] (см. рис.1, 4).

Важное значение имеет находка в пегматитах Сепаратион Рапидс (Канада) вольфрамовой разновидности воджинита [46]. Выявление воджинита с повышенным содержанием WO_3 в пегматитах [26, 59] и гранитах [68, 69] позволяет предполагать возможность выделения нового минерала «вольфрамоводжинита». Концентрация WO_3 в «вольфрамоводжините» пегматитов достигает 16,01 (34,63) %, в гранитах – 18,39 (23,93) % (табл.4). Вольфрам, наряду с оловом, является типичным элементом остаточных редкометалльных расплавов, насыщенных фтором, и изоморфно замещает в воджините ниобий (см. табл.3) [46, 59, 69]. «Вольфрамоводжинит» обогащен литием и уступает по его содержанию только литиеводжиниту: Li_2O 0,06 (0,16) % в пегматитах и 0,21 (0,29) % в гранитах.

Ведущая кристаллохимическая роль Sn в МГВ, считавшаяся единственной определяющей в преобразовании неупорядоченной иксиолитовой структуры в упорядоченную воджинитовую [14, 60], была опровергнута экспериментальными данными. В окислительной обстановке дифференциации редкометалльной магмы при недостатке олова его роль в структуре воджинита играет Fe^{3+} [8, 62, 71]. В пегматитах наибольшее содержание Fe_2O_3 наблюдается в ферротитановоджините 3,14 (7,83) % и «вольфрамоводжините» 3,75 (7,05) % [46, 58]; в гранитах – в ферроводжините 0,91 (1,97) % [69]. Роль катионов Fe^{3+} минимальна в воджините гранитов и пегматитов: Fe_2O_3 0,20 и 0,56 % (см. табл.3, 4).

Среди элементов-примесей МГВ заметна повышенная роль Ca в пегматитовом воджините (до 0,14) [7, 37, 39] и Sc – в «вольфрамоводжините» гранитов (ф.к. 0,01-0,16) [69] (см. табл.3). Как и сопутствующие тантало-ниобаты, МГВ содержат примеси Zr и Hf, которые вследствие сокращения объемов кристаллизации циркона в насыщенной F, B, P, H_2O редкометалльной магме вступают в изоморфные отношения с Sn, Ta, Ti, Fe^{3+} . На позднемагматической стадии кристаллизации основным носителем Zr, Hf становится воджинит пегматитов: ZrO_2 0,35 (2,28) %, HfO_2 0,05 (0,92) % [26, 29, 30]; и в еще большей степени – ферроводжинит пегматитов: ZrO_2 0,61 (5,98) %, HfO_2 0,08 (1,59) % [33, 40] (см. табл.1). Формульный коэффициент циркония в позиции B составляет 0,02-0,03 (см. табл.3). Воджинит гранитов также содержит ZrO_2 0,02 (0,85) %, HfO_2 0,03 (1,00) % [63, 65]. Отношение Zr/Hf в воджините гранитов низкое: 1,18-1,54, а в пегматитах – 4,29-8,73 (см. табл.2). Исследователи отмечают, что МГВ несут более высокие концентрации Zr, Hf, чем колумбит, танталит и тапиолит [1, 30].

Таким образом, МГВ гранитов по сравнению с МГВ пегматитов обогащены Sn, Nb, W и обеднены Fe^{3+} , Ta, Zr, Hf. Для гранитных МГВ характерна примесь Sc, а для пегматитовых – Zr (см. табл.3, 4). Марганцовистость $Mn/(Mn + Fe)$ в МГВ гранитов относительно повышена, а отношение Zr/Hf относительно понижено (см. рис.3, 4). Усредненные кристаллохимические формулы воджинита в пегматитах и гранитах: $(Mn_{0,84}Fe_{0,17}Ca_{0,01})_{1,02}(Sn_{0,57}Ti_{0,09}Ta_{0,24}Fe^{3+}_{0,05}Zr_{0,02})_{1,01}(Ta_{1,76}Nb_{0,23}W_{0,01})_{2,00}O_8$; $(Mn_{0,88}Fe_{0,23})_{1,11}(Sn_{0,56}Ti_{0,14}Ta_{0,20}Fe^{3+}_{0,02})_{0,92}(Ta_{1,61}Nb_{0,39})_{2,00}O_8$.

Исходя из среднего состава минералов, можно указать месторождения, где описаны типичные виды МГВ. Месторождения в пегматитах: воджинит – Берник-Лейк (Канада), Воджина (Австралия), Наньпин (Китай); титановоджинит – Нанси (Аргентина); ферроводжинит – Нумби (Конго), Пилава-Гурна (Польша); ферротитановоджинит – Ла-Каландрия (Аргентина); «вольфрамоводжинит» – Сепаратион Рапидс (Канада) (см. табл.1 и 4); месторождения в гранитах: воджинит – Абу-Даббаб (Египет); титановоджинит – Эбелекан (Алжир), Ичунь (Китай); ферроводжинит – Суншуган (Китай); ферротитановоджинит – Гедонпин (Китай); «вольфрамоводжинит» – Суншуган (Китай) (см. табл.2 и 4).

Типоморфизм минералов группы воджинита. Настоящий обзор показывает, что МГВ отражают условия образования Li-F пегматитов и гранитов и признаны маркерами позднемагматического этапа кристаллизации редкометалльно-гранитного расплава [4, 49, 66]. Экспериментально установлено, что воджинит и титановоджинит кристаллизуются из гранитной магмы при температуре 700-800 °C [77] или из солевого (гидросиликатного) расплава, обогащенного Ta и Sn [68]. Воджинит образуется в окислительных условиях путем трансформации иксиолита и колумбита [59, 64, 71].



Эволюция состава и кислотно-основных свойств материнской среды определяет формирование стандартной последовательности тантало-ниобатов: колумбит-(Fe) → колумбит-(Mn) → танталит-(Mn) → воджинит → микролит → касситерит [28, 46, 59]. В парагенезисах нескольких МГВ последовательность их кристаллизации изучена слабо. С учетом имеющихся онтогенетических наблюдений можно предположить, что последовательность минералообразования подчиняется эволюции материнской магмы и соответствует намеченным рядам эволюции МГВ пегматитов [ферроводжинит → ферротитановоджинит → титановоджинит → «вольфрамоводжинит» → воджинит → танталоводжинит] и эволюции МГВ гранитов [ферроводжинит → ферротитановоджинит → «вольфрамоводжинит» → воджинит → титановоджинит] [45, 46, 66] (см. рис.3, 4). От ранних минералов к поздним возрастает размер кристаллов: в пегматитах от 350-4400 мкм для железистых видов до 6-9,6 мм для воджинита, танталоводжинита; в гранитах от 5-26 мкм для ферроводжинита до 18-58 мкм для титановоджинита и воджинита (см. рис.1).

Присутствие МГВ фиксирует предельную дифференциацию магмы (флюида) до экстремальных значений $Ta/(Ta + Nb)$ и $Mn/(Mn + Fe)$ в апикальных частях пегматитовых и гранитных тел [3, 47, 77]. Признаками высокой редкометалльности материнского расплава являются такие особенности МГВ, как высокое содержание Ta, Sn, Mn, Li, W, Zr, Hf; повышенное значение отношений $Ta/(Ta + Nb)$, $Mn/(Mn + Fe)$ и пониженное – Zr/Hf .

МГВ являются характерными минералами крупных редкометалльных месторождений и служат индикаторами танталоносных пегматитов и гранитов. Воджинит входит в состав Ta, Sn, Li, W руд (месторождения провинции Супериор в Канаде, провинции Цзянси в Китае и др.). Однако в России воджинит найден лишь на четырех из 22 месторождений тантала, учтенных Госбалансом. Поскольку воджинит характерен для редкометалльных гранитов, то перспективными источниками тантала являются месторождения Дальневосточного пояса Li-F гранитов, содержащих воджинит [21, 23]. Примерами служат известные Вознесенское и Кестерское месторождения [22, 23].

Выводы

- Минералы группы воджинита выделяются среди тантало-ниобатов наиболее упорядоченной структурой, обусловленной изоморфным внедрением катионов олова: ${}^4[Fe, Mn]^{2+} + 2^C[Nb, Ta]^{5+} \leftrightarrow {}^3B[Sn, Ti]^{4+}$. Полиэлементный изоморфизм в трех кристаллохимических позициях позволяет выделить группу воджинита, включающую семь минералов: воджинит, титановоджинит, ферроводжинит, ферротитановоджинит, литиоводжинит, танталоводжинит, «вольфрамоводжинит».

- Минералы группы воджинита приурочены к Li-F пегматитам и Li-F гранитам в составе сходных парагенезисов: Та-касситерит, фторапатит, Hf-циркон, танталит-(Mn), колумбит-(Mn), иксиолит, микролит, тапиолит и МГВ. Среди МГВ наиболее распространен воджинит: 86,6 % в пегматитах и 78,3 % в гранитах.

- Встречаемость МГВ в гранитах и пегматитах отличается: при ведущей роли воджинита в гранитах в три раза чаще встречаются титановоджинит и «вольфрамоводжинит», совсем не встречаются литиоводжинит и танталоводжинит.

- Отличие МГВ гранитов от МГВ пегматитов состоит в более мелком размере зерен; повышенном содержании Sn, Nb, Ti, W, Sc; пониженном содержании Fe^{3+} , Ta, Zr, Hf; более высоком значении $Mn/(Mn + Fe)$ и более низком значении Zr/Hf .

- Дифференциация редкометалльно-гранитовой магмы определяет эволюцию состава МГВ. Ряд эволюции МГВ пегматитов: ферроводжинит → ферротитановоджинит → титановоджинит → «вольфрамоводжинит» → воджинит → танталоводжинит. Ряд эволюции МГВ гранитов: ферроводжинит → ферротитановоджинит → «вольфрамоводжинит» → воджинит → титановоджинит.

- Минералы группы воджинита служат индикаторами танталоносных пегматитов и гранитов. В России перспективными источниками тантала являются месторождения Дальневосточного пояса Li-F гранитов, содержащих воджинит.



ЛИТЕРАТУРА

1. Melcher F., Graupner T., Oberthür T., Schütte P. Tantalum-(niobium-tin) mineralisation in pegmatites and rare-metal granites of Africa // South African Journal of Geology. 2017. Vol. 120. Iss. 1. P. 77-100. DOI: 10.25131/gssajg.120.1.77
2. Alekseev V.I., Marin Yu.B. Accessory Cassiterite as an Indicator of Rare Metal Petrogenesis and Mineralization // Geology of Ore Deposits. 2022. Vol. 64. № 7. P. 397-423. DOI: 10.1134/S1075701522070029
3. Moussa H.E., Asimow P.D., Azer M.K. et al. Magmatic and hydrothermal evolution of highly-fractionated rare-metal granites at Gabal Nuweibi, Eastern Desert, Egypt // Lithos. 2021. Vol. 400-401. № 106405. DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106405
4. Горжевская С.А. Воджинит // Типоморфизм минералов. М.: Недра, 1989. С. 125-126.
5. Ercit T.S., Černý P., Hawthorne F.C. The wodginite group. III. Classification and new species // The Canadian Mineralogist. 1992. Vol. 30. P. 633-638.
6. Хвостова В.А., Павлова В.Н., Александров В.Б., Максимова Н.В. Первая находка воджинита в СССР // Доклады АН СССР. 1966. Т. 167. № 5. С. 1135-1138.
7. Ходырева А.И., Кашиев А.А. О воджините из пегматитов Восточного Саяна // Вопросы минералогии и геохимии месторождений Восточной Сибири. Иркутск: Институт геохимии СО АН СССР, 1973. С. 3-12.
8. Корнетова В.А., Сидоренко Г.А., Казакова М.Е. и др. О воджините, богатом железом // Труды минералогического музея. Вып. 27. Новые данные о минералах СССР. М.: Наука, 1978. С. 76-85.
9. 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
10. Skublov S.G., Gawad A.E.A., Levashova E.V., Ghoneim M.M. U-Pb geochronology, REE and trace element geochemistry of zircon from El Fereyid monzogranite, south Eastern Desert, Egypt // Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. 2021. Vol. 116. Iss. 4. P. 220-233. DOI: 10.2465/jmps.210320
11. Кривовичев В.Г., Гульбин Ю.Л. Рекомендации по расчету и представлению формул минералов по данным химических анализов // Записки Российского минералогического общества. 2022. Т. 151. № 1. С. 114-124. DOI: 10.31857/S0869605522010087
12. Салимгараева Л.И., Скублов С.Г., Березин А.В., Галанкина О.Л. Фальбанды Керетского архипелага Белого моря: характеристика состава пород и минералов, рудная минерализация // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 513-521. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.2
13. Simpson E.S. Minerals of Western Australia. Vol. 3. Perth: W. H. Wyatt, Government Printer, 1952. 714 p.
14. Nickel E.H., Rowland J.F., McAdam R.C. Wodginite – a new tin-manganese tantalate from Wodgina, Australia and Bernic Lake, Manitoba // The Canadian Mineralogist. 1963. Vol. 7. № 3. P. 390-402.
15. Ercit T.S., Černý P., Hawthorne F.C., McCammon C.A. The wodginite group. II. Crystal chemistry // The Canadian Mineralogist. 1992. Vol. 30. P. 613-631.
16. Wodginite. URL: <https://www.mindat.org/min-4302.html#autoanchor7> (дата обращения 18.08.2022).
17. Xiao Long Huang, Ru Cheng Wang, Xiao Ming Chen et al. Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz-lepidolite granite, Jiangxi Province, southern China // The Canadian Mineralogist. 2002. Vol. 40. Iss. 4. P. 1047-1068. DOI: 10.2113/gscanmin.40.4.1047
18. Волошин А.В., Пахомовский Я.А. Минералогия тантала и ниобия в редкометалльных пегматитах. Л.: Наука, 1988. 238 с.
19. Чокан В.М. Геохимия и минералогия тантала, ниобия и олова в редкометалльных пегматитах Восточного Саяна: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск: Институт геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН, 2002. 24 с.
20. Попова В.И., Котляров В.А. Воджинит $\text{MnSnTa}_2\text{O}_8$ из гранитных пегматитов Тайгинки: новая находка на Южном Урале // Минералогия Урала-2003: Материалы IV Всероссийского совещания, 25-30 августа 2003, Миасс, Россия. Миасс: Институт минералогии УрО РАН, 2003. Т. II: Минералы месторождений и руд Урала. Физика минералов. С. 94-98.
21. Руб А.К., Руб М.Г. Редкометалльные граниты Приморья. М.: Всесоюзный институт минерального сырья, 2006. 86 с.
22. 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/min11111154
23. Alekseev V.I., Alekseev I.V. Tungsten-Bearing Wodginite from the Kester Deposit, Eastern Siberia, Russia // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 2. № 231. DOI: 10.3390/min13020231
24. Скублов С.Г., Гаврильчик А.К., Березин А.В. Геохимия разновидностей берилла: сравнительный анализ и визуализация аналитических данных методами главных компонент (PCA) и стохастического вложения соседей с t-распределением (t-SNE) // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 455-469. DOI: 10.31897/PMI.2022.40
25. Марин Ю.Б. О минералогических исследованиях и использовании минералогической информации при решении проблем петро- и рудогенеза // Записки РМО. 2020. Т. 149. № 4. С. 1-15. DOI: 10.31857/S0869605520040048
26. Sarbajna C., Babu G.N., Rajagopalan V., Viswanathan R. Mineralogical and chemical characterization of wodginite from pegmatite of Pendalras, Bastar district, Chattisgarh, India // The Indian Mineralogist. 2010. Vol. 44. № 1. P. 152-165.
27. Burke E.A.J., Kieft C., Felius R.O., Adusumilli S.M. Wodginite from northeastern Brazil // Geologie en Mijnbouw. 1970. Vol. 49. № 3. P. 235-240.
28. Černý P., Roberts W.L., Ercit T.S., Chapman R. Wodginite and associated oxide minerals from the Peerless pegmatite, Pennington County, South Dakota // American Mineralogist. 1985. Vol. 70. № 9-10. P. 1044-1049.
29. Černý P., Chapman R., Ferreira K., Smeds S.-A. Geochemistry of oxide minerals of Nb, Ta, Sn, and Sb in the Varuträsk granitic pegmatite, Sweden: The case of an «anomalous» columbite-tantalite trend // American Mineralogist. 2004. Vol. 89. Iss. 4. P. 505-518. DOI: 10.2138/am-2004-0405
30. Černý P., Teertstra D.K., Chapman R. et al. Extreme fractionation and deformation of the leucogranite – Pegmatite suite at Red Cross Lake, Manitoba, Canada. IV. Mineralogy // The Canadian Mineralogist. 2012. Vol. 50. Iss. 6. P. 1839-1875. DOI: 10.3749/canmin.50.6.1839



31. Ercit T.S., Hawthorne F.C., Černý P. The wodginite group. I. Structural crystallography // *The Canadian Mineralogist*. 1992. Vol. 30. P. 597-611.
32. Fernandes J., Moura A. Metallographic and in situ compositional study on columbite-tantalite mining concentrates from placers at Maçainhas (Central-East Portugal): insights for tantalum exploration // *Journal of Iberian Geology*. 2017. Vol. 43. Iss. 3. P. 439-450. DOI: 10.1007/s41513-017-0029-z
33. Galliski M.A., Márquez-Zavalía M.F., Černý P. et al. The Ta-Nb-Sn-Ti oxide-mineral paragenesis from La Viquita, a spodumene-bearing rare-element granitic pegmatite, San Luis, Argentina // *The Canadian Mineralogist*. 2008. Vol. 46. Iss. 2. P. 379-393. DOI: 10.3749/canmin.46.2.379
34. Guastoni A., Pennacchioni G., Pozzi G. et al. Tertiary pegmatite dikes of the Central Alps // *The Canadian Mineralogist*. 2014. Vol. 52. Iss. 2. P. 191-219. DOI: 10.3749/canmin.52.2.191
35. Hanson S.L., Falster A.U., Simmons W.B.S. et al. Tantalowodginite, $(\text{Mn}_{0.5}\square_{0.5})\text{TaTa}_2\text{O}_8$, a new mineral species from the Emmons pegmatite, Uncle Tom Mountain, Maine, U.S.A. // *The Canadian Mineralogist*. 2018. Vol. 56. Iss. 4. P. 543-553. DOI: 10.3749/canmin.1800009
36. Kaeter D., Barros R., Menuge J.F. Metasomatic High Field Strength Element, Tin, and Base Metal Enrichment Processes in Lithium Pegmatites from Southeast Ireland // *Economic Geology*. 2021. Vol. 116. Iss. 1. P. 169-198. DOI: 10.5382/econgeo.4784
37. Lahti S.I. On the granitic pegmatites of the Eräjärvi area in Orivesi, southern Finland // *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 1981. № 314. 82 p.
38. Loun J., Novák M., Cempírek J. et al. Geochemistry and secondary alterations of microlite from eluvial deposits in the Numbi mining area, South Kivu, Democratic Republic of the Congo // *The Canadian Mineralogist*. 2018. Vol. 56. Iss. 2. P. 203-220. DOI: 10.3749/canmin.1700091
39. Mali H. Die Spodumenpegmatite von Bretstein und Pusterwald (Wölzer Tauern, Steiermark) // *Joannea Mineralogie*. 2004. Iss. 2. P. 5-53.
40. Masau M., Černý P., Chapman R. Exsolution of zirconian-hafnian wodginite from manganoan-tantalian cassiterite, Annie Claim #3 granitic pegmatite, Southeastern Manitoba, Canada // *The Canadian Mineralogist*. 2000. Vol. 38. Iss. 3. P. 685-694. DOI: 10.2113/gscanmin.38.3.685
41. Pal D.C., Mishra B., Bernhardt H.-J. Mineralogy and geochemistry of pegmatite-hosted Sn, Ta-Nb-, and Zr-Hf bearing minerals from the southeastern part of the Bastar-Malkangiri pegmatite belt, Central India // *Ore Geology Reviews*. 2007. Vol. 30. Iss. 1. P. 30-55. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2005.10.004
42. Rao C., Wang R.Ch., Hu H., Zhang W.L. Complex internal textures in oxide minerals from the Nanping № 31 dyke of granitic pegmatite, Fujian province, Southeastern China // *The Canadian Mineralogist*. 2009. Vol. 47. Iss. 5. P. 1195-1212. DOI: 10.3749/canmin.47.5.1195
43. Spilde M.N., Shearer C.K. A comparison of tantalum-niobium oxide assemblages in two mineralogically distinct rare-element granitic pegmatites, Black Hills, South Dakota // *The Canadian Mineralogist*. 1992. Vol. 30. № 3. P. 719-737.
44. Taylor R.P., Henham R. The Nature and Distribution of Tantalum-bearing Minerals in Newly Discovered, Rare-Element Pegmatites at the Musselwhite Mine, Northwestern Ontario // *Exploration and Mining Geology*. 2001. Vol. 10. № 1-2. P. 85-93. DOI: 10.2113/10.1-2.85
45. Taylor R.P., Pedersen J.C., Bubar D.S. et al. The Nature and Distribution of Tantalum Mineralization in Pegmatite Dikes, Lilypad Lakes Property, Fort Hope, Northwestern Ontario // *Exploration and Mining Geology*. 2005. Vol. 14. Iss. 1-4. P. 31-44. DOI: 10.2113/gsemg.14.1-4.31
46. Tindle A.G., Brearks F.W., Webb P. Wodginite-group minerals from the Separation Rapids rare-element granitic pegmatite group, northwestern Ontario // *The Canadian Mineralogist*. 1998. Vol. 36. № 2. P. 637-658.
47. van Lichtenvelde M., Salvi S., Beziat D., Linnen R.L. Textural Features and Chemical Evolution in Tantalum Oxides: Magmatic Versus Hydrothermal Origins for Ta Mineralization in the Tanco Lower Pegmatite, Manitoba, Canada // *Economic Geology*. 2007. Vol. 102. № 2. P. 257-276. DOI: 10.2113/gsecongeo.102.2.257
48. Wise M.A., Černý P. First U.S. occurrence of wodginite from Powhatan County, Virginia // *American Mineralogist*. 1984. Vol. 69. № 7-8. P. 807-809.
49. Aurisicchio C., De Vito C., Ferrini V., Orlandi P. Nb and Ta oxide minerals in the Fonte del Plete granitic pegmatite dike. Island of Elba, Italy // *The Canadian Mineralogist*. 2002. Vol. 40. № 3. P. 799-814. DOI: 10.2113/gscanmin.40.3.799
50. Beurlen H., Da Silva M.R.R., Thomas R. et al. Nb-Ta-(Ti-Sn) oxide mineral chemistry as tracer of rare-element granitic pegmatite fractionation in the Borborema Province, Northeastern Brazil // *Mineralium Deposita*. 2008. Vol. 43. № 2. P. 207-228. DOI: 10.1007/s00126-007-0152-4
51. Galliski M.A., Márquez-Zavalía M.F., Škoda R. et al. A Ta,Ti-rich oxide mineral assemblage from the Nancy beryl-columbite-phosphate granitic pegmatite, San Luis, Argentina // *Mineralogy and Petrology*. 2019. Vol. 113. № 5. P. 687-701. DOI: 10.1007/s00710-019-00673-z
52. Abella P.A., Corbella I., Cordon I.M. et al. Nb-Ta-minerals from the Cap de Creus pegmatite field, eastern Pyrenees: distribution and geochemical trends // *Mineralogy and Petrology*. 1995. Vol. 55. P. 53-69.
53. Beurlen H., Barreto S.B., Silva D. et al. Titanian ixiolite – niobian rutile intergrowths from the Borborema pegmatitic province, northeastern Brazil // *The Canadian Mineralogist*. 2007. Vol. 45. Iss. 6. P. 1367-1387. DOI: 10.3749/canmin.45.6.1367
54. Pieczka A., Szuszkiewicz A., Szeleg E. et al. (Fe,Mn)-(Ti,Sn)-(Nb,Ta) oxide assemblage in a little fractionated portion of a mixed (NYF + LCT) pegmatite from Piława Górna, the Sowie Mts. block, SW Poland // *Journal of Geosciences*. 2013. Vol. 58. Iss. 2. P. 91-112. DOI: 10.3190/jgeosci.136
55. von Knorring O., Sahama Th.G., Lehtinen M. Ferroan wodginite from Ankole, South-West Uganda // *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 1969. Vol. 41. P. 65-69. DOI: 10.17741/BGSF/41.005
56. Vormä A., Siivola J. Sukulaite – $\text{Ta}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ and wodginite as inclusions in cassiterite in the granite pegmatite in Sikula, Tammela in S.W. Finland // *Bulletin de la Commission Géologique de Finlande*. 1967. № 229. P. 173-187.



57. Galliski M.A., Černý P., Márquez-Zavalía M.F., Chapman R. Ferrotitanowodginite, $\text{Fe}^{2+}\text{TiTa}_2\text{O}_8$, a new mineral of the wodginite group from the San Elias pegmatite, San Luis, Argentina // *American Mineralogist*. 1999. Vol. 84. Iss. 5-6. P. 773-777. DOI: 10.2138/am-1999-5-610
58. Galliski M.A., Márquez-Zavalía M.F., Černý P., Lira R. Complex Nb-Ta-Ti-Sn oxide mineral intergrowths in the La Calandria pegmatite, Canada Del Puerto, Cordoba, Argentina // *The Canadian Mineralogist*. 2016. Vol. 54. № 4. P. 899-916. DOI: 10.3749/canmin.1500095
59. Волошин А.В. Тантало-ниобаты. Систематика, кристаллохимия и эволюция минералообразования в гранитных пегматитах. СПб: Наука, 1993. 298 с.
60. Ferguson R., Hawthorne F.C., Grice J.D. The Crystal Structures of Tantalite, Ixiolite and Wodginite from Bernic Lake, Manitoba. II. Wodginite // *The Canadian Mineralogist*. 1976. Vol. 14. P. 550-560.
61. dos Santos C.A., Zawislak L.I., Kinast E.J. et al. Crystal chemistry and structure of the orthorhombic $(\text{Fe,Mn})(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_6$ family of compounds // *Brazilian Journal of Physics*. 2001. Vol. 31. Iss. 4. P. 616-631. DOI: 10.1590/S0103-97332001000400012
62. Kinast É.J., Isnard O., da Cunha J.B.M. et al. A new approach for the determination of multiple cation locations and ordering, using the example of natural and heat-treated columbites // *Journal of Applied Crystallography*. 2011. Vol. 44. Iss. 4. P. 738-746. DOI: 10.1107/S0021889811023211
63. Alfonso P., Hamid S.A., Garcia-Valles M. et al. Textural and mineral-chemistry constraints on columbite-group minerals in the Penouta deposit: evidence from magmatic and fluid-related processes // *Mineralogical Magazine*. 2018. Vol. 82. Iss. S1. P. S199-S222. DOI: 10.1180/minmag.2017.081.107
64. Černý P., Goad B.E., Hawthorne F.C., Chapman R. Fractionation trends of the Nb- and Ta-bearing oxide minerals in the Greer Lake pegmatitic granite and its pegmatite aureole, southeastern Manitoba // *American Mineralogist*. 1986. Vol. 71. № 3-4. P. 501-517.
65. Gaafar I. Geophysical Mapping, Geochemical Evidence and Mineralogy for Nuweibi Rare Metal Albite Granite, Eastern Desert, Egypt // *Open Journal of Geology*. 2014. Vol. 4. Iss. 4. P. 108-136. DOI: 10.4236/ojg.2014.44010
66. Kesraoui M., Nedjari S. Contrasting evolution of low-P rare metal granites from two different terranes in the Hoggar area, Algeria // *Journal of African Earth Sciences*. 2002. Vol. 34. Iss. 3-4. P. 247-257. DOI: 10.1016/S0899-5362(02)00023-4
67. Ennong Tian, Rucheng Wang, Lei Xie et al. Mineralogy and geochemistry of the newly discovered Late Mesozoic granite-pegmatite and associated Sn-Nb-Ta-Be mineralization in the Miao'er-shan-Yuechengling composite batholith, northern Guangxi, South China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 190. № 104149. DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.104149
68. Mingqian Wu, Iain M. Samson, Dehui Zhang. Textural and chemical constraints on the formation of disseminated granite-hosted W-Ta-Nb mineralization at the Dajishan deposit, Nanling range, Southeastern China // *Economic Geology*. 2017. Vol. 112. Iss. 4. P. 855-887. DOI: 10.2113/econgeo.112.4.855
69. Ze-Ying Zhu, Ru-Cheng Wang, Xu-Dong Che et al. Magmatic-hydrothermal rare-element mineralization in the Songshugang granite (northeastern Jiangxi, China): Insights from an electron-microprobe study of Nb-Ta-Zr minerals // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 65. P. 749-760. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2014.07.021
70. René M., Škoda R. Nb-Ta-Ti oxides fractionation in rare-metal granites: Krásno-Horní Slavkov ore district, Czech Republic // *Mineralogy and Petrology*. 2011. Vol. 103. Iss. 1-4. P. 37-48. DOI: 10.1007/s00710-011-0152-z
71. Turnock A.C. Synthetic wodginite, tapiolite and tantalite // *The Canadian Mineralogist*. 1966. Vol. 8. № 4. P. 461-470.
72. Esmaeilzadeh S., Grins J. Meta-stable phases in the Mn-Ta-O system // *Solid State Sciences*. 2002. Vol. 4. Iss. 1. P. 117-123. DOI: 10.1016/S1293-2558(01)01216-X
73. Бескин С.М., Марин Ю.Б. Геодинамические типы редкометалльного гранитового магматизма и ассоциирующие с ними месторождения // *Записки Горного института*. 2013. Т. 200. С. 155-162.
74. Bouabssa L., Marignac C., Chabbi R., Cuney M. The Filfila (NE Algeria) topaz-bearing granites and their rare metal minerals: Petrologic and metallogenic implications // *Journal of African Earth Sciences*. 2010. Vol. 56. № 2-3. P. 107-113. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2009.05.008
75. Küster D. Granitoid-hosted Ta mineralization in the Arabian-Nubian Shield: Ore deposit types, tectono-metallogenic setting and petrogenetic framework // *Ore Geology Reviews*. 2009. Vol. 35. Iss. 1. P. 68-86. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2008.09.008
76. Pollard P.J. The Yichun Ta-Sn-Li deposit, South China: Evidence for extreme chemical fractionation in F-Li-P-Rich Magma // *Economic Geology*. 2021. Vol. 116. № 2. P. 453-469. DOI: 10.5382/ECONGEO.4801
77. McNeil A.G., Linnen R.L., Flemming R.L., Fayek M. An experimental approach to examine fluid-melt interaction and mineralization in rare-metal pegmatites // *American Mineralogist*. 2020. Vol. 105. № 7. P. 1078-1087. DOI: 10.2138/am-2020-7216

Автор В.И.Алексеев, д-р геол.-минерал. наук, профессор, alekseev_vi@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1512-9347> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).



Научная статья

Гранатиты из эклогитового комплекса Марун-Кей (Полярный Урал): геохимия и проблемы образования

Л.И.САЛИМГАРАЕВА^{1,2}✉, А.В.БЕРЕЗИН^{1,3}¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия² Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия³ Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Салимгараева Л.И., Березин А.В. Гранатиты из эклогитового комплекса Марун-Кей (Полярный Урал): геохимия и проблемы образования // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 509-525. EDN CLAFSR

Аннотация. Приведена комплексная минералого-геохимическая характеристика (XRF, ICP-MS, SEM-EDS, SIMS методы) гранатитов и их протолитов из комплекса Марун-Кей (Полярный Урал) – одного из ключевых объектов в понимании истории развития Уральского орогена. Установлено, что ультраосновные (в большинстве случаев) и основные породы являются протолитами, по которым развиваются гранатиты. Общая тенденция для гранатитов – рост суммарного содержания REE по сравнению с протолитами. Все проанализированные гранатиты демонстрируют существенное падение Cr, Ni и Co. Содержание V в гранатитах также уменьшается относительно протолитов, но менее масштабно. В целом гранаты из гранатитов, развивающихся по перидотитам, характеризуются резко повышенным (относительно гранатов из гранатитов, развивающихся по основным породам – порфирирам) содержанием Prp минала и пониженным – Alm минала, что, вероятнее всего, определяется магнезиальностью протолита. В гранатитах по перидотитам установлен гранат с нетипичным недифференцированным спектром REE со значительной положительной Eu-аномалией, который может быть объяснен эффектом наследования гранатом спектра REE от минерала-предшественника, в данном случае плагиоклаза. Наблюдаемые на исследованном участке Слюдяная Горка гранатиты, вероятно, образовались из основных и ультраосновных пород океанической коры в процессе их выведения на более верхние уровни разреза при воздействии корового флюида, проникающего по зонам трещиноватости.

Ключевые слова: гранатиты; эклогиты; гранаты; редкие элементы; редкоземельные элементы; комплекс Марун-Кей

Благодарность. Исследование выполнено при поддержке гранта № РНФ 22-17-00177.

Поступила: 03.12.2022

Принята: 23.03.2023

Онлайн: 23.06.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Гранатиты (породы с содержанием граната не менее 50 %) довольно часто встречаются в метаморфических комплексах [1-3]. Экспериментально подтверждено, что эклогиты полностью трансформируются в гранатиты при давлениях около 15 ГПа, что реализуется при субдукции океанической коры [4-6]. Гранатиты также были установлены среди гранулитов в shear-зонах Хабаровинского мафит-ультрамафитового массива на Южном Урале [7] и Кондалитового пояса Северо-Китайского кратона [8]. Являются характерными образованиями для гигантского месторождения Брокен-Хилл, что объясняется метаморфизмом гранулитовой фации при активном участии флюидов [9, 10].

Природа происхождения гранатитов до сих пор остается дискуссионной. Распространенная точка зрения – появление гранатитов при метаморфизме первично дифференцированных магматических пород [11]. Существуют также предположения о возникновении гранатита в результате метаморфической дифференциации при активной инфильтрации флюида [3] и метасоматозе с образованием метасоматической колонки [12]. Гранат с высоким содержанием спессартинового минала часто может возникать при метаморфизме осадков, обогащенных Fe и Mn [13]. Во многих гипотезах отмечается вовлечение в процесс образования гранатитов значительного количества флюидов, обеспечивающих мобильность ряда компонентов [14, 15].



В северо-западной части Беломорского подвижного пояса масштабные проявления гранатизации эклогитовых тел вплоть до образования мономинеральных гранатитов были отмечены в салминских эклогитах возрастом около 1900 млн лет. В результате исследования тела эклогитов в карьере месторождения Куру-Ваара установлено, что образование гранатита было оторвано во времени от процесса эклогитизации и произошло одновременно с внедрением секущих пегматитовых жил около 1840 млн лет назад, определявших привнос LREE и других высокозарядных элементов (Y, Zr, Hf и Th) [16].

Эклогитовый комплекс Марун-Кей на Полярном Урале до сих пор является малоизученным. Характер протолитов, возраст и условия образования эклогитов Марун-Кей – предмет дискуссий [17-19]. Ранее были предприняты попытки расшифровать метаморфическую эволюцию эклогитов Марун-Кей путем детального исследования гранатов по главным элементам, без учета распределения редких и редкоземельных элементов (REE) [20, 21]. Гранатиты, широкое распространение которых среди эклогитов Слюдяной Горки было отмечено еще одним из первых исследователей эклогитов Полярного Урала Н.Г.Удовкиной [22], остались вне изучения во всех последующих работах.

Целью настоящего исследования является анализ закономерностей изменения состава (по главным, редким и редкоземельным элементам) гранатов и сосуществующих с ними минералов из различных типов гранатитов в эклогитовом комплексе Марун-Кей применительно к проблемам образования гранатитов. Гранат является ключевым минералом при определении параметров метаморфизма [23, 24] и датировании гранатсодержащих парагенезисов Sm-Nd и Lu-Hf методами [25, 26]. Редкие и редкоземельные элементы широко используются при оценке геохимических обстановок кристаллизации, что

позволяет с их помощью исследовать условия образования минералов различного генезиса, таких как циркон [27-29], титанит [30], берилл [31-33], оливин [34, 35] и ряд других.

Геологическая характеристика района исследования. Комплекс Марун-Кей – один из ключевых объектов в истории развития Уральского орогена, представляет собой тектонический блок размером 14×70 км, приуроченный к зоне Главного Уральского разлома (рис.1) [22]. Наиболее полно эклогиты и реликты их протолитов представлены в южной части комплекса Марун-Кей (местонахождение Слюдяная Горка). Выходы эклогитов приурочены к приосевой части структуры комплекса Марун-Кей, эклогиты и их протолиты выражены линзовидными блоками, залегающими в гранито-гнейсовой матрице [22].

Вершина у отметки 1040 (67°28'16,5" с.ш., 66°29'24" в.д.) сложена массивными ультрабазитами. На склоне южной экспозиции в ультрабазитах наблюдается зона рассланцевания мощностью до 10 м. Азимут простирания зоны 340°, падение субвертикальное. В зоне рассланцевания

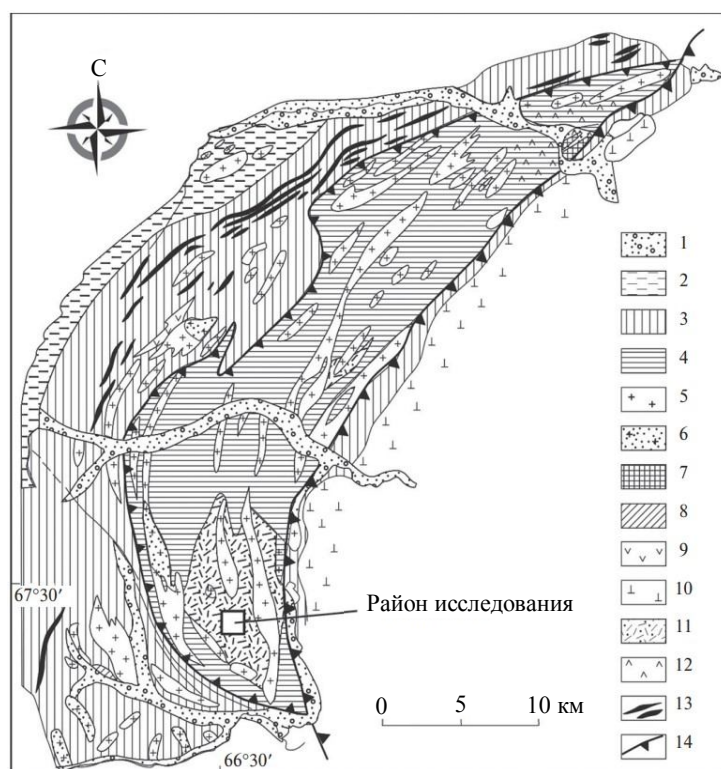


Рис.1. Схематическая геологическая карта комплекса Марун-Кей [17, 22]

1 – четвертичные отложения; 2 – палеозойские отложения; 3 – няровейская серия: кварц-графитовые, кварц-серицитовые, амфибол-хлоритовые сланцы, конгломераты, серицит-хлоритовые сланцы с прослоями кварцитов, песчаников и мраморов, кварц-серицит-хлоритовые тонкополосчатые сланцы с прослоями эффузивов; 4 – комплекс Марун-Кей: чередование амфиболитов (гранатовых, альбитовых, слюдяных, слюдяно-хлоритовых) с гнейсами, гранито-гнейсами и эклогитами; 5 – граниты, тоналиты, гнейсы; 6 – гранитоиды с флюоритом; 7 – метариолиты; 8 – диориты; 9 – габбро, диабазы; 10 – перидотитовый комплекс Сыум-Кей; 11 – участки распространения эклогитов; 12 – породы с глаукофаном; 13 – кварц-графитовые сланцы; 14 – зоны нарушений



отмечены конформные ей линзы эклогитов (рис.2, *а*), от основания к вершине обнажения мощность линз увеличивается от 0,2 до 5 м при простирании более 15 м. В линзах эклогитов наблюдаются редкие обособления гранатитов мощностью до 5 см, тяготеющие к контактам с ультрабази-тами (обр. 2204, рис.2, *б*). На 200 м ниже по склону на ЮЗ среди элювиальных развалов были отобраны два образца гранатитов (обр. 2224, 2225).

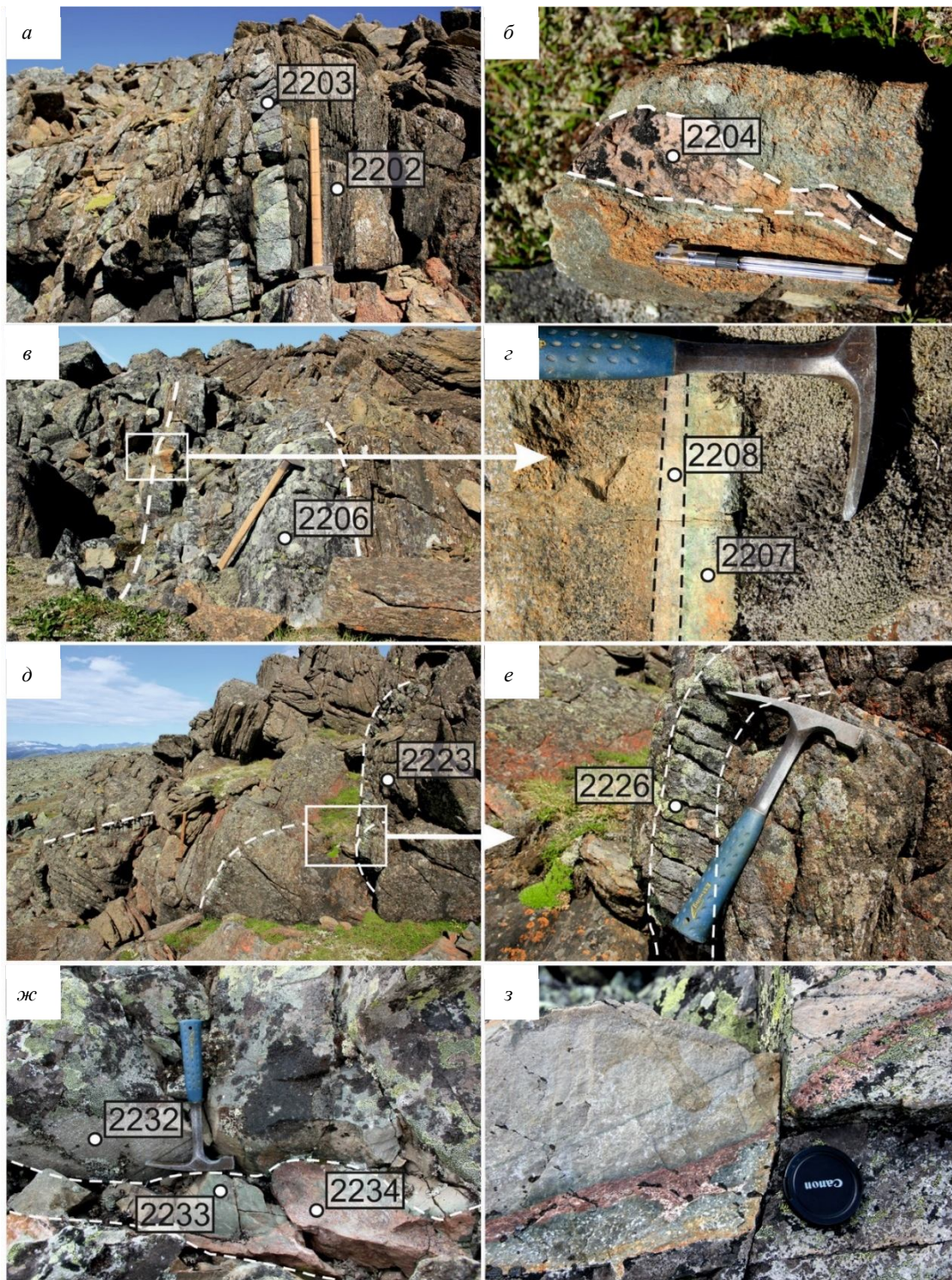


Рис.2. Фотографии обнажений: *а* – линзы эклогитов в зоне рассланцевания ультрабазитов; *б* – обособление гранатита в эклогите; *в* – линза эклогитов в зоне рассланцевания ультрабазитов; *г* – метасоматическая колонка на контакте ультрабазитов (слева) и эклогитов (справа); *д* – массивные ультрабазиты с разнонаправленными прожилками гранатитов (белый пунктир); *е* – прожилок гранатита с зонами амфиболизации; *ж*, *з* – зоны развития гранатитов и эклогитов в порфиритах



В некоторых случаях на контакте линз эклогитов с вмещающими ультрабазами (рис.2, в) развивается метасоматическая зональность (рис.2, з), представленная зоной гранатита (обр. 2208) и комплементарной ей зоной хлорит-амфибол-эпидотового состава (обр. 2207). Суммарная мощность метасоматической колонки не превышает 5 см.

В 500 м на ЮЮЗ от отметки 1040 (67°27'49" с.ш., 66°29'27" в.д.) находится обнажение массивных ультрабазитов. На склоне юго-западной экспозиции в ультрабазах появляется гранат, а гранатсодержащие перидотиты постепенно переходят в амфиболитизированные эклогиты. Выше по склону в гранатсодержащих перидотитах отмечаются многочисленные разнонаправленные прожилки гранатита (обр. 2226) мощностью 2-3 см (рис.2, д) с зонами амфиболитизации мощностью до 15 см с каждой стороны (рис.2, е).

На 300 м восточнее от вышеописанного обнажения (67°27'50" с.ш., 66°29'55" в.д.) находится зубчатый останец, сложенный порфиритами основного состава, по которым развиваются мелкозернистые эклогиты и зоны гранатизации. Мощность зон гранатизации (обр. 2234) от первых до десятков сантиметров (рис.2, ж). На контакте гранатитов с вмещающими порфиритами присутствуют тонкие (до 1 см) каймы амфиболитизации (рис.2, з).

Установлено, что протолитами, по которым развиваются гранатиты, являются две разновидности пород – это ультраосновные и основные породы. Подробное описание всех основных разновидностей пород приведено в работе [22], отметим лишь некоторые важные особенности.

Первый тип протолита гранатитов – ультрабазиты, макроскопически (обр. 2202, рис.3, а, б) представлены темно-зелеными до черными породами, сложенными главным образом оливином при подчиненной роли ортопироксена. При петрографическом изучении породы установлено, что основная ее ткань выражена крупными зернами оливина и ортопироксена. Зерна оливина (до 90 об.%) в значительной степени изменены и превращены в агрегат иддингсита и талька в ассоциации с магнетитом. Ортопироксен (до 2 об.%), представленный идиоморфными зернами, характеризуется наличием структур распада твердого раствора в виде тонких ламелей. Пироксен часто замещен агрегатом бесцветного хлорита (рис.3, а, б). В породе также встречается гранат (до 10 об.%), который ксеноморфен и сильно изменен в краевой части с образованием зернистого агрегата магнетизального хлорита. Таким образом, по особенностям минерального состава породу можно отнести к гранатсодержащим ультраосновным породам (перидотитам [22]).

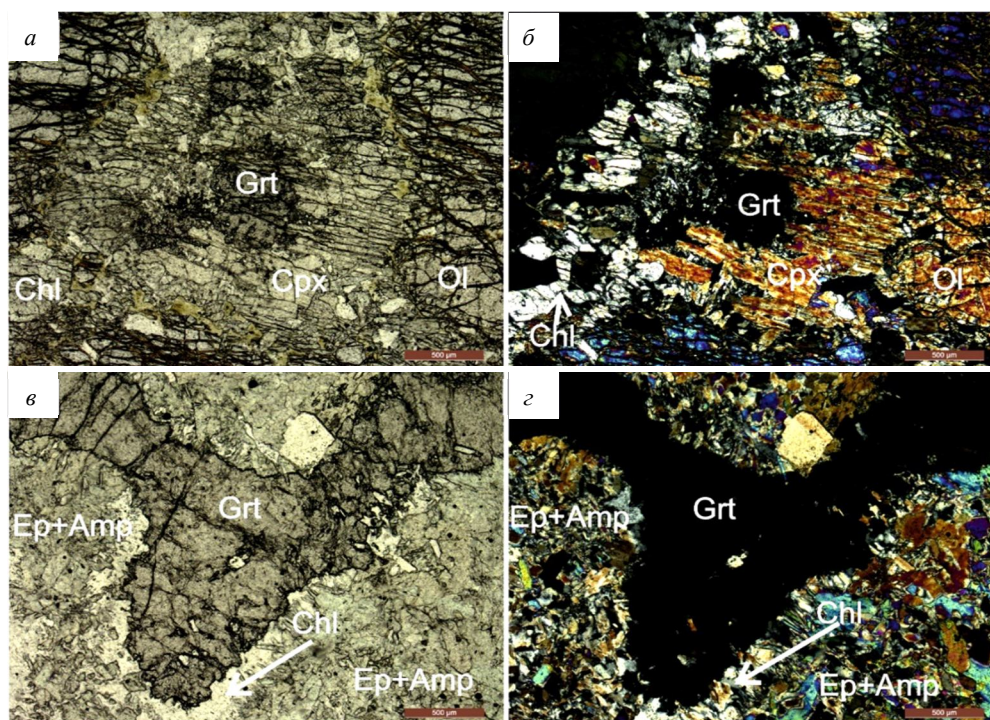


Рис.3. Фото шлифов: гранатсодержащего перидотита (обр. 2202) без анализатора (а), с анализатором (б); эклогита (обр. 2203) без анализатора (в), с анализатором (г)



При преобразовании перидотита (обр. 2203, рис.3, в, г) в породе отчетливо сохраняются реликты первичной структуры, вплоть до полного замещения оливина и пироксена. Реликты ортопироксена замещаются новообразованным клинопироксеном, а также бесцветным амфиболом и хлоритом. Агрегаты граната, поздние по генезису, заполняют промежутки между замещенными зернами пироксена и оливина и реже формируют отдельные мелкие зерна. Учитывая эти особенности, породу можно отнести к существенно измененному эклогиту.

Второй тип пород, по которому развиваются гранатиты, установлен лишь в одном случае – это пироксеновый базальтовый порфирит (обр. 2232). Порода серо-зеленого цвета с мелкозернистой основной массой, при микроскопическом исследовании в ней устанавливаются измененные микролиты плагиоклаза. Общая ткань породы сложена мелкозернистым агрегатом граната, амфибола, хлорита, измененного плагиоклаза и пироксена. Реликты вкрапленников представлены псевдоморфозами бесцветного хлорита, развивающегося по клинопироксену. В породе установлено до 3 об.% рутила, имеющего метаморфическое происхождение. На основании приведенных особенностей породу можно отнести к пироксеновым порфиритам основного состава.

При образовании эклогита по порфириту (обр. 2233) наблюдается более интенсивное проявление гранатизации в виде равномерного заполнения матрикса породы ксеноморфными агрегатами, без образования ограненных зерен. Внутри наиболее крупных (до 300 мкм) агрегатов граната были установлены включения бесцветного хлорита. Зерна первично-магматического клинопироксена замещаются мелкозернистым агрегатом метаморфического клинопироксена, нередко в ассоциации с бесцветным амфиболом. Таким образом, представленную породу можно отнести к эклогитизированному порфириту основного состава.

Ввиду наличия хлорита, серпентина и преимущественно бесцветного амфибола максимальную температуру образования данных парагенезисов можно ограничить величиной не более 550 °С. Установлено [22], что контакты блоков эклогитизированных пород с плагиогранитами представлены зонами рассланцевания. В рассланцованных двуслюдяных плагиогранитах, ассоциирующих с основными-ультраосновными породами, устанавливается один минеральный парагенезис с эпидотом, что не противоречит приведенной выше оценке температуры.

Таким образом, исследованные гранатиты Слюдяной Горки можно разделить на несколько типов: в ассоциации с эклогитами (в виде ксеноморфных, линзообразных обособлений в эклогитовых телах и как составляющую зон метасоматического генезиса на контакте ультрабазитов и эклогитов); в виде маломощных (не более 5 см) мономинеральных жил, секущих блоки ультрабазитов, – более редкий тип. Полевые наблюдения свидетельствуют об образовании трещин, вмещающих эти жилы, в условиях хрупко-пластичных деформаций пород.

Аналитическая методика. Содержание петрогенных (главных) элементов в породах анализировалось рентгеноспектральным флуоресцентным методом (XRF) на многоканальном спектрометре ARL-9800 по стандартной методике (ВСЕГЕИ). Нижний предел определения оксидов петрогенных элементов составляет 0,01-0,05 мас. %.

Валовые анализы пород на редкие и редкоземельные элементы проводились методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре ELAN-DRC-6100 по стандартной методике (ВСЕГЕИ) с использованием кислотного разложения в смеси кислот (HF+HNO₃). Для контроля точности анализа использовались геологические стандарты USGS. Относительная погрешность определения для более чем 70 элементов не превышает 5-10 %: для REE менее 5 %, Rb, Sr, Ba, Nb, Ta, Zr, Hf, U и Th менее 10 %. Нижние пределы обнаружения колеблются в пределах 0,01 % для главных и 0,005-0,010 ppm для большинства редких и редкоземельных элементов.

Химический состав, а также строение и взаимоотношение минералов исследовались в препаратах из эпоксидной смолы (шайбах) в режиме обратноотраженных электронов (BSE) на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (ИГГД РАН). Для расчета минерального состава минералов применялась программа Minal 3.0, разработанная Д.В.Доливо-Добровольским (ИГГД РАН). С целью определения классификационной принадлежности минералов группы эпидота была использована программа WinEpcas [36], состав амфиболов рассчитан на основании рекомендаций и классификационной схемы, утвержденной IMA [37]. Аббревиатуры минералов даны согласно [38].



Содержание редких и редкоземельных элементов в минералах было определено методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на ионном микрозонде Cameca IMS-4f в ЯФ ФТИАН им. К.А.Валиева РАН. Погрешность измерения редких элементов составляет до 10 % для концентраций выше 1 ppm и до 20 % для диапазона концентраций 0,1-1 ppm; порог обнаружения для различных элементов варьируется в пределах 5-10 ppb. Редкоэлементный состав породообразующих минералов определялся в тех же точках, что и главных элементов. При построении спектров распределения REE составы минералов нормировались на состав хондрита CI [39].

Результаты. Состав пород. При сравнении составов пород гранатиты по возможности сопоставляются с исходными для них породами (протолитами) – перидотитами и порфиритами основного состава, а также с эклогитами, образованными по тем же протолитам (табл.1).

Таблица 1

Состав пород по главным элементам, мас.%

Компоненты	Гранатиты и их протолиты, связанные с перидотитами							Гранатиты и их протолиты, связанные с порфиритами		
	Перидотит	Измененный эклогит	Гранатит	Эклогит	Гранатит	Гранатсодержащий перидотит	Гранатит	Порфирит	Эклогит	Гранатит
	2202	2203	2204	2206	2208	2223	2226	2232	2233	2234
SiO ₂	39,22	39,94	38,06	40,01	40,68	40,66	45,16	48,46	48,44	41,59
Al ₂ O ₃	7,30	18,83	23,04	16,34	22,39	8,35	11,01	17,26	14,87	20,56
TiO ₂	0,05	0,04	0,03	0,05	0,02	0,14	0,36	0,49	0,61	3,36
Fe ₂ O _{3t}	10,91	8,41	13,21	7,83	9,35	13,27	11,34	10,44	12,23	21,40
MnO	0,16	0,14	0,34	0,12	0,18	0,20	0,32	0,19	0,21	0,22
MgO	34,33	21,43	15,97	22,34	16,71	29,42	19,32	8,54	8,87	2,38
CaO	4,29	9,28	10,30	10,12	10,66	5,07	12,60	12,70	12,29	8,59
Na ₂ O	< 0,1	0,46	< 0,1	0,32	< 0,1	0,16	< 0,1	1,58	1,62	1,41
K ₂ O	0,03	0,06	< 0,01	0,05	0,01	0,20	< 0,01	0,17	0,17	0,39
P ₂ O ₅	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,11	0,08	0,09	0,47
LOI	3,81	1,64	0,30	2,00	0,49	1,85	0,17	< 0,1	0,13	< 0,1
Сумма	100,00	100,00	101,00	99,18	101,00	99,31	100,00	99,99	99,54	100,00

Примечание. Fe₂O_{3t} – суммарное железо; LOI – потери при прокаливании; обр. 2202 является протолитом для гранатитов 2204 и 2208.

Главные элементы. Проанализированные гранатиты характеризуются сравнительно узким интервалом содержания кремнезема от 38,06 до 45,16 мас.% (табл.1). Максимальное содержание 45,16 мас.% установлено для обр. 2226. При этом кремнезем в гранатсодержащем перидотите (обр. 2223), по которому развивается этот гранатит, существенно ниже – 40,66 мас.%. Кремнезем в гранатитах (обр. 2204 и 2208) практически не отличается от значений для протолита. В гранатите (обр. 2234), развивающемся по порфируиту (обр. 2232), кремнезема меньше (41,59 мас.%), чем в порфирите и эклогите (около 48,5 мас.%).

Содержание глинозема достаточно выдержано в трех образцах гранатитов – 20,56-23,04 мас.% (обр. 2204, 2208, 2234). В обр. 2226 оно существенно ниже – 11,01 мас.%. Однако для всех гранатитов фиксируется единая тенденция – рост глинозема по сравнению с протолитом.

Содержание окиси титана в трех гранатитах (обр. 2204, 2208 и 2226) невысокое – 0,02-0,36 мас.% и примерно соответствует его количеству в протолите. В гранатите по порфируиту (обр. 2234) содержание TiO₂ составляет 3,36 мас.%, что существенно больше, чем в протолите (0,49 мас.%).

Гранатит по порфируиту (обр. 2234) отличается повышенным содержанием Fe₂O_{3t}, равным 21,40 мас.%, значительно превышающим значение для порфирита – 10,44 мас.%. Для других гранатитов содержание Fe₂O_{3t} примерно соответствует уровню протолитов и находится в интервале 9,35-13,21 мас.%.

Содержание MnO для всех проанализированных гранатитов находится в сравнительно узком интервале 0,18-0,34 мас.% и незначительно отличается от протолитов.



Общей закономерностью является падение содержания MgO в гранатитах по сравнению с протолитами. Для обр. 2204, 2208 и 2226 MgO находится в интервале 15,97-19,32 мас.%, для протолитов этих гранатитов – в интервале 29,42-34,33 мас.%. Гранатит по порфириту (обр. 2234) отличается минимальным содержанием MgO – 2,38 мас.%, что коррелируется с невысоким содержанием в протолите – 8,54 мас.%.

Для обр. 2204, 2208 и 2226 содержание CaO находится в узком интервале 10,30-12,60 мас.%, при этом наблюдается его рост примерно вдвое по сравнению с протолитами. Напротив, для гранатита по порфириту (обр. 2234) фиксируется падение содержания CaO по сравнению с порфиритом – с 12,70 до 8,59 мас.%.

Для обр. 2204, 2208 и 2226 содержание щелочей (оксидов Na и K) ниже порога чувствительности метода XRF (или незначительно выше, как K₂O в обр. 2208). Для гранатита по порфириту содержание Na₂O – 1,41 мас.%, K₂O – 0,39 мас.%. Эти значения сопоставимы с протолитом.

Содержание оксида фосфора ниже порога чувствительности метода XRF для обр. 2204 и 2208, для обр. 2226 оно составляет 0,11 мас.% (в протолите ниже порога обнаружения). Для гранатита по порфириту отмечен рост содержания P₂O₅ по сравнению с протолитом (0,39 и 0,17 мас.% соответственно).

Для более корректного сравнения изменений состава пород (ультрабазиты и базиты) был проведен расчет по кислородному методу Барта [40], предполагающий изообъемный характер преобразований. Установлено, что в гранатитах по ультрабазитам относительное количество алюминия возрастает до 300 %, а в таковых по основным порфиритам – на 20 %. Относительная концентрация магния во всех гранатитах уменьшается относительно протолита в 2-4 раза.

Гранатиты по порфиритам отличаются возрастанием относительной концентрацией железа в два, а титана – в 10 раз, что выражается петрографически в интенсивном образовании рутила.

Для всех ассоциаций пород было установлено, что наименее подвижным является кремнезем (относительные изменения не более 10 %), а наибольшей мобильностью отличаются титан (до 700 отн.%) и щелочи Na, K (до 300 отн.%).

Если принять кремнезем за условно немобильный элемент, то существует возможность оценить состав источника флюидов, приводящих к эклогитизации и гранатизации. Сделанные авторами предварительные оценки по такой модели смешения (протолит-флюид) с использованием отношений элементов [41] позволяют предполагать, что источником флюида могло быть вещество высокоглиноземистых натровых гранитоидов.

Редкие элементы. Все проанализированные гранатиты демонстрируют существенное падение содержания Cr по сравнению с протолитом. Для гранатитов (обр. 2204, 2208 и 2226), протолитами которых являются перидотиты, Cr составляет 260-526 ppm (табл.2). При этом Cr в протолитах значительно выше – 1500-3100 ppm. В порфирите содержание Cr закономерно ниже – 263 ppm, в гранатите по порфириту (обр. 2234) оно уменьшается до 41,6 ppm. Содержание Ni и Co изменяется аналогично хрому, уменьшаясь в гранатитах относительно их протолита.

Содержание Cu мало меняется для обр. 2204, 2208 и 2226 при сравнении с протолитом, составляя 33,4-91,3 ppm. При сопоставлении порфирита и гранатита по нему фиксируется рост меди с 97,3 до 158 ppm. Содержание Zn коррелируется с содержанием меди и также достигает максимума 296 ppm в гранатите по порфириту.

Содержание V в гранатитах уменьшается относительно протолитов, но менее масштабно: с 37,4 до 11,3 и 15,2 ppm для обр. 2208 и 2204, с 81,1 до 57,1 ppm для обр. 2226. В порфирите (обр. 2232) содержание V существенно выше – 374 ppm, чем в перидотите, но в гранатите по порфириту (обр. 2234) оно также уменьшается до 253 ppm.

Содержание Sc в гранатитах варьируется в интервале 2,86-19,4 ppm. Оно либо остается на уровне протолита, либо уменьшается.

Поведение Sr не демонстрирует явных закономерностей. В обр. 2226 он не изменяется по сравнению с протолитом, в обр. 2204 – уменьшается, в обр. 2208 – увеличивается. Для этих трех гранатитов содержание Sr находится в интервале 39,2-179 ppm. Для гранатита по порфириту (обр. 2234) рост Sr более заметен – 547 ppm в гранатите и 197 ppm в порфирите. Похожим образом себя ведет и другой крупноионный литофильный элемент Ba.



Таблица 2

Состав пород по редким элементам, ppm

Компоненты	Гранатиты и их протолиты, связанные с перидотитами							Гранатиты и их протолиты, связанные с порфиритами		
	Перидотит	Измененный эклогит	Гранатит	Эклогит	Гранатит	Гранат- содержащий перидотит	Гранатит	Порфирит	Эклогит	Гранатит
	2202	2203	2204	2206	2208	2223	2226	2232	2233	2234
Cr	1500	739	260	897	410	3100	526	263	146	41,6
Ni	1220	668	180	707	391	896	306	56,4	77,9	33,4
Co	120	63,9	62,3	70,2	62,6	98,6	53,1	38,8	47,4	29,1
V	37,4	19,9	15,2	25,6	11,3	81,1	57,1	374	396	253
Sc	12,1	5,69	3,66	7,42	2,86	15,8	19,4	39,4	40,7	16,4
Sr	101	168	39,2	182	179	79,7	79,1	197	95,6	547
Y	1,36	0,880	1,54	1,02	0,500	3,03	21,5	16,3	16,7	17,7
Zr	3,10	2,45	7,39	3,94	2,34	7,09	260	42,3	48,1	64,9
Nb	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,620	3,80	1,88	2,42	7,22
Hf	0,091	0,110	0,099	0,068	0,034	0,240	6,73	1,26	1,54	1,67
Ta	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,400	< 0,1	0,150	0,410
Th	< 0,1	< 0,1	0,360	< 0,1	0,150	0,260	1,38	0,140	0,170	1,54
U	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,320	< 0,1	< 0,1	0,240
Cu	50,7	70,9	59,5	91,8	33,4	100	91,3	97,3	144	158
Zn	75,7	62,6	44,1	82,0	38,5	109	68,3	129	148	296
La	0,470	0,500	6,78	0,610	4,53	1,17	3,26	8,45	7,25	25,8
Ce	0,980	1,35	7,06	1,11	5,16	3,57	5,84	19,5	17,0	55,0
Pr	0,120	0,130	0,570	0,160	0,400	0,450	0,720	2,68	2,17	6,78
Nd	0,760	0,750	1,96	0,790	1,04	1,66	3,06	11,2	9,33	29,4
Sm	0,160	0,130	0,330	0,270	0,240	0,440	1,28	2,88	1,99	5,96
Eu	0,089	0,210	0,360	0,140	0,140	0,280	0,270	1,13	0,890	3,37
Gd	0,150	0,240	0,340	0,190	0,180	0,470	1,79	2,91	2,63	8,66
Tb	0,028	0,025	0,056	0,024	0,024	0,083	0,390	0,420	0,360	0,650
Dy	0,230	0,180	0,270	0,200	0,130	0,490	2,91	2,57	2,70	3,21
Ho	0,048	0,036	0,066	0,031	0,019	0,110	0,810	0,600	0,640	0,710
Er	0,120	0,088	0,150	0,120	0,048	0,290	2,49	1,90	1,97	1,82
Yb	0,130	0,120	0,110	0,092	0,044	0,350	2,37	1,60	1,85	1,36
Lu	0,017	0,019	0,012	0,012	0,005	0,057	0,400	0,290	0,290	0,210

Примечание. Обр. 2202 является протолитом для гранатитов 2204 и 2208.

Содержание Y в двух гранатитах по перидотитам (обр. 2208 и 2204) низкое – 0,50 и 1,54 ppm и отвечает его количеству в протолите. В гранатите (обр. 2226) Y резко возрастает до 21,5 ppm по сравнению с протолитом (3,03 ppm). В гранатите по порфириту (обр. 2234) Y не меняется при переходе от исходной породы и составляет 17,7 ppm.

Поведение Zr коррелируется с поведением Y. Содержание Zr в обр. 2208 и 2204 невысокое – 2,34 и 7,39 ppm и соответствует его количеству в протолите. В гранатите (обр. 2226) Zr резко возрастает по сравнению с протолитом (260 и 7,09 ppm соответственно). В гранатите по порфириту (обр. 2234) Zr увеличивается до 64,9 ppm (от 42,3 ppm в протолите).

Ниобий ведет себя аналогично цирконию, достигая максимального содержания 7,22 ppm в гранатите по порфириту (обр. 2234). Схожие тенденции демонстрируют другие высокочarged элементы: гафний (максимальное содержание в обр. 2226 – 6,73 ppm); тантал (только в гранатитах обр. 2226 и 2234 содержание выше порога обнаружения и составляет около 0,4 ppm); торий (в гранатитах обр. 2226 и 2234 содержание максимальное и составляет около 0,4 ppm) и уран (распределение аналогично танталу).

Редкоземельные элементы. Общей тенденцией для гранатитов является рост суммарного содержания REE по сравнению с протолитами. Для обр. 2208 и 2204 содержание REE составляет 12,0 и 18,1 ppm по сравнению с 3,34 ppm в протолите – перидотите. Для обр. 2223 (гранатсодержащий перидотит) и 2226 (гранатит) содержание REE растет от 9,47 до 26,0 ppm. Наиболее существенное увеличение количества REE зафиксировано для гранатита по порфириту (обр. 2234) – с 56,4 ppm у порфирита до 143 ppm у гранатита. При этом для обр. 2204 и 2208 рост содержания

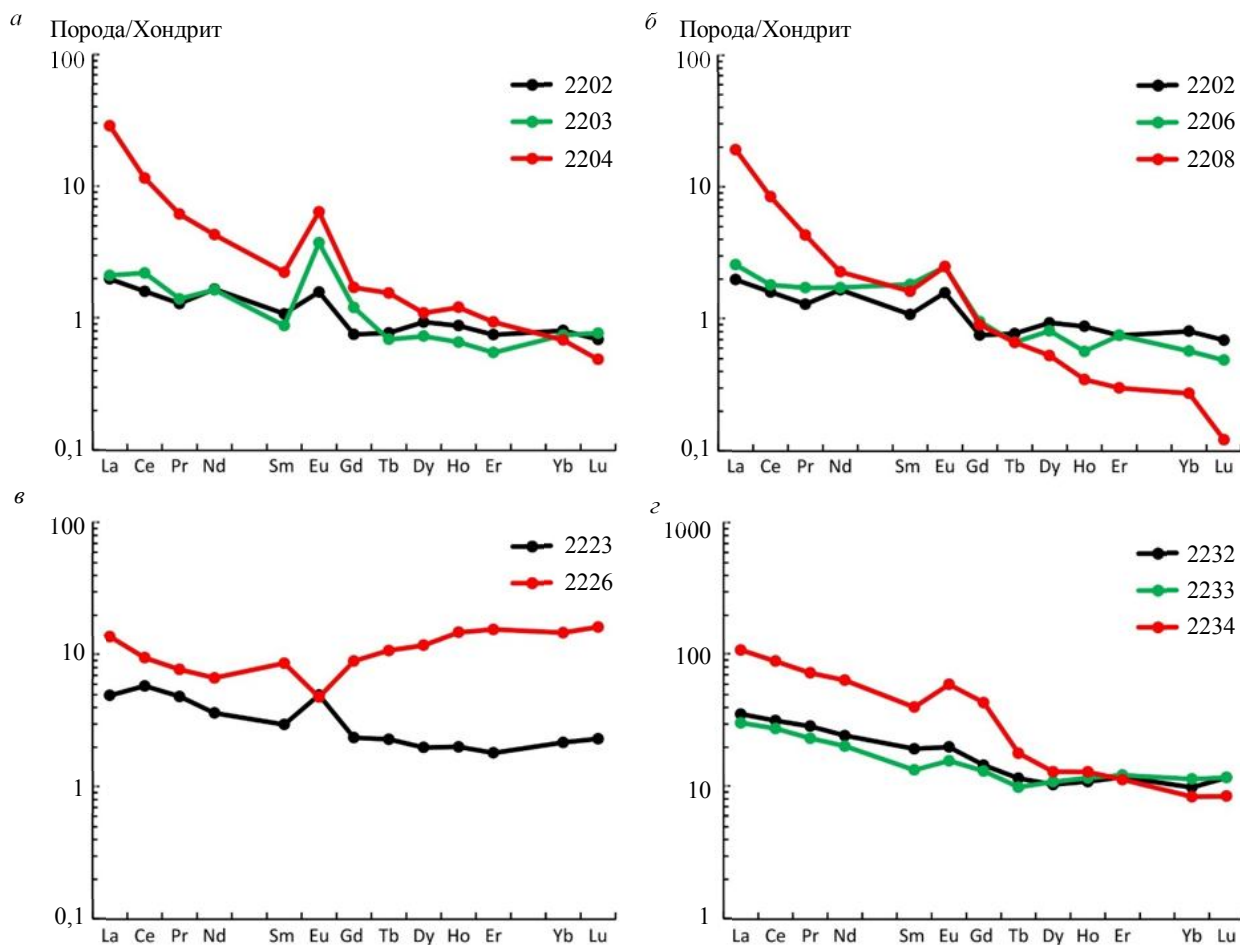


Рис.4. Спектры распределения REE в исследуемых породах: 2202, 2223 – ультрабазиты; 2232 – порфирит; 2203, 2206, 2233 – эклогиты; 2204, 2208, 2226, 2234 – гранатиты

REE происходит преимущественно за счет увеличения количества легких REE. В гранатите по порфириту, помимо легких REE, возрастает содержание средних и ряда тяжелых REE.

Перечисленные выше особенности распределения REE наглядно проявлены на спектрах для гранатитов в сопоставлении с их протолитами (рис.4). Протолиты – перидотит (обр. 2202) и развивающийся по нему эклогит (обр. 2203) – достаточно схожи в отношении характера распределения и уровня содержания REE (рис.4, а), за исключением Eu и отчасти Gd, которые возрастают в эклогите. Однако гранатит (обр. 2204) отличается повышенным содержанием всех легких (наиболее существенно) и средних REE, содержание тяжелых REE тоже повышается (за исключением Yb и Lu), но не так существенно. Показатель фракционирования REE (La_N/Lu_N отношение) для гранатита возрастает до 58,7 (со значений 2,87 и 2,73 у перидотита и эклогита). Для всех трех образцов в этой серии фиксируется положительная Eu-аномалия, величина которой у эклогита и гранатита сопоставима ($Eu/Eu^* = 3,62$ и $3,28$ соответственно); для перидотита $Eu/Eu^* = 1,75$.

Некоторые отличия серии пород перидотит (обр. 2202) – эклогит (обр. 2206) – гранатит (обр. 2208) состоят в том, что в гранатите накапливаются только легкие REE (рис.4, б). За счет выноса HREE гранатит характеризуется максимальной степенью фракционирования REE ($La_N/Lu_N = 157$) по сравнению с перидотитом и эклогитом (2,87 и 5,28 соответственно). Eu-аномалия для пород этой серии положительная ($Eu/Eu^* = 1,75-2,05$).

Перидотит (обр. 2223) и гранатит (обр. 2226) отличаются от других характером распределения REE (рис.4, в). Если спектр для перидотита комплементарен спектру другого перидотита (обр. 2202), то спектр для гранатита отличается слабодифференцированным характером. Примечательно, что содержание Eu практически не изменяется при переходе от перидотита к гранатиту, происходит инверсия знака Eu-аномалии с положительного на отрицательный с сохранением ее



амплитуды. Распределение REE в гранатите приобретает черты спектра «крыльев птицы», характерного для пород, испытавших сильную флюидную переработку [42].

Спектры распределения REE в порфирите (обр. 2232) и эклогите (обр. 2233) достаточно схожи (рис.4, з). Гранатит отличается от них повышенным содержанием легких и средних REE, а также Gd. Степень фракционирования REE ($La_N/Lu_N = 12,8$) не так значительна, как для обр. 2204 и 2208, и возрастает по сравнению с порфиритом и эклогитом (3,02 и 2,59 соответственно). Eu-аномалия для трех образцов умеренная, положительная ($Eu/Eu^* = 1,19$ для порфирита и эклогита и 1,43 для гранатита).

Состав минералов по главным элементам. Гранатиты, развивающиеся по перидотитам. В обр. 2204 гранаты представлены в виде сплошных образований с редкими зернами амфиболов (паргасит) размером до 300 мкм в поперечнике (рис.5, а). По составу гранаты неоднородны – содержание, мол.-%: Prp минала – 48-59, Alm – 21-27, Grs – 14-26, Sps – не более 1,2 (табл.3). При этом наблюдается следующая закономерность – на контакте с зоной развития амфиболов понижается содержание Grs минала (14-17 мол.-%) и повышается содержание Prp минала (55-59 мол.-%) относительно удаленной от контакта части образца, где Grs – 24-27 мол.-%, а Prp – 43-49 мол.-% (табл.3). Содержание Alm минала в разных зонах практически не меняется. Магнезиальность гранатов на контакте с зоной развития амфиболов составляет 0,65-0,70, а на удалении от этой зоны – 0,61-0,66; магнезиальность амфиболов не меняется – 0,87-0,88 (табл.4). Анализ #Mg гранатов и амфиболов указывает на отсутствие равновесия между этими двумя минералами и относительно быстрое развитие зоны гранатита.

В обр. 2208 гранаты представлены в виде идиоморфных зерен размером от 250 до 500 мкм в матриксе (рис.5, б), сложенным преимущественно амфиболами (паргасит) и минералами группы эпидота (цоизит). Гранаты характеризуются отсутствием включений, а также практически полным отсутствием зональности по главным элементам. При этом содержания, мол.-%: Prp минала – 48-52; Alm минала – ниже 17-23; а Grs – выше 26-31 (см. табл.3), чем в обр. 2204.

Таблица 3

Представительные анализы состава гранатов по главным элементам, мас.-%

Минерал	2204						2208			2226		
	7	8	10	15	17	21	3	4	23	4	12	13
SiO ₂	40,98	41,59	41,65	39,90	40,69	41,09	41,23	40,92	41,12	40,89	40,83	40,38
Al ₂ O ₃	22,72	22,66	22,72	22,40	22,62	22,93	23,42	22,88	22,98	22,46	22,29	22,60
Fe ₂ O _{3t}	13,98	14,17	12,60	15,14	13,36	12,22	10,14	10,08	10,22	16,25	16,75	16,47
MnO	0,45	0,37	0,48	0,61	0,42	0,49	0,19	0,18	0,19	0,81	0,47	0,74
MgO	15,36	15,26	16,43	11,72	13,34	13,58	13,61	14,03	13,67	13,02	13,23	13,89
CaO	6,50	5,94	6,12	10,23	9,57	9,70	11,41	11,91	11,82	6,58	6,43	5,92
Сумма	99,99	99,99	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Prp	55,87	55,11	58,83	43,78	48,88	49,28	49,30	51,11	49,57	47,63	48,30	51,28
Alm	26,20	28,70	24,46	27,45	25,06	24,43	20,61	17,33	19,25	33,37	33,86	31,46
Grs	17,00	15,43	15,74	27,48	25,19	25,29	29,69	31,19	30,78	17,31	16,88	15,72
Sps	0,94	0,76	0,96	1,28	0,87	1,00	0,40	0,37	0,40	1,69	0,96	1,54

Минерал	2234				2224				2225			
	21	22	23	24	2c	3r	18c	19r	40c	38r	44c	55r
SiO ₂	38,18	38,10	38,13	38,05	39,87	40,30	39,85	39,83	39,45	39,23	39,35	39,02
Al ₂ O ₃	20,81	21,10	20,99	21,27	22,54	22,43	22,46	22,09	21,83	21,16	21,78	22,11
Fe ₂ O _{3t}	26,86	27,00	26,59	26,84	16,64	17,07	16,98	17,59	20,54	21,55	19,82	21,42
MnO	0,59	0,62	0,65	0,43	0,44	0,19	0,15	0,48	0,29	0,11	0,43	0,37
MgO	3,73	3,67	3,48	3,87	10,67	11,24	9,81	11,08	8,49	9,12	7,83	9,48
CaO	9,83	9,52	10,15	9,54	9,84	8,77	10,00	8,35	10,13	7,53	10,80	7,61
Сумма	100,0	100,0	99,99	100,0	100,0	100,0	99,25	99,42	100,7	98,70	100,0	100,0
Prp	14,56	14,36	13,61	15,17	39,89	41,58	36,86	41,46	32,08	34,65	29,67	36,22
Alm	56,55	57,50	56,44	57,01	32,73	34,72	35,79	35,05	39,78	44,55	39,99	42,07
Grs	27,59	26,78	28,52	26,85	26,44	23,30	27,01	22,45	27,51	20,57	29,40	20,90
Sps	1,30	1,37	1,43	0,97	0,94	0,40	0,33	1,04	0,64	0,23	0,94	0,81

Примечание. Указаны номера образцов и номера точек анализа; c – центральная часть зерна, r – краевая.



Таблица 4

Представительные анализы состава породообразующих минералов по главным элементам, мас. %

Минерал	Амфиболы			Клинопироксены		Минералы группы эпидота		
	2204	2208	2226	2226	2225	2208	2225	2234
SiO ₂	45,32	45,30	46,94	54,24	54,35	40,04	38,50	36,05
TiO ₂	0,40	0,19	0,45	0,07	0,08	—	0,19	—
Al ₂ O ₃	15,74	17,29	12,54	0,80	9,35	33,66	29,23	25,82
Fe ₂ O _{3t}	4,39	2,76	5,35	2,76	4,71	0,57	5,32	8,53
MnO	0,03	0,00	0,11	0,17	—	0,02	—	—
MgO	17,48	17,09	17,66	16,26	9,68	0,11	0,32	0,00
CaO	13,75	13,06	13,71	25,79	17,25	26,42	25,01	22,89
Na ₂ O	2,67	2,90	2,35	0,27	5,03	—	—	—
K ₂ O	0,40	0,09	0,14	—	—	—	—	—
Cl	0,10	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	100,28	98,68	99,25	100,36	100,45	100,82	98,57	93,65
Элемент	Кристаллохимические коэффициенты							
Si	6,276	6,278	6,569	1,977	1,952	2,969	2,995	3,012
Ti	0,042	0,020	0,047	0,002	0,002	—	0,011	—
Al	2,569	2,824	2,068	0,034	0,396	2,942	2,680	2,543
Fe	0,508	0,320	0,626	0,084	0,141	0,035	0,346	0,596
Mn	0,004	—	0,013	0,005	—	0,001	—	—
Mg	3,608	3,531	3,685	0,884	0,518	0,012	0,037	—
Ca	2,040	1,939	2,056	1,007	0,664	2,099	2,085	2,049
Na	0,717	0,779	0,638	0,019	0,350	—	—	—
K	0,071	0,016	0,025	—	—	—	—	—
Cl	0,023	—	—	—	—	—	—	—

Для обр. 2226 характерны линзовидные выделения ксеноморфных гранатов в матрице, сложенной гипидиоморфными зернами клинопироксенов (диопсид) размером до 300 мкм в поперечнике (рис.5, в). Кроме того, встречаются единичные зерна амфиболов (паргасит), ильменита и Cl-апатита. Состав гранатов по главным элементам варьируется слабо, при этом по содержанию Prp минала (47-51 мол.%) он близок составу гранатов из обр. 2204 и 2208. Однако гранаты из обр. 2206 отличаются пониженным содержанием Grs минала 15-19 мол.% и повышенным – Alm 30-33 мол.%.

В обр. 2224 и 2225 гранаты представлены крупными хорошо ограниченными порфириобластами размером до 500 мкм, с редкими включениями кварца (рис.5, з, д). Основная масса сложена преимущественно кварцем, встречаются редкие ксеноморфные зерна омфациита (содержание Na₂O достигает 5 мас.%), а также эпидота. Акцессорная минерализация представлена рутилом и Cl-апатитом. По составу гранаты из обр. 2224 более

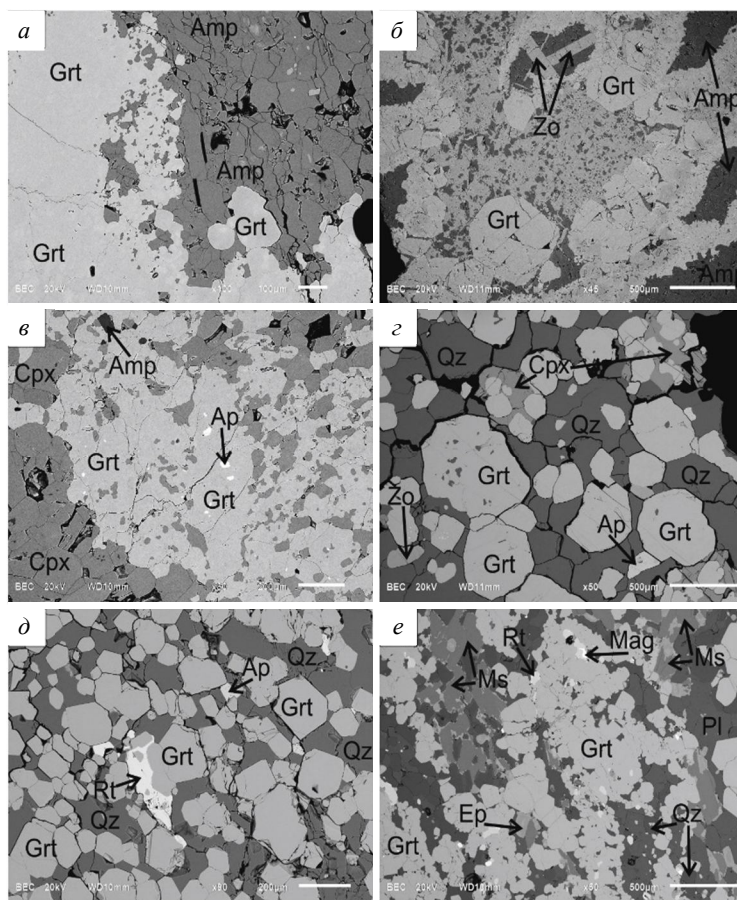


Рис.5. BSE-изображения гранатов, связанных с перидотитами: обр. 2204 (а); обр. 2208 (б); обр. 2226 (в); обр. 2225 (з); обр. 2224 (д); с порфиритами обр. 2232 (е)



магнезиальные ($\#Mg = 0,50-0,57$), чем гранаты из обр. 2225 ($\#Mg = 0,38-0,46$). Содержание Grs и Sps миналов для гранатов в этих образцах близко: Grs – 20-29 мол.%, Sps – 0,2-1,1 мол.%. В гранатах установлена слабовыраженная зональность с увеличением Prp и Alm миналов (на 3-5 мол.%) и уменьшением Grs минала (на 3-9 мол.%) от центра к краю зерен (см. табл.3).

Гранатиты, развивающиеся по порфиритам основного состава. В гранатите (обр. 2234) гранаты представлены линзовидными обособлениями «слипшихся» порфиробластов размером от 50 до 400 мкм (рис.5, е). Пространство между агрегатами гранатов выполнено преимущественно зернами плагиоклаза (An_{9-10}), кварца, эпидота и мусковита. Из аксессуарных минералов встречаются зерна рутила и магнетита. Для всех гранатов из этого образца, включая мелкие зерна с неразличимыми границами, характерны следующие содержания миналов, мол.%: Alm – 55-61; Prp – 9-16; Grs – 24-29; Sps – 0,8-1,4 (см. табл.3).

Таким образом, состав гранатов из гранатитов в значительной мере определяется составом протолита, по которому они развиваются (рис.6).

Состав минералов по редким элементам. Гранаты из обр. 2208 отличаются минимальным по сравнению с другими гранатитами содержанием высокозарядных элементов, ppm: Y – 0,7; Ti – в среднем 58,3; Hf – не более 0,1 и невысокое содержание V – в среднем 72,0 (табл.5).

В гранатах из других гранатитов (обр. 2224-2226, 2204 и 2234) содержание Y существенно выше – 14,5-147 ppm при среднем значении 44,4 ppm. Содержание Ti варьируется 109-381 ppm (в среднем 240 ppm), Hf – 0,43-7,56 ppm (в среднем 2,29 ppm). Повышенное содержание Cr (в среднем 637 ppm) установлено в гранатах из обр. 2204, V – в гранате из обр. 2224 (в среднем 201 ppm).

Гранаты из гранатита по порфириту (обр. 2234) выделяются среди этих образцов повышенным содержанием Ti (в среднем 356 ppm), пониженным – V и Cr (в среднем 49,6 и 57,7 ppm соответственно). Гранаты из этого образца демонстрируют зональное распределение по ряду редких элементов. Центральная часть зерна обогащена относительно края высокозарядными элементами – Ti, Zr и Hf и обеднена V и Cr (табл.5).

Редкоземельные элементы. Гранаты из обр. 2208 отличаются минимальным содержанием REE ($\Sigma REE \sim 0,49$ ppm). Спектры распределения REE для гранатов из обр. 2208 (рис.7, а) повторяют в области легких REE дифференцированный характер спектров для других гранатов, но в области средних и тяжелых REE спектры резко выполаживаются ($Lu_N/Gd_N \sim 1,40$). Гранаты из обр. 2208 обнаруживают положительную Eu-аномалию, амплитуда которой несколько уменьшается от центра к краю зерна ($Eu/Eu^* = 4,22$ и 2,48 соответственно). Такой характер спектров является нетипичным для метаморфических гранатов и может быть объяснен эффектом наследования от минерала-предшественника (предположительно плагиоклаза) [42].

Спектры распределения REE в гранатах из других гранатитов демонстрируют дифференцированный характер распределения с увеличением нормированного содержания от легких к тяжелым REE. Для гранатов из обр. 2224-2226 и 2234 общей чертой является выполаживание части спектра в области тяжелых REE ($Lu_N/Gd_N \sim 2,75$). Для граната из обр. 2204 тяжелые REE дифференцированы в той же степени, что и легкие REE ($Lu_N/Gd_N \sim 13,30$). Для гранатов из обр. 2224-2226 зафиксирована умеренная отрицательная Eu-аномалия ($Eu/Eu^* 0,54-0,96$). Для гранатов из гранатита по порфириту (обр. 2234) установлена положительная Eu-аномалия ($Eu/Eu^* \sim 2,13$).

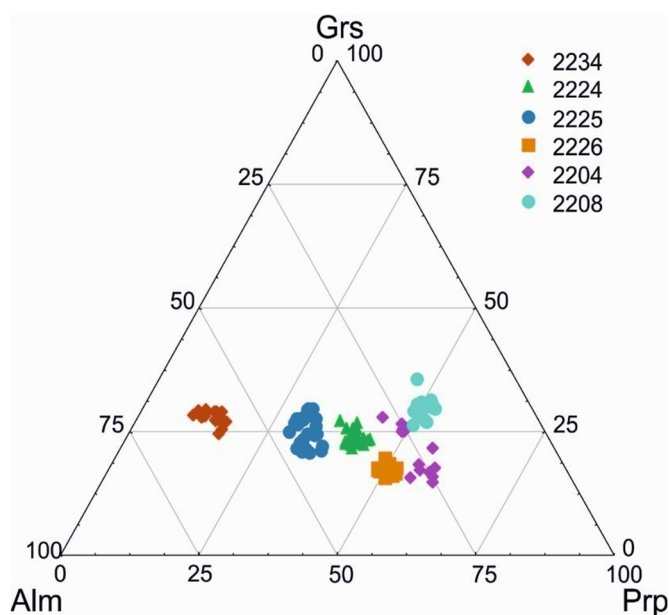


Рис.6. Диаграмма Prp-Grs-Alm минерального состава гранатов из гранатитов



Таблица 5

Представительные анализы состава минералов по редким элементам, ppm

Минерал	Гранаты												
	2226			2204		2208			2234			2224	
	3r	4m	5c	9	10	11r	12c	13r	20r	21c	22r	25r	26c
La	0,012	0,039	0,087	0,011	0,011	bdl	0,007	bdl	0,018	0,009	0,009	0,005	bdl
Ce	0,083	0,084	0,128	0,016	0,011	0,014	0,007	0,017	0,050	0,043	0,029	0,027	0,017
Pr	0,031	0,047	0,039	bdl	0,005	bdl	bdl	bdl	0,009	0,007	0,011	0,005	0,004
Nd	0,749	0,832	0,722	0,070	0,043	bdl	bdl	bdl	0,143	0,248	0,059	0,036	0,056
Sm	1,58	1,24	1,63	0,147	0,177	0,050	0,038	0,039	0,666	0,693	0,247	0,047	0,149
Eu	0,550	0,492	0,667	0,075	0,082	0,067	0,080	0,030	1,00	1,19	0,418	0,028	0,115
Gd	4,38	4,37	4,94	0,381	0,447	0,074	0,088	0,086	2,96	3,38	1,94	0,237	1,61
Tb	1,03	0,947	1,11	0,114	0,123	0,012	0,027	0,017	0,737	0,769	0,564	0,232	0,487
Dy	7,06	5,47	6,48	1,36	1,78	0,137	0,137	0,076	5,08	5,02	3,77	2,84	4,28
Er	4,12	2,40	2,99	2,52	2,80	0,058	0,081	0,074	2,72	2,19	2,09	3,33	4,25
Yb	3,43	1,71	2,12	4,54	4,01	0,028	0,065	0,080	2,16	1,243	1,30	3,62	4,98
Lu	0,463	0,344	0,411	0,739	0,604	0,012	0,017	0,013	0,326	0,308	0,207	0,448	0,661
Ti	237	208	217	109	112	57,1	64,4	53,4	332	381	355	266	214
V	123	123	128	100	110	70,4	67,9	77,8	43,5	32,7	72,5	192	210
Cr	202	149	213	670	604	296	305	309	61,7	50,1	61,2	190	170
Y	43,9	29,1	36,3	14,5	17,5	0,682	0,717	0,651	31,8	27,2	25,1	26,5	34,8
Zr	16,7	11,4	16,1	8,41	8,25	2,24	2,56	2,03	5,66	8,29	5,84	9,04	2,15
Ba	0,226	0,146	0,464	0,191	0,187	0,237	0,231	0,195	0,666	0,372	0,332	0,575	0,403
Hf	2,29	2,10	2,32	0,430	0,571	0,099	0,083	0,102	1,76	2,22	1,40	1,01	1,22

Минерал	Гранаты			Амфиболы			Клинопироксены		Эпидот		Цоизит	Мусковит
	2225			2226	2204	2208	2226	2225	2225	2234	2208	2234
	30r	31c	32r	6	7	14	1	28	29	18	15	19
La	0,051	0,015	0,052	8,70	2,05	0,867	1,63	0,032	1219	1795	38,2	4,62
Ce	0,088	0,060	0,080	24,7	5,44	0,861	4,62	0,180	2422	3750	43,0	0,10
Pr	0,020	0,009	0,015	3,72	0,766	0,075	0,644	0,023	305	472	4,06	0,008
Nd	0,211	0,093	0,152	23,8	4,52	0,392	3,53	0,148	1374	2311	16,3	0,097
Sm	0,597	0,251	0,343	8,06	0,718	0,056	1,36	0,088	238	439	2,42	0,210
Eu	0,317	0,172	0,285	1,49	0,327	0,023	0,196	0,038	26,9	208	2,24	bdl
Gd	5,33	3,24	4,57	7,51	1,39	0,081	0,748	0,377	138	261	0,862	bdl
Tb	1,46	1,44	2,36	0,755	0,081	0,016	0,075	0,093	7,97	8,19	0,078	0,008
Dy	7,58	12,5	21,3	3,23	0,657	0,038	0,454	0,433	62,7	55,0	0,436	0,814
Er	4,99	11,0	14,7	0,673	0,288	0,066	0,113	0,123	13,0	13,8	0,086	0,233
Yb	5,33	9,36	11,1	0,338	0,077	0,022	0,096	0,188	7,45	2,08	0,121	0,086
Lu	0,854	1,23	1,45	0,153	0,035	bdl	0,022	0,009	2,57	2,59	0,008	0,030
Ti	198	246	246	2769	2251	667	369	1342	1148	828	84,8	8762
V	122	126	109	329	163	97,8	56,4	549	522	167	15,7	573
Cr	404	288	261	668	833	554	275	546	687	59,7	256	54,0
Y	53,4	89,3	147	8,47	2,34	0,347	1,22	1,70	165	66,5	2,21	0,882
Zr	3,54	2,60	3,81	19,6	12,8	1,67	1,81	10,8	18,2	17,8	1,16	2,00
Ba	1,62	1,26	1,41	120	96,1	76,3	0,107	0,862	18,1	44,9	17,3	6276
Hf	2,38	4,56	7,56	2,18	0,618	0,119	0,281	0,759	13,6	6,89	0,121	1,34

Примечания: с – центральная часть зерна; m – промежуточная; r – краевая; bdl – ниже порога обнаружения.

Амфиболы из обр. 2226, 2204, 2208 существенно различаются по характеру распределения REE (рис.7, б). Для обр. 2208 суммарное содержание REE составляет в среднем 1,37 ppm, обр. 2226 – 83,4 ppm, обр. 2204 – 15,5 ppm. Аналогично изменяется содержание Ti – 697, 2769 и 2258 ppm соответственно. Аномально низкое содержание REE в амфиболе указывает на возможный метасоматический генезис этого минерала [43]. Спектры распределения REE в амфиболах из обр. 2226 и 2204 между собой конформны, отличаясь только общим уровнем содержания REE. Для них характерен выпуклый характер спектра в области легких и средних REE. Два спектра для амфибола из обр. 2208 отличаются крайне низким уровнем содержания легких REE, примерно совпадая в области средних и тяжелых REE (рис.7, б).

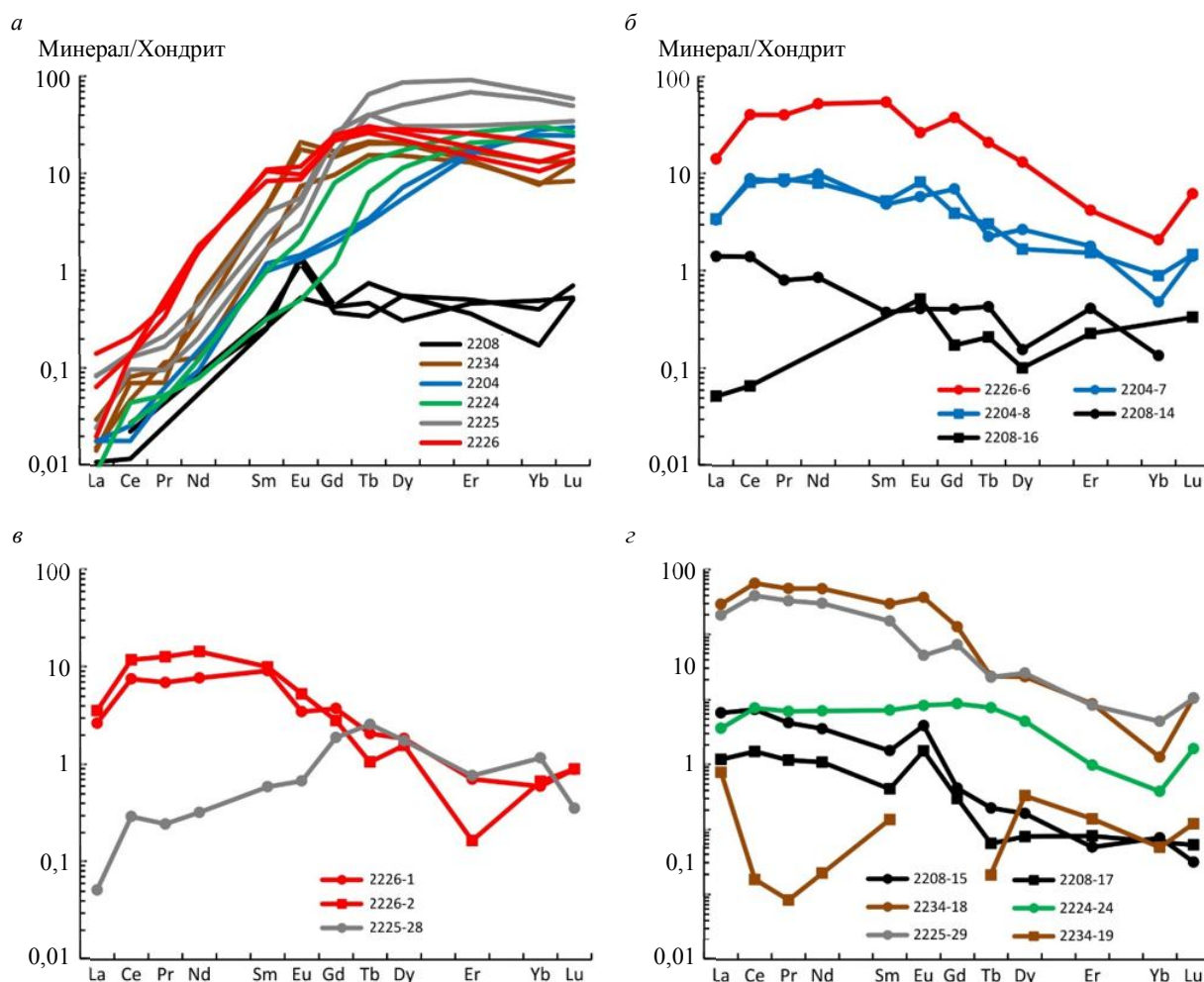


Рис. 7. Спектры распределения REE в породообразующих минералах гранатитов: гранаты (а); амфиболы (б); пироксены (в); минералы группы эпидота (г)

Спектры распределения REE в пироксенах из обр. 2226 повторяют конфигурацию спектра амфиболов из этого же образца (рис. 7, в). Спектр REE для пироксенов из обр. 2225 отличается пониженным содержанием легких REE и более дифференцированным характером их распределения в области LREE. В области тяжелых REE спектры для всех трех проанализированных пироксенов подобны друг другу.

Суммарное содержание REE в эпидоте из обр. 2225 и 2234 составляет 5819 и 9318 ppm соответственно. Спектры распределения в них сильно дифференцированы (рис. 7, г). Эпидот из обр. 2224 имеет более умеренное содержание REE (154 ppm) и отличается горизонтальным характером спектра в области легких и средних REE. Цоизит из обр. 2208 характеризуется низким уровнем содержания REE (108 и 25,6 ppm), спектры распределения REE для него подобны эпидоту из обр. 2225 и 2234. Отличие заключается в четко проявленной для обр. 2208 положительной Eu-аномалии ($Eu/Eu^* \sim 4,65$). Содержание Sr и Ba из эпидота и цоизита из разных образцов сопоставимы (Sr ~3930 ppm в эпидоте и 4911 ppm в цоизите; Ba ~24,5 ppm в эпидоте и 18,2 ppm в цоизите).

Мусковит был проанализирован только в обр. 2234. Содержание REE в нем низкое, на уровне состава хондрита, за исключением La (более 10 хондритовых отношений, рис. 7, г).

Выводы. Из петрографических особенностей изученных пород следует, что первичная магматическая ассоциация была подвержена двум этапам метаморфизма. Первый – аутометаморфизм с образованием серпентина, хлорита и граната в ультрабазитах. Второй сопряжен с образованием гранатитов и эклогитов, к нему относится появление цоизита и мусковита.

На основании полевых и петрографических наблюдений было установлено, что условия преобразований пород по температуре, вероятно, не превышают 550–600 °C (наличие эпидота в гранитах и хлорита в ультрабазитах и базитах). При данной температуре кислые (вмещающие) породы



мигматизируются, часть выплавки может мигрировать [22, 44]. При этом основные и ультраосновные породы остаются практически жесткими, деформации в них носят преимущественно хрупкий характер, что подтверждается полевыми наблюдениями над жильными гранатитами в ультрабазитах. Вмещающие породы характеризуются незначительной степенью мигматизации и переработки. Особенности проявления процессов гранатизации в породах с возникновением сливных, вплоть до мономинеральных, агрегатов, без образования хорошо ограненных кристаллов, свидетельствуют о том, что он протекал субсинхронно с появлением эклогитов, был достаточно скоротечным и носил нуклеарный характер. Формирование гранатитовых агрегатов в межзерновом пространстве указывает на активное участие флюида в их образовании.

Сложно представить ситуацию, чтобы на столь ограниченной площади, как Слюдяная Горка, были тектонически совмещены различные по генезису породы с близкими минеральными ассоциациями (эклогиты и гранатиты). Наличие на локальной территории блоков ультрабазитов, базитов и субвулканических пород с развитием гранатитов и эклогитов по ним позволяет предположить одновременное образование гранатитов по протолитам всех типов.

Вероятная модель образования ассоциации эклогит – гранатит может быть представлена следующей последовательностью.

Проникновение флюида, обогащенного Na, Al, вероятно водой, по трещинам в протолите приводит к образованию диффузионным путем метасоматической колонки, включающей зоны, обогащенные гранатом и Na-пироксеном (вплоть до омфацита). Данная последовательность согласуется с авторскими масс-балансовыми оценками, указавшими на подвижность Na и Ti. Ранее было показано, что Ti и Zr могут мигрировать в метасоматическом флюиде совместно с U, Th, Y и REE [45]. Увеличение La и Ce в гранатитах относительно протолита до трех раз не представляется возможным объяснить с позиций изохимического метаморфизма. Однако эти элементы изоморфно входят в минералы группы эпидота, которыми часто насыщены вмещающие гранитоиды. Соответственно, даже при незначительной мигматизации эти элементы будут переходить во флюид. Характер образующегося в породах флюида существенно щелочной, что способствует успешной миграции перечисленных элементов.

Приведенные особенности не позволяют говорить о полноценной применимости модели мантийного генезиса эклогитов и гранатитов района Марун-Кеу, как утверждалось рядом авторов [46]. Например, наличие эклогитизированных блоков анортозитов, которые распространены либо в разрезах океанической коры, либо в условиях нижней части континентальной коры [47], или эклогитизированные и гранатизированные основные порфириды, по своим текстурным и структурным особенностям однозначно свидетельствующие о незначительных глубинах образования. Поэтому одна из вероятных моделей образования эклогитов и гранатитов района Марун-Кеу – это эклогитизация океанической коры с дальнейшим ее выведением на верхние уровни. Такая возможность была показана ранее [17]. Классический разрез океанической коры (ультрабазиты с хромитом, кумулятивные породы и субвулканические тела) и наблюдаемые особенности пород района Слюдяной Горки этому не противоречат. Вариант образования данных пород в условиях нижней континентальной коры менее вероятен, поскольку гранулитовых ассоциаций не было установлено.

Наблюдаемые на исследованном участке Слюдяная Горка гранатиты образовались из основных и ультраосновных пород океанической коры, вероятно, в процессе их выведения на более верхние уровни разреза при воздействии корового флюида, проникающего по зонам трещиноватости.

Авторы благодарят С.Г.Симакина, Е.В.Потапова (ЯФ ФТИАН им. К.А.Валиева РАН), О.Л.Галанкину (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН) за помощь в аналитических исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Готтман И.А., Пушкирев Е.В., Хиллер В.В. Урансодержащий шриланкит из высокobarических гранатитов на Южном Урале – первые данные // Доклады Академии наук. 2018. Т. 479. № 6. С. 677-681. DOI: 10.7868/S0869565218120150
2. Селятицкий А.Ю., Ревердатто В.В. Термобарические условия эксгумации Ti-клиногумитовых гранатитов Кокчетавской субдукционно-коллизийной зоны (Северный Казахстан) // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 8. С. 1051-1074. DOI: 10.15372/GiG2021147



3. Yung-Hsin Liu, Huai-Jen Yang, Yen-Hong Shau et al. Compositions of high Fe-Ti eclogites from the Sulu UHP metamorphic terrane, China: HFSE decoupling and protolith characteristics // *Chemical Geology*. 2007. Vol. 239. Iss. 1-2. P. 64-82. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2006.12.005](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.12.005)
4. Irifune T., Sekine T., Ringwood A.E., Hibberson W.O. The eclogite-garnetite transformation at high pressure and some geophysical implications // *Earth and Planetary Science Letters*. 1986. Vol. 77. Iss. 2. P. 245-256. DOI: [10.1016/0012-821X\(86\)90165-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90165-2)
5. Nishi M., Kubo T., Kato T. Metastable transformations of eclogite to garnetite in subducting oceanic crust // *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2009. Vol. 104. Iss. 3. P. 192-198. DOI: [10.2465/jmps.080929](https://doi.org/10.2465/jmps.080929)
6. Sekine T., Irifune T., Ringwood A.E., Hibberson W.O. High-pressure transformation of eclogite to garnetite in subducted oceanic crust // *Nature*. 1986. Vol. 319. Iss. 6054. P. 584-586. DOI: [10.1038/319584a0](https://doi.org/10.1038/319584a0)
7. Bakker R.J., Pushkarev E., Biryuzova A.P. High Temperature Reduced Granulite-Facies Nature of Garnetites in the Khabarny Mafic-Ultramafic Massif, Southern Urals: Evidence from Fluid and Mineral Analyses // *Journal of Petrology*. 2020. Vol. 61. Iss. 6. P. 1-25. DOI: [10.1093/petrology/egaa066](https://doi.org/10.1093/petrology/egaa066)
8. Shujuan Jiao, Jinghui Guo, Harley S.L., Windley B.F. New Constraints from Garnetite on the P-T Path of the Khondalite Belt: Implications for the Tectonic Evolution of the North China Craton // *Journal of Petrology*. 2013. Vol. 54. Iss. 9. P. 1725-1758. DOI: [10.1093/petrology/egt029](https://doi.org/10.1093/petrology/egt029)
9. Schwandt C.S., Papike J.J., Shearer C.K., Brearley A.J. A Sim investigation of REE chemistry of garnet in garnetite associated with the Broken Hill Pb-Zn-Ag orebodies, Australia // *The Canadian Mineralogist*. 1993. Vol. 31. № 2. P. 371-379. DOI: [10.3749/1499-1276-31.2.371](https://doi.org/10.3749/1499-1276-31.2.371)
10. Spry P.G., Heimann A., Messerly J.D., Houk R.S. Discrimination of Metamorphic and Metasomatic Processes at the Broken Hill Pb-Zn-Ag Deposit, Australia: Rare Earth Element Signatures of Garnet-Rich Rocks // *Economic Geology*. 2007. Vol. 102. Iss. 3. P. 471-494. DOI: [10.2113/gsecongeo.102.3.471](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.3.471)
11. Ранний докембрий Балтийского щита / Под ред. В.А.Глебовицкого. СПб: Наука, 2005. 711 с.
12. Vrijmoed J.C., Austrheim H., John T., Podladchikov Y.Y. Metasomatism of the UHP Svartberget olivine-websterite body in the Western Gneiss Complex, Norway // *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*. 2008. Vol. 72. № 12. P. A989.
13. Kropáč K., Buriánek D., Zimák J. Origin and metamorphic evolution of Fe-Mn-rich garnetites (coteculites) in the Desná Unit (Silesicum, NE Bohemian Massif) // *Geochemistry*. 2012. Vol. 72. Iss. 3. P. 219-236. DOI: [10.1016/j.chemer.2011.11.002](https://doi.org/10.1016/j.chemer.2011.11.002)
14. Cruz-Urbe A.M., Page F.Z., Lozier E. et al. Trace element and isotopic zoning of garnetite veins in amphibolitized eclogite, Franciscan Complex, California, USA // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. Vol. 176. Iss. 5. № 41. DOI: [10.1007/s00410-021-01795-4](https://doi.org/10.1007/s00410-021-01795-4)
15. van Schrojenstein Lantman H.W., Scambelluri M., Gilio M. et al. Extensive fluid-rock interaction and pressure solution in a UHP fluid pathway recorded by garnetite, Lago di Cignana, Western Alps // *Journal of Metamorphic Geology*. 2021. Vol. 39. Iss. 4. P. 501-518. DOI: [10.1111/jmg.12585](https://doi.org/10.1111/jmg.12585)
16. Мельник А.Е., Березин А.В., Скублов С.Г. Возраст (U-Pb, Sm-Nd) и геохимические особенности гранатитов в салминских эклогитах, Беломорский подвижный пояс // *Записки Российского минералогического общества*. 2014. № 6. С. 17-33.
17. Лю И., Перчук А.Л., Аришкин А.А. Высокобарный метаморфизм в перидотитовом кумулате комплекса Марун-Кей, Полярный Урал // *Петрология*. 2019. Т. 27. № 2. С. 138-160. DOI: [10.31857/S0869-5903272138-160](https://doi.org/10.31857/S0869-5903272138-160)
18. Селятицкий А.Ю., Куликова К.В. Первые данные о проявлении УНР-метаморфизма на Полярном Урале // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 476. № 6. С. 681-684. DOI: [10.7868/S086956521730017X](https://doi.org/10.7868/S086956521730017X)
19. Fancong Meng, Yazhou Fan, Shmelev V.R., Kulikova K.V. Constraints of eclogites from the Marun-Keu metamorphic complex on the tectonic history of the Polar Urals (Russia) // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 187. № 104087. DOI: [10.1016/j.jseaes.2019.104087](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104087)
20. Селятицкий А.Ю., Куликова К.В. Состав граната как отражение корового генезиса протолитов УНР-перидотитов комплекса Марун-Кей (Полярный Урал) // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2018. № 2. С. 38-47. DOI: [10.19110/2221-1381-2018-2-38-47](https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-2-38-47)
21. Селятицкий А.Ю., Куликова К.В. Эволюция химического состава граната при метаморфизме перидотитов УНР-комплекса Марун-Кей (Полярный Урал) // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2017. № 8. С. 36-43. DOI: [10.19110/2221-1381-2017-8-36-43](https://doi.org/10.19110/2221-1381-2017-8-36-43)
22. Удовкина Н.Г. Эклогиты Полярного Урала (на примере южной части хр. Марун-Кей). М.: Наука, 1971. 191 с.
23. Абдрахманов И.А., Гульбин Ю.Л., Гембицкая И.М. Ассоциация Fe-Mg-Al-Ti-Zn оксидов в гранулитах оазиса Бангера, Восточная Антарктида: свидетельства метаморфизма сверхвысоких температур // *Записки Российского минералогического общества*. 2021. Т. 150. № 4. С. 38-76. DOI: [10.31857/S086960552104002X](https://doi.org/10.31857/S086960552104002X)
24. Акимов Е.Ю., Скублов С.Г. Распределение редкоземельных элементов в породообразующих минералах корундсо-державших пород проявления Хитоостров (Северная Карелия) // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2021. Т. 66. № 4. С. 686-705. DOI: [10.21638/spbu07.2021.403](https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.403)
25. Anczkiewicz R., Szczepański J., Mazur S. et al. Lu-Hf geochronology and trace element distribution in garnet: Implications for uplift and exhumation of ultra-high pressure granulites in the Sudetes, SW Poland // *Lithos*. 2007. Vol. 95. Iss. 3-4. P. 363-380. DOI: [10.1016/j.lithos.2006.09.001](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.09.001)
26. Melnik A.E., Skublov S.G., Rubatto D. et al. Garnet and zircon geochronology of the Paleoproterozoic Kuru-Vaara eclogites, northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield // *Precambrian Research*. 2021. Vol. 353. № 106014. DOI: [10.1016/j.precamres.2020.106014](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.106014)
27. Левашиова Е.В., Попов В.А., Левашиов Д.С., Румянцев Н.А. Распределение редких элементов по секторам и зонам роста в цирконе из миекситового пегматита Вишневогорского массива, Южный Урал // *Записки Горного института*. 2022. Т. 254. С. 136-148. DOI: [10.31897/PMI.2022.29](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.29)
28. Румянцев Н.А., Скублов С.Г., Ваништейн Б.Г. и др. Циркон из габброидов хребта Шака (Южная Атлантика): U-Pb возраст, соотношение изотопов кислорода и редкоземельный состав // *Записки Российского минералогического общества*. 2022. Т. 151. № 1. С. 49-73. DOI: [10.31857/S0869605522010099](https://doi.org/10.31857/S0869605522010099)



29. Skublov S.G., Rumyantseva N.A., Vanshtein B.G. et al. Zircon xenocrysts from the Shaka Ridge record ancient continental crust: New U-Pb geochronological and oxygen isotopic data // *Journal of Earth Science*. 2022. Vol. 33. Iss. 1. P. 5-16. DOI: [10.1007/s12583-021-1422-2](https://doi.org/10.1007/s12583-021-1422-2)
30. Xiao-Xiao Ling, Qiu-Li Li, Huyskens M.H. et al. Matrix effects and improved calibration procedures for SIMS titanite U-Pb dating // *Chemical Geology*. 2022. Vol. 593. № 120755. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2022.120755](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120755)
31. Гаврильчик А.К., Скублов С.Г., Котова Е.Л. Редкоэлементный состав берилла из месторождения Шерловая Гора, Юго-Восточное Забайкалье // *Записки Российского минералогического общества*. 2021. Т. 150. № 2. С. 69-82. DOI: [10.31857/S0869605521020052](https://doi.org/10.31857/S0869605521020052)
32. Abdel Gawad A.E., 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)
33. Скублов С.Г., Гаврильчик А.К., Березин А.В. Геохимия разновидностей берилла: сравнительный анализ и визуализация аналитических данных методами главных компонент (PCA) и стохастического вложения соседей с t-распределением (t-SNE) // *Записки Горного института*. 2022. Т. 255. С. 455-469. DOI: [10.31897/PMI.2022.40](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.40)
34. Суханова К.Г., Кузнецов А.Б., Скублов С.Г. Геохимические особенности хондр метеорита Орловка (H5) как свидетельство плавления минералов-прекурсоров // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 504. № 1. С. 28-33. DOI: [10.31857/S2686739722050164](https://doi.org/10.31857/S2686739722050164)
35. Суханова К.Г., Кузнецов А.Б., Скублов С.Г., Галанкина О.Л. Оценка температур термального метаморфизма равновесных обыкновенных хондритов // *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13. № 2s. DOI: [10.5800/GT-2022-13-2s-0618](https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0618)
36. Yavuz F., Yildirim D.K. A Windows program for calculation and classification of epidote-supergroup minerals // *Periodico di Mineralogia*. 2018. Vol. 87. № 3. P. 269-285. DOI: [10.2451/2018PM808](https://doi.org/10.2451/2018PM808)
37. Locock A.J. An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations // *Computers & Geosciences*. 2014. Vol. 62. P. 1-11. DOI: [10.1016/j.cageo.2013.09.011](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.09.011)
38. 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)
39. 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)
40. Barth T.F.W. Oxygen in Rocks: A Basis for Petrographic Calculations // *The Journal of Geology*. 1948. Vol. 56. Iss. 1. P. 50-60. DOI: [10.1086/625477](https://doi.org/10.1086/625477)
41. Langmuir C.H., Vocke Jr.R.D., Hanson G.N., Hart S.R. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts // *Earth and Planetary Science Letters*. 1978. Vol. 37. Iss. 3. P. 380-392. DOI: [10.1016/0012-821X\(78\)90053-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90053-5)
42. Скублов С.Г. Геохимия редкоземельных элементов в породообразующих метаморфических минералах. СПб: Наука, 2005. 147 с.
43. Skublov S., Drugova G. Patterns of trace-element distribution in calcic amphiboles as a function of metamorphic grade // *The Canadian Mineralogist*. 2003. Vol. 41. Iss. 2. P. 383-392. DOI: [10.2113/gscanmin.41.2.383](https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.2.383)
44. Collins W.J., Murphy J.B., Johnson T.E., Hui-Qing Huang. Critical role of water in the formation of continental crust // *Nature Geoscience*. 2020. Vol. 13. Iss. 5. P. 331-338. DOI: [10.1038/s41561-020-0573-6](https://doi.org/10.1038/s41561-020-0573-6)
45. Gieré R. Hydrothermal mobility of Ti, Zr and REE: examples from the Bergell and Adamello contact aureoles (Italy) // *Terra Nova*. 1990. Vol. 2. Iss. 1. P. 60-67. DOI: [10.1111/j.1365-3121.1990.tb00037.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1990.tb00037.x)
46. Шацкий В.С., Симонов В.А., Ягоуц Э. и др. Новые данные о возрасте эколлитов Полярного Урала // *Доклады Академии наук*. 2000. Т. 371. № 4. С. 519-523.
47. Kennett J.P. *Marine Geology*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1982. 813 p.

Авторы: Л.И.Салимгареева, канд. геол.-минерал. наук, младший научный сотрудник, fluoritecaf2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3285-847X> (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия; Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия), А.В.Березин, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-5324-5840> (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия; Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Влияние вторичного минералообразования на показания Na-K-геотермометра на примере гидротермальной системы Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка)

А.В.СЕРГЕЕВА¹✉, А.В.КИРЮХИН^{1,2}, О.О.УСАЧЕВА¹, **Т.В.РЫЧКОВА¹**, Е.В.КАРТАШЕВА¹, М.А.НАЗАРОВА¹,
А.А.КУЗЬМИНА¹

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

² Кроноцкий государственный биосферный заповедник, Елизово, Россия

Как цитировать эту статью: Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Усачева О.О., Рычкова Т.В., Карташева Е.В., Назарова М.А., Кузьмина А.А. Влияние вторичного минералообразования на показания Na-K-геотермометра на примере гидротермальной системы Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 526-540. EDN BMBZHP

Аннотация. Температура в продуктивном геотермальном резервуаре Долины гейзеров (Камчатка), рассчитанная по полевошпатовому Na-K-геотермометру, устойчиво повышается в течение последних 10 лет в среднем с 165 до 235 °С, что приближается к показателям гидротермального взрыва пароводяной смеси. Для анализа химических геотермометров использовано TOUGHREACT-моделирование, с помощью которого на одноэлементной модели воспроизведены ранее известный Na-K полевошпатовый геотермометр и получены новые формулы для трех Na-K-геотермометров: цеолитового, смектитового и на основе вулканического стекла. Химическая история 1968-2018 гг. по хлор-иону, который рассматривается в качестве инертного трассера геофильтрационных процессов, показывает, что после 2007 г. в гейзерный резервуар поступает значительное количество инфильтрационных вод (их массовая доля оценивается от 5 до 15 %). Предполагается, что повышенные показания Na-K полевошпатового геотермометра в последние годы не отражают возрастание температуры в гейзерном резервуаре, а являются эффектом разбавления смектитовыми водами.

Ключевые слова: TOUGHREACT-моделирование; Долина гейзеров; геотермометры; цеолиты; монтмориллонит; геотермальный резервуар; вулканическое стекло

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научного и технологического исследовательского совета Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21-55-50003 ЯФ_а «Магматический фрекинг и флюидные потоки в вулканических структурах» и НИР ИВиС ДВО РАН по теме № FWEW-2019-0002 «Тепломассоперенос и сейсмичность в гидротермальных, магматических и геофлюидных системах, термогидродинамическое-геохимическое-геомеханическое моделирование (TOUGH2, TOUGHREACT, C-FRAC), приложения для оценки геотермальных ресурсов и прогноза землетрясений».

Поступила: 13.04.2022

Принята: 13.02.2023

Онлайн: 22.06.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Термогидродинамическое состояние геофлюидных резервуаров определяется температурой, давлением и насыщением газовой фазы. Эти параметры являются основными, из них могут быть рассчитаны все остальные параметры теплоносителя – энтальпия, вязкость, плотность жидкой и газовой фаз и др. При поиске, разведке и анализе условий эксплуатации геотермальных месторождений широко применяются геохимические термометры, которые позволяют оценить температуру продуктивного геотермального резервуара по химическому составу теплоносителя без проведения буровых работ и прямых измерений температуры в скважинах. Например, оценка температуры формирования Пятигорского месторождения минеральных вод показала два температурных диапазона их образования – для вод с содовым составом и с преобладанием сульфата натрия [1]. С использованием Na-Li- и Mg-Li-геотермометров, которые разработаны для оценки температур пластовых вод осадочных бассейнов, в том числе нефтяных, в диапазоне до 300-340 °С,



проведена оценка температуры генерации флюидов грязевых вулканов Азербайджана [2]. Исследование условий формирования Ульского термального источника, расположенного на Охотоморском побережье (Хабаровский край), выполненное с использованием геотермометрии, позволило оценить глубину (около 1-2 км) и температуру (не более 80 °С) циркуляции вод [3]. В Киргизии в результате применения Na-K-геотермометров в исследовании более двух десятков термальных и холодных минеральных вод, локализованных в северном и юго-западном Тянь-Шане, определено, что они формируются под влиянием местных температурных градиентов, без эндогенного источника тепла [4]. С помощью геотермометрии исследованы термальные источники Таджикистана в Памире и предгорьях Тянь-Шаня и показано, что воды формировались при температуре до 240 °С [5, 6]. Окинская гидротермальная система, расположенная в Восточном Саяне, которую связывают с проявлением базальтового вулканизма, исследована с применением ряда геотермометров [7]. Проблема корректности оценки температуры по геотермометрам в связи со смещением затронута при исследовании азотных термальных вод провинции Цзянси (Китай) и показано, что Na-K-геотермометр менее чувствителен к влиянию грунтовых и метеорных вод, чем SiO₂-геотермометр [8]. С помощью геотермометрии было проведено исследование условий формирования Таватумских азотных термальных вод, локализованных на Охотоморском побережье Магаданской области [9]. В целом геотермометрия используется совместно с изотопией для определения условий формирования вод различного генезиса, при этом существует проблема корректности применения геотермометров, на которую исследователи обращают внимание.

Метод химических геотермометров основан на использовании зависимости констант химических равновесий между флюидом и вмещающими горными породами [10]. Для геотермальных резервуаров с температурой выше 150 °С наиболее широко применяется натрий-калиевый геотермометр $t(\text{Na-K}) = \frac{855,6}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] + 0,8573} - 273,15$ [11], действие которого основано

на полевошпатовых равновесиях, и достаточно хорошо апробированный на разбуренных геотермальных месторождениях. Также применяется геотермометр вида $t(\text{Na-K}) = \frac{1217}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] + 1,438} - 273,15$ [12].

Проверка условия $T > 150$ °С, если бурение скважин для прямого измерения температуры заведомо невозможно, является нетривиальной и актуальной задачей в Долине гейзеров Кроноцкого государственного биосферного заповедника, где буровые работы запрещены действующим законодательством. Решение этой задачи имеет важное значение для обеспечения безопасности туристской инфраструктуры в Долине гейзеров, которую ежегодно посещает около 6000 человек с тенденцией к увеличению посещаемости. Температура, рассчитанная по полевошпатовому Na-K-геотермометру, устойчиво повышается в течение последних 10 лет в среднем с 165 до 235 °С [13]. Повышение температуры в двухфазном геотермальном резервуаре означает одновременное повышение давления с 7 до ~31 бар, что может привести к разрушению верхнего относительного водоупора мощностью до 10-20 м и гидротермальному взрыву в эпицентре гейзерного резервуара по аналогии с катастрофическим обвалом 2007 г. и селевым потоком 2014 г., явившимися следствием гидротермальной активности [14, 15].

При геохимической оценке температуры геотермальных резервуаров используются два подхода. Согласно первому, температура определяется по соотношению элементов в растворе. Часто используется соотношение концентраций натрия и калия, содержание кремнезема в растворе, соотношение Na-K-Si и ряд других функций, связывающих концентрации элементов и температуру, причем предпочтение отдается наиболее простым в использовании математическим выражениям. Популярным является Na-K-геотермометр, выведенный для равновесий вод с полевыми шпатами, который удобен тем, что позволяет избавиться от эффектов разбавления, а из-за большой распространенности полевых шпатов может применяться в широком спектре гидрогеологических условий.



Ограничения, накладываемые на геотермометры, связаны с достижением равновесия воды и породообразующих минералов. Например, классические выражения для Na-K-геотермометров определены для равновесия полевых шпатов и термальных вод [10], а при изменении минерального состава вмещающих пород, как это происходит в геотермальных резервуарах, оценка температуры может стать некорректной. Второй подход в оценке температуры основан на подборе минерального состава, равновесного с химическим составом воды. Этот подход с минимизацией индексов насыщения осуществлен с использованием, например, программы iGeoT [16].

В 1969-2003 гг. Na-K-геотермометр в Долине гейзеров показывал медленное снижение температуры резервуара со скоростью 0,3-0,9 °C/год при диапазоне 165-185 °C. После гигантского оползня 3 июня 2007 г. медленный убывающий тренд сменился быстрым возрастанием температуры со скоростью 4,2-5 °C/год, а диапазон температур сместился в сторону более высоких значений – 180-230 °C (рис.1). Подъем температуры в гейзерном резервуаре может иметь две независимые причины. Первая возможная причина связана с магматической активностью вулкана Кихпинич. В пользу этой гипотезы свидетельствует активизация вулкана, подробно рассмотренная в работе [17]. Активность Кихпинича представляется маловероятной причиной повышения геохимической температуры, так как вулканические газы должны были вызвать понижение pH и повышение содержания хлора в водах, чего не наблюдалось. Вторая возможная причина связана с некорректным применением полевошпатового Na-K геохимического термометра в условиях наличия иных минеральных фаз, способных к ионному обмену с участием катионов, в том числе с натрием и калием.

В ходе переработки вмещающих пород и в результате активных минералообразующих процессов формируется целый спектр вторичных минералов, среди которых интерес представляют способные к ионному обмену с участием натрия и калия. В зависимости от условий (pH, состава раствора) в местах высокотемпературных разгрузок формируются цеолитовые минералы, такие как морденит, стильбит, гейландит и клиноптилолит [18, 19], либо слоистые силикаты группы смектита, чаще всего монтмориллонита [20, 21], и ряд других отложений [22, 23]. Цеолиты тяготеют к щелочным средам, а монтмориллонит формируется в слабокислых и близонейтральных условиях [24]. Наряду с монтмориллонитом на термальных полях формируется и каолинит, но из-за его слабой способности к собственно ионному обмену в данной работе он не рассматривается. Кроме того, для каолинита благоприятны кислые и слабокислые среды, практически не отвечающие условиям разгрузок гейзеров [19, 20].

Цеолиты относятся к каркасным силикатам, в структуре которых имеются каналы и полости, достаточные для ионного обмена с катионами натрия и калия, присутствующими в растворе. У слоистых силикатов катионы, расположенные в межслоевом пространстве, так же легко обмениваются на катионы контактирующего раствора. При этом в природе и цеолиты, и смектитовые

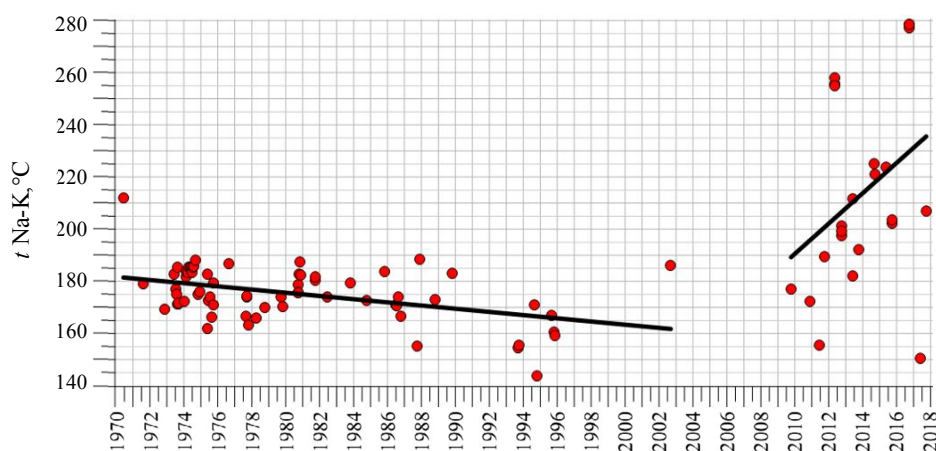


Рис. 1. Изменение расчетной температуры по полевошпатовому Na-K-геотермометру [11, 25] в Долине гейзеров за 1969-2016 гг. для гейзера Великан [14]



минералы обычно мелкодисперсны, легко диспергируются и образуют взвесь. Поэтому равновесие с растворами по катионам натрия и калия для цеолитовых и монтмориллонитовых минералов достигается сравнительно быстро.

Высокая скорость ионного обмена в клиноптилолите отмечается в ряде работ [26, 27], рассматриваются кинетические параметры и факторы, определяющие механизм и скорость ионообменных процессов [28, 29]. Природные цеолиты представляются оптимальным материалом для практического применения, например, в производстве катализаторов ряда промышленных процессов и сорбентов [30]. Так, модифицирование цеолитизированных туфов, содержащих морденит и клиноптилолит, позволило получить катализаторы для трансформации легких нефтяных фракций [31].

Очистка сточных вод от радионуклидов и других загрязнителей на предприятиях горно-добывающей, горно-перерабатывающей и атомной промышленности возможна с использованием цеолитовых сорбентов [32, 33]. На накопление в почвах тяжелых металлов оказывают влияние ионообменные процессы [34, 35], они же учитываются при захоронении радиоактивных отходов [36, 37].

Обменные характеристики монтмориллонита связаны с его способностью набухать, что принимают во внимание при разработке и освоении нефтяных коллекторов [38]. Актуальность всестороннего исследования подтверждается работами по аналитическому контролю содержания нефтепродуктов [39-41]. Монтмориллонит – перспективный катионообменник с быстрой кинетикой [42, 43] – представляет собой слоистый силикат, ионообменные свойства которого обусловлены гетеровалентными замещениями в металлокислородных сетках [44, 45] и пространственной организацией глинистых частиц [46]. Монтмориллонит активно образуется на термальных полях современных гидротермальных систем [20], где в сложно меняющихся динамических условиях принимает участие в обменных взаимодействиях с контактирующими растворами [10, 47]. С высокодисперсными цеолитами и монтмориллонитом равновесие по катионам достигается за период от нескольких десятков минут до суток, а для полевых шпатов это время составляет от сотен до десятков тысяч лет и более [10]. Поэтому можно предположить, что воды, контактирующие с толщей селевых отложений, вторичных минералов в гейзерном резервуаре или зонах инфильтрации поверхностных вод, сравнительно быстро принимают соотношения натрия и калия, которые характерны для монтмориллонита или цеолитов [10, 18, 48].

Вулканическое стекло, присутствующее в составе вмещающих пород гейзерного резервуара, характеризуется широкими вариациями состава. Оно сравнительно легко растворяется, особенно в щелочных средах, метастабильно относительно перехода в кристаллические фазы, поэтому может оказывать значительное влияние на состав контактирующих с ним вод [18].

Катастрофические процессы в Долине гейзеров 2007 и 2014 гг. привели к частичному разрушению верхнего водоупора, созданию инфильтрационных окон и подтоплению каналов гейзеров, что вызвало значительный приток инфильтрационных поверхностных вод в продуктивный гейзерный резервуар [49], что также необходимо учитывать при выборе расчетных геотермометров.

Гидрогеологическая стратификация и минералогический состав продуктивного гейзерного резервуара. Район исследования характеризуется аккумулятивным вулканическим типом рельефа, формирование которого связано в основном с накоплением вулканогенных отложений. Наиболее древние нижне-среднеплейстоценовые эффузивно-пирокластические толщи вскрыты в основном в бортах депрессий и кальдер, а молодые верхнеплейстоценовые и голоценовые слагают обширные плато, а также стратовулканы, шлаковые конусы, экструзивные купола. Район р. Гейзерная сложен вулканогенно-осадочной толщей, представляющей собой сложное чередование прослоев туфобрекчий, агломератовых, псаммитовых и алевропелитовых туфов. Широким распространением пользуются уплотненные обломочные пемзы. Вулканогенно-осадочная толща во многих местах прорвана разновозрастными экструзиями андезитов и андезито-дацитов, с которыми связаны короткие лавовые потоки [50, 51].

Четвертичные толщи относительно рыхлой пирокластики и продукты их размыва, заполняющие депрессии, имеют мощность 1 км и более и обладают довольно хорошими коллекторскими свойствами, что создает предпосылки для формирования в этих отложениях пластовых скоплений



термальных вод [52]. Основная масса гидротерм выходит из коренных обнажений слаболифтированных пемзовых псефитовых и агломератовых туфов дацитов гейзерной и устьевой пачек. Слабая проницаемость псефитовых туфов гейзерной и устьевой пачек, препятствующая интенсивному внедрению холодных поверхностных вод, является одним из важных геолого-структурных факторов формирования и деятельности высокотемпературной гидротермальной системы Долины гейзеров. Верхняя часть разреза гейзерной и устьевой пачек сложена в том числе тонкообломочными разновидностями туфов, коэффициенты поровой проницаемости которых, как правило, на два порядка ниже, чем у псефитовых туфов. Они служат верхним водоупором и способствуют лучшей гидроизоляции водовмещающих горизонтов [50].

Продуктивный гейзерный резервуар сформирован в результате последовательной серии трюбок гидротермальных взрывов с последующим химическим растворением/суффозией центральных гейзерных каналов и samozапечатыванием вторичными гидротермальными минералами периферических частей и кровли (верхний водоупор) [14], приток глубинного теплоносителя приурочен к каналам/дайкам. Верхний относительный водоупор является продуктом гидротермальной переработки исходных пород.

В работе [13] показано, что в пачке Гейзерной (grn), вскрытой обвалом 2007 г., распространены как гидротермально измененные, так и неизмененные алевропелитовые витрокластические и псаммито-псефитовые пемзовые с включением лито- и кристаллокластов, при этом гидротермальным преобразованиям подвержены в первую очередь вулканическое стекло и пемзокласты, доля которых в исходном минералогическом составе является значительной.

В центральной части кальдеры Узон, на левом берегу р. Шумной (г. Белая), расположена сложенная пемзами экструзия Q₃, практически не затронутая гидротермальными преобразованиями. Ее состав, выраженный через содержания полевых шпатов и кварца, следующий: 44 мас.% NaAlSi₃O₈, 29 % SiO₂, 15 % KAlSi₃O₈, 12 % CaAlSi₂O₈. Минеральный состав, по данным рентгенофазового анализа, соответствует элементному составу, а именно преобладанию полевых шпатов и вулканического стекла.

Методы. Исходные данные для TOUGHREACT-моделирования, сборка модели. Минеральный состав гейзеритов исследовался в ходе мониторинга температуры и цикличности извержений гейзеров с помощью логгеров. Логгер представляет собой небольшой металлический цилиндр, длиной около 10 и диаметром 1 см, погружающийся в изучаемую среду и записывающий показания в течение нескольких месяцев. За полгода работы логгер успевает покрыться тонким слоем гейзеритовых отложений, достаточным для исследования минерального состава, при этом *не страдают уникальные гейзеритовые постройки*, а в распоряжение исследователей попадают актуальные данные по минеральному составу гейзеритов.

Минеральный состав исследован методами рентгеновской дифрактометрии. Дифрактограммы записаны с помощью рентгеновского дифрактометра MaxXRD 7000 (Shimadzu) в диапазоне 6-65 °2θ с шагом 0,05-0,1 °2θ, скорость сканирования 1-2 град/мин, что эквивалентно выдержке в точке 3-6 с. Полуколичественный состав отложений был исследован с помощью рентгеновской флуориметрии на спектрометре S4 Pioneer (BrukerAXS). Все исследования были выполнены на базе Аналитического центра Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Ранее было обнаружено, что гейзеритовые плащи имеют преимущественно кварц-опал-цеолитовый состав с различным соотношением минеральных компонентов [19]. На дифрактограммах отложений логгеров фиксируется интенсивное гало, отвечающее аморфным фазам с малой областью когерентного рассеяния (рис.2). Исследование состава отложений на логгерах за 2018-2021 гг. показало, что хорошо окристаллизованные осадки 2018 г. постепенно становятся все более аморфными, и к 2021 г. степень кристалличности становится очень низкой (рис.2). Параллельно со снижением кристалличности меняется и состав отложений, доминирующей фазой становится аморфный гидратированный кремнезем, а не цеолиты. К такому эффекту может приводить снижение pH, уменьшение концентрации кремнезема и алюминия в термальных растворах и снижение температуры. Известно, что щелочная среда благоприятна для кристаллизации цеолитов, так как с ростом pH возрастает скорость их кристаллизации. Понижения температуры не наблюдалось, разгрузка при извержении гейзеров происходила и происходит при 100 °C.



На дифрактограммах присутствуют размытые рефлексы, которые могут принадлежать таким цеолитам, как морденит, гейландит, клиноптилолит и, возможно, стильбит. У них близкие дифрактограммы, и в случае преобладания аморфной компоненты уширенные рефлексы накладываются друг на друга и затрудняют прецизионную идентификацию.

Для моделирования в программном комплексе TOUGHREACT-EOS2 [53, 54] создана одноэлементная модель, концепция которой представлена на рис.3. Начальные условия: давление 60 бар, температура 210 °С, парциальное давление CO₂ задано нулевым. Материальные свойства в модели определены следующим образом: плотность 2700 кг/м³; пористость 0,1; проницаемость 10⁻¹² м²; теплопроводность 2 Вт/(м·°С); теплоемкость 850 Дж/(кг·°С). Удельный расход воды соответствует продуктивному гейзерному резервуару, состав воды отвечает каноническому, взятому для гейзера Великан (табл.1). Минералы вмещающих пород: стекло*³ Na_{0,97}Ca_{0,016}K_{0,005}Mg_{0,0015}Si_{2,99}Al_{1,01}O₈; смектит-Na Na_x[Al, Mg, Fe]₂[Si₄O₁₀](OH)₂; смектит-K K_x[Al, Mg, Fe]₂[Si₄O₁₀](OH)₂; смектит-Ca Ca_x[Al, Mg, Fe]₂[Si₄O₁₀](OH)₂; альбит NaAlSi₃O₈; микролин KAlSi₃O₈; анортит CaAl₂Si₂O₈; опал SiO₂·nH₂O; морденит [Na₂, Ca, K₂]₄[Al₈Si₄₀]O₉₆·28H₂O; клиноптилолит Ca₃[Si₃₀Al₆]O₇₂·20H₂O.

Модель представляет собой куб со стороной 100 м (рис.3) с проточной циркуляцией, постоянный расход 5,8 кг/с. Проточная циркуляция определена водоотбором из заданной на модели скважины с одновременной инъекцией в элемент модели постоянного расхода воды с заданной энтальпией (приток глубинного теплоносителя или инфильтрационных вод). Заданное время моделирования 1000 лет.

Результаты TOUGHREACT-моделирования. Вывод уравнений Na-K-геотермометров для различных минералов. При обработке результатов TOUGHREACT-моделирования предполагается, что ионное произведение или константа ионного обмена отвечают аррениусовской зависимости от температуры $T: K(T) = A_{\text{exp}}(-\Delta G/RT)$, где A – множитель, не зависящий от температуры; ΔG – изменение энергии Гиббса в ходе обратимого процесса; R – универсальная газовая постоянная.

В ходе моделирования при различных значениях энтальпии (притока глубинного теплоносителя или инфильтрационных вод) получен состав раствора, равновесный с заданным набором минералов при температурах диапазона 25-250 °С. Данные моделирования равновесного состава

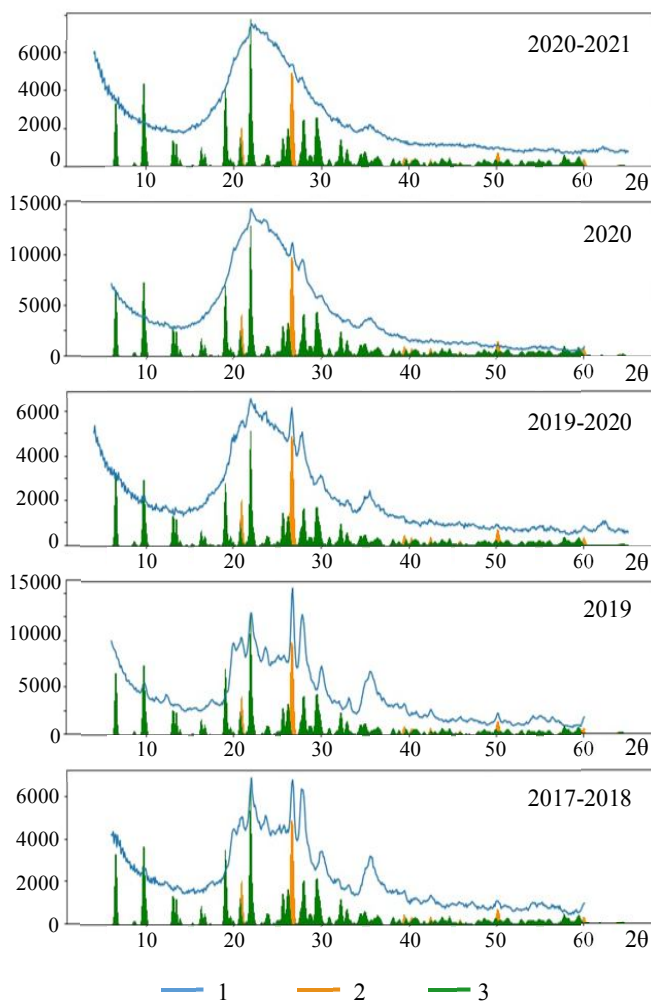


Рис.2. Отложения гейзера Великан, полученные в 2017-2021 гг.
1 – минеральные отложения; 2 – кварц; 3 – цеолит

Таблица 1

Состав воды, близкий составу гейзера Великан (pH = 8)

Компонент	Концентрация	
	моль/кг H ₂ O	мг/л
NH ₄ ⁺	5,6·10 ⁻⁵	1
Na ⁺	2,64·10 ⁻²	605
K ⁺	1,2·10 ⁻³	47
Ca ²⁺	5,5·10 ⁻⁴	22
SiO ₂	5,0·10 ⁻³	300
AlO ₂ ⁻	1,0·10 ⁻⁷	5,9·10 ⁻³
Cl ⁻	2,46·10 ⁻²	872
SO ₄ ²⁻	1,68·10 ⁻³	161
HCO ₃ ⁻	1,44·10 ⁻³	88

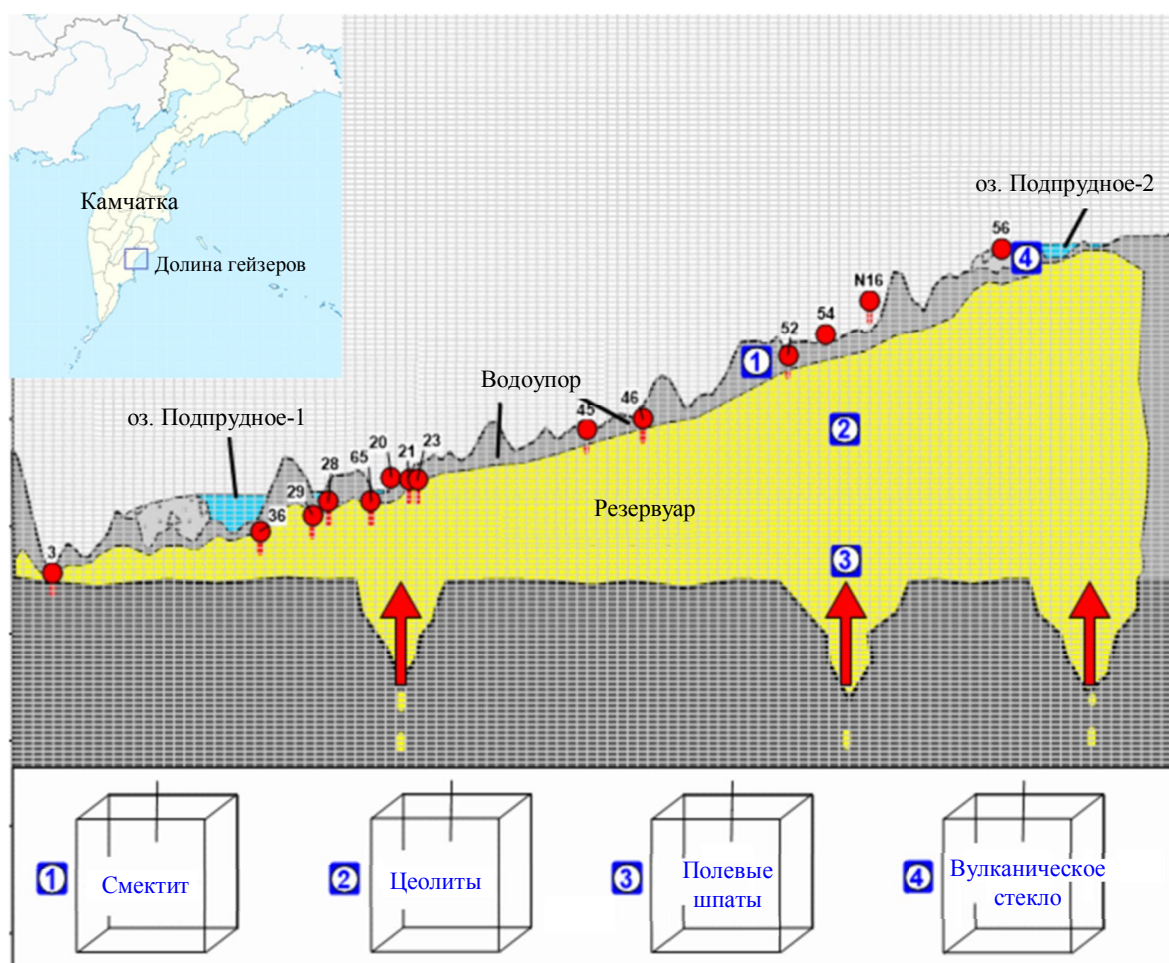


Рис.3. Одноэлементная модель, имитирующая фрагмент гейзерного резервуара в зонах с различным минеральным составом [55]

1 – К-монтмориллонит + Na-монтмориллонит + Са-монтмориллонит; 2 – морденит + клиноптилолит (clinopt/10);
3 – полевой шпат + альбит высокий + альбит низкий; 4 – вулканическое стекло (glass3);
на врезке показана локализация Долины гейзеров на территории Камчатки

вод преобразовывались в координаты $1000/T$ и $\lg(C_i/C_j)$, где C_i и C_j – концентрации соответствующих компонентов раствора в массовых или молярных единицах (г/л, мг/л, ppm, моль/л и др.).

Линеаризованные участки полученных графиков описывались уравнением вида $y = A + Bx$, где $y = \lg(C_i/C_j)$; $x = 1000/(t + 273,15)$, из которого выводили уравнение геотермометра

$$t = \frac{1000B}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] - A} - 273,15.$$

В ходе моделирования получены данные по составу растворов, где концентрации выражены в моль/л. Для перехода к массовым содержаниям требуется умножение на молярную массу, а для пересчета соотношения C_i/C_j из молярных в массовые единицы требуется умножить эту величину на коэффициент Mr_i/Mr_j , где Mr_i и Mr_j – молярные массы компонентов i и j . Коэффициент пересчета соотношения концентраций натрия и калия из молярных единиц в массовые составляет 23/39. Для удобства в уравнениях и на графиках указаны единицы измерения концентраций натрия и калия.

В табл.2 представлены результаты моделирования взаимодействия вода – порода для вторичных минералов при неизменном исходном составе воды и постоянном расходе, значения коэффициентов A и B и температурные диапазоны линейных или близких к линейным участкам.



Таблица 2

Коэффициенты уравнения геотермометра $t = \frac{1000B}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right]^{-A}} - 273,15$ для различных минералов

Минеральная ассоциация	Температурный диапазон, °C	Коэффициенты	
		A (для ppm)	B
Альбит, анортит, микроклин Стекло	25-250	-1,683	1,239
	25-125	0,961	0,037
	125-250	1,034	0,0085
Монтмориллонит	25-125	-1,267	0,612
Цеолиты (морденит, гейландит, клиноптилолит)	25-125	1,151	-0,012
	125-250	1,949	-0,349

Система К-полевой шпат + альбит низкий + вода (T4_REACT_Feldspar). В качестве исходных фаз были взяты К-полевой шпат и низкий альбит в равных объемных долях, причем добавление высокотемпературной модификации альбита не меняло общую картину. Время моделирования составляло 1000 лет, на каждом шаге моделирования принималось химическое равновесие вода – порода.

Полевошпатовый геотермометр, полученный в ходе моделирования, близок к каноническому уравнению Фурнье [12, 56] и дает согласованные с ним результаты. Диапазон, в котором меняется соотношение Na/K, достаточно велик, около 2,5-300, и это позволяет определять температуру по содержанию катионов. Высокие соотношения характерны для низких температур, и наоборот. Поэтому применение полевошпатового геотермометра для случаев, когда натрий поглощается и соотношение $C(\text{Na})/C(\text{K})$ понижается, приводит к кажущемуся разогреву геотермального резервуара (рис.4) [57].

Уравнение полевошпатового геотермометра следующее:

$$t = \frac{1239}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] + 1,683} - 273,15 \text{ ppm.}$$

Система стекло (glass3) + вода (TR_T_glass3_#9). В качестве исходных фаз было взято только вулканическое стекло glass3. Время моделирования составляло 1000 лет, на каждом шаге принималось локальное химическое равновесие вода – порода.

В ходе моделирования было обнаружено растворение стекла, при этом логарифм соотношения $C(\text{Na})/C(\text{K})$ менялся незначительно, в пределах 1,28-1,32 моль/л (рис.5), поэтому практическое использование геотермометра на основе вулканического стекла затруднено. В диапазоне 125-250 °C уравнение геотермометра имеет следующий вид:

$$t = \frac{8,5}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] - 1,034} - 273,15 \text{ ppm;}$$

в диапазоне 25-125 °C

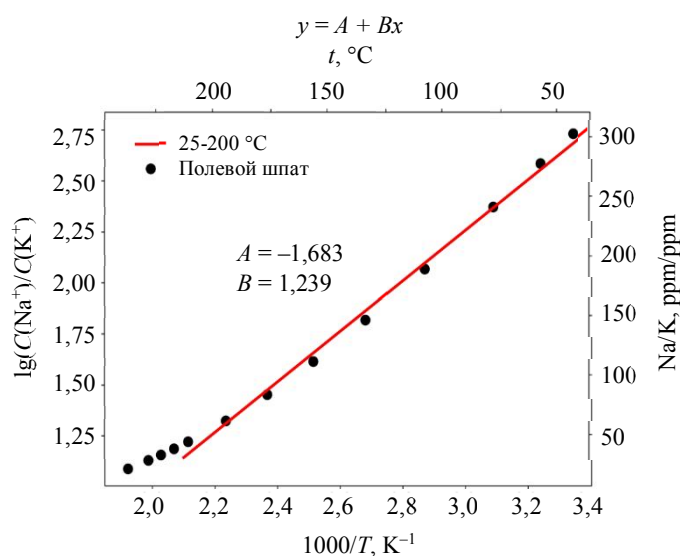


Рис.4. Аррениусовская зависимость для соотношения натрия и калия в случае равновесия термальных вод с полевыми шпатами

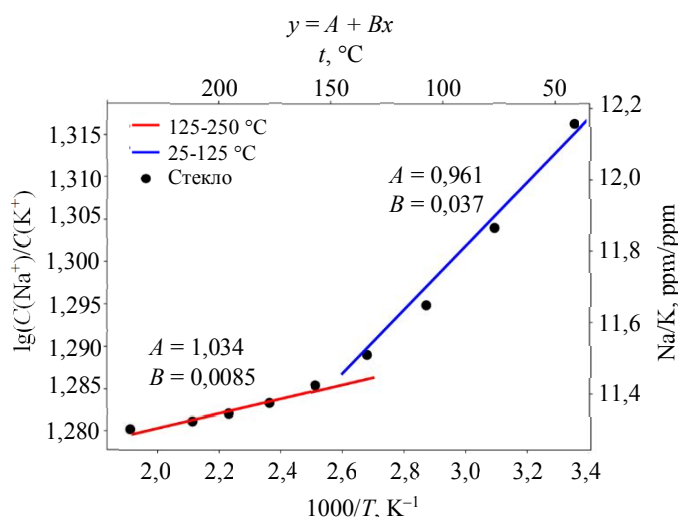


Рис.5. Два линейных участка в аррениусовских координатах, отвечающие температурной зависимости соотношения концентраций натрия и калия для стекла

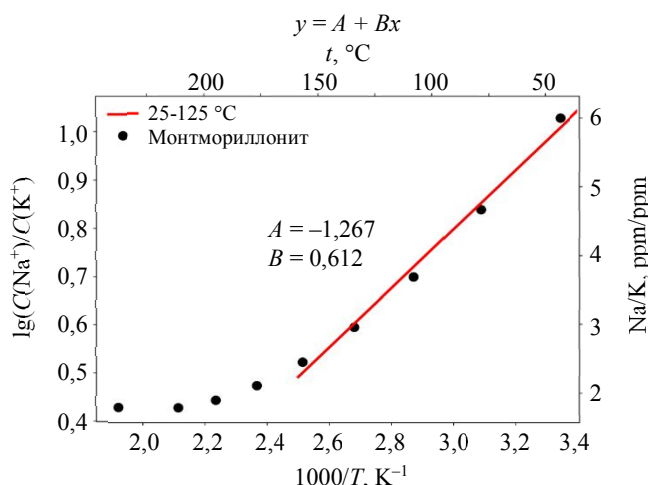


Рис.6. Линейный участок соотношения концентраций натрия и калия для равновесия монтмориллонита с термальными водами

ется в малом диапазоне 1,5-6 (для ppm). Высокое значение соотношения характерно для низкой температуры, и наоборот. На графике (рис.6) удастся выделить линейный участок в диапазоне температур 25-125 °С. Малый диапазон изменения соотношения и низкое относительное содержание натрия не позволяют использовать полевошпатовый Na-K-геотермометр для оценки температур в случае смектитового контроля соотношения натрия и калия. В диапазоне 25-150 °С уравнение геотермометра принимает следующий вид:

$$t = \frac{612}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] + 1,267} - 273,15 \text{ (для ppm)}.$$

На термальных полях Камчатки монтмориллонит преимущественно натрий-кальциевый, равновесные с ним воды характеризуются невысоким соотношением $C(\text{Na})/C(\text{K})$, поэтому использование полевошпатового геотермометра приводит к кажущемуся значительному разогреву геотермального резервуара. В грязеводных котлах современных термальных полей Камчатки со слабокислыми и близонейтральными водами при условии доминирования монтмориллонита

$$t = \frac{37}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] - 0,961} - 273,15 \text{ ppm}.$$

Растворение стекла поддерживает концентрацию элементов на определенном уровне, поэтому применение полевошпатовых Na-K-геотермометров приводит к ошибочным оценкам.

Если к полевошпатовому стеклу добавляются кристаллические полевые шпаты, альбит, анортит и микроклин, то стекло растворяется и перекристаллизовывается в соответствующие минералы, и уравнение Na-K-геотермометра получается близким уравнению Фурнье. Однако по-прежнему в ходе растворения стекла соотношение $C(\text{Na})/C(\text{K})$ меняется слабо, в пределах 11-12,2 (для ppm) для широкого температурного интервала, поэтому присутствие стекла вызывает кажущийся разогрев геотермального резервуара и может приводить к значительным ошибкам в определении температуры.

Система К-монтмориллонит + Na-монтмориллонит + Са-монтмориллонит + вода (TR T mont Ca #9). В качестве исходных фаз были взяты фазы К-монтмориллонит (montmor-k), Na-монтмориллонит (montmor-na), Са-монтмориллонит (montmor-ca). Объемные доли всех трех минералов были равны и составляли 1/3. Заданное время моделирования 1000 лет, на каждом шаге принималось локальное химическое равновесие вода – порода.

Соотношение Na/K плохо линеаризуется в аррениусовских координатах и меня-



наблюдается смектитовый контроль соотношения концентраций натрия и калия, при котором они лежат в рассчитанных пределах 1,5-6 (для ppm) [58].

Система морденит + клиноптилолит (*clinopt/10*) + вода (+/- гейландит) (*Mor_Heu_no_Fels_#9*). В качестве начальных фаз были взяты морденит (доля 0,3), клиноптилолит (*clinopt/10*, доля 0,3) и аморфный SiO_2 (доля 0,4). Опал задан химически равновесным с термальной водой, для цеолитов кинетическая константа растворения задана в диапазоне 10^{-15} - 10^{-18} , а кинетическая константа осаждения принимала значения 10^{-19} - 10^{-20} , энергия активации 58 кДж/моль. Время моделирования 1000 лет.

По результатам моделирования в условиях геотермального резервуара и щелочной среды клиноптилолит и гейландит осаждаются с высокой скоростью, по ним быстро достигается насыщение, а морденит незначительно растворяется. Поэтому для получения нужных зависимостей варьировали кинетические параметры, такие как скорость осаждения и растворения для морденита, гейландита и клиноптилолита. Обнаружено, что соотношение концентраций натрия и калия в значительной степени определяется скоростью осаждения цеолитов. Важно то, что соотношение концентраций натрия и калия меняется в пределах 13-20 (для ppm) в диапазоне температур 25-250 °С. Линеаризация соотношений в аррениусовских координатах показана на графике (рис.7) – более крутой высокотемпературный и пологий низкотемпературный участки.

Уравнение цеолитового геотермометра для высоких температур 150-250 °С:

$$t = \frac{-349}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] - 1,949} - 273,15 \text{ (для ppm);}$$

для температур 25-150 °С уравнение геотермометра имеет следующий вид:

$$t = \frac{-12}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] - 1,151} - 273,15 \text{ (для ppm).}$$

Отмечается низкое соотношение натрия и калия для вод, контактирующих с цеолитами, поэтому расчет по уравнению для полевых шпатов приводит к завышенным температурам.

Обсуждение. Исследование гейзеритовых отложений гейзера Великан показывает формирование аморфных цеолитов в ассоциации с опалом и кварцем. Наблюдение за составом отложений отмечает снижение их кристалличности за 2018-2021 гг., которое может быть связано с некоторым понижением рН термального раствора. В целом рН разгружающихся растворов высокий, щелочной (8-9) и благоприятен для формирования цеолитов. В то же время прогретые грунты Долины гейзеров имеют состав, сходный с составом прогретых грунтов других термальных полей Камчатки, и содержат монтмориллонит, который кристаллизуется в близонейтральных и слабокислых растворах. Такая среда формируется при взаимодействии поровых растворов грунтов с кислородом воздуха, на дневной поверхности кристаллизуются

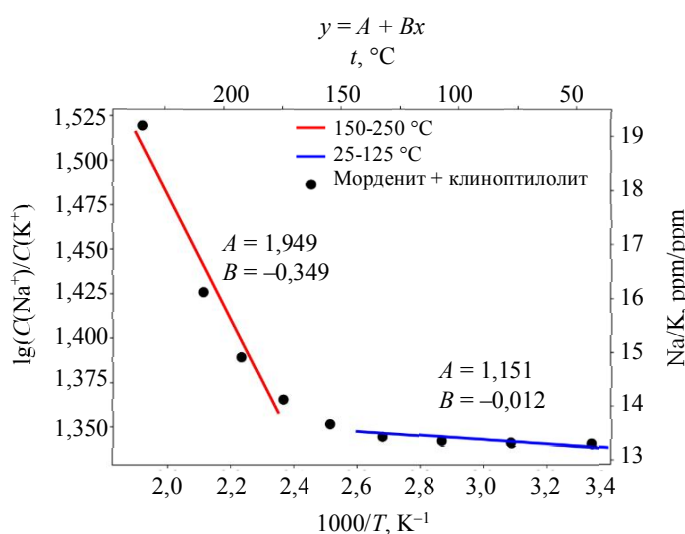


Рис.7. Линейные участки в аррениусовских координатах для соотношения натрия и калия в зависимости от температуры для морденита и клиноптилолита



ажурные солевые отложения, ассоциированные обычно со слоистыми силикатами, в том числе с монтмориллонитом.

Вулканическое стекло оказывает значительное влияние на показания геотермометров благодаря хорошей растворимости по сравнению с другими минералами ассоциаций. В щелочных средах растворимость силикатных стекол возрастает на несколько порядков, вследствие этого влияние стекла на соотношение Na/K в природных резервуарах с щелочными растворами оказывается значительным. Кроме того, при растворении стекла соотношение Na/K по результатам моделирования составляет 11-12,2 в диапазоне температур 25-250 °С, по полевошпатовому геотермометру это температура находится в пределах 170-180 °С.

Смектит избирательно поглощает натрий, и по результатам моделирования соотношение натрия и калия снижается до 1,5-6 в интервале температур 25-250 °С. Оценка температуры резервуара по Na-K-геотермометру для вод, пришедших в равновесие со смектитовыми минералами, дает завышенные значения, поэтому влияние смектита на Na-K-геотермометр весьма заметно и выражается в кажущемся разогреве резервуара. Однако применение смектитового геотермометра для определения температур разгрузок на термальных полях, в грязевых и грязеводных котлах, поровых растворах прогретых грунтов и парогазовых струях при условии доминирования монтмориллонита показывает хорошее согласие расчетной и измеренной в ходе пробоотбора температуры. Поэтому применение смектитового геотермометра правомерно на термальных полях при условии монтмориллонитового контроля соотношения натрия и калия.

Цеолиты действуют подобно монтмориллониту, понижая соотношение натрия и калия до диапазона 13-19 в интервале температур 25-250 °С, что по полевошпатовому геотермометру отвечает температурам 140-170 °С. Чувствительность геотермометра к температуре зависит от абсолютного значения параметра B , с уменьшением этого параметра чувствительность геотермометра снижается. Поэтому геотермометры на основе цеолитов и вулканического стекла наименее чувствительны к температуре. Затем идет монтмориллонитовый геотермометр, который ограниченно применяется в рамках термальных полей, а наиболее чувствителен полевошпатовый геотермометр.

По результатам TOUGHREACT-моделирования выведены уравнения Na-K-геотермометров для равновесий термальных растворов с полевыми шпатами, монтмориллонитом, цеолитами и вулканическим стеклом. Оба класса вторичных минералов способны к быстрому катионному обмену с контактирующими растворами, что может вызвать сбой в показаниях полевошпатового Na-K-геотермометра. Учет взаимодействия термальных вод и вторичных минералов, обладающих ионообменными свойствами, показал, что цеолиты и монтмориллонит могут влиять на показания полевошпатового геотермометра посредством контроля соотношения натрия и калия в растворе. Минералы этих групп снижают соотношение $C(\text{Na}^+)/C(\text{K}^+)$, благодаря чему расчет температуры резервуара дает завышенные значения. Сбой в показаниях Na-K-геотермометра, вызванный контактом с ионообменными минералами, происходит практически мгновенно, в течение нескольких десятков минут, в то же время равновесие с полевыми шпатами достигается значительно медленнее, на него требуются годы.

Вулканическое стекло в щелочных термальных растворах сравнительно быстро растворяется и благодаря этому также способно контролировать соотношение натрия и калия в растворе. Вызванные растворением стекла сбои полевошпатового геотермометра показывают завышенную температуру в резервуаре.

Уравнение полевошпатового геотермометра для диапазона 25-200 °С по результатам моделирования имеет следующий вид:

$$t = \frac{1239}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] + 1,683} - 273,15 \text{ (для ppm);}$$

уравнение геотермометра на основе вулканического стекла в диапазоне 125-200 °С



$$t = \frac{8,5}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] - 1,034} - 273,15 \text{ (для ppm)},$$

в диапазоне 25-125 °С $t = \frac{37}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] - 0,961} - 273,15 \text{ (для ppm)};$

уравнение для смектитового геотермометра в диапазоне 25-150 °С

$$t = \frac{612}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] + 1,267} - 273,15 \text{ (для ppm)};$$

уравнения цеолитового геотермометра для высоких температур (150-250 °С)

$$t = \frac{-349}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] - 1,949} - 273,15 \text{ (для ppm)},$$

для 25-150 °С $t = \frac{-12}{\lg \left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)} \right] - 1,151} - 273,15 \text{ (для ppm)}.$

История изменения химического состава гейзеров 1968-2020 гг. показывает тренд понижения концентрации хлор-иона [14, 46], который объясняется следующими причинами: уменьшением притока глубинного теплоносителя из-за тренда понижения концентрации хлор-иона 1,1 ppm/год с начальной концентрации 900 ppm в 1969-2003 гг.; дополнительным разбавлением за счет притока инфильтрационных вод из р. Гейзерная, начиная с катастрофического обвала 2007 г. (понижение концентрации хлор-иона до 780 ppm в среднем по гейзеру Великан).

Если использовать хлор-ион как инертный трассер геофильтрационных процессов и принять концентрацию хлор-иона в родительском флюиде $C_p = 810$ ppm на 2002 г. [14], концентрацию хлор-иона в р. Гейзерной $C_r = 100$ ppm при диапазоне от 43 до 167 ppm [59], долю инфильтрационных вод в разгрузке гейзеров можно оценить следующим образом:

$$X = (C_p - C) / (C_p - C_r).$$

Это соотношение показывает, что доля инфильтрационной воды (являющейся наиболее вероятно «смектитовой водой») оценивается в 5 %. Если же за концентрацию хлор-иона в родительском флюиде принять величину $C_p = 900$ ppm [52], то оцениваемая доля инфильтрационных вод возрастает до 15 %. Возможно ли, исходя из этого, комплексирование двух Na-K-геотермометров: глубинного полевошпатового и инфильтрационного – смектитового? Вероятно, это возможно, но на модели с распределенными параметрами (ненулевой размерности), учитывающей одновременно притоки как глубинного теплоносителя (родительский флюид), так и инфильтрационных вод.

Заключение. С использованием TOUGHREACT-моделирования на одноэлементной модели (нулевой размерности) для гидрогеологических условий гейзерного резервуара (Долина гейзеров, Камчатка) воспроизведены ранее известный Na-K полевошпатовый геотермометр [11, 25] и получены новые формулы для трех Na-K-геотермометров: цеолитового, смектитового и на основе вулканического стекла. С практической точки зрения использование представленной модели и полученных уравнений геотермометров дает уточнение прогноза катастрофических событий, а также оценку их геохимических последствий.



Установлено, что при взаимодействии термальной воды с вулканическим стеклом соотношение Na/K варьирует в пределах 11-12,2 (для ppm), для смектита это соотношение лежит в пределах 1,5-6 (для ppm), для цеолитов – 13-19 (для ppm) в температурном диапазоне 25-250 °С. Наиболее широкий диапазон отмечается для полевых шпатов, для которых соотношение Na/K составляет 6-300 (для ppm).

За 2010-2018 гг. для вод гейзеров соотношения $C(\text{Na}^+)/C(\text{K}^+)$ лежат в пределах 5-15 (для ppm), верхняя граница диапазона отвечает полевошпатовому геотермометру с температурой 160-180 °С и соответствует состоянию резервуара, фиксировавшемуся до схода селевых потоков. Значения с пониженным соотношением натрия и калия приближаются к смектитовым водам с температурой 5-50 °С. Ситуация отвечает контакту вод, разгружающихся на поверхность в виде гейзерных фонтанов, с прогретыми грунтами, сложенными смектитом, при котором соотношение Na/K понижается. Вероятно, смектитовыми водами и вызваны искажения в показаниях полевошпатового геотермометра, когда наблюдались заметные выбросы значений температуры резервуара выше 160-180 °С.

Химическая история по хлор-иону, который рассматривается в качестве инертного трассера геофильтрационных процессов, показывает, что после 2007 г. в гейзерный резервуар поступает значительное количество инфильтрационной воды, массовая доля которой оценивается в 5-15 %. Наиболее вероятно, что это смектитовая вода, сформированная в результате химического взаимодействия речной воды из р. Гейзерная с гидротермально измененными (смектиты) породами верхнего относительного водоупора (см. рис.3).

Таким образом, показания Na-K полевошпатового геотермометра [11, 25] до 260-280 °С в последние годы (см. рис.1) могут являться отражением эффекта разбавления смектитовыми водами. Для оценки истинной температуры в гейзерном резервуаре необходимо применение термогидродинамических-химических моделей с распределенными параметрами. Такое моделирование является задачей дальнейших исследований.

Авторы признательны младшему научному сотруднику лаборатории теплопереноса Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН Н.Б.Журавлеву за помощь в полевых исследованиях и обсуждении материала, сотрудникам Кроноцкого государственного биосферного заповедника П.И.Шпиленок, Д.М.Паничевой, Е.Л.Субботиной за помощь в подготовке и проведении полевых работ на территории Долины гейзеров и кальдеры Узон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарева Г.Л. Оценка температурных условий формирования минеральных вод Пятигорского месторождения // Разведка и охрана недр. 2011. № 3. С. 40-42.
2. Лаврушин В.Ю., Гулиев И.С., Киквадзе О.Е. и др. Воды грязевых вулканов Азербайджана: изотопно-химические особенности и условия формирования // Литология и полезные ископаемые. 2015. № 1. С. 3-29. DOI: 10.7868/S0024497X15010036
3. Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитонов Н.А. и др. Геохимия и условия формирования Ульского термального источника (Охотоморское побережье, Хабаровский край) // Тихоокеанская геология. 2019. Т. 38. № 2. С. 73-85. DOI: 10.30911/0207-4028-2019-38-2-73-85
4. Челноков Г.А., Лаврушин В.Ю., Айдаркожина А.С. и др. Новые данные о газовом составе и геотермии минеральных вод Киргизии // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. Улан-Удэ: Бурятский научный центр СО РАН, 2020. С. 111-113. DOI: 10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-111-113
5. Киреева Т.А., Салихов Ф.С., Бычков А.Ю., Харитонов Н.А. Новые данные по микроэлементному и изотопному составу термальных источников Таджикистана // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы третьей Всероссийской научной конференции с международным участием. Улан-Удэ: Бурятский научный центр СО РАН, 2018. С. 292-295. DOI: 10.31554/978-5-7925-0536-0-2018-292-295
6. Киреева Т.А., Салихов Ф.С., Бычков А.Ю., Харитонов Н.А. Химический состав вод и условия формирования некоторых термальных источников Таджикистана // Геохимия. 2020. Т. 65. № 4. С. 379-391. DOI: 10.31857/S0016752520030061
7. Бадминов П.С., Иванов А.В., Писарский Б.И., Оргильянов А.И. Окинская гидротермальная система (Восточный Саян) // Вулканология и сейсмология. 2013. № 4. С. 27-39. DOI: 10.7868/S0203030613040020
8. Зитта Е.В., Гусева Н.В., Сунь Чж., Чень Г. Оценка температур циркуляции термальных вод провинции Цзянси с применением различных геотермометров // Успехи современного естествознания. 2019. № 10. С. 52-57. DOI: 10.17513/use.37213
9. Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитонов Н.А. Новые изотопно-геохимические данные по Таватумским термальным водам (Магаданская область) // Тихоокеанская геология. 2021. Т. 40. № 5. С. 104-114. DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-5-104-114



10. Алексеев В.А. Кинетика и механизмы реакций полевых шпатов с водными растворами. М.: ГЕОС, 2002. 246 с.
11. Truesdell A.H., Jones B.F. WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters // Journal of Research of the U.S. Geological Survey. 1974. Vol. 2. № 2. P. 233-248.
12. Fournier R.O., Potter H.R.W. Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1979. Vol. 43. Iss. 9. P. 1543-1550. DOI: [10.1016/0016-7037\(79\)90147-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90147-9)
13. Фролова Ю.В., Гвоздева И.П., Чернов М.С., Кузнецов Н.П. Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины гейзеров (полуостров Камчатка) // Инженерная геология. 2015. № 6. С. 30-42.
14. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем. СПб: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
15. Kiryukhin A., Sugrobov V., Sonnenthal E. Geysers Valley CO₂ Cycling Geological Engine (Kamchatka, Russia) // Geofluids. 2018. Vol. 2018. № 1963618. P. 1-16. DOI: [10.1155/2018/1963618](https://doi.org/10.1155/2018/1963618)
16. Spycher N., Peiffer L., Sonnenthal E.L. et al. Integrated multicomponent solute geothermometry // Geothermics. 2014. Vol. 51. P. 113-123. DOI: [10.1016/j.geothermics.2013.10.012](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.10.012)
17. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Развитие модели района Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии и вулкана Кихпинич (Камчатка) по результатам совместного анализа данных микро-сейсмического зондирования и локальной геодинамической активности // Физика Земли. 2015. № 3. С. 89-101. DOI: [10.7868/S0002333715030096](https://doi.org/10.7868/S0002333715030096)
18. Кирюхин А.В., Рычкова Т.В., Сергеева А.В. Моделирование условий формирования проницаемых каналов гейзеров в районах кислого вулканизма // Вулканология и сейсмология. 2020. № 2. С. 3-16. DOI: [10.31857/S0203030620020030](https://doi.org/10.31857/S0203030620020030)
19. Sergeeva A., Kiryukhin A. Secondary minerals in the geysers of the Geysers Valley (Kamchatka) // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 98. № 08019. P. 1-5. DOI: [10.1051/e3sconf/20199808019](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199808019)
20. Sergeeva A.V., Denisov D.K., Nazarova M.A. Clay mineral assemblages in recent thermal anomalies of Southern Kamchatka // Russian Geology and Geophysics. 2019. Vol. 60. № 11. P. 1267-1277. DOI: [10.15372/RGG2019090](https://doi.org/10.15372/RGG2019090)
21. Semenov I.N., Klink G.V., Lebedeva M.P. et al. The variability of soils and vegetation of hydrothermal fields in the Valley of Geysers at Kamchatka Peninsula // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Iss. 1. № 11077. DOI: [10.1038/s41598-021-90712-7](https://doi.org/10.1038/s41598-021-90712-7)
22. Судариков С.М. Моделирование геохимических процессов в зоне субмаринной разгрузки гидротермальных растворов // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 284-291. DOI: [10.18454/PMI.2017.3.284](https://doi.org/10.18454/PMI.2017.3.284)
23. Sudarikov S., Petrov V., Narkevsky E. et al. In-Situ Study Methods Used in the Discovery of Sites of Modern Hydrothermal Ore Formation on the Mid-Atlantic Ridge // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 10. № 1219. DOI: [10.3390/min12101219](https://doi.org/10.3390/min12101219)
24. Сергеева А.В., Житова Е.С., Нурбаев А.А., Назарова М.А. Моделирование процесса минералообразования на термоаномалиях с аммонийно-сульфатными термальными водами: роль водородного показателя (pH) // Вулканология и сейсмология. 2022. № 1. С. 39-53. DOI: [10.31857/S0203030621060092](https://doi.org/10.31857/S0203030621060092)
25. Truesdell A.H., Fournier R.O. Calculation of Deep Temperatures in Geothermal Systems from the Chemistry of Boiling Spring Waters of Mixed Origin // Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, May, 1975. Vol. 1. P. 837-844.
26. Тамуна Б., Хамизов Р.Х., Бавижев М.Д., Конов М.А. Влияние СВЧ-обработки клиноптилолита на его ионообменные кинетические свойства // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16. № 6. С. 803-812.
27. Колесникова Л.Г., Ланкин С.В., Юрков В.В. Ионный перенос в клиноптилолите. Благовещенск: Изд-во Благовещенского государственного педагогического университета, 2007. 113 с.
28. Колесникова Л.Г. Ионный обмен в цеолитах // Проблемы экологии Верхнего Приамурья. 2012. Т. 14. С. 12-45.
29. Колесникова Л.Г., Филиппова Т.С., Ключевская Т.Г. Состав и термодинамические параметры ионного обмена цеолитов Вангинского месторождения Амурской области // Проблемы экологии Верхнего Приамурья. 2009. Т. 11. С. 23-41.
30. Шкуренко Г.Ю. Ионообменные свойства природного гейландита: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2004. 16 с.
31. Бобонич Ф.М., Патрияк К.И., Левчук Н.Н. и др. Влияние химического модифицирования на каталитические свойства клиноптилолита и модернита в реакции гидроизомеризации *n*-гексана // Катализ и нефтехимия. 2001. № 9-10. С. 98-102.
32. Размахнин К.К., Милютин В.В., Хатькова А.Н. Геоэкологические аспекты использования природных цеолитов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 2. № 4. С. 246-255. DOI: [10.33764/2618-981X-2019-2-4-246-255](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-4-246-255)
33. Хатькова А.Н. Перспективы использования цеолитов для повышения промышленной и экологической безопасности на объектах промышленности России // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: Материалы XX Международной научно-практической конференции. Чита: Забайкальский государственный университет, 2020. Ч. 1. С. 7-15.
34. Везенцев А.И., Добродомова Е.В., Перистая Л.Ф. и др. Минералогический состав глины Сергиевского месторождения как сорбента ионов тяжелых металлов из водных растворов // Вода: химия и экология. 2012. № 10 (52). С. 78-84.
35. Сарапулова Г.И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 388-392. DOI: [10.31897/PMI.2020.3.388](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.388)
36. Ерзова В.А., Румынин В.Г., Никуленков А.М. и др. Прогноз миграции радионуклидов в подземных водах в зоне влияния строительного дренажа Ленинградской АЭС-2 // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 194-211. DOI: [10.31897/PMI.2022.27](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.27)
37. Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Комплексная оценка безопасности захоронения радиоактивных отходов в глинистых породах (на примере Санкт-Петербургского региона) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10-1. С. 66-76. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_101_0_66](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_101_0_66)
38. Palyanitsina A.N., Sukhikh A.S. Peculiarities of assessing the reservoir properties of clayish reservoirs depending on the water of reservoir pressure maintenance system properties // Journal of Applied Engineering Science. 2020. Vol. 18. Iss. 1. P. 10-14. DOI: [10.5937/jaes18-24544](https://doi.org/10.5937/jaes18-24544)
39. Пашикевич М.А., Быкова М.В. Исследование возможности повышения точности измерений при установлении уровня загрязнения почв нефтепродуктами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 4. С. 67-86. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_4_0_67](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_4_0_67)



40. *Mustafaev A.S., Popova A.N., Sukhomlinov V.S.* A New Technique of Eliminating the Actual Plasma Background When Calibrating Emission Spectrometers with a CCD Recording System // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 6. № 2896. DOI: [10.3390/app12062896](https://doi.org/10.3390/app12062896)
41. *Popova A.N., Sukhomlinov V.S., Mustafaev A.S.* A New Intensity Adjustment Technique of Emission Spectral Analysis When Measured at the Upper Limit of the Dynamic Range of Charge-Coupled Devices // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 13. № 6575. DOI: [10.3390/app12136575](https://doi.org/10.3390/app12136575)
42. *El-Batouti M., Sadek O.M., Assaad F.F.* Kinetics and thermodynamics studies of copper exchange on Na-montmorillonite clay mineral // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2003. Vol. 259. № 2. P. 223-227. DOI: [10.1016/S0021-9797\(02\)00173-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(02)00173-X)
43. *Inoue A., Minato H.* Ca-K Exchange Reaction and Interstratification in Montmorillonite // *Clays and Clay Minerals*. 1979. Vol. 27. Iss. 6. P. 393-401. DOI: [10.1346/CCMN.1979.0270601](https://doi.org/10.1346/CCMN.1979.0270601)
44. *Fletcher P., Sposito G.* The chemical modelling of clay/electrolyte interactions for montmorillonite // *Clay Minerals*. 1989. Vol. 24. № 2. P. 375-391. DOI: [10.1180/claymin.1989.024.2.14](https://doi.org/10.1180/claymin.1989.024.2.14)
45. *Shainberg I., Alperovitch N.I., Keren R.* Charge Density and Na-K-Ca Exchange on Smectites // *Clays and Clay Minerals*. 1987. Vol. 35. Iss. 1. P. 68-73. DOI: [10.1346/CCMN.1987.0350109](https://doi.org/10.1346/CCMN.1987.0350109)
46. *Tournassat C., Bizi M., Braibant G., Crouzet C.* Influence of montmorillonite tactoid size on Na-Ca cation exchange reactions // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 364. Iss. 2. P. 443-454. DOI: [10.1016/j.jcis.2011.07.039](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.07.039)
47. *Di Xu, Xiang Zhou, Xiangke Wang.* Adsorption and desorption of Ni²⁺ on Na-montmorillonite: Effect of pH, ionic strength, fulvic acid, humic acid and addition sequences // *Applied Clay Science*. 2008. Vol. 39. Iss. 3-4. P. 133-141. DOI: [10.1016/j.clay.2007.05.006](https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.05.006)
48. *Таран Ю.А., Рябинин Г.В., Покровский Б.Г. и др.* Минеральные воды Авачинской депрессии, Камчатка // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2021. Вып. 50. № 2. С. 22-39. DOI: [10.31431/1816-5524-2021-2-50-22-39](https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-2-50-22-39)
49. *Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K.* Hydrothermal system in Geysers Valley (Kamchatka) and triggers of the Giant landslide // *Applied Geochemistry*. 2012. Vol. 27. P. 1753-1766.
50. *Белоусов В.И., Гриб Е.Н., Леонов В.Л.* Геологические позиции гидротермальных систем Долины Гейзеров и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 65-79.
51. *Калинина Д.Ф., Егоров А.С., Болюшкова Н.В.* Потенциальная нефтегазоносность Западно-Камчатского побережья и ее связь со структурно-тектоническим строением Охотоморского региона по геофизическим данным // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2022. Вып. 53. № 1. С. 59-75. DOI: [10.31431/1816-5524-2022-1-53-59-75](https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-1-53-59-75)
52. *Белоусов В.И., Сузоров В.М.* Геологическая и гидрогеотермическая обстановка геотермальных районов и гидротермальных систем Камчатки // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: Изд-во Дальневосточного научного центра АН СССР, 1976. С. 5-22.
53. *Tianfu Xu, Sonnenthal E., Spycher N., Pruess K.* TOUGHREACT – A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media: Applications to geothermal injectivity and CO₂ geological sequestration // *Computers & Geosciences*. 2006. Vol. 32. Iss. 2. P. 145-165. DOI: [10.1016/j.cageo.2005.06.014](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.06.014)
54. *Шулюпин А.Н.* Неустойчивость течения в добычной скважине на месторождении парогидротерм // Записки Горного института. 2016. Т. 220. С. 551-555. DOI: [10.18454/PML.2016.4.551](https://doi.org/10.18454/PML.2016.4.551)
55. *Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Усачева О.О. и др.* Влияние вторичных минералов на показания Na-K геотермометра на примере гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2022. С. 90-94.
56. *Fournier R.O.* Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering // *Geothermal Systems. Principle and Case Histories*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1981. P. 109-143.
57. *Fournier R.O., Truesdell A.H.* Chemical indicators of subsurface temperature applied to hot spring waters of Yellowstone National Park, Wyoming, U.S.A. // *Geothermics*. 1970. Vol. 2. Part 1. P. 529-535. DOI: [10.1016/0375-6505\(70\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0375-6505(70)90051-9)
58. *Калачева Е.Г., Рычагов С.Н., Королева Г.П., Нуржаев А.А.* Геохимия парогидротерм Кошелевского вулканического массива (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 41-56. DOI: [10.7868/S0203030616030044](https://doi.org/10.7868/S0203030616030044)
59. *Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Zhuravlev N.B. et al.* Dynamics of natural discharge of the hydrothermal system and geyser eruption regime in the Valley of Geysers, Kamchatka // *Applied Geochemistry*. 2022. Vol. 136. № 105166. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2021.105166](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105166)

Авторы: А.В.Сергеева, канд. хим. наук, старший научный сотрудник, anastavalers@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5127-347X> (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), А.В.Кирюхин, д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5468-1452> (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия; Кроноцкий государственный биосферный заповедник, Елизово, Россия), О.О.Усачева, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0781-3448> (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), Т.В.Рычкова, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6844-8771> (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), Е.В.Карташева, заведующий Аналитическим центром, <https://orcid.org/0000-0002-0518-7412> (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), М.А.Назарова, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6839-6599> (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), А.А.Кузьмина, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1428-6447> (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Обоснование и выбор расчетных параметров гидрофицированного комплекса оборудования для получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения

В.И.АЛЕКСАНДРОВ¹, А.М.ВАТЛИНА²✉, П.Н.МАХАРАТКИН¹¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия² ООО «Сигнал», Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Александров В.И., Ватлина А.М., Махараткин П.Н. Обоснование и выбор расчетных параметров гидрофицированного комплекса оборудования для получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 541-551. EDN PHJCLI. DOI: 10.31897/PMI.2022.68

Аннотация. Рассмотрен вопрос о влиянии концентрации твердой фазы на снижение энергетических затрат и удельной энергоемкости при транспортировании пульпы. Показан порядок подготовки гидросмеси из текущих хвостов обогащения. Приведена схема и описана работа гидрофицированного агрегата для сгущения и гидро-транспорта закладочных смесей. Показана схема движения твердых частиц в одном из узлов комплекса – пластинчатом сгустителе. В сводной таблице указаны основные конструктивные параметры и характеристики пластинчатого сгустителя. Приведен общий вид лабораторной установки, используемой для экспериментальных исследований с гидросмесью при различных концентрациях. Представлен пример расчета производительности, плотности и удельной нагрузки. Определена зависимость напряжения сдвига от градиента скорости для различных концентраций пульпы. Проведены экспериментальные исследования процесса сгущения получения гидросмеси из текущих хвостов обогащения. Выявлено, что геометрические размеры сгустителя зависят от концентрации твердой фазы в транспортируемой смеси. Сделан вывод, что расход гидросмеси и потери напора являются функциями реологических характеристик вязкопластической гидросмеси и могут быть рассчитаны по выведенным расчетным зависимостям.

Ключевые слова: горные выработки; закладочные смеси; тонкослойный сгуститель; грунтовый насос; концентрация гидросмеси; хвосты обогащения; реологические свойства

Поступила: 15.12.2021

Принята: 21.07.2022

Онлайн: 16.03.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Главными задачами горного производства и технологий, связанных с гидравлическим транспортом продуктов переработки минерального сырья, являются дальнейшее снижение затрат энергии, уменьшение удельной энергоемкости технологических процессов и освоение безотходных технологий процессов [1-3]. Определяющим и эффективным направлением решения задач безотходных технологий является применение систем добычи полезных ископаемых подземным способом с закладкой выработанного пространства [4-6]. Данный процесс должен включать использование отходов производства (хвостов обогащения) [7-9]. Это повлияет на более интенсивное освоение месторождений, позволит решать вопросы охраны недр и окружающей среды [10, 11].

Добыча руды системами с закладкой горных выработок в настоящее время в России составляет не более 24 % от общей добычи подземным способом. Большинство горно-добывающих предприятий цветной металлургии имеют обогатительные фабрики. Возрастающие объемы закладочных работ определяют необходимость создания и применения новых закладочных смесей, обеспечивающих высокие физико-механические свойства закладочного массива при минимальном расходе вяжущего материала (цемента) [12-14]. При увеличении тонкости помола твердой фазы из-за обеднения руды значительно возрастает выход тонких классов крупности – текущих хвостов обогащения [15-17]. Именно текущие хвосты могут быть основным материалом для закладочных смесей [18-20].



Подготовка смеси на основе текущих хвостов обогащения предусматривает несколько технологических операций [21-23]: сгущение хвостовой пульпы в сгустительных устройствах до высокой концентрации твердой фазы; гидравлическое транспортирование сгущенной смеси с помощью насосного оборудования на закладочные комплексы шахты в расходные емкости [24-26]; дозирование сгущенной гидросмеси в специальных устройствах-активаторах и смешивание смеси с вяжущим материалом; доставка и укладка подготовленной закладочной смеси в горную выработку [27-29].

Первоначальной и основной технологической операцией подготовки закладочной смеси является сгущение гидросмеси, поступающей после технологического процесса обогащения руды [30-32]. В практике горного дела применяются различные сгустители, отличающиеся по конструкции и способу действия, – радиальные, гидроциклоны, центрифуги и др. [33, 34]. В последние годы применяются пластинчатые сгустители [35-37]. Отличительной особенностью сгустителей пластинчатого типа от традиционных радиальных являются меньшие габаритные размеры при равной удельной нагрузке на единицу площади осаждения.

Несмотря на значительные и подтвержденные практически преимущества пластинчатых сгустителей, аппараты этого типа к настоящему времени еще не нашли широкого применения в технологиях гидротранспорта в схемах сгущения хвостовых пульп для получения гидросмесей высоких концентраций. Проблема заключается в недостаточном теоретическом и экспериментальном обосновании процесса осаждения твердых частиц в межпластинных каналах и механизма формирования структуры сгущенного осадка. Это не позволяет создать эффективную конструкцию пластинчатого сгустителя для получения высококонцентрированных гидросмесей для приготовления закладочных смесей [38-40].

Целью работы является выявление параметров, при которых оборудование будет функционировать с меньшими энергетическими и эксплуатационными затратами. В работе рассматриваются в совокупности процессы сгущения (обезвоживания) тонкодисперсных хвостов обогащения, гидравлического транспортирования высококонцентрированных гидросмесей как инертного наполнителя закладочной смеси и зависимости энергетических характеристик грунтовых насосов от реологических свойств перекачиваемых закладочных смесей.

Методы. Гидрофицированный агрегат (рис.1) для подготовки и транспортирования закладочных смесей состоит из последовательно смонтированных блоков: I – расхода (приема) поступающей гидросмеси; II – обезвоживания; III – подачи сгущенной смеси в грунтовый насос; IV – гидротранспорта; V – удаления слива.

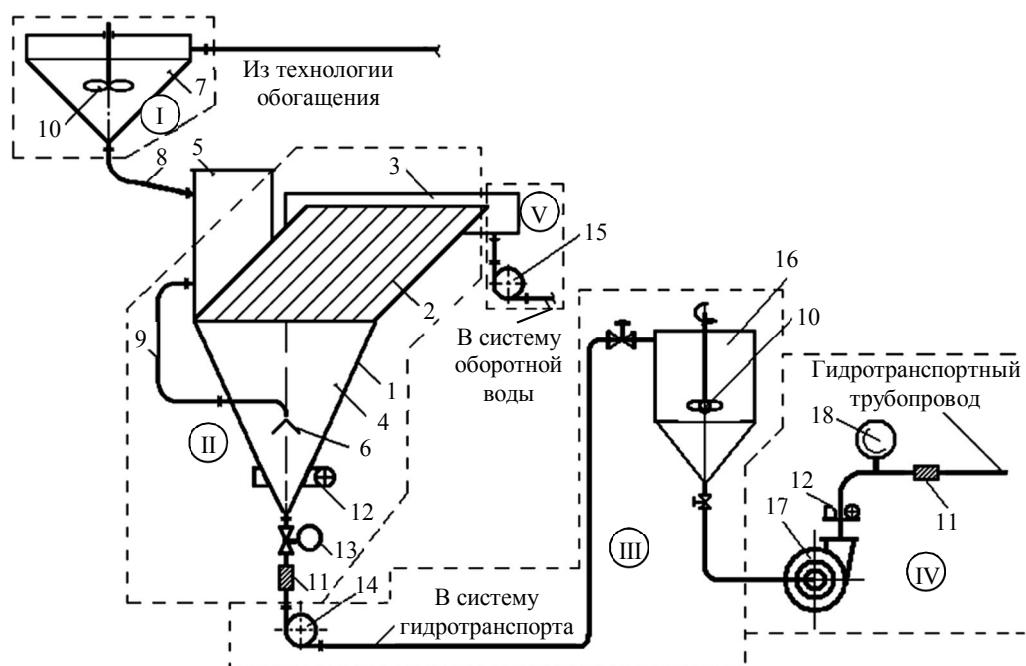


Рис.1. Схема гидрофицированного агрегата для сгущения и гидротранспорта закладочных смесей



Сгущаемая гидросмесь (текущие хвосты обогащения руды) поступает из технологии обогащения в бункер исходной пульпы 7 с импеллером 10 (для предотвращения осаждения твердых частиц). Далее гидросмесь по подводящему трубопроводу 8 заполняет уравнительную емкость 5 и по трубопроводу 9 загружается объем сгустителя (бункер-накопитель 4, блок наклонных пластин 2 и сливной лоток 3). Гидросмесь протекает между пластинами сгустителя 1 с отбойным козырьком 6, где происходит выпадение (седиментация) твердых частиц на всей длине канала. Осадок твердых частиц, формирующийся на нижних пластинах, под действием собственного веса перемещается сверху вниз и осаждается в нижней части бункера-накопителя 4, где формируется сгущенная гидросмесь. Обратная вода переливается через верхние кромки пластин в сливной лоток 3, установленный по всему периметру блока пластин, и удаляется с помощью насоса 15 в хвостохранилище.

Сгущенная до необходимой концентрации гидросмесь при помощи пульпонасоса 14 подается по трубопроводу с задвижкой 13 в бункер 16 сгущенной гидросмеси, далее при помощи грунтового насоса 17 поступает в гидротранспортный трубопровод и транспортируется на закладочный комплекс, где производится подготовка твердеющей закладочной смеси. Объем смеси и давление данной системы замеряется расходомерами 11 и 12 и манометром 18.

Отличительной особенностью рассматриваемого гидрофицированного комплекса является то, что все технологические операции приготовления закладочной смеси и гидравлического транспортирования объединены в одном агрегате. В такой комплектации упрощаются процессы регулирования и управления технологическим процессом сгущения и гидравлического транспорта сгущенной закладочной смеси. Исследования гидрофицированного комплекса по представленной на рис.1 схеме проводились в лаборатории Горного университета на опытном образце пластинчатого сгустителя. В качестве опытных гидросмесей использовались хвосты обогащения медной руды Джезказганского ГМК.

Основными элементами агрегата для сгущения и гидравлического транспортирования являются пластинчатый сгуститель и грунтовый насос. Особенностью рабочего процесса пластинчатых (тонкослойных) сгустителей является то, что благодаря особой конструкции сгустительного блока 2 улавливаются и отправляются в сгущенный продукт твердые частицы хвостов обогащения мелких классов, до 0,038 мм. Принцип работы пластинчатых сгустителей – противоточный. Сгущаемый поток, содержащий частицы заданного гранулометрического состава движется снизу вверх, а обезвоженный осадок твердых частиц – по нижним пластинам в противоположном направлении – сверху вниз и накапливается в бункере-накопителе 4. Режим работы гидротранспортного агрегата контролируется набором приборов: плотномеры ВИП-2МР; индукционные расходомеры ЭМИС-МАГ 270 на выходе из бункера-накопителя и на нагнетательном патрубке грунтового насоса.

Основным расчетным параметром пластинчатых сгустителей является длина зоны осаждения твердых частиц – пластин и канала, образованного нижней и верхней пластиной. На рис.2 показана схема осаждения твердых частиц в пространстве между нижней (1) и верхней (2) пластинами. На рис.2: L – общая длина пластин; H – расстояние между нижней и верхней пластинами; α – угол наклона пластин, градус; w^* , w_* – максимальная и минимальная скорость осаждения твердых частиц, м/с; x^* , x_* – расстояние формирования осадка твердого материала на нижних пластинах; $v_f(y)$ – средняя по площади сечения канала скорость входного потока гидросмеси, м/с; I и II – области полного замутнения (присутствуют все частицы гранулометрического состава гидросмеси) и постепенного осветления входного потока гидросмеси.

Стационарный поток гидросмеси в канале между пластинами обеспечивается при ограниченном значении чисел Рейнольдса и Фруда. Для стационарного режима течения справедливо предположение о гравитационном сносе

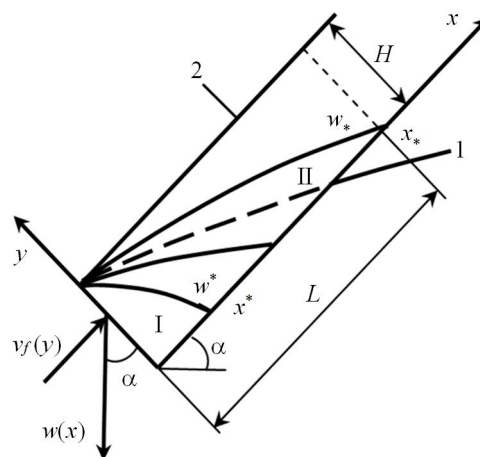


Рис.2. Схема движения твердых частиц в межпластинном канале пластинчатого сгустителя



твердых частиц гранулометрического состава с линий тока гидросмеси. Предварительные эксперименты показали, что критическое число Рейнольдса для обеспечения ламинарного и стационарного режима не превышает 400, т.е.

$$Re_{кр} = \frac{H_p v_c}{\nu} = 400 \leq 10^3,$$

где H_p – высота канала, м; v_c – средняя скорость гидросмеси, м/с; ν – кинематическая вязкость гидросмеси, m^2/c .

Для стационарного режима течения гидросмеси были получены значения основных конструктивных и геометрических параметров пластинчатого сгустителя (табл.1), совокупность которых составляет математическую модель рабочего процесса пластинчатого сгустителя.

Таблица 1

Конструктивные, геометрические параметры и характеристики пластинчатого сгустителя

Параметр	Полученные значения
Средняя скорость гидросмеси, м/с	$v_c = \sqrt[3]{\frac{1}{4} g \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 400 \cdot 1,017 \cdot 10^{-6}} = 0,008$
Высота канала, м	$H_p = \frac{1,017 \cdot 10^{-6} \cdot 400}{0,008} = 0,05$
Участок пластин с ламинарным потоком, м	$L_{лам} = \frac{0,008 \cdot 0,05}{7,74 \cdot 10^{-4} (\rho_s - 1)} = \frac{0,517}{\rho_s - 1}$ Для $\rho_s = 2,4 \text{ т/м}^3$ (плотность твердого вещества) $L_{лам} = 0,369$
Общая длина пластин, м	$L = 1,137 / (\rho_s - 1)$; для $\rho_s = 2,4 \text{ т/м}^3$ $L = 0,82$
Угол наклона пластин, град	$\alpha = \frac{55}{2} + \frac{1}{2} \arccos \frac{2}{3} \cos 55 = 62$
Площадь каналов, m^2	$S = \frac{Q_i}{0,008} = 125 Q_i$
Площадь слива, m^2	$S_f = \frac{125 Q_i}{\sin 62} = 141,6 Q_i$
Высота наклонной части, м	$H_{н.бл} = \frac{1,137 \sin 62}{\rho_s - 1} = \frac{1,04}{\rho_s - 1}$; $H_{н.бл} = 0,742$ при $\rho_s = 2400 \text{ кг/м}^3$
Вместимость нижней части, m^3	$W_t = \frac{Q_i \cdot 0,08}{c_v} \cdot 0,95 \cdot 1200 = 91,2 \frac{Q_i}{c_v}$
Производительность по твердому материалу, т/ч	$q_s = 3,6 Q_i \cdot 0,08 \rho_s \cdot 0,95 = 0,274 Q_i \rho$
Конструктивные и геометрические параметры сгустителя: 1 – разгрузочный канал; 2 – бункер-накопитель; 3 – загрузочный трубопровод; 4 – блок пластин; 5 – уравнивающая емкость; 6 – седиментационный канал; 7 – сливной лоток; 8 – сливной канал; 9 – наклонные пластины	



Из приведенных расчетов видно, что геометрические и конструктивные характеристики рабочего процесса пластинчатого сгустителя определяются режимом течения гидросмеси в межпластинных каналах Re , гидравлической крупностью твердых частиц гранулометрического состава $P(d_i)$, производительностью на входе в сгуститель Q_i .

Обсуждение результатов. Для проверки адекватности полученной математической модели были проведены эксперименты. Исследования процессов сгущения производились на специально разработанном лабораторном образце тонкослойного пластинчатого сгустителя (рис.3).

Исследуемая гидросмесь с заданными концентрацией и гранулометрическим составом твердых частиц загружается в расходный бак и перекачивалась по экспериментальному контуру. При достижении установившегося режима работы стенда (через 5-10 мин) отбирались пробы на сливе сгустителя (из трубы 13) и в его разгрузке (3). Пробы анализировались на плотность, определялась концентрация твердых частиц. В процессе экспериментов измерялась высота сгущенного слоя в нижней части сгустителя через прозрачную вставку. По характеру изменения высоты сгущенного слоя определялась стабильность режима работы сгустителя. Данные по содержанию твердых частиц в сливе и разгрузке использовались для определения эффективной площади сгущения по исходному, сгущенному и сливному продуктам. По результатам работы на нескольких концентрациях твердой фазы с учетом удельных параметров сгустителя выбирался наиболее эффективный режим по величине максимальной концентрации в сгущенном продукте и меньшему содержанию твердого в сливе пульпы. Экспериментальные результаты по удельным параметрам пересчитывались на работу промышленных образцов гравитационных сгустителей.

При выполнении экспериментальных исследований на лабораторном пластинчатом сгустителе, производились замеры исходного потока пульпы, приготовленной из хвостов обогащения медной руды. Содержание твердой фазы на входе в сгуститель составляло около 5 % по объему смеси $c_{исх}$. Производительность загрузочного насоса (2 на рис.3) составляла около 5 л/мин. Производительность системы по твердому материалу составляла около $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{мин}$ (0,675 кг/мин). В процессе экспериментов замерялось время осаждения твердой фазы в нижней части сгустителя до заданной высоты бункера-накопителя, по которому определялась скорость стесненного осаждения твердых частиц. Высота слоя осевших частиц наблюдалась через стеклянную вставку. Изменение расхода сгущенной гидросмеси на выходе из сгустителя с помощью пробкового крана на отводящей трубе меняло концентрацию твердых частиц в сгущенной гидросмеси. Измерялся расход осветленной воды и содержание в ней твердых частиц. Для измерения распределения концентрации твердых частиц по высоте сгустителя (по высоте вертикальной части) в корпусе были просверлены отверстия диаметром 10 мм, через которые отбирались пробы пульпы в специальные тарированные емкости [30]. После отбора пробы отверстия заглашались пластмассовыми заглушками. По времени наполнения мерной емкости определялся расход. Концентрация твердых частиц в пробах определялась взвешиванием на рычажных весах с разновесами. Основные измеряемые величины: время отбора пробы t , с; измерение объема отобранной пробы $W_{пр}$, м^3 ; взвешивание пробы $G_{пр}$, г; высота слоя уплотненного осадка h , мм; площадь сечения прохождения пульпы $S_{эф}$, мм^2 ; количество твердой фазы в гидросмеси $q_{ТВ}$, т; концентрация твердой фазы $c_{ТВ}$, %.

По значениям этих параметров рассчитывались:

- производительность сгустителя в разгрузке аппарата

$$Q_{сг} = \frac{W_{пр}}{t};$$

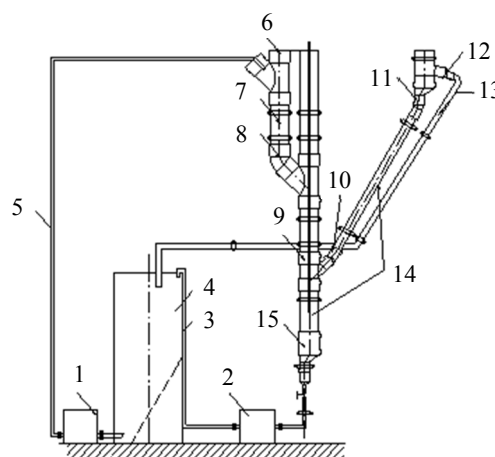


Рис.3. Схема лабораторного пластинчатого сгустителя

- 1, 2 – насосные агрегаты; 3 – отвод сгущенной гидросмеси; 4 – расходный бак; 5 – загрузочная труба; 6 – входная емкость; 7 – успокоительная емкость; 8 – переход; 9, 15 – бункер-накопитель; 10 – наклонный модуль; 11 – переход на сливной трубопровод; 12, 13 – сливная труба; 14 – стеклянная вставка $\varnothing 50 \text{ мм}$



- плотность сгущенной гидросмеси

$$\rho_{см} = \frac{G_{пр}}{W_{пр}};$$

- удельная нагрузка на эффективную площадь сгущения

$$A_{п} = \frac{Q_{сг}}{S_{эф}} = \frac{4Q_{сг}}{\pi D^2} \text{ (по пульпе);}$$

$$A_{п} = \frac{4q_{тв}}{S_{эф}} = \frac{4Q_{сг} c_{тв} \rho_{тв}}{\pi D^2} \text{ (по твердому материалу),}$$

где D – диаметр бункера-накопителя лабораторного сгустителя, $D = 50$ мм; $\rho_{тв}$ – плотность хвостов обогащения медной руды, $\rho_{тв} = 2700$ кг/м³.

Опытные данные по сгущению гидросмеси хвостов обогащения медной руды в лабораторном пластинчатом сгустителе приведены в табл.2.

Таблица 2

Опытные данные по исследованию сгущения гидросмеси хвостов обогащения медной руды

Время, с	Объем пробы, мл	Вес пробы, г	Плотность смеси, кг/м ³	Концентрация, %	Удельная нагрузка по пульпе, м ³ /(ч·м ²)	Удельная нагрузка по твердому материалу, т/(ч·м ²)	Высота осадка, м
15	312,5	413,43	1323	20,0	38,21	18,34	0,318
20	277	413,40	1492	29,0	25,40	20,57	0,212
25	260	429,50	1652	38,4	19,10	20,68	0,159
30	250	453,06	1812	47,8	16,30	22,00	0,127

Результаты экспериментов и опытные данные свидетельствуют о зависимости геометрических параметров сгустителя от значения концентрации в разгрузке аппарата. При изменении концентрации изменялись высота слоя осадка в разгрузочной части сгустителя и удельная нагрузка на эффективную площадь сгущения. При изменении концентрации в разгрузке сгустителя от 0,2 до 0,5 % высота уплотненного слоя изменялась от 318 до 127 мм. Удельная нагрузка при этом изменялась от 38,21 м³/(ч·м²) по пульпе и 18,34 т/(ч·м²) по твердому материалу до 16,29 м³/(ч·м²) и 22 т/(ч·м²). Причем удельная нагрузка по пульпе уменьшалась с увеличением концентрации сгущенной гидросмеси, а нагрузка по твердой фазе потока – увеличивалась.

В процессе экспериментов производились отборы проб из наклонного модуля в трех его сечениях: на входе, в середине и на выходе (слив сгустителя). Гранулометрический состав твердых частиц в отобранных пробах определялся ситовым анализом. Для этого пробы отфильтровывались, сушились и рассеивались через набор сит. Определение количества материала по классам крупности производилось путем взвешивания отдельных классов. Точность ситового анализа составляла около 5 %. На основании ситового анализа производился расчет средневзвешенного диаметра твердых частиц.

В качестве предварительного вывода по результатам экспериментов на лабораторном сгустителе с тонкослойным модулем отметим, что основная часть мелких частиц осаждается в наклонном канале, а геометрические размеры сгустителя определяют величину концентрации твердой фазы в сгущенном продукте. При изменении расхода в разгрузке сгустителя и постоянном расходе на его входе изменяется высота уплотненного осадка и концентрация твердого в сгущенной гидросмеси. Производительность сгустителя по твердому материалу и расход на входе во всех экспериментах оставались постоянными.

Гидравлический транспорт сгущенной гидросмеси на закладочный комплекс. Анализ экспериментальных результатов показывает, что гидросмесь в разгрузке сгустителя формируется высококонцентрированной вязкопластической гидросмесью, течение которой описывается формулой Шведова – Бингама [41]:



$$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{dV}{dn} \right),$$

где τ – касательное напряжение; τ_0 – статическое напряжение; μ – коэффициент динамической вязкости; $\frac{dV}{dn} = \dot{\gamma}$ – градиент скорости (скорость сдвига).

Данный предварительный вывод о характере сгущенной гидросмеси подтверждается экспериментальными данными, полученными с помощью ротационного вискозиметра. В формуле Шведова – Бингама определяющим параметром является вязкость, которая изменяется в зависимости от концентрации твердых частиц от минимальных (вязкость оборотной воды) до максимальных значений, характерных для пастовых гидросмесей. Эксперименты проводились на автоматическом универсальном ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1.

В процессе экспериментов определялась зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига для различных концентраций твердых частиц c_v в объеме исследуемой гидросмеси (табл.3).

Таблица 3

Значения измеренных параметров по модели Шведова – Бингама

Скорость сдвига, c^{-1}	Напряжения сдвига (Па) при различных объемных концентрациях твёрдого материала				
	$c_v = 0,233$	$c_v = 0,4$	$c_v = 0,498$	$c_v = 0,525$	$c_v = 0,562$
32,52	3,18	6,88	17,06	33,58	82,93
33,25	3,20	7,00	17,20	33,92	83,33
34,67	3,48	7,23	17,48	34,31	84,11
35,71	3,55	7,42	17,68	34,60	84,68
35,89	3,65	7,44	17,71	34,65	84,80
37,06	3,78	7,63	17,94	34,98	85,37
41,11	4,02	8,29	18,74	35,98	87,37
41,33	4,08	8,32	18,78	36,04	87,47
41,78	4,12	8,40	18,87	36,14	87,70
41,70	4,11	8,38	18,85	36,10	87,65
42,15	4,15	8,48	18,94	36,26	87,87
42,66	4,18	8,57	19,08	36,44	88,12
44,33	4,20	8,86	19,45	37,10	88,94
44,87	4,24	8,95	19,56	37,29	89,20
46,22	4,41	9,19	19,84	37,77	89,39
46,61	4,46	9,25	19,92	37,91	90,10
48,11	4,65	9,54	20,23	38,45	90,80
48,21	4,67	9,55	20,25	38,48	90,84
50,24	4,92	9,87	20,68	39,22	91,78
52,58	5,22	10,24	21,20	39,83	92,87
53,00	5,27	10,30	21,26	39,94	93,06
54,53	5,30	10,50	21,50	40,34	93,77
54,80	5,32	10,60	21,54	40,41	93,89
54,89	5,33	10,61	21,55	40,43	93,93

Экспериментальные данные позволяют рассчитать динамическую вязкость гидросмесей как отношение напряжения сдвига к градиенту скорости сдвига при соответствующих значениях начального напряжения.

Экспериментальная кривая вязкости описывается зависимостью вида

$$\eta = \mu_0 e^{kc} = 1,017 \cdot 10^{-3} e^{9,933c},$$

где μ_0 – коэффициент динамической вязкости чистой воды, Па·с.



Формула устанавливает связь вязкости сгущенной гидросмеси и концентрации твердых частиц и определяет удельные потери напора при гидротранспорте сгущенных гидросмесей.

Для установления функциональной зависимости потерь напора при течении гидросмеси по трубопроводу запишем формулу Шведова – Бингама в виде

$$\tau - \tau_0 = \mu \dot{\gamma} = \tau (1 - \sigma),$$

где $\sigma = \tau_0 / \tau$ – относительное напряжение.

Для статического напряжения можно записать:

$$\tau_0 = \frac{\sigma}{1 - \sigma} \mu \dot{\gamma},$$

а общее напряжение будет равно

$$\tau = \frac{\mu \dot{\gamma}}{1 - \sigma}.$$

Выражение для потерь давления при течении гидросмеси по трубопроводу:

$$i = \frac{4\mu \dot{\gamma}}{(1 - \sigma)D}.$$

Потери давления будут равны

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{\rho g h}{l} \rho g i_{\text{см}}; \quad \tau = i_{\text{см}} \frac{\rho g D}{4},$$

где $i_{\text{см}}$ – потери напора гидросмеси, м/м; ρ – плотность смеси, кг/м³;

$$i_{\text{см}} = \frac{4\mu \dot{\gamma}}{(1 - \sigma)\rho g D}.$$

Если скорость сдвига для ламинарного режима течения равна $\dot{\gamma} = 8v_m / D$ и число Рейнольдса $Re = vD\rho / \mu$, то

$$i_{\text{см}} = \frac{32v^2}{(1 - \sigma)Re g D}.$$

В итоге формула потерь напора для вязкопластической гидросмеси запишется в следующем виде:

$$i_{\text{см}} = \lambda_{\text{см}} \frac{v^2}{2gD} = \frac{64}{Re(1 - \sigma)} \frac{v^2}{2gD}.$$

В отличие от известной зависимости удельных потерь напора Дарси – Весбаха для обычных гидросмесей, полученная формула учитывает относительные значения касательных напряжений, возникающих при течении вязкопластической гидросмеси. Относительное напряжение сдвига изменяется от 0 до 1. Если относительное напряжение равно 0, гидросмесь не проявляет вязкопластических свойств и представляет собой обычную ньютоновскую жидкость. Если относительное напряжение равно 1, то гидросмесь представляет собой твердое тело. Главным параметром, определяющим тип гидросмеси (ньютоновская или вязкопластическая), является объемная концентрация твердой фазы.

Заключение. В результате проведенного комплексного теоретического и экспериментального исследования гидрофицированного агрегата для сгущения и гидротранспорта высококонцентрированных гидросмесей продуктов обогащения полиметаллической руды на закладочные комплексы горного предприятия решена важная задача создания ресурсосберегающей техники и технологии с разработкой научно обоснованной методики расчета процессов сгущения и гидравлического транспорта. В ходе исследований установлено:



- Эффективным для подготовки закладочной смеси является гидрфицированный агрегат, включающий устройство для сгущения хвостовой пульпы до высоких концентраций твердой фазы и грунтовый насос для перекачки сгущенной закладочной смеси на закладочные комплексы горного предприятия.
- Движение хвостовой пульпы в канале между пластинами сгустителя сопровождается осаждением твердых частиц по всей длине нижних пластин. Характер осаждения твердого материала зависит от скорости стесненного падения твердых частиц (гидравлической крупности), являющейся функцией вязкости пульпы. Физической моделью процесса сгущения (обезвоживания) гидросмесей хвостов обогащения является гипотеза гравитационного сноса твердых частиц с линий тока, взятая за основу при разработке алгоритма расчета конструктивных, технологических и геометрических параметров сгустителей пластинчатого типа.
- Закон распределения твердых частиц по длине зоны осаждения, наличие в сгущенном осадке преимущественно частиц мелких классов крупности и высокая степень концентрации твердых частиц свидетельствуют о том, что сгущенный продукт характеризуется неньютоновскими реологическими свойствами.
- Для механизма течения исследуемых гидросмесей наиболее приемлема теория деформации неньютоновских жидкостей Шведова – Бингама и академика П.И.Ребиндера, в соответствии с которой при течении структурированных гидросмесей характерны три режима: с неразрушенной структурой потока при $\tau < \tau_0$ (ламинарный режим течения); с непрерывно разрушающейся структурой, когда $\tau \geq \tau_0$ (переходной режим течения от ламинарного к турбулентному течению); с разрушенной структурой при $\tau \gg \tau_0$ (развитый турбулентный режим течения).
- Расход гидросмеси и потери напора являются функциями реологических характеристик вязкопластической гидросмеси и могут быть рассчитаны по выведенным расчетным зависимостям, которые в совокупности определяют математическую модель течения вязкопластических гидросмесей хвостов обогащения руд по гидротранспортным трубопроводам.
- Результаты теоретических исследований процессов сгущения и гидротранспорта сгущенных гидросмесей подтверждаются опытными данными, полученными при выполнении экспериментальных исследований на опытном образце пластинчатого сгустителя и лабораторной гидротранспортной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабочкин Г.И. Исследование влияния технологической схемы работы и длины лавы на удельный расход электрической энергии очистного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2. С. 139-149. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-139-149
2. Пичуев А.В., Мартышкин В.В. Комплексная оценка энергоэффективности тоннелепроходческих механизированных комплексов // Технический оппонент. 2019. № 2. С. 26-28.
3. Садридинов А.Б., Пичуев А.В., Карпенко С.М. Комплексный анализ показателей энергоэффективности промышленных предприятий // Энергобезопасность и энергосбережение. 2018. № 2. С. 15-17. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-2-15-17
4. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Чжун Чан, Масленников С.А. Использование хвостов обогащения в приготовлении твердеющих закладочных смесей // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. № 2 (50). С. 95-101. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-2-95-101
5. Куликова А.А., Ковалева А.М. Применение хвостов обогащения в качестве закладки выработанного пространства рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2-1. С. 144-154. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-144-154
6. Смирнов О.Ю. Исследование условий применения систем разработки месторождений с закладкой в различных горно-геологических условиях // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 5. С. 14-20. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-14-20
7. Alexakhin A., Sala D., Sala D., et al. Reducing energy costs for pipeline transportation // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 57. P. 24-32. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.021
8. Aben Kh., Krupnik L.A., Shaposhnik Y.N. Technology of blasting at the contact with backfilled stopes // Горный журнал Казахстана. 2017. № 11. С. 4-5.
9. Lèbre É., Corder G.D., Golev A. Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource // Minerals Engineering. 2017. Vol. 107. P. 34-36. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.12.004
10. Крупник Л.А., Абен Х.Х., Мырзахметов С.С. и др. Отбойка руды на контакте с закладкой при разработке подкарьерных запасов // Взрывное дело. 2017. № 117-74. С. 205-213.
11. Садридинов А.Б., Пичуев А.В., Петуров В.И. Повышение энергоэффективности горнопроходческих работ // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т. 1. С. 641-645.



12. Александрова Т.Н., Потемкин В.А. Разработка методики оценки процесса гидроциклонирования с учетом реологических параметров минеральной суспензии // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 908-916. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.12
13. Власак П. Течение крупнозернистых гидросмесей в трубах // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 338-341. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.338
14. Гембицкая И. М., Гвоздецкая М. В. Трансформация зерен технологического сырья при получении мелкодисперсных порошков // Записки Горного института. 2022. Т. 249. С. 401-407. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9
15. Ревель-Муроз П.А., Фридлянд Я.М., Кутуков С.Е. и др. Оценка гидравлической эффективности по данным мониторинга технологических режимов эксплуатации // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. № 1. С. 8-19. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-1-8-19
16. Устинова Я.В., Контев В.Ю., Крук М.Н. Механические свойства калийсодержащей руды как фактор выбора способа обработки материала // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. № 6. С. 21-30.
17. Cheng Q., Zheng A., Yang L., et al. Studies on energy consumption of crude oil pipeline transportation process based on the unavoidable exergy loss rate // Case Studies in Thermal Engineering. 2018. Vol. 12. P. 8-15. DOI: 10.1016/j.csite.2018.02.005
18. Авксентьев С.Ю., Сержан С.Л., Труфанова И.С. Определение параметров гидротранспорта хвостов обогащения железной руды качканарского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11. С. 3-14. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-11-3-14
19. Большунова О.М., Ватлина А.М., Коржев А.А. Влияние концентрации гидросмеси на энергоэффективность работы системы насос-пульпопровод // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021, 22-23 апреля 2021, Санкт-Петербург, Россия. Санкт-Петербургский горный университет, 2021. С. 147-149.
20. Александров В.И., Тимухин С.А., Махараткин П.Н. Энергетическая эффективность гидравлического транспорта хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 330-337. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.330
21. Бауман А. В. Анализ агрегативной и седиментационной устойчивости технологических пульп // Обогащение руд. 2018. № 2. С. 55-60. DOI: 10.17580/or.2018.02.10
22. Кибирев В.И., Бауман А.В., Никитин А.Е. О создании современных российских сгустителей // Горная промышленность. 2017. № 5 (135). С. 33-35.
23. Кузьмин Е.В., Святецкий В.С., Марковец В.В. Сгущение отходов переработки урановых руд с получением пасты для подземного размещения // Горный журнал. 2018. № 7. С. 73-77. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.14
24. Avksentieva S.Y., Avksentieva E.Y. Determining the parameters of the hydraulic transport of tailings for processing iron ore // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194. № 032003. DOI: 10.1088/1755-1315/194/3/032003
25. Qinglin Cheng, Anbo Zheng, Lu Yang et al. Studies on energy consumption of crude oil pipeline transportation process based on the unavoidable exergy loss rate // Case Studies in Thermal Engineering. 2018. Vol. 12. P. 8-15. DOI: 10.1016/j.csite.2018.02.005
26. Контев В. Ю. Выбор транспортных машин для проектирования транспортных систем горных предприятий // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017, 23-24 марта 2017, Санкт-Петербург, Россия. Санкт-Петербургский горный университет, 2017. С. 57-61.
27. Mingzhi Li, Jianping He, Ruhong Jiang et al. Analysis of minimum specific energy consumption and optimal transport concentration of slurry pipeline transport systems // Particology. 2021. Vol. 66. P. 38-47. DOI: 10.1016/j.partic.2021.08.004
28. Zhen Li, Songlin Wu, Shiwen Zhang et al. Optimization of Land Reuse Structure in Coal Mining Subsided Areas Considering Regional Economic Development: A Case Study in Pei County, China // Sustainability. 2020. Vol. 12. Iss. 8. № 3335. DOI: 10.3390/su12083335
29. Masip-Macia Y., Pedrera J., Castro M.T. et al. Analysis of Energy Sustainability in Ore Slurry Pumping Transport Systems // Sustainability. 2019. Vol. 11. Iss. 11. № 3191. DOI: 10.3390/su11113191
30. Фролов Д.В. Исследование и обоснование подходов к оптимизации процессов сгущения угольных шламов // Вестник Кузбасского государственного университета. 2018. № 2(126). С. 61-69. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-2-61-69
31. Kaiwei Chu, Jiang Chen, Yu A.B., Williams R.A. Numerical studies of multiphase flow and separation performance of natural medium cyclones for recovering waste coal // Powder Technology. 2017. Vol. 314. P. 532-541. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.10.047
32. Watling H.R., Collinson D.M., Watling R.J., Shiers D.W. Simulated heap leaching and recovery of multiple elements from a mineralised black shale // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 167. P. 48-57. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.10.015
33. Jinyi Tian, Long Ni, Tao Song et al. An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations // Separation and Purification Technology. 2018. Vol. 206. P. 268-285. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.06.015
34. Akhbarifar S., Shiruani M. Improving cyclone efficiency for small particles // Chemical Engineering Research and Design. 2019. Vol. 147. P. 483-492. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.05.026
35. Тусупбаев Н.К., Батырбаева А., Амантай Н. и др. Изучение процесса сгущения и фильтрации свинцовоцинковых концентратов присутствии неионогенных полимеров и их смеси с анионными полиэлектролитами // Материалы Международной практической интернет-конференции «Актуальные проблемы науки». 22 ноября 2018, Алматы, Казахстан. Satbaev University, 2018. С. 1-6. DOI: 10.31643/2018.025
36. Бусарев А.В., Селюгин А.С., Ягин Я.В. Исследование процессов очистки нефтесодержащих стоков машиностроительных предприятий с применением напорных гидроциклонов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 8-2. С. 190-194.
37. Vahidifar S., Saffarian M.R., Hajidavalloo E. Introducing the theory of successful settling in order to evaluate and optimize the sedimentation tanks // Meccanica. 2018. Vol. 53. P. 3477-3493. DOI: 10.1007/s11012-018-0907-2
38. Svetlov A., Makarov D., Selivanova E. et al. Heap leaching and perspectives of bioleaching technology for the processing of low-grade copper-nickel sulfide ores in Murmansk region, Russia // Journal of the Polish Mineral Engineering Society (Inzynieria Mineralna). 2017. Vol. 18. № 1 (39). P. 51-57.



39. Bagheri G., Bonadonna C. On the drag of freely falling non-spherical particles // Powder Technology. 2016. Vol. 301. P. 526-544. DOI: [10.1016/j.powtec.2016.06.015](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.015)
40. Wachter S., Jakobs T., Kolb T. Effect of Solid Particles on Droplet Size Applying the Time-Shift Method for Spray Investigation // Applied Science. 2020. Vol. 10. Iss. 21. № 7615. DOI: [10.3390/app10217615](https://doi.org/10.3390/app10217615)
41. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Сабылина Н.Р. и др. Исследование установившегося течения вязкопластического битумного вяжущего, описываемого моделью Шведова-Бингама, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 3. С. 158-177. DOI: [10.31675/1607-1859-2019-21-3-158-177](https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-3-158-177)

Авторы: **В.И.Александров**, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-2459-4168> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **А.М.Ватлина**, канд. техн. наук, инженер-конструктор, vatlina.anka@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3411-1994> (ООО «Сигнал», Санкт-Петербург, Россия), **П.Н.Махараткин**, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-9376-061X> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Применение метода опорных векторов для обработки результатов обогащения оловянных руд методом центробежной концентрации

А.Е.БУРДОНОВ¹✉, Н.Д.ЛУКЬЯНОВ¹, В.В.ПЕЛИХ², В.М.САЛОВ¹¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия² ООО «Сибикон», Иркутск, Россия

Как цитировать эту статью: Бурдонов А.Е., Лукьянов Н.Д., Пелих В.В., Салов В.М. Применение метода опорных векторов для обработки результатов обогащения оловянных руд методом центробежной концентрации // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 552-561. EDN BDULJO

Аннотация. Актуальность исследований обусловлена получением новых знаний об особенностях применимости метода опорных векторов, относящегося к инструментам машинного обучения, для решения задач математического моделирования горно-обогачительного оборудования. Цель исследований – статистический анализ результатов полупромышленных испытаний технологии Knelson CVD на оловянном сырье с помощью метода опорных векторов и разработка математических моделей, пригодных для дальнейшей оптимизации технологических параметров оборудования. Объектами исследований являлись продукты, полученные в результате работы гидроциклонов, а также технологические параметры работы центробежных концентраторов. В работе применяются классические методы математической статистики, метод наименьших квадратов для построения модели линейной регрессии, метод опорных векторов, реализованный на базе библиотеки Scikit-learn, а также метод верификации получаемых моделей на базе библиотеки ShuffleSplit. Представлено общее описание процесса проведения испытаний концентратора Knelson с непрерывной регулируемой разгрузкой применительно к обогащению оловянных руд. Полученные результаты обработаны с помощью метода опорных векторов. Получены регрессионные модели в виде полиномов второй степени и в виде радиально-базисных функций. Показана существенная нелинейность в зависимости между содержанием ценного компонента в хвостах и значениями технологических параметров аппарата.

Ключевые слова: гравитационное обогащение; концентрат; метод опорных векторов; теория управления; концентратор Нельсона; дифференциальные уравнения

Поступила: 11.05.2022

Принята: 13.02.2023

Онлайн: 18.05.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Добыча и переработка минерального сырья всегда являлись ключевыми вопросами национальной безопасности нашей страны [1]. На территории Российской Федерации выявлены практически все виды полезных ископаемых, а по некоторым из них наша страна входит в число мировых лидеров: железные руды, никель, медь, цинк, вольфрам и др. [2, 3]. Ключевым металлом, который используется в различных областях промышленности, является олово. Благодаря своим свойствам [4] олово находит широкое применение в легировании, лужении, пайке, и – самое важное – в электронной и микроэлектронной промышленности.

В конце 90-х – начале 2000-х гг. добыча олова в РФ была почти полностью прекращена. В 2010 г. было получено всего 100 т концентрата, хотя на территории России сосредоточены крупнейшие запасы олова в мире – более 2 млн т, из них более трех четвертей подсчитаны по категориям А + В + С1. Лидирующие позиции в оловодобывающей отрасли традиционно занимают Китай, который с середины 1990-х гг. обеспечивает не менее 30 % мировой добычи металла (около 900 месторождений), и Индонезия (20 %). В РФ в настоящее время на государственном учете находятся более 250 месторождений олова (рис.1)*.

* Олово России. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах». URL: <https://nedradv.ru/nedradv/ru/resources?obj=ab05b068239ede80d3dd35cf4058c0a8> (дата обращения 11.05.2022).



Рис. 1. Состояние сырьевой базы олова Российской Федерации

Объекты и методы. Металл в основном получают в результате переработки касситерита, который, как правило, обогащают с применением гравитационных методов и флотационного обогащения. Для достижения наибольших показателей эффективности извлечения на стадии флотационного обогащения используются новые реагентные режимы [5-7], проектируется новое оборудование – например, применение скоростной флотации в контуре измельчения, разработанной компанией Metso Outotec. Предлагаемая технология позволяет минимизировать переизмельчение ценного компонента, повысить производительность извлечения и снизить обводнение схемы обогащения [8].

Для извлечения крупных частиц металла применяют гравитационное обогащение, в частности центробежную концентрацию [9-11]. Однако в связи с особенностями минералогического состава [12] и несовершенством применяемых технологий, с хвостами обогащения уходит значительное количество ценного компонента, который при правильном подходе может быть извлечен и переработан.

Существуют различные технологии переработки таких материалов, которые постоянно обновляются [13, 14]. Тем не менее наиболее распространенными методами остаются именно обогащение с помощью гравитационных методов и флотационное обогащение.

Применение центробежных концентраторов [15, 16] в гравитационных методах переработки оловянных руд и продуктов их обогащения является показателем современности и эффективности схемы разработки сырья [17].

Ручная настройка (технологических параметров центробежных концентраторов, скорости вращения чаши, влияния характеристик исходного сырья, работы клапанов и т.д.) требует значительных финансовых и временных затрат, поэтому при их настройке чаще всего применяют методы математического моделирования. Авторами [18-20] предприняты попытки разработки модели работы центробежных концентраторов на базе классических регрессионных подходов. Однако предложенные решения не всегда подходят для получения достоверной модели на хвостах обогащения, поскольку существенно нелинейные зависимости при применении классических методов не позволяют учитывать скрытые взаимосвязи между параметрами работы концентратора. Целью данной работы является описание применения метода опорных векторов (относящегося к методам машинного обучения) к задаче построения нелинейных моделей работы центробежного концентратора на базе полиномиальных радиально-базисных функций ядра.

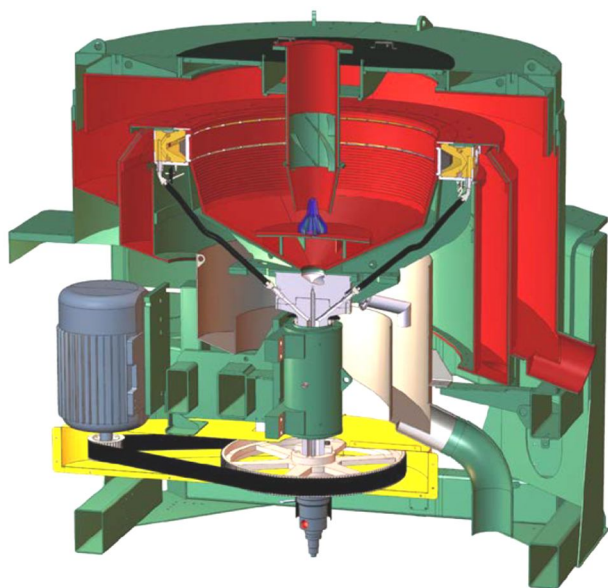


Рис.2. Концентратор Knelson KC-CVD64

Концентратор Knelson с непрерывной регулируемой разгрузкой (CVD) – это центробежный гравитационный сепаратор, предназначенный для извлечения больших масс полезного минерала, в котором применяются запатентованная FLSmidth Knelson технология флюидизации и система пережимных пневматических клапанов, обеспечивающих непрерывный выход концентрата одновременно с добавлением свежего питания (рис.2). Технология CVD используется преимущественно для извлечения основных металлов и промышленных минералов (самородной меди, ртути, танталита, касситерита, хромита и шеелита [21-23], а также благородных металлов [24, 25]).

Объектами исследований в данной работе являлись продукты, полученные в результате работы гидроциклонов (гидравлических классификаторов), а также технологические параметры

работы центробежных концентраторов. В работе применялись классические методы математической статистики, метод наименьших квадратов для построения модели линейной регрессии, метод опорных векторов, реализованный на базе библиотеки Scikit-learn, а также метод верификации получаемых моделей на базе библиотеки ShuffleSplit.

Методика. Технологические исследования проводились на трех технологических потоках обогатительной фабрики, а именно на разгрузке нескольких спиготов гидравлического классификатора. После подачи питания на полупромышленную установку были настроены промежуточные параметры, после чего подготовительный этап был завершен.

Разгрузка первого и второго спиготов гидравлического классификатора. Объединенный продукт самотеком подавался на установку. Содержание твердого в данном потоке составляло около 40-50 %, максимальная крупность частиц 4 мм. Для соблюдения требований к потоку питания, поступающему на полупромышленную установку, в трубопровод подачи питания была добавлена вода сопровождения и часть потока была отведена через байпас установки.

Этап 1. G-ускорение. Испытания проводились на разных скоростях вращения ротора – 60, 70, 80 и 90 G; производительность по твердому составила 1,73 т/ч; средний объемный поток 1,44 м³/ч; содержание олова в питании 1,24 %; время закрытия клапана было остановлено на 8 с. На основании проведенного комплекса испытаний была установлена оптимальная скорость вращения ротора, которая составила 80 G, и зафиксировано минимальное значение содержания Sn в хвостах концентрации – 0,31 %. Максимальное содержание Sn в хвостах установлено при скорости 90 G – 0,44 %.

Этап 2. Расход флюидизационной воды. Испытания с различным значением уставки расхода флюидизационной воды во время цикла обогащения концентратора проводились при скорости вращения ротора 80 G, времени закрытия клапана 12 с, времени открытия клапана 0,32 с. Содержание твердого в питании составляло 25 %, олова – 1,24 %. Расход флюидизационной воды варьировался от 25 до 45 л/мин.

Наилучшие результаты были зафиксированы при расходе воды 35 и 45 л/мин – извлечение составило 75,75 и 88,45 % соответственно. Однако содержание в концентрате более 2 % достигнуто только при расходе 45 л/мин. Для дальнейших тестов было принято использовать значение расхода флюидизационной воды, равное 45 л/мин.

Этап 3. Периодичность открытия пережимных клапанов. Следующим этапом являлось установление оптимального значения периодичности открытия пережимных клапанов концентратора. Время открытия 0,32 с; время закрытия клапана – 18, 24, 32, 48, 64 с; содержание Sn в питании 1,24 %.

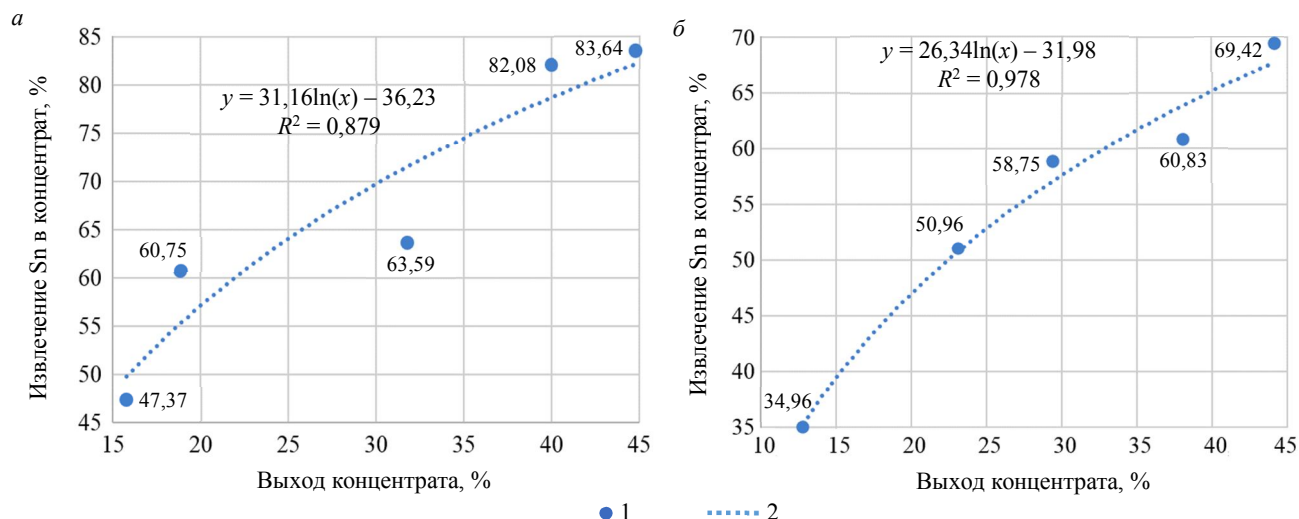


Рис.3. Зависимости извлечения Sn в концентрат от выхода концентрата при разгрузке первого и второго (а) и четвертого (б) спиготов гидравлического классификатора

1 – зависимость извлечения Sn от выхода; 2 – логарифмическая зависимость извлечения Sn в концентрат от выхода

В результате эксперимента установлено, что при увеличении уставки времени закрытия клапана содержание олова в концентрате линейно возрастает. Максимальное значение содержания в концентрате 3,23 % зафиксировано при значении уставки времени закрытия клапана 64 с. Однако при увеличении времени наблюдается повышение концентрации ценного компонента в хвостах. На основании полученных данных был построен график зависимости извлечения олова от выхода продукта (рис.3, а). В результате полупромышленных испытаний коэффициент концентрации варьировался от 1,7 до 3, извлечение олова составило 60-83 %.

Разгрузка третьего спигота гидравлического классификатора. На данном технологическом потоке была обеспечена стабильная подача материала на концентратор со средним содержанием твердого в потоке 20-21 % крупностью частиц $-1+0$ мм. Извлечение не опускалось ниже 80 % при степени концентрации 1,51-1,76 и содержании олова в концентрате 1,12-1,31 %. Наилучшие показатели извлечения в концентрат зафиксированы при скорости вращения ротора в 70 G и составили 87,84 %.

По результатам выполнения данного теста было выбрано значение уставки расхода флюидизационной воды, равное 35 л/мин. Извлечение олова в концентрат составило 88,93 %. Наиболее низкое извлечение ценного компонента (80,55 %) зафиксировано при расходе 40 л/мин.

С увеличением времени закрытия пережимных клапанов извлечение олова в концентрат уменьшается с 82,6 до 42,35 %, при этом значительно снижается выход концентрата – с 44 до 9 %.

Установлено, что на технологические показатели работы концентратора значительное влияние оказывает крупность питания. Для эффективного обогащения представленного сырья со снижением крупности необходимо снижать скорость вращения ротора и расход флюидизационной воды.

Разгрузка четвертого спигота гидравлического классификатора. Аналогичный комплекс исследований проведен на разгрузке четвертого спигота гидравлического классификатора (рис.3, б). На различных технологических потоках установлено изменение коэффициента концентрации от 1,5 до 2,7, при этом извлечение фиксировалось в диапазоне 34-70 %; содержание олова в концентрате варьировалось от 2,78 до 3,65 г/т.

Обсуждение результатов. В результате испытаний был получен массив данных 33 экспериментов (см. таблицу). В качестве независимых переменных выступают скорость вращения ротора x_1 , расход флюидизационной воды x_2 , время, в течение которого клапан открыт, x_3 и содержание ценного компонента в питании x_4 . В качестве выходных переменных принимается содержание ценного компонента в концентрате y_1 и хвостах y_2 .



Результаты опробования после применения процедуры нормирования

Скорость вращения ротора x_1	Расход флюид. воды x_2	Время x_3	Питание (Sn) x_4 , %	Концентрат (Sn) y_1 , %	Хвосты (Sn) y_2 , %
-1,90502	-1,20829	-0,73582	0,449332	-0,85767	-0,10721
-0,64771	-1,20829	-0,73582	1,326049	-0,43093	-0,2532
0,609607	-1,20829	-0,73582	0,830513	-0,49494	-0,69117
1,866921	-1,20829	-0,73582	1,402285	-0,69764	0,257765
0,609607	-0,69045	-0,47726	-0,92292	-0,18556	0,841728
0,609607	-0,17261	-0,47726	1,859703	-0,50561	0,038779
0,609607	0,345225	-0,47726	1,211695	0,35852	-0,54518
0,609607	0,863064	-0,47726	-0,80857	0,145154	-0,39919
0,609607	1,380902	-0,47726	0,373096	1,094632	-0,2532
0,609607	1,380902	0,292669	1,135458	0,134485	0,33076
0,609607	1,380902	0,805954	2,317121	0,582554	1,133709
0,609607	1,380902	1,832523	-0,54174	1,382676	2,812602
0,609607	1,380902	2,859092	1,09734	1,553369	1,790667
0,609607	0,863064	0,804671	-0,84668	0,347851	1,644676
-1,90502	-0,69045	-0,47854	-0,84668	-0,49494	-1,05615
-0,64771	-0,69045	-0,47854	-0,69421	-0,54829	-1,34813
0,609607	-0,69045	-0,47854	-0,92292	-0,69764	-1,20214
1,866921	-0,69045	-0,47854	-1,07539	-0,58029	-1,20214
-0,64771	-1,20829	-0,47854	0,296859	-0,10022	-0,39919
-0,64771	-0,17261	-0,47854	0,525568	-0,14289	-0,10721
-0,64771	0,345225	-0,47854	0,525568	-0,12155	-0,69117
-0,64771	0,863064	-0,47854	-0,80857	-0,6123	-0,69117
-0,64771	1,380902	-0,47854	-0,73233	-0,6123	-0,98316
-0,64771	0,345225	-0,09358	0,030032	0,070475	-0,69117
-0,64771	0,345225	0,291386	-0,35115	-0,53762	-2,95403
-0,64771	0,345225	0,804671	-0,35115	0,742578	0,257765
-0,64771	0,345225	1,83124	-0,12244	2,438838	0,841728
-0,64771	0,345225	2,857809	0,220623	3,238961	1,863662
-1,90502	-1,20829	-0,47854	-0,80857	-0,85767	-0,39919
-0,64771	-1,20829	-0,47854	-1,15163	-1,02836	-0,2532
0,609607	-1,20829	-0,47854	-1,53281	-1,18838	-0,2532
1,866921	-1,20829	-0,47854	-1,45657	-1,07103	-0,83717
0,609607	1,380902	-0,73582	0,373096	-0,32425	0,549746

Обработка полученных результатов для поиска наиболее адекватной модели, связывающей входные x_1 , x_2 , x_3 , x_4 и выходные y_1 , y_2 параметры процесса, проходила с использованием двух наиболее распространенных метрик: коэффициента детерминации R^2 и объясненной дисперсии EV . Применение подобной метрики подразумевает разделение исходного набора данных на две части – обучающую и тестовые выборки:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \tilde{y}_i)^2};$$

$$EV = 1 - \frac{D[y - \hat{y}]}{D[y]},$$

где m – количество векторов в тестирующей выборке; y_i – истинные значения параметра; \hat{y}_i – значение, рассчитанное на основе модели; \tilde{y}_i – среднее значение параметра при расчете по тестирующей выборке; D – дисперсия.

Для исключения влияния содержания выборок (обучающей и тестовой) на оценки моделей применяется кросс-валидация [26], когда из исходной выборки случайным образом k раз выбирается два подмножества без повторений. При этом расчет оценок также проводится k раз, и, таким образом, можно получить не зависящую от входных данных оценку эффективности модели. Ввиду



небольшого объема исходных данных разобьем исходную выборку в отношении 80:20 для обучающей и тестирующей части соответственно, а k примем равным пяти.

При использовании таких моделей наиболее целесообразным представляется применение уравнений регрессии. Сначала рассмотрим простую линейную модель для переменной y_1 (коэффициент детерминации $R^2 = 0,74$ на обучающей выборке):

$$y_1 = -0,038 - 0,023x_1 + 0,16x_2 + 0,698x_3 + 0,139x_4,$$

при этом p -значения коэффициентов регрессии, рассчитанные на основе t -статистики, равны 0,69; 0,8; 0,14; $1,34 \cdot 10^{-6}$; 0,15. Поскольку все коэффициенты, кроме коэффициента при x_3 , существенно больше 0,05, то, несмотря на то, что зависимость между исследуемыми переменными существует, оценить ее количественные характеристики по данному уравнению невозможно.

Поэтому для поиска регрессионной зависимости между исследуемыми переменными предлагаем использовать другие методы, позволяющие установить не только качественную, но и количественную связь между факторами [27]. Так, наряду с классическим методом наименьших квадратов, для решения задач регрессионного анализа и конструирования сложных нелинейных моделей используется один из алгоритмов машинного обучения, называемый методом опорных векторов (SVM). Данный подход широко применяется для решения задачи классификации, однако в работах [28-30] показана его применимость к решению задач регрессии.

Метод опорных векторов применяется для отображения исходного пространства $R^4 \ni x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ в некоторое гиперпространство H . В этом гиперпространстве строятся две параллельные плоскости, положение которых различается на значение параметра b . Однако для того, чтобы построить эти гиперплоскости, начиная с некоторого приближения, из обучающей выборки выбираются векторы и добавляются в множество опорных SV . После чего определяется целевая функция решаемой задачи оптимизации – минимизация отклонения для всех векторов, не попавших в «зазор» между построенными гиперплоскостями, а также определяется двойственная задача к данной прямой задаче [30, 31].

Итоговое уравнение регрессии выглядит так:

$$y = \sum_{i \in SV} D_i K(\bar{x}_i, \bar{x}) + b, \quad (1)$$

где D_i – коэффициенты двойственной задачи (по отношению к прямой, заключающейся в поиске коэффициентов гиперплоскости, минимизирующей функцию штрафа); SV – множество индексов опорных векторов; $K(\bar{x}_i, \bar{x})$ – ядро, используемое при построении гиперпространства.

Рассмотрим функции $K(\bar{x}_i, \bar{x})$, применяемые в данном алгоритме в качестве ядер. Так, любая функция, применяемая в качестве ядра должна удовлетворять условиям теоремы Мерсера [32], которая требует неотрицательной определенности и симметричности функции $K(\bar{x}_i, \bar{x})$ в пространстве R^n . Существует несколько стандартных функций $K(\bar{x}_i, \bar{x})$, используемых в программных библиотеках, реализующих метод опорных векторов. Поскольку установлено, что линейная регрессия не принесла удовлетворительного результата, используются два типа нелинейных ядер:

- полиномиальное ядро $K(\bar{x}_i, \bar{x}) = (\langle \bar{x}_i, \bar{x} \rangle + 1)^p$, где $\langle \bar{x}_i, \bar{x} \rangle$ – скалярное произведение векторов \bar{x}_i и \bar{x} ; p – максимальная степень полинома;
- радиально-базисное ядро $K(\bar{x}_i, \bar{x}) = e^{-\gamma \|\bar{x} - \bar{x}_i\|^2}$, где $\|\bar{x} - \bar{x}_i\|$ – метрика расстояния между векторами; γ – параметр.

При использовании полиномиального ядра и размерности пространства признаков $n = 4$ с раскрытием скобок функция ядра предстает в следующем виде:

$$K(\bar{x}_i, \bar{x}) = ((x_{1i}x_1 + x_{2i}x_2 + x_{3i}x_3 + x_{4i}x_4) + 1)^p,$$

где $x_{1i} \dots x_{4i}$ – координаты i -го опорного вектора.



Поскольку мы располагаем всего 33 наблюдениями, применение степени $p > 2$ не будет оправдано ввиду того, что уже при $p = 3$ количество коэффициентов в уравнении регрессии будет равно 33, поэтому для нашей задачи используется $p = 2$. Тогда при раскрытии скобок и подставлении ядра в выражение (1) получим уравнение регрессии для полиномиального ядра второй степени

$$y = \sum_{i \in SV} D_i (\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + \alpha_3 x_3^2 + \alpha_4 x_4^2 + \alpha_5 x_1 x_2 + \alpha_6 x_1 x_3 + \alpha_7 x_1 x_4 + \alpha_8 x_2 x_3 + \alpha_9 x_2 x_4 + \alpha_{10} x_3 x_4 + \alpha_{11} x_1 + \alpha_{12} x_2 + \alpha_{13} x_3 + \alpha_{14} x_4 + 1) + b,$$

где $\alpha_1 \dots \alpha_{14}$ – коэффициенты, получаемые из координат i -го опорного вектора.

Для радиально-базисного ядра функция записывается в таком виде:

$$K(\bar{x}_i, \bar{x}) = e^{-\gamma((x_1 - x_{1i})^2 + (x_2 - x_{2i})^2 + (x_3 - x_{3i})^2 + (x_4 - x_{4i})^2)}.$$

Подставляя в выражение (1) уравнения регрессии, получим:

$$y = \sum_{i \in SV} D_i e^{-\gamma((x_1 - x_{1i})^2 + (x_2 - x_{2i})^2 + (x_3 - x_{3i})^2 + (x_4 - x_{4i})^2)} + b = e^{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2} \left(\sum_{i \in SV} D_i e^{\alpha_{i1}x_1 + \alpha_{i2}x_2 + \alpha_{i3}x_3 + \alpha_{i4}x_4 + \alpha_{i5}} \right) + b, \quad (2)$$

где α_{ij} – коэффициенты, получаемые из координат i -го опорного вектора.

Полученная регрессионная функция не содержит отдельных коэффициентов для квадратов переменных x_1, x_2, x_3, x_4 , что затрудняет идентификацию влияния на выход каждого параметра в отдельности, однако такая функция может учесть существенную нелинейную зависимость между входами и выходами процесса.

Для программной реализации метода опорных векторов к задаче обработки результатов испытаний технологии CVD6 при обогащении оловянных руд воспользуемся библиотекой Scikit-learn для языка программирования Python. В качестве стратегии разбиения на обучающую и тестирующую выборки использовался метод ShuffleSplit, а для обработки массивов данных библиотека Numpy.

Данные, полученные в результате работы программы: при линейной регрессии $R^2 = 0,614$, $EV = 0,722$; при полиномиальном ядре SVM $R^2 = 0,693$, $EV = 0,781$; при радиально-базисном ядре SVM $R^2 = 0,742$, $EV = 0,781$. Для метрик R^2 и EV показаны усредненные результаты, полученные после пяти запусков.

Использование обеих метрик метода SVM показало лучшие результаты относительно простой линейной регрессии, при этом для метрики R^2 радиально-базисное ядро выявило несколько лучший результат.

Особенностью метода опорных векторов является наличие гиперпараметра регуляризации C , определение которого индивидуально как для каждой применяемой функции ядра, так и для каждой решаемой задачи [30, 33, 34]. Для поиска наилучшего значения C воспользуемся регулярным поиском по отрезку $C \in [0,0001; 10,0001]$ с шагом 0,0001 (рис.4).

Итоговые уравнения регрессии, полученные при лучших значениях гиперпараметра C метода SVM: для полиномиального ядра второй степени значение, соответствующее максимальному значению метрики EV , $C = 0,0401$, для радиально-базисного $C = 2,943$. Таким образом, уравнение регрессии при полиномиальном ядре представлено выражением:

$$y_1 = -0,0276x_1^2 - 0,085x_2^2 + 0,1936x_3^2 - 0,065x_4^2 + 0,194x_1x_2 - 0,293x_1x_3 - 0,00775x_1x_4 - 0,0345x_2x_3 - 0,0469x_2x_4 - 0,136x_3x_4 + 0,0171x_1 + 0,123x_2 + 0,196x_3 + 0,0774x_4 - 0,023. \quad (3)$$

Значение метрики R^2 , рассчитанное на тестирующей выборке для данного уравнения, равно 0,858, что является высоким результатом.

После применения метода опорных векторов с радиально-базисным ядром к решаемой задаче количество опорных векторов оказалось равным 20 и, соответственно, уравнение (2) содержит 20 слагаемых, поэтому представим его в общем виде:

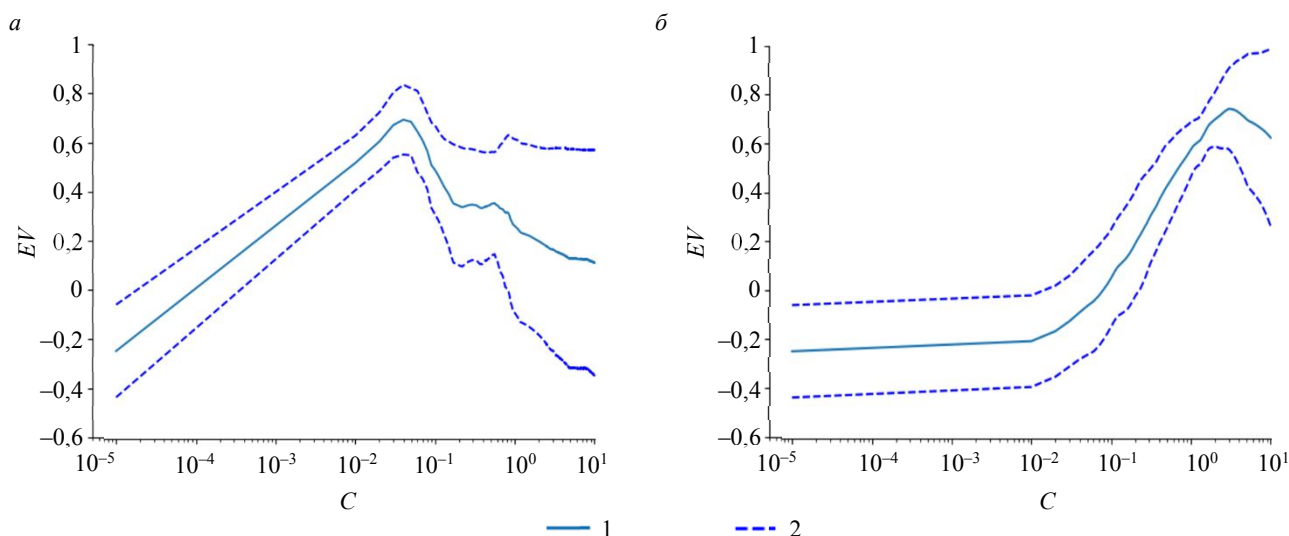


Рис.4. Графики подбора гиперпараметра C метода SVM для полиномиального (а) и радиально-базисного (б) ядер
1 – зависимость метрики от значения; 2 – среднеквадратичное отклонение

$$y_1 = e^{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2} \left(\sum_{i \in SV} B_i e^{\alpha_{i1}x_1 + \alpha_{i2}x_2 + \alpha_{i3}x_3 + \alpha_{i4}x_4} \right) + 0,05; \quad B_i = D_i e^{\alpha_{i5}}. \quad (4)$$

Представим в виде массива значения коэффициентов $B_i = (-0,24; -0,13; -0,9; -2,19; -1,81; 2,45; 2,43; -1,17; 0,62; 1,39; -1,82; -0,53; -2,41; -5,96; 1,93; 3,47; -2,08; 3,36; 0,1; 2,81)$.

Поскольку общее количество коэффициентов $\alpha_{i1}; \alpha_{i2}; \alpha_{i3}; \alpha_{i4}$ равно 80, в статье их приводить не следует. Значение метрики R^2 , рассчитанное на тестирующей выборке для данного уравнения, равно 0,923, что соответствует высокой прогностической способности модели.

Представим аналогичные исследования для хвостов. При использовании полиномиального ядра получено следующее уравнение регрессии:

$$y_2 = -0,0016x_1^2 + 0,026x_2^2 + 0,126x_3^2 + 0,046x_4^2 + 0,067x_1x_2 - 0,05x_1x_3 + 0,04x_4 + \\ + 0,096x_2x_3 + 0,047x_2x_4 - 0,0023x_3x_4 + 0,042x_1 + 0,011x_2 + 0,066x_3 + 0,069x_4.$$

Коэффициент детерминации R^2 , рассчитанный на тестирующей выборке, равен 0,59, что является низким результатом.

Для радиально-базисного ядра общая форма уравнения совпадает с выражением (4), а B_i имеет следующий набор коэффициентов: $B_i = (-0,33; 0,03; 0,54; 0,41; 0,64; 0,56; -0,75; -0,25; -0,49; 1,36; 0,19; 0,78; -1,51; -1,43; 0,14; -2,11; -2,23; -0,40; 0,05; 1,29; 1,11; -0,24; -0,58)$.

Значение свободного коэффициента $b = 0,296$, при этом $R^2 = 0,846$.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными при работе на обогатительных фабриках с иным ценным компонентом [18-20]. Так, модели (3), (4) для концентрации y_1 показали очень хорошую прогностическую способность на тестовых выборках ($R^2 > 0,85$), при этом использование полиномиального ядра предпочтительнее, так как позволяет исследовать полученное уравнение для поиска экстремальных точек.

В результате была найдена стационарная точка $M_0(-2,8; -3,47; -1,83; 0,23)$, соответствующая данной точке матрица Гессе является знакопеременной. При этом детерминант наибольшего минора не равен нулю, что говорит о том, что найденная точка M_0 является седловой, т.е. максимальные значения в концентрате следует искать с учетом ограничений накладываемых на значения переменных x_1, x_2, x_3, x_4 .

При использовании полиномиального ядра в модели для хвостов получаются неудовлетворительные результаты, однако модель, полученная на основе радиально-базисного ядра, подтвердила тезис о нелинейной зависимости содержания ценного компонента в хвостах от настраиваемых параметров.



Заключение. Установлено, что метод опорных векторов применим к задаче обработки результатов обогатительных испытаний и показывает достаточно интересные результаты. В частности, полученная модель хвостов при использовании радиально-базисного ядра убедительно свидетельствует о существенной нелинейности взаимосвязи между содержанием ценного компонента и настраиваемыми параметрами, что будет накладывать дополнительные ограничения в случае параметрической оптимизации работы установки. Применяя метод опорных векторов SVR с радиально-базисным ядром RBF, удалось получить модель, прогностическая способность которой имеет достаточно высокий результат ($R^2 = 0,846$).

Применение полиномиального ядра для поиска зависимости между содержанием ценного компонента в концентрате и настраиваемыми параметрами позволило получить не зависящую от входных данных высокую прогностическую способность $R^2 = 0,858$. При этом использование полиномиального ядра позволило проводить с полученным уравнением стандартную процедуру поиска экстремума функции многих переменных. Полученные значения коэффициентов регрессии позволяют утверждать, что наиболее влиятельным фактором на выход концентрата является время, в течение которого открыт пережимной клапан, поскольку полученные коэффициенты уравнения (3) имеют наибольшие абсолютные значения слагаемых, в которых присутствует переменная x_3 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Чантурия В.А., Бочаров В.А. Современное состояние и основные направления развития технологии комплексной переработки минерального сырья цветных металлов // Цветные металлы. 2016. № 11. С. 11-18. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01
2. Aleksandrova T.N., Orlova A.V., Taranov V.A. Enhancement of copper concentration efficiency in complex ore processing by the reagent regime variation // Journal of Mining Science. 2020. Vol. 56. Iss. 6. P. 982-989. DOI: 10.1134/S1062739120060101
3. Федотов П.К., Сенченко А.Е., Федотов К.В., Бурдонов А.Е. Исследования обогатимости сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 218-227. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.218
4. Angadi S.I., Sreenivas T., Ho-Seok Jeon et al. A review of cassiterite beneficiation fundamentals and plant practices // Minerals Engineering. 2015. Vol. 70. P. 178-200. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.09.009
5. Matveeva T.N., Chanturiya V.A., Getman V.V. et al. The Effect of Complexing Reagents on Flotation of Sulfide Minerals and Cassiterite from Tin-Sulfide Tailings // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2022. Vol. 43. Iss. 3. P. 346-359. DOI: 10.1080/08827508.2020.1858080
6. Leistner T., Embrechts M., Leifner T. A study of the reprocessing of fine and ultrafine cassiterite from gravity tailing residues by using various flotation techniques // Minerals Engineering. 2016. Vol. 96-97. P. 94-98. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.06.020
7. Matveeva T.N., Getman V.V., Karkeshkina A.Yu. Flotation extraction of tin from tailings of sulfide-tin ore dressing using thermomorphic polymer // Eurasian Mining. 2021. № 2. P. 46-49. DOI: 10.17580/em.2021.02.10
8. Hassanzadeh A., Safari M., Duong H. Hoang et al. Technological assessments on recent developments in fine and coarse particle flotation systems // Minerals Engineering. 2022. Vol. 180. № 107509. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107509
9. Angadi S.I., Eswaraiyah C., Ho-Seok Jeon et al. Selection of Gravity Separators for the Beneficiation of the Uljin Tin Ore // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2017. Vol. 38. Iss. 1. P. 54-61. DOI: 10.1080/08827508.2016.1262856
10. Tong Yue, Haisheng Han, Yuehua Hu et al. Beneficiation and purification of tungsten and cassiterite minerals using Pb-BHA complexes flotation and centrifugal separation // Minerals. 2018. Vol. 8. Iss. 2. № 566. DOI: 10.3390/min8120566
11. Zhang Jin-Lu, Ge Bao-Liang, Wang Xian-Qiang, Yang Chun-Gang. Study on Beneficiation of a Stanniferous Multi-metallic Sulphide Ore in Yunnan // The Chinese Journal of Process Engineering. 2015. Vol. 15. Iss. 6. P. 945-953. DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.215282
12. Юсупов Т.С., Кондратьев С.А., Бакшеева И.И. Структурно-химические и технологические свойства минералов касситерит-сульфидного техногенного сырья // Обогащение руд. 2016. № 5. С. 26-31. DOI: 10.17580/or.2016.05.05
13. Yong Cheng Zhou, Xiong Tong, Xiao Wang et al. Beneficiation of Ultrafine Cassiterite from a Tin Tailings by Flotation // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 616-618. P. 643-648. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.616-618.643
14. Yongcheng Zhou, Xiong Tong, Shaoxian Song et al. Beneficiation of Cassiterite Fines from a Tin Tailing Slime by Froth Flotation // Separation Science and Technology. Vol. 49. Iss. 3. P. 458-463. DOI: 10.1080/01496395.2013.818036
15. Murthy Y.R., Tripathy S.K. Process optimization of a chrome ore gravity concentration plant for sustainable development // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2021. Vol. 120. № 4. P. 261-268. DOI: 10.17159/2411-9717/990/2020
16. Basnayaka L., Albijanic B., Subasinghe N. Performance evaluation of processing clay-containing ore in Knelson concentrator // Minerals Engineering. 2020. Vol. 152. № 106372. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106372
17. Nayak A., Jena M.S., Mandre N.R. Application of Enhanced Gravity Separators for Fine Particle Processing: An Overview // Journal of Sustainable Metallurgy. 2021. Vol. 7. Iss. 2. P. 315-339. DOI: 10.1007/s40831-021-00343-5
18. Пелих В.В., Салов В.М., Бурдонов А.Е., Лукиянов Н.Д. Модель извлечения бадделеита из отвальных продуктов апатито-бадделеитовой обогатительной фабрики на концентраторе CVD6 // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 281-289. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.12



19. Пелих В.В., Салов В.М., Бурдонов А.Е., Лукьянов Н.Д. Установление технологических зависимостей работы концентратора КС-CVD6 с помощью метода группового учета аргументов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 2. С. 139-150. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2500
20. Пелих В.В., Салов В.М., Бурдонов А.Е., Лукьянов Н.Д. Применение Knelson CVD-технологии для обогащения золото-свинцовой руды // Обогащение руд. 2019. № 1. С. 3-11. DOI: 10.17580/or.2019.01.01
21. Sakuhuni G., Emre Altun N., Klein B. Modelling of continuous centrifugal gravity concentrators using a hybrid optimization approach based on gold metallurgical data // Minerals Engineering. 2022. Vol. 179. № 107425. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107425
22. Койжанова А.К., Кенжалиев Б.К., Магомедов Д.Р., Абдылдаев Н.Н. Разработка комбинированной технологии обогащения малосульфидных золотосодержащих руд // Обогащение руд. 2021. № 2. С. 3-8. DOI: 10.17580/or.2021.02.01
23. Majumder A.K., Barnwal J.P. Modeling of enhanced gravity concentrators – Present status // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2006. Vol. 27. Iss. 1. P. 61-86. DOI: 10.1080/08827500500339307
24. Fedotov P.K., Senchenko A.E., Fedotov K.V., Burdonov A.E. Integrated Technology for Processing Gold-Bearing Ore // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. 2021. Vol. 102. Iss. 2. P. 397-411. DOI: 10.1007/s40033-021-00291-0
25. Jordens A., Sheridan R.S., Rowson N.A., Waters K.E. Processing a rare earth mineral deposit using gravity and magnetic separation // Minerals Engineering. 2014. Vol. 62. P. 9-18. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.09.011
26. Ojala M., Garriga G.C. Permutation Tests for Studying Classifier Performance // Journal of Machine Learning Research. 2010. Vol. 11. P. 1833-1863.
27. Tie-Yan Liu. Learning to rank for Information Retrieval // Foundations and Trends in Information Retrieval. 2009. Vol. 3. № 3. P. 225-231. DOI: 10.1561/15000000016
28. Vapnik V.N. An overview of statistical learning theory // IEEE Transactions on Neural Networks. 1999. Vol. 10. Iss. 5. P. 988-999. DOI: 10.1109/72.788640
29. Ghanbari E., Shakery A. A Learning to rank framework based on cross-lingual loss function for cross-lingual information retrieval // Applied Intelligence. Vol. 52. P. 3156-3174. DOI: 10.1007/s10489-021-02592-z
30. Sacks J., Welch W.J., Mitchell T.J., Wynn H.P. Design and analysis of computer experiments // Statistical Science. 1989. Vol. 4. Iss. 4. P. 409-423. DOI: 10.1214/ss/1177012413
31. Smola A.J., Schölkopf B. A tutorial on support vector regression // Statistics and Computing. 2004. Vol. 14. P. 199-222. DOI: 10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88
32. Bartlett P., Shawe-Taylor J. Generalization Performance of Support Vector Machines and Other Pattern Classifiers // Advances in Kernel Methods. Cambridge: MIT Press, 1998. P. 43-54.
33. Vapnik V., Izmailov R. V-matrix method of solving statistical inference problems // Journal of Machine Learning Research. 2015. Vol. 16. P. 1683-1730.
34. Burdonov I.B., Vinarskii E.M., Yevtushenko N.V., Kossatchev A.S. Perfect Sets of Paths in the Full Graph of SDN Switches // Programming and Computer Software. 2021. Vol. 47. Iss. 7. P. 505-514. DOI: 10.1134/S0361768821070033

Авторы: А.Е.Бурдонов, канд. техн. наук, доцент, slimbul@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5298-445X> (Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия), Н.Д.Лукьянов, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-8826-3424> (Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия), В.В.Пелих, генеральный директор, <https://orcid.org/0000-0002-5552-7446> (ООО «Сибикон», Иркутск, Россия), В.М.Салов, канд. техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-2629-6666> (Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна

М.Г.ВЫСТРЧИЛ ✉, В.Н.ГУСЕВ, А.К.СУХОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Выстрчил М.Г., Гусев В.Н., Сухов А.К. Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 562-570. EDN SZOFVD

Аннотация. Предложена методика построения цифровой модели рельефа по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна, основанная на разделении исходного облака точек на равные сегменты. Это позволяет, сделав допущение о линейном характере изменения высоты точек в отдельном сегменте, аппроксимировать их отдельными плоскостями. По рассеиванию точек относительно аппроксимирующих поверхностей были рассчитаны среднеквадратические погрешности моделей относительно исходных данных, что позволило выявить зависимость погрешности построения модели относительно размеров составляющих их сегментов, а также предложить метод фильтрации ячеек, содержащих выбросы относительно ожидаемой погрешности модели. Предлагаемая методика была апробирована на моделях трех горных объектов – известнякового карьера, отвала фосфогипса и торфяного разреза. Результаты эксперимента показали кратное уменьшение погрешности модели относительно стандартных DEM моделей, что обеспечивает требуемую точность, предъявляемую к горно-графической документации.

Ключевые слова: облако точек; дистанционные съемки; фотограмметрия; лазерно-сканирующие системы; DEM модели; GRID модели; маркшейдерское дело

Поступила: 14.04.2023

Принята: 02.08.2023

Онлайн: 28.08.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Разработка месторождений полезных ископаемых неразрывно связана с маркшейдерским обеспечением [1], которое включает инженерное сопровождение горных работ [2], наблюдение за геомеханическими процессами [3, 4], учет движения объемов полезного ископаемого [5], сбор, хранение и обобщение информации о пространственно-временных изменениях, происходящих как на земной поверхности, так и под землей [6]. Объединяет эти задачи понятие маркшейдерской съемки, включающее процессы инструментальных измерений, их математической обработки, и представление полученных данных в удобной для последующей работы форме [7, 8]. Последовательность выполняемых операций на каждом этапе должна обеспечивать строгий контроль качества получаемых, используемых и выдаваемых данных с возможностью локализации и фильтрации содержащих недопустимые погрешности (выбросы) [9].

Эмпирическое определение погрешностей основано на статистической оценке закономерностей рассеивания измерений. Необходимым условием при этом является наличие избыточных измерений, общее количество которых обеспечивает надежность формируемых таким образом оценок. Избыточные измерения формируются при определенных геометрических условиях, таких как равенство повторных измерений между собой или равенство нулю сумм приращений координат или высот в замкнутых полигонах [10]. При отсутствии избыточных измерений оценка точности становится возможна лишь в виде предположения, основывающегося на экстраполяции погрешностей измерений на результат, что позволяет получить лишь ожидаемые погрешности, а не найти фактические.



Большинство инженерных маркшейдерских съемок, которые направлены на геометрическое обеспечение горных работ, связанных с решением задач определения объемов добытой горной массы, построением маркшейдерской горно-графической документации, выносом проектных координат в натуру и т.д., не формируют достаточного объема избыточных измерений. В таком случае контроль качества работ требует дополнительных выборочных съемок, что, в свою очередь, допускает риск получения ложных выводов за счет экстраполяции результатов локальной проверки на всю работу в целом. Современные средства маркшейдерских измерений, примерами которых могут служить наземные и воздушные лазерно-сканирующие системы, беспилотные фотограмметрические системы, получили повсеместное внедрение [11, 12], поскольку позволяют минимизировать время выполнения полевых работ. Однако при всех своих преимуществах (скорости и полноте собираемых данных, безопасности выполнения работ) вопросы обработки получаемых данных, оценки их точности, сопоставления разновременных моделей и решение с их помощью инженерных горно-геологических задач до сих пор не найдены [13, 14].

Постановка проблемы. Высокая скорость съемки и полнота данных, получаемых средствами лазерно-сканирующих и фотограмметрических съемок, достигаются за счет автоматизации процесса измерений, которая может быть получена только при полном отсутствии априорного выбора конкретных объектов съемки, другими словами, пользователь может заранее указать лишь общую область съемки, а не отдельные интересующие его объекты. В результате формируемые этими системами массивы данных «облака точек» представляют собой набор координат, нерегулярно и случайно покрывающий объект съемки [15, 16].

Случайность данных дистанционного зондирования не позволяет выполнить прямое сравнение нескольких разновременных съемок, так как каждый раз точки будут по-новому размещаться на снимаемом объекте, не позволяя заранее однозначно предсказать фактическое содержание модели и требуя сбора избыточной информации для гарантии результата, поэтому объем данных может превышать десятки и сотни миллионов точек. Показательно, что такой объем информации лишь уменьшает случайность и дискретность модели, не решая проблему, подменяя ее трудностями с хранением, обработкой и передачей больших данных [17].

Если проблема случайности модели может быть экстенсивно снижена увеличением плотности точек, то проблема дискретности – нет. Какова бы ни была плотность сформированного облака, дискретные точки не в состоянии полностью заполнить все пространство модели. В свою очередь, одно из основных требований, предъявляемых к горно-графической документации, – возможность получения информации в любой точке, для чего необходимо интерполировать содержащиеся в облаке точки [18].

Данная задача решается путем построения цифровых моделей местности (ЦММ), вопросам создания которых посвящены научные работы [2, 11]. ЦММ в горном деле использовались при решении задач планирования и оценки запасов полезных ископаемых, моделирования геомеханических процессов [19] методами конечных элементов, оценки рисков экологических аварий [20].

Стандартным способом построения ЦММ для решения инженерных задач является интерполяция пространства между точками треугольными полигонами, вершины которых определяются по алгоритму Делоне или подобным ему. Такой алгоритм построения ЦММ эффективно работает для съемок, результат которых состоит из набора характерных точек местности, выбранных маркшейдером при проведении съемочных работ, исходя из его личного опыта и представления о форме рельефа. Выбранные специалистом точки образуют массив характерных точек рельефа, позволяющих выбрать структурные линии, формирующие модель, адекватную снимаемому рельефу [21].

Применение подобной процедуры к облакам точек высокой плотности не показывает высокой эффективности, поскольку объем получаемой полигональной модели удваивается относительно исходной из-за того, что она должна содержать в себе сведения не только о точках, но и об их связях между собой. Сама же модель останется нерегулярной и примет все погрешности исходных данных, не обладая при этом инструментами явной оценки точности составляющих ее полигонов и требуя дополнительных ресурсов для последующей работы [22]. Снижение требований к ресурсам, необходимым для обработки таких моделей, достигается в основном путем предварительного разряжения исходного облака точек, что в результате уменьшает и плотность



результатирующей модели. При этом, очевидно, снижаются подробность и информативность модели, а также обесценивается предварительно выполненная работа по определению положения удаленных из обработки точек [23].

Потенциальным способом нивелирования недостатков полигональных моделей является использование сегментированных GRID моделей, состоящих из набора равных по типу и размерам территориально сопряженных ячеек, упорядоченных в виде матрицы [24]. Регулярность получаемой модели делает ее более устойчивой к случайности распределения исходных точек в плане за счет того, что положение границ составляющих модель сегментов определяется размером ячейки и положением единственной начальной точки [25]. Весомым преимуществом такого подхода является также инвариантность итогового объема данных модели относительно исходного облака точек, которая достигается благодаря наполнению модели информацией путем создания в каждой ячейке атрибутов, обобщающих необходимые свойства попавших в ее границы точек [26].

Благодаря указанным преимуществам сегментированные модели нашли широкое применение в задачах по геодезии и картографии, а вопросы их создания и совершенствования не теряют актуальности и решаются учеными всего мира [27-29].

GRID модели используются в задачах по картографии [30], таксации лесов [31, 32] и общей связи с ГИС-системами. Однако, несмотря на многие явные преимущества сегментированных моделей, вопросы их использования для решения задач горного и маркшейдерского дела остаются не решенными [5]. Одним из фундаментальных препятствий к их внедрению в повседневную практику является отсутствие инструментов оценки их точности [33]. Оценка точности сегментированных моделей выполняется путем дополнительных измерений геодезическими средствами для выборочного контроля качества выполненных работ, но требует дополнительных затрат времени и средств [34].

Цель данной работы заключается в описании разработанного авторами метода оценки точности сегментированных моделей по их внутреннему наполнению, выявлении основных зависимостей формирования погрешностей сегментированных моделей и определении их оптимальных параметров применительно к решению задач в горном деле.

Методы. Стандартной формой хранения сегментированных ЦММ является DEM (Digital elevation model) формат, представляющий собой геопривязанное растровое изображение, в котором значения пикселей определяют среднюю высотную отметку в каждой ячейке [35]. Так как ни сам формат, ни программы, его создающие, не дают информации о качестве определения результирующих высотных отметок, авторским коллективом была разработана собственная программа, позволяющая рассчитывать сегментированные модели из облаков точек с сохранением информации о погрешностях аппроксимации точек в отдельных ячейках, а также рассчитывать на их основании общую среднеквадратическую погрешность всей модели в целом.

В качестве аппроксимирующих функций были рассмотрены два варианта:

- средняя отметка всех точек в ячейке (стандартная DEM модель);
- плоскость, задаваемая функцией вида $Z = Ax + By + C$; параметры A , B и C определялись по методу наименьших квадратов (авторская PLANE модель):

$$RSS(A, B, C) = \sum_{i=1}^n ((Ax_i + By_i + C) - z_i)^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

Среднеквадратическая погрешность аппроксимации точек в k -й ячейке может быть найдена по формуле

$$m_k = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_k} (\hat{Z}_k - z_i)^2}{r_k}}, \quad (2)$$

где \hat{Z}_k – отметка, вычисленная по аппроксимирующей функции k -й ячейки в точке (x_i, y_i) ; z_i – высотная отметка точки (x_i, y_i) ; n_k – количество точек в k -й ячейке; r_k – количество степеней свободы в k -й ячейке, определяемое в зависимости от типа аппроксимирующей поверхности ($r_k = n_k - 1$ для средней отметки; $r_k = n_k - 3$ для плоскости).



Рис. 1. Облака точек, исследуемых в работе объектов: *а* – известняковый карьер; *б* – отвал фосфогипса; *в* – торфяное месторождение

Общая среднеквадратическая погрешность модели может быть вычислена на основе среднеквадратических погрешностей аппроксимации отдельных ячеек (2) с учетом количества степеней свободы, участвующих в их определении:

$$M = \pm \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (m_k^2 r_k)}{\sum_{k=1}^N r_k}}, \quad (3)$$

где m_k – среднеквадратическая погрешность аппроксимации в k -й ячейке; N – количество присутствующих в модели ячеек.

В качестве исследуемых выбраны три горных объекта, модели которых были получены фотограмметрическим способом, расчет облаков точек выполнялся в программе Agisoft Metashape (рис.1, таблица).

Основные характеристики исследуемых объектов

Параметр	Известняковый карьер	Отвал фосфогипса	Торфяное месторождение
Площадь, га	41	159	28
Перепад высот, м	132	112	23
Количество точек в исходной модели, тыс. точек	11823	16242	5331
Объем модели (формат .asc), Мб	956	529	365
Используемый БЛА	DJI Phantom 3 PRO	Autel Robotics EVO II Pro	DJI Phantom 4 PRO
Высота съемки, м	100	150	150
Количество снимков, шт.	127	1800	536
Размер матрицы, inch CMOS	1/2,3	1	1
Разрешение снимков, Mpixels	12,4	20	20

По каждому облаку точек были построены сегментированные модели с размером ячейки 1; 1,5; 2; 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 50 м, рассчитаны СКП (среднеквадратические погрешности) каждой ячейки (при положительном значении r_k), найдены общие СКП моделей, а также построены карты распределения СКП внутри каждой модели.

Обсуждение результатов. Рассчитанные для каждого случая по формуле (3) среднеквадратические погрешности моделей представлены на графиках (рис.2).

При анализе полученных зависимостей видно, что погрешности DEM моделей одинаково ведут себя во всех рассматриваемых объектах, пропорционально уменьшаясь вместе с размером ячейки в модели. При этом для равных значений размеров ячеек в разных моделях достигаются разные значения СКП, возрастающие прямо пропорционально увеличению общего перепада высот в модели, приведенного в таблице. Средняя высотная отметка, используемая при построении DEM модели, не позволяет дать состоятельную оценку точкам в аппроксимируемой площади при наличии в ней негоризонтальных участков, погрешность результирующей высоты в ячейке прямо связана с величиной перепада высот внутри нее. Уменьшение размера ячейки снижает шанс большого перепада высоты, тем самым уменьшая погрешность модели в целом.

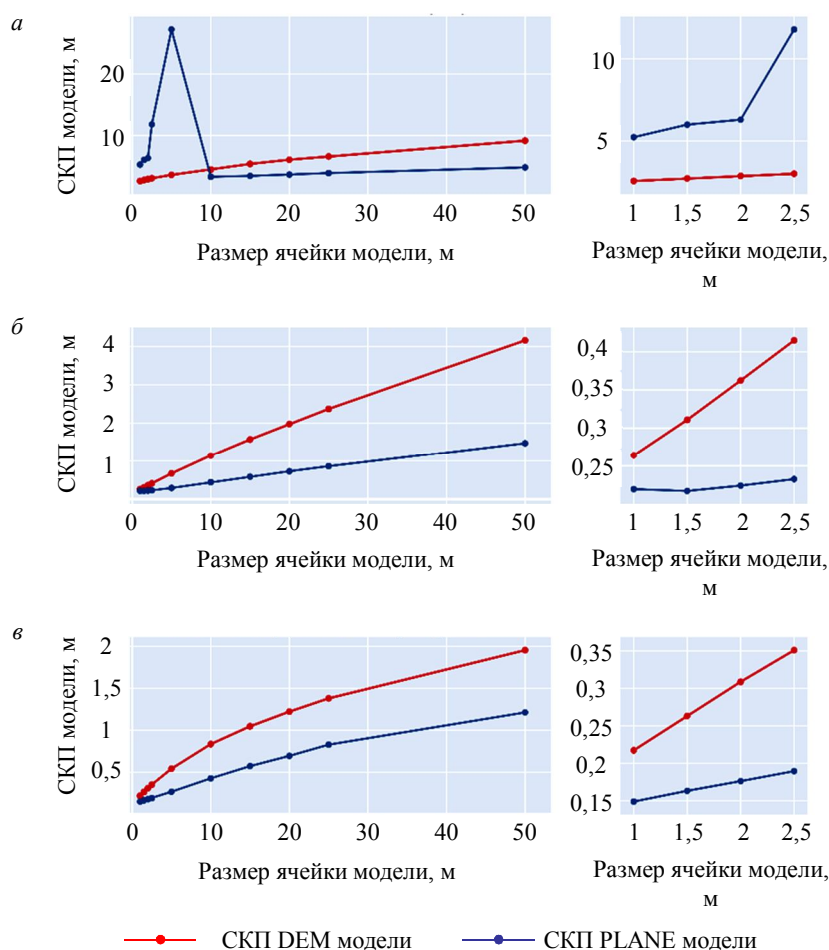


Рис.2. Зависимость СКП сегментированных моделей от размера ячейки модели для объектов: а – известняковый карьер; б – отвал фосфогипса; в – торфяное месторождение

Однако полученные для минимальных из рассмотренных размеров ячеек в один метр погрешности превышают значения, допустимые для маркшейдерских съемок. Формально, экстраполировав линейный характер погрешности модели, можно определить необходимый размер ячейки для каждого случая. Но в силу того, что количество ячеек в модели увеличивается относительно размера ячейки квадратично, такое решение приведет к лавинообразному увеличению объема общей модели, что повлечет за собой как проблемы с наполнением сформированных ячеек информацией, так и трудности с хранением, передачей и обработкой модели в целом.

Использование в качестве аппроксимирующей поверхности плоскости снижает влияние характера распределения высот внутри ячейки на погрешность модели в целом. Такой эффект достигается за счет того, что PLANE модель будет каче-

ственно повторять исходный набор данных в случае равномерного изменения высоты в рамках отдельной ячейки. При сопоставлении зависимости погрешности PLANE и DEM моделей видно, что, за исключением моделей известнякового карьера с размерами ячеек 1-5 м, выдвинутое предположение соответствует результатам эксперимента.

Выделенная аномалия выявляет основной недостаток PLANE модели – в случае аппроксимации рельефа, содержащего вертикальные участки, функция (1) может дать неопределенное значение, высотой отметки стремящееся к $\pm\infty$. Среднеквадратическая погрешность, рассчитываемая по формулам (2) и (3), в силу возведения в квадрат отклонений между отметками модели и точками облака чувствительна к наличию в исходных данных грубых результатов, поэтому может дать завышенное значение. На рис.3 представлены зависимости погрешностей модели с распределением погрешности отдельных ячеек в ней.

При анализе распределения погрешностей ячеек внутри модели видно, что выбросы в значениях погрешности PLANE модели с малыми размерами ячеек вызваны присутствием в выборке малочисленных ячеек с грубыми ошибками, превышающими в отдельных случаях сотни метров, что физически невозможно, исходя из фактического перепада высот внутри модели (см. таблицу). Ячеек с таким значением СКП при больших размерах ячеек нет, поскольку большая аппроксимируемая площадь внутри ячейки содержит помимо вертикально распределенных точек участки местности с более плоским рельефом, «выполаживающую» результирующую поверхность. Максимальная погрешность аппроксимации точек в ячейке при этом совпадает с максимальной погрешностью DEM модели. Постоянство результирующей отметки внутри ячейки DEM модели не позволяет ее СКП превысить некоторое пороговое значение, инвариантное к размеру ячейки модели и определяемое перепадом высот в самом исходном облаке точек.

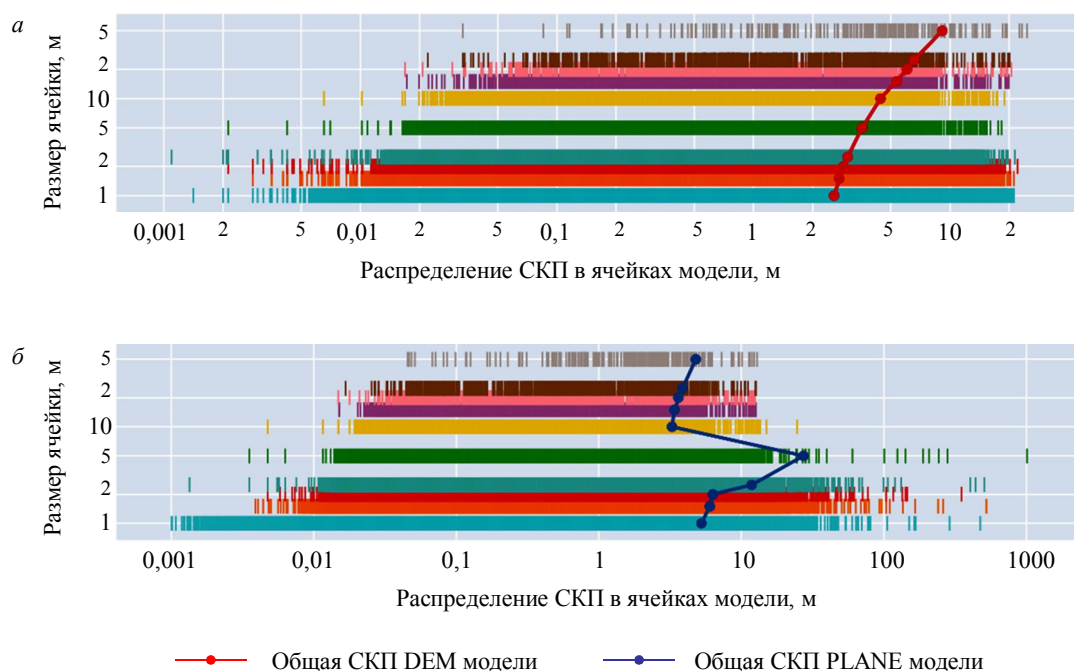


Рис.3. Распределение СКП отдельных ячеек внутри моделей: а – DEM модели; б – PLANE модели

Во всех рассматриваемых случаях как для DEM, так и для PLANE модели рассчитанное значение общей СКП модели смещено от медианного значения распределения погрешности отдельных, составляющих ее ячеек в большую сторону, что также является следствием грубых неустраненных погрешностей в отдельных ячейках модели.

Для исправления выявленного смещения были отфильтрованы ячейки, которые содержат значения СКП, выходящие за верхний предел статистически значимой выборки рассматриваемой модели:

$$m_{\max} = Q_3 + 1,5IQR, \quad (4)$$

где IQR – межквартильный размах (разница между квартилями выборки Q_3 и Q_1 – значениями, разделяющими в упорядоченном ряду СКП ячеек модели первые 75 и 25 % от общего количества значений соответственно).

Выбор в пользу формулы (4) для определения допустимого значения СКП и отказ от других статистических критериев нахождения выбросов был сделан исходя из того, что общее распределение погрешностей отдельных сегментов внутри модели имеет существенную левостороннюю асимметрию, что видно на диаграммах рассеивания (рис.3). Применение формулы (4) дает большую устойчивость результатов в случае ненормального распределения случайной величины.

Значения общих СКП моделей после фильтрации представлены на рис.4. Графики показывают, что после фильтрации ячеек, содержащих выбросы, вид зависимости изменения СКП модели во всех случаях принимает плавный характер. При этом вид зависимости для каждого из рассмотренных объектов имеет некоторые характерные особенности, объяснимые индивидуальным распределением рельефа внутри сетки сегментированной модели. Следует обратить внимание на подобие формы кривых распределения погрешностей DEM и PLANE моделей в рамках каждого из рассмотренных объектов, а также на то, что СКП PLANE модели в 1,5-10 раз меньше относительно аналогичной DEM модели.

На рис.5 изображена карта распределения погрешности PLANE модели объекта «Известняковый карьер» после фильтрации. При визуальном анализе видно, что, даже несмотря на большой размер ячейки, доминирующая площадь модели определена с погрешностями, не превышающими 10 см, что отвечает требованиям, предъявляемым к горно-графической документации. Редкие значения, превышающие порог в 0,1 м, локализованы в участках рельефа, содержащих не типичные

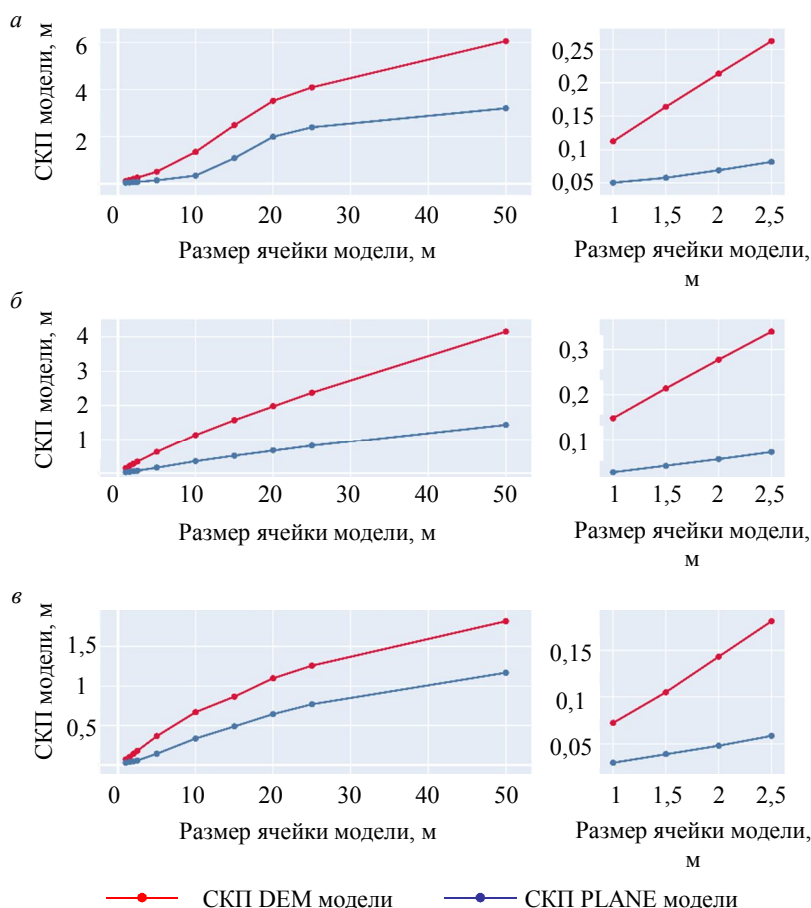


Рис.4. Зависимость СКП сегментированных моделей от размера ячейки модели после фильтрации для объектов: а – известняковый карьер; б – отвал фосфогипса; в – торфяное месторождение

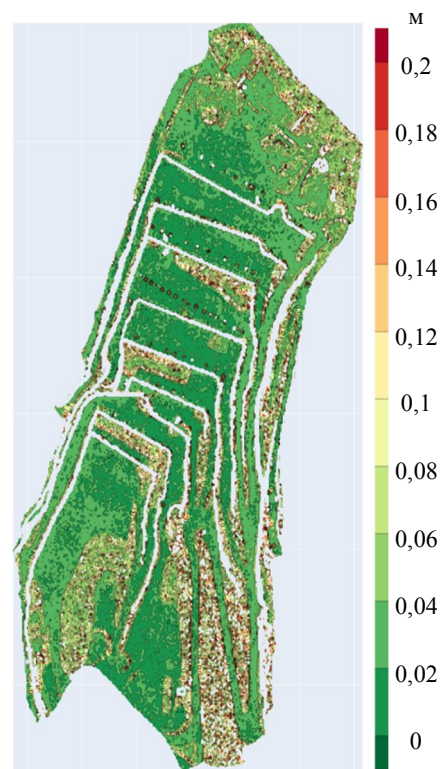


Рис.5. Распределение СКП ячеек внутри PLANE модели известнякового карьера при размере ячейки 2,5 м

для основной модели объекты, например негабариты, обозначающие берму безопасности, вывалы на откосах, растительность, постройки в северной части карьера и т.д.

Закключение. Качество каждой модели, наравне с ее наполнением, является уникальным для каждого случая съемки. Общая погрешность модели складывается из набора отдельных слабо коррелирующих между собой факторов, определяющих качество внутреннего и внешнего ориентирования модели и погрешность измерений при съемке. Сложность определения и управления этими факторами на практике часто приводит к результатам непредсказуемого и неудовлетворительного качества, отчего возможность апостериорной оценки точности результирующей модели приобретает дополнительную ценность [17].

Предлагаемый метод моделирования позволяет сопоставить каждый элемент с мерой его точности. Полученные в результате PLANE модели соответствуют по своей точности требованиям, предъявляемым к горно-графической документации, а порядок выполненного эксперимента и обработки его результатов можно рассматривать как инструмент комплексного анализа качества получаемых облаков точек.

Несмотря на то что полученные результаты исследования решают сформулированные во вводной части задачи, описанные подходы являются скорее инструментом, предоставляющим широкие возможности решения различных горно-технических задач. Объем данных в результате аппроксимации исходных облаков точек кратно уменьшился относительно исходного облака (в 100-300 раз для модели с размером ячейки в один метр и еще больших значений для ячеек большего размера). Все это позволяет в перспективе использовать получаемые модели не только для решения инженерных задач, но и для глубокого обучения нейронных сетей при прогнозе геодинамических проявлений, компьютерного зрения при беспилотном управлении горной техники и множества других задач.



ЛИТЕРАТУРА

1. Цыгляну П.П., Ромашева Н.В., Фадеева М.Л., Петров И.В. Инжиниринговые проекты в топливно-энергетическом комплексе России: актуальные проблемы, факторы и рекомендации по развитию // Уголь. 2023. № 3. С. 45-51. DOI: [10.18796/0041-5790-2023-3-45-51](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-3-45-51)
2. Borisov M., Simić R., Petrović V.M., Milinčić M. Analiza kvaliteta 3D modela zasnovanih na digitalnoj fotogrametriji // Geodetski glasnik. 2021. Vol. 52. P. 5-26.
3. Уразбаев Г.М., Алтаева А.А., Кожжаев Ж.Т., Мустафин М.Г. Геодезический мониторинг за деформациями инженерных сооружений // Комплексное использование минерального сырья. 2021. Т. 317. № 2. С. 69-77. DOI: [10.31643/2021/6445.20](https://doi.org/10.31643/2021/6445.20)
4. Саблин М.В., Боргер Е.Б., Кутепов Ю.И. и др. Геомеханическое обоснование отработки свиты угольных пластов на шахте им. А.Д.Рубана под гидроотвалом открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 6. С. 124-135. DOI: [10.25018/0236-1493-2019-06-0-124-135](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-124-135)
5. Пономаренко М.Р., Кутепов Ю.И., Шабаров А.Н. Информационно-аналитическое обеспечение мониторинга состояния объектов открытых горных работ на базе технологий веб-картографии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 8. С. 56-70. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_8_0_56](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_8_0_56)
6. Шокер Х.М., Мустафин М.Г. Геодезическое обеспечение использования технологии лазерного сканирования для фиксации памятников культурного наследия // Геодезия и картография. 2020. Т. 82. № 2. С. 2-10. DOI: [10.22389/0016-7126-2021-968-2-2-10](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2021-968-2-2-10)
7. Ferrero A.M., Migliazza M., Roncella R., Rabbi E. Rock slopes risk assessment based on advanced geostuctural survey techniques // Landslides. 2011. Vol. 8. P. 221-231. DOI: [10.1007/s10346-010-0246-4](https://doi.org/10.1007/s10346-010-0246-4)
8. Abellan A., Derron M.H., Jaboyedoff M. "Use of 3D Point Clouds in Geohazards" Special Issue: Current Challenges and Future Trends // Remote Sensing. 2016. Vol. 8. Iss. 2. № 130. DOI: [10.3390/rs8020130](https://doi.org/10.3390/rs8020130)
9. Мустафин М.Г., Нуеен В.Х. Оценка вертикальных смещений оснований зданий и сооружений на основе анализа элементов деформационной сети // Геодезия и картография. 2019. Т. 80. № 3. С. 11-19. DOI: [10.22389/0016-7126-2019-945-3-11-19](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-945-3-11-19)
10. Brigadnov I., Lutton A., Bogdanova K. Error State Extended Kalman Filter Localization for Underground Mining Environments // Symmetry. 2023. Vol. 15. Iss. 2. № 344. DOI: [10.3390/sym15020344](https://doi.org/10.3390/sym15020344)
11. Кротенок А.Ю., Шурыгин Д.Н., Литовченко Т.В. и др. Фотограмметрическая обработка изображений на основе беспилотных летательных аппаратов и наземного лазерного сканирования при проектировании открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 50-55. DOI: [10.25018/0236-1493-2017-12-0-50-55](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-0-50-55)
12. Бударова В.А., Мартынова Н.Г., Шереметинский А.В., Привалов А.В. Наземное лазерное сканирование объектов промышленных площадок на территории нефтегазовых месторождений // Московский экономический журнал. 2019. № 6. С. 8-14. DOI: [10.24411/2413-046X-2019-16004](https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-16004)
13. Пономаренко М.Р., Кутепов Ю.И., Волков М.А., Гринюк А.П. Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 103-113. DOI: [10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113)
14. Samylovskaya E., Makhovikov A., Lutton A. et al. Digital Technologies in Arctic Oil and Gas Resources Extraction: Global Trends and Russian Experience // Resources. 2022. Vol. 11. Iss. 3. № 29. DOI: [10.3390/resources11030029](https://doi.org/10.3390/resources11030029)
15. Чибунчиков А.Г., Михайлов А.П., Старинов В.В. Автоматическое построение плотного облака точек по множеству снимков на основе полуглобального метода отождествления соответственных точек // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 2. С. 14-18.
16. Rosnell T., Honkavaara E. Point Cloud Generation from Aerial Image Data Acquired by a Quadcopter Type Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Digital Still Camera // Sensors. 2012. Vol. 12. Iss. 1. P. 453-480. DOI: [10.3390/s120100453](https://doi.org/10.3390/s120100453)
17. Гусев В.Н., Блищенко А.А., Санникова А.П. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 173-179. DOI: [10.31897/PMI.2022.35](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.35)
18. Martino S., Mazzanti P. Integrating geomechanical surveys and remote sensing for sea cliff slope stability analysis: the Mt. Pucci case study (Italy) // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014. Vol. 14. Iss. 4. P. 831-848. DOI: [10.5194/nhess-14-831-2014](https://doi.org/10.5194/nhess-14-831-2014)
19. Novozhenin S.U., Bogdanova K.A., Kempler A.K. Comparative analysis of modelling methods of the tunnel construction harmful effect // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1333. Iss. 3. № 032059. DOI: [10.1088/1742-6596/1333/3/032059](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/3/032059)
20. Бригуша В.С. Анализ данных для формирования пространственных геоэкологических моделей // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2022. Т. 1. № 7. С. 108-114. DOI: [10.23885/2500-395X-2022-1-7-108-114](https://doi.org/10.23885/2500-395X-2022-1-7-108-114)
21. Ghadi Y. 3D Modelling of Earth Kinematics in Palestine for GNSS and Geodetic Time-Dependent Positioning // International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019. Vol. 8. Iss. 3. P. 6034-6039. DOI: [10.35940/ijrte.C5577.098319](https://doi.org/10.35940/ijrte.C5577.098319)
22. Riquelme A.J., Tomás R., Abellán A. Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2016. Vol. 84. P. 165-176. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2015.12.008](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.008)
23. Юнусов А.Г., Джидид А.Д., Бегларов Н.С., Елишеви М.А. Оценка влияния изменения плотности облака точек на точность автоматической сегментации // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 7. С. 47-55. DOI: [10.22389/0016-7126-2020-961-7-47-55](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-961-7-47-55)
24. Chenlei Lv, Weisi Lin, Baoquan Zhao. Approximate Intrinsic Voxel Structure for Point Cloud Simplification // IEEE Transactions on Image Processing. 2021. Vol. 30. P. 7241-7255. DOI: [10.1109/TIP.2021.3104174](https://doi.org/10.1109/TIP.2021.3104174)
25. Gezawa A.S., Bello Z.A., Qicong Wang, Lei Yunqi. A voxelized point clouds representation for object classification and segmentation on 3D data // Journal of Supercomputing. 2022. Vol. 78. P. 1479-1500. DOI: [10.1007/s11227-021-03899-x](https://doi.org/10.1007/s11227-021-03899-x)
26. Li Pengfei, Zhang Xiaochen, Yan Lu et al. Comparison of interpolation algorithms for DEMs in topographically complex areas using airborne LiDAR point clouds // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2021. Vol. 37. № 15. P. 146-153. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2021.15.018](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2021.15.018)
27. Вальков В.А., Виноградов К.П., Валькова Е.О., Мустафин М.Г. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки // Геодезия и картография. 2022. Т. 83. № 11. С. 40-49. DOI: [10.22389/0016-7126-989-11-40-49](https://doi.org/10.22389/0016-7126-989-11-40-49)



28. *Donnellan A., Parker J., Heflin M. et al.* Improving access to geodetic imaging crustal deformation data using GeoGateway // *Earth Science Informatics*. 2022. Vol. 15. Iss. 3. P. 1513-1525. DOI: [10.1007/s12145-020-00561-7](https://doi.org/10.1007/s12145-020-00561-7)
29. *Liang He, Junru Zhang, Suozhong Chen et al.* Three-dimensional hydrogeological modeling method and application based on TIN-GTP-TEN // *Earth Science Informatics*. 2022. Vol. 15. Iss. 1. P. 337-350. DOI: [10.1007/s12145-021-00727-x](https://doi.org/10.1007/s12145-021-00727-x)
30. *Yong Li, Yinzhen Luo, Xia Gu et al.* Point Cloud Classification Algorithm Based on the Fusion of the Local Binary Pattern Features and Structural Features of Voxels // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Iss. 16. № 3156. DOI: [10.3390/rs13163156](https://doi.org/10.3390/rs13163156)
31. *Lingchen Lin, Kunyong Yu, Xiong Yao et al.* UAV Based Estimation of Forest Leaf Area Index (LAI) through Oblique Photogrammetry // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Iss. 4. № 803. DOI: [10.3390/rs13040803](https://doi.org/10.3390/rs13040803)
32. Блищенко А.А., Санникова А.П. Применение беспилотных летательных аппаратов при маркшейдерском обеспечении съемки лесного фонда // *Вестник СГУГиТ*. 2022. Т. 27. № 1. С. 42-51. DOI: [10.33764/2411-1759-2022-27-1-42-51](https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-1-42-51)
33. Санникова А.П., Добрянский И.А., Волошина Е.А. Проблемы современного маркшейдерско-геодезического обеспечения открытых горных работ // *Естественные и технические науки*. 2022. № 4 (167). С. 91-94. DOI: [10.25633/ETN.2022.04.10](https://doi.org/10.25633/ETN.2022.04.10)
34. Курков В.М., Киселева А.С., Чибунчев А.Г. Исследование точности цифровой модели рельефа, построенной по материалам беспилотной аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования // *Производственные системы будущего: опыт внедрения Leap и экологических решений: Материалы международной научно-практической конференции, 13-14 апреля 2022, Кемерово, Россия. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, 2022. С. 309.1-309.9.*
35. *Boliang Guan, Shujin Lin, Ruomei Wang et al.* Voxel-based quadrilateral mesh generation from point cloud // *Multimedia Tools and Applications*. 2020. Vol. 79. Iss. 29-30. P. 20561-20578. DOI: [10.1007/s11042-020-08923-5](https://doi.org/10.1007/s11042-020-08923-5)

Авторы: М.Г.Выстрчил, канд. техн. наук, доцент, ratven@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1669-7776> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), В.Н.Гусев, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-3148-9729> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.К.Сухов, аспирант, <https://orcid.org/0000-0002-1401-7909> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит»

А.П.ГОСПОДАРИКОВ, И.Е.РЕВИН✉, К.В.МОРОЗОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Господариков А.П., Ревин И.Е., Морозов К.В. Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит» // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 571-580. EDN PZUUR. DOI: 10.31897/PMI.2023.9

Аннотация. Геомеханический мониторинг состояния массива горных пород – это активно развивающийся раздел геомеханики, в котором невозможно выделить единую методологию и подходы для решения задач, сбора и анализа данных при разработке систем сейсмического мониторинга. При ведении горных работ изменениям подвергаются все природные факторы. В процессе отработки массива горных пород наиболее явно проявляются изменения состояния структурных неоднородностей: раскрываются имеющиеся естественные структурные неоднородности; происходят подвижки по разрывным нарушениям (разломам); образуются новые техногенные нарушения (трещины), которые сопровождаются изменением естественного напряженного состояния различных блоков массива. Разработанный метод оценки результатов мониторинга геомеханических процессов в массиве горных пород на примере Объединенного Кировского рудника КФ АО «Апатит» позволил решить одну из главных задач системы геомониторинга – спрогнозировать местоположение зон возможного возникновения опасных проявлений горного давления.

Ключевые слова: кластеризация; геомониторинг; сейсмика; анализ данных; машинное обучение; композитные модели

Благодарность. Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, соглашение FSER-2021-0012.

Поступила: 23.03.2022

Принята: 13.12.2022

Онлайн: 16.02.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Проводимые исследования являются дальнейшим развитием идеи, предложенной авторами [1], об использовании методов машинного обучения при работе с математическими моделями временных рядов, базирующихся на данных сейсмического мониторинга.

В задачу геомеханического мониторинга входит поиск различного рода взаимосвязей между широким перечнем природных и технических факторов, определяющих состояние техногенно нарушенного массива горных пород. Можно выделить две основные группы таких факторов. Так, например, в работе А.А.Козырева с соавторами [2] этим факторам даются следующие определения: «Природные факторы – это сумма свойств пород, слагающих массив, структурных неоднородностей массива и естественного природного поля напряжений. Технические факторы – это совокупность методов ведения горных работ, порядок строительства объектов, применяемая система разработки, характеристики горных выработок и др.».

Одним из способов оценки вероятности проявления опасных геодинамических процессов является использование математических моделей, основанных на данных сейсмического мониторинга. Так как массив горных пород является сложной динамической системой, для построения таких моделей целесообразно использовать как пространственные координаты, так и компоненты временного ряда сейсмической активности. Последовательность разрушений, которые появляются в процессе эксплуатации месторождения, можно представить в виде некоторого временного ряда, состоящего из дискретных событий. Каждое из этих событий задается координатой во времени и характеристикой, описывающей степень разрушения массива, например величиной энергии



сигнала [3]. В данной статье в качестве такого временного ряда предлагается использовать сейсмическую последовательность, зарегистрированную с помощью системы контроля состояния массива горных пород. Для локализации пространственной зоны подготовки очага разрушения используются методы кластеризации, присваивающие каждому дискретному событию свой пространственный кластер.

Объектом настоящего исследования является Кукисвумчоррское месторождение, разрабатываемое Объединенным Кировским рудником КФ АО «Апатит». По данным П.А.Корчака и С.А.Жуковой, мониторинг сейсмичности на подземных рудниках осуществляется с помощью автоматизированной системы контроля состояния массива (АСКСМ). За время наблюдения за сейсмичностью в массиве горных пород были выявлены такие закономерности: реакция массива на массовые взрывы; сезонный рост сейсмичности в периоды таяния снега; рост сейсмичности перед обрушением консоли налегающих пород.

Технологические процессы при ведении горных работ оказывают существенное влияние на сейсмический режим рудников. В настоящее время на рудниках АО «Апатит» документально зарегистрировано около 40 горных ударов [4].

Методология. В ближайшем будущем ожидается ряд технологических прорывов, отражающих глубинные технологические изменения, которые приведут к трансформации традиционного промышленного производства [5-7]. При этом необходимо учитывать, что увеличение объемов добычи полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях тесно связано с анализом основных параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород [8].

Достоверный анализ и моделирование НДС массива горных пород базируется на применении различных математических моделей [9, 10]. Так, с точки зрения теории, предложенной в рамках иерархической модели, критерием формирования очага разрушения является нарушение условий стационарности/квазистационарности моделируемого процесса (например, Пуассона) [11]. Однако при данном подходе учитываются только статистические и игнорируются, например, физико-механические параметры исследуемой среды. Это негативно влияет на качество работы используемой прогностической модели и не позволяет учитывать особенности моделируемого месторождения.

Таким образом, получение качественных и достоверных результатов при реализации таких моделей без непосредственного участия эксперта предметной области исследований всегда затруднено, так как он выбирает соответствующие стратегии предварительной обработки данных, тип используемой модели, ее параметры и набор критериев [12]. Предлагаемый в данной работе алгоритм генерирует с помощью математической модели, управляемой данными сейсмического мониторинга data-driven model [13, 14], собственный набор критериев формирования очага разрушения. Полученный набор учитывает и особенности ведения горных работ на месторождении, и физико-механические свойства массива горных пород.

Искомую математическую модель можно разработать, используя как одиночную модель машинного обучения, так и гибридный (композиционный) подход. В настоящее время идентификация data-driven-моделей со сложной гетерогенной структурой пока остается нерешенной проблемой. Структура композиционной модели может быть представлена в виде ориентированного ациклического графа (DAG), а наиболее подходящий вариант структуры может быть разработан с использованием оптимизационных подходов. Элементами этого графа являются модели машинного обучения (предназначенные для классификации или дополнительные модели для побочных задач, например, кластеризации).

Таким образом, задачей исследования является поиск кластеров – очагов разрушения горной породы. Для такой задачи в области пространства – времени – энергии сейсмических событий на основе проведенных исследований был разработан алгоритм системы анализа и прогноза геомеханического состояния техногенно нарушенного горного массива (рис.1), который заключается в одновременном применении различных моделей машинного обучения в единой композиционной модели, наиболее подходящих для определенного типа данных, отражающих изменчивость наблюдаемой системы в каждой из компонент пространства. Оценка качества итоговой модели в работе определяется введением критериев, необходимых для организации процесса многокритериальной оптимизации.

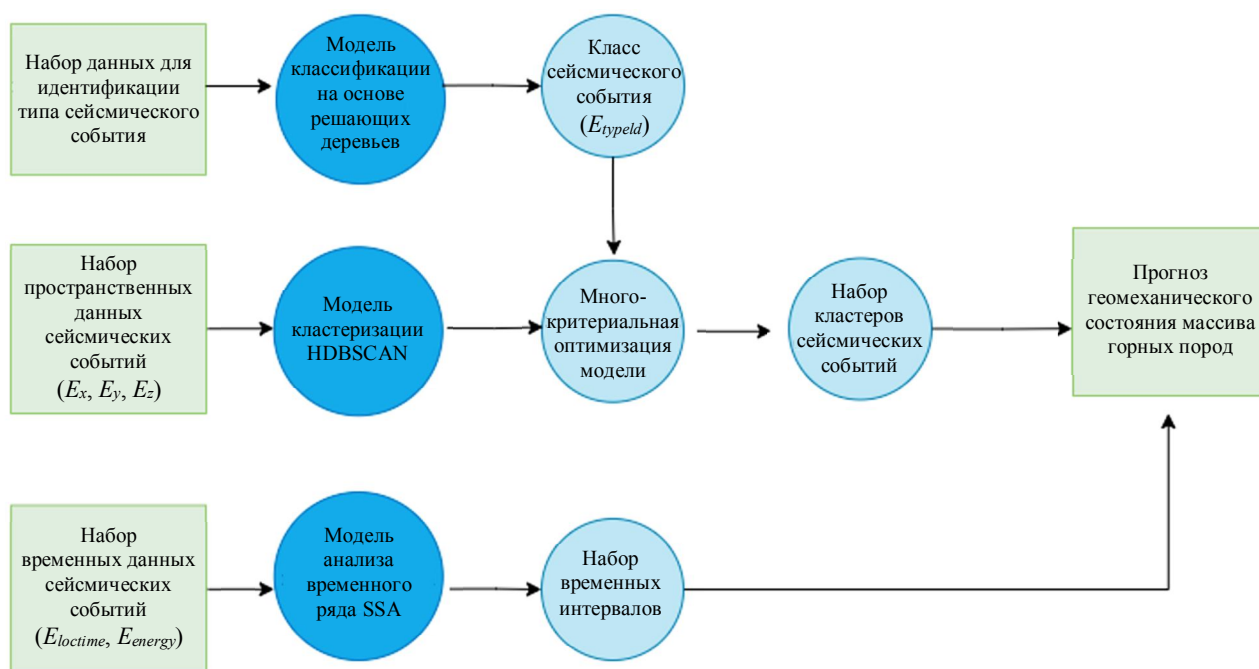


Рис. 1. Композитная модель прогноза опасных геодинамических явлений

Критерий Silhouette. Силуэтом выборки называется средняя величина силуэта объектов данной выборки; она показывает, насколько среднее расстояние до объектов своего кластера отличается от среднего расстояния до объектов других кластеров. Эта величина принадлежит диапазону $[-1, 1]$. Значения, близкие к -1 , соответствуют плохим (разрозненным) кластеризациям; значения, близкие к нулю, означают, что кластеры пересекаются и накладываются друг на друга; значения, близкие к единице, соответствуют «плотным», четко выделенным кластерам, т.е. чем больше силуэт выборки, тем более четко выделены кластеры, представляющие собой компактные, плотно сгруппированные облака точек.

Доли ложных (FAR) и пропущенных (MAR) тревог. Важнейшим элементом решения проблемы детектирования аномалий является определение временного окна детектирования. В рамках предложенных критериев качества предсказанные аномалии внутри окна детектирования воспринимаются только как один истинный положительный результат. Отсутствие прогнозируемых аномалий внутри окна обнаружения воспринимается только как один ложный отрицательный результат. Предсказанные точки за пределами окон обнаружения определяются как ложные срабатывания. В данном исследовании приняты три значения ширины окна детектирования: краткосрочный горизонт прогнозирования – 6 ч до и после наступления события; среднесрочный горизонт прогнозирования – 48 ч до и после наступления события; долгосрочный горизонт прогнозирования – 168 ч до и после наступления события.

Далее рассмотрим два из трех методов, используемых в итоговой композитной модели: метод Singular spectrum analysis (SSA) для анализа временных рядов сейсмического мониторинга, предназначенный для моделирования поведения системы в пространстве времени – энергии, и метод кластеризации HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise), предназначенный для поиска кластеров – очагов разрушения горной породы и отвечающий за моделирование пространственной изменчивости системы.

Базовым вариантом метода SSA при анализе временных рядов является декомпозиция исходного ряда на простые компоненты, которые могут быть аппроксимированы с помощью периодических функций или полиномов низкой степени [15-19]. Полученное разложение может служить основой прогнозирования как самого временного ряда, так и его отдельных составляющих. Для анализа временного ряда сейсмического мониторинга выбирается параметр L , отвечающий за ширину окна. Выбор значения этого параметра зависит от исследователя и его предметных знаний о системе, порождающей выбранный временной ряд. Затем на основе ряда строится матрица



Ганкеля, где в качестве столбцов используются векторы длины L . Задачей выбранного вида разложения является представление исходного ряда в виде суммы компонент. Такой метод рекомендуется применять для выделения тренда, циклических компонент и построения на основе выбранных компонент некоторой аппроксимации исходного временного ряда.

Анализ данных сейсмического мониторинга и кластеризация сейсмических событий требуют применения современных методов математического моделирования. В процессе длительного периода изучения сейсмического режима Кукисвумчоррского месторождения было установлено, что кластеры сейсмических событий и механизм их образования имеют схожие с другими месторождениями черты, в частности, они «приурочены к местам активного ведения горных работ, к дизъюнктивным нарушениям в консоли пород всячего бока, а также могут образовываться под влиянием других факторов – как природных, так и техногенных» [20].

Классический подход использования методов кластеризации – это подход, основанный на представлениях о физических процессах, происходящих в процессе нагружения и последующей деформации горного массива. Для решения задачи идентификации очаговых зон наиболее целесообразным кажется использование иерархического, или графового, подхода. Иными словами, данные методы являются методами строгой кластеризации [16, 21, 22]. При этом в ряде исследований утверждается, что использование методов нестрогой кластеризации более предпочтительно для моделирования случайных процессов [23, 24].

В результате работы был применен алгоритм HDBSCAN [6, 25, 26], который является иерархическим пространственным алгоритмом кластеризации данных с шумом на основе использования плотности распределения [27-30].

Результаты и обсуждения. В качестве данных для валидации работы предложенного алгоритма используются даты зафиксированных горных ударов за 2009-2018 гг. (табл.1). С целью соблюдения конфиденциальности пространственные координаты изменены.

Таблица 1

Зафиксированные горные удары (по данным карточек горных ударов)

Координаты сейсмического события по осям			
Ox	Oy	Oz	Дата наступления геодинамического события
0,456	0,413	0,325	13.05.2009
0,381	0,464	0,228	21.10.2010
0,603	0,441	0,293	27.01.2016

Длина анализируемого временного ряда составляет 365 дней, ширина временного окна была выбрана равной 30 дням (параметр L), а в качестве наблюдаемой величины используется среднее значение (за один день) всех сейсмических событий со значением энергии в диапазоне от 10^2 до 10^5 Дж. Данный диапазон был обоснован анализом распределения сейсмических событий по величине энергии с января 2009 г. по декабрь 2020 г., а также на основании экспертной оценки сотрудников Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета. В качестве оси Ox выбрана временная шкала сейсмического мониторинга, а в качестве оси Oy – шкала величины среднего значения сейсмических событий.

Параметр предполагаемой периодичности процесса формирования горного удара был выбран равным 15 дням. Его значение в 50 % от длины окна свидетельствует о наличии двух подпроцессов в рамках одного месяца. И если в первом подпроцессе (первые 15 дней) не было опасных проявлений горного давления (ГД), то вероятность их появления во втором подпроцессе (вторые 15 дней) растет в соответствии с ростом экспоненциальной функции. Восстановленные по первой элементарной матрице временные ряды для 2009, 2010 гг. приведены на рис.2, а, б, для 2016 г. – на рис.2, в. Первая элементарная матрица отвечает за тренд сейсмической активности. Как видно из рис.2, а, б, 13.04.2009 и 25.09.2010 достигаются минимальные значения тренда сейсмической активности.



На рис.2, а, б приведен пример комбинации первого и второго случаев (2009 и 2010 гг.). С одной стороны, имеется повтор ситуации 2009 г. (падение до минимального значения тренда сейсмической активности), и точка смены направления роста тренда 27.01.2015 (рис.2, в). Следовательно, анализ тренда сейсмической активности, полученного с помощью метода SSA, позволяет установить связь между опасными проявлениями ГД в виде горного удара от 21.01.2016 и сейсмической активностью, выраженной нисходящим трендом.

Таким образом, опасному проявлению ГД может предшествовать плавное снижение тренда до точки глобального минимума с последующим изменением в направлении тренда. В соответствии с предположением о цикличности процесса, для выбранных параметров (ширина окна и периодичность процесса), время до наступления опасного проявления ГД равно 15 и 30 дням соответственно.

Использование композитной модели для анализа данных сейсмического мониторинга за 2020 г. На рис.3 можно выделить три ключевые точки в тренде:

- 20.03.2020 достигается минимальное значение тренда сейсмической активности на текущий момент наблюдений. Однако вероятность наступления горного удара – умеренная, так как росту тренда предшествует период стационарности (отсутствие роста среднего значения тренда), равный длине окна (30 дней). Данный период можно интерпретировать как стабилизацию процессов деформации в массиве горных пород, что позволяет нейтрализовать возможные опасные проявления ГД.

- 20.05.2020 достигается локальный минимум тренда сейсмической активности, и начинается резкий рост тренда в противоположном направлении. Вероятность наступления горного удара в следующие 30 дней достаточно велика, так как процесс достиг своего локального минимума, и наступил рост сейсмической активности.

- 02.11.2020 достигается глобальный минимум значения тренда сейсмической активности за весь период наблюдений, а затем начинается его умеренный рост. Вероятность наступления горного удара в следующие

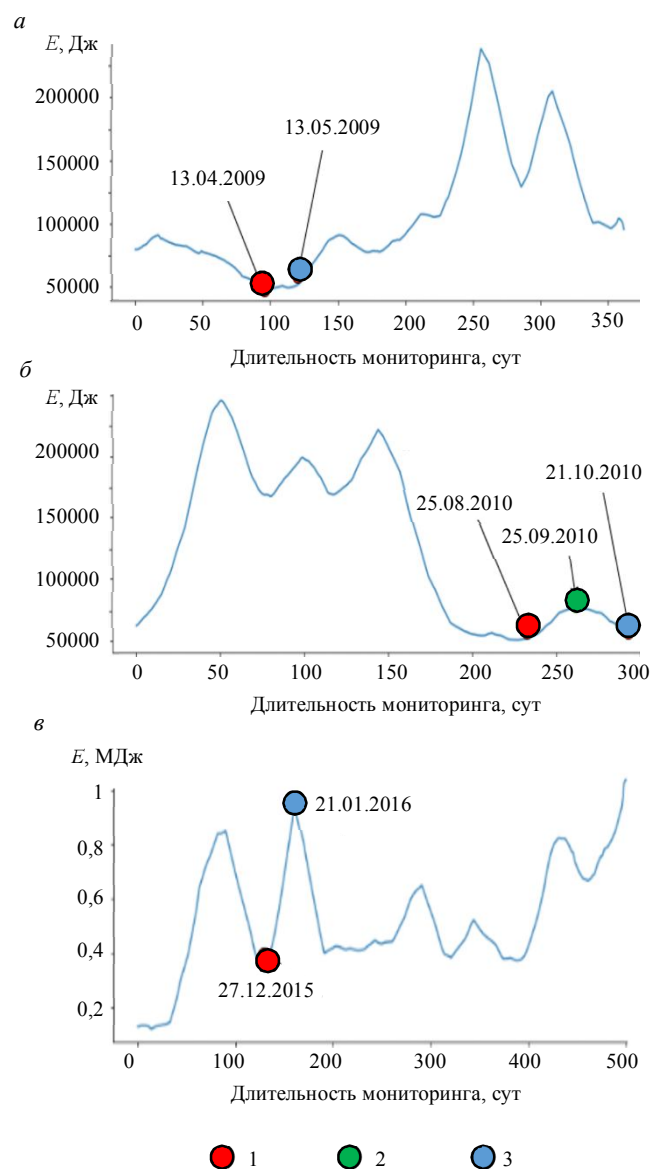


Рис.2. Тренд временного ряда сейсмического мониторинга за 2009 (а), 2010 (б) и 2016 гг. (в)
1 – минимум и смена направления движения тренда;
2 – предполагаемый горный удар;
3 – зафиксированный горный удар

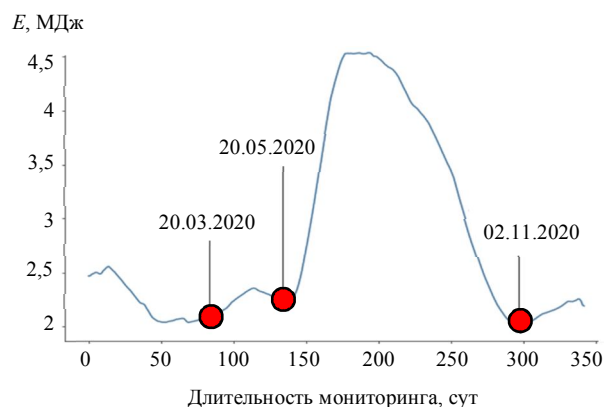


Рис.3. Тренд временного ряда сейсмического мониторинга за 2020 г.



30 дней крайне велика, так как процесс достиг своего минимального исторического значения, и наступил рост тренда сейсмической активности.

В двух из трех зафиксированных горных ударах удалось спрогнозировать приблизительное (с разницей в один-два дня) время наступления горного удара (табл.2). Однако для случая, произошедшего 06.07.2020, ошибка прогноза составила 15 дней, что требует уточнения прогноза. Далее с использованием данных с 01.01.2020 по 05.07.2020 (за один день до фактического горного удара) был детально рассмотрен случай и восстановлен исходный временной ряд.

Таблица 2

Прогнозы наступления потенциальных горных ударов

Появление точки локального минимума и смена тренда	Потенциальный горный удар (степень риска умеренная)	Потенциальный горный удар (степень риска крайне высокая)	Наступление зафиксированного геодинамического события
20.03.2020	06.04.2020	21.04.2020	08.04.2020
20.05.2020	06.06.2020	20.06.2020	06.07.2020
02.11.2020	17.11.2020	03.12.2020	04.12.2020

Как видно из рис.4, в точке 30.06.2020 достигается локальный максимум, и начинается смена направления движения тренда. Также в период с 30.06.2020 по 05.07.2020 зафиксировано максимальное значение амплитуды циклической составляющей. Совокупность этих факторов позволяет спрогнозировать наступление потенциального горного удара 06.07.2020. Таким образом, можно сделать вывод, что анализ тренда целесообразно дополнять анализом циклической составляющей.

Анализ результатов моделирования кластеров сейсмических событий на основе данных сейсмического мониторинга за 2020 г. В ряде работ отмечено, что «существенная часть подходов к прогнозным оценкам проявлений опасного горного давления основывается на следующей концепции: по мере разрушения горной породы происходит формирование нескольких стадий разрушения с постепенным переходом от одной стадии к другой» [31, 32]. Размеры и диапазон трещин, которые образуются в результате деформации и разрушения массива горных пород, могут варьироваться от миллиметра до десятых долей метра. Наиболее часто опасные проявления ГД выражаются в виде горных ударов и других проявлений техногенной сейсмичности (рис.5, 6).

Для анализа результатов моделирования кластеров сейсмических событий С.А.Игнатъев [11] утверждает, что «кластерный анализ опирается на два основных предположения: выявленные признаки объекта должны допускать разбиение некоторой совокупности объектов на кластеры; правильность выбора должного масштаба или необходимых единиц величин, отражающих признаки объекта (в некоторых случаях требуется применение стандартизованных величин)».

В частности, авторы [33, 34] предлагают использовать предварительную обработку исходных данных перед процедурой кластеризации. Исходные данные делятся на группы, каждая из которых характеризуется плотностью распределения сейсмических событий в пространстве сейсмического

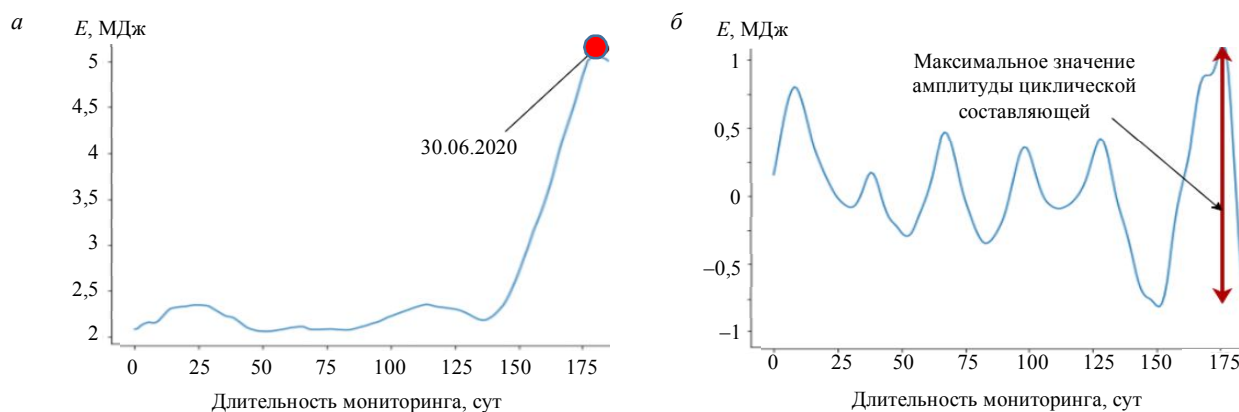


Рис.4. Тренд (а) и циклическая компонента (б) временного ряда сейсмического мониторинга за период с 01.01.2020 по 05.07.2020

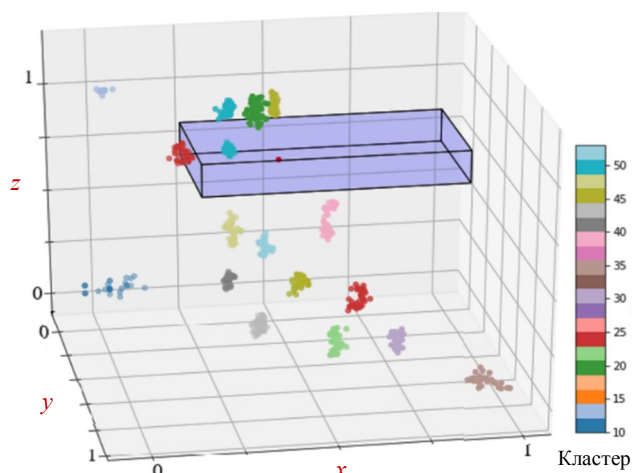
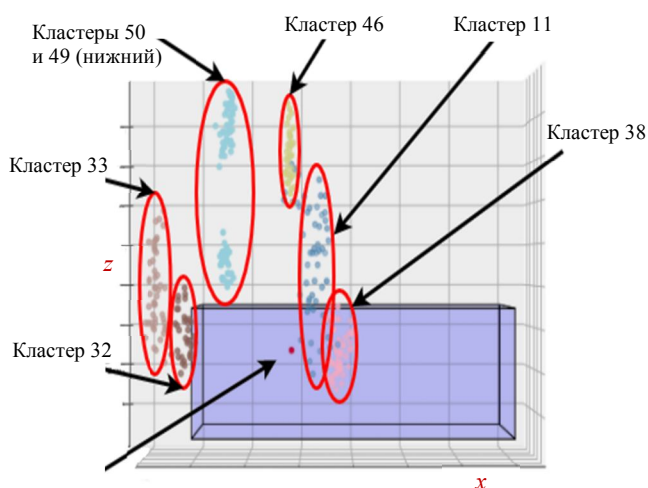


Рис.5. Выделение всех микрокластеров (не более 100 событий в год) сейсмических событий. Фиолетовый параллелепипед – опасная зона (зона горных работ + 100 м по осям Ox и Oy и 50 м запаса по оси Oz)



Горный удар 04.12.2020 в 23:23:13 с энергией $E = 5,32 \cdot 10^7$ Дж

Рис.6. Кластеры – очаги разрушения горной породы

мониторинга. Данный подход позволит отфильтровать исходные данные от «шумовых» точек. Также одним из этапов кластерного анализа является использование статистических критериев, полученных в результате анализа данных сейсмического мониторинга Кукисвумчоррского месторождения за длительный период наблюдений (2000-2020 гг.): среднее значение $9620 \pm 241,76$ Дж; медиана 1610 Дж; среднеквадратичное отклонение 18000 Дж.

Таким образом, все сейсмические события, превышающие выборочное среднее (на основании экспертной оценки сотрудников Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета было выбрано значение 104 Дж), рассматриваются как сейсмические события – предвестники, способные привести к опасным проявлениям ГД. Используя в качестве критериев качества предложенные в работе метрики, в ходе многокритериальной оптимизации [33-35] с помощью разработанного алгоритма были получены кластеры «неклассических» геометрических форм (эллипсоиды), которые условно можно разделить на три группы по расположению относительно произошедшего горного удара. Кластеры 32-33 находятся севернее точки удара, кластеры 46, 49, 50 расположены выше точки удара. Кластеры 11 и 38 находятся на юго-востоке от точки удара. Следует отметить, что все выделенные кластеры являются устойчивыми во времени, т.е. включают в себя сейсмические события в течении всего периода мониторинга в 2020 г. В табл.3 приведены кластеры и содержащиеся в них события – предвестники, которые с высокой долей вероятности могут являться триггерами горных ударов. Мониторинг сейсмических событий в этих кластерах в дальнейшем является целесообразным. В табл.4 приведены результаты расчета критериев качества FAR/MAR. Для подсчета метрики используются события – предвестники из табл.3.

Таблица 3

Характеристики сейсмических событий – предвестников выбранных кластеров, превышающих 10^4 Дж

Время наступления сейсмического события	Энергия сейсмического события, Дж	Номер кластера	Дата предполагаемого горного удара
22:13:27 11.03.2020	976000	50	06.04.2020
17:53:49 12.04.2020	153000	50	21.04.2020
02:55:17 21.05.2020	406000	50	06.06.2020
21:27:14 07.06.2020	94600	46	06.06.2020
06:33:30 15.06.2020	18400	50	21.06.2020
18:20:15 05.07.2020	362400	50	05.07.2020
08:31:49 08.11.2020	22300	32	17.11.2020
01:24:33 21.11.2020	15000	32	03.12.2020
02:23:31 21.11.2020	27400	33	03.12.2020
13:48:17 28.11.2020	24000	32	03.12.2020



Таблица 4

**Метрики сейсмических событий – предвестников
выбранных кластеров, превышающих 10⁴ Дж**

Дата наступления сейсмического события	Горизонты прогноза FAR/MAR		
	Краткосрочный	Среднесрочный	Долгосрочный
08.04.2020	1/1	0/0	1/1
06.07.2020	3/1	3/0	3/1
04.12.2020	3/1	0/0	3/1

Заключение. В результате анализа кластеризации сейсмических событий на основании данных мониторинга за 2020 г. можно сделать следующие выводы.

Сформирована гипотетическая связь между опасным проявлением ГД и плавным снижением тренда сейсмической активности до точки глобального минимума с последующим изменением в направлении тренда. Для каждого из горных ударов были найдены свои события-предвестники; их количество, разница во времени и значения энергий тесно связаны с вероятностью наступления горного удара.

Предложена схема композитной модели анализа данных сейсмического мониторинга. На основании сейсмического мониторинга за 2020 г. были получены экспериментальные данные, подтверждающие сформированную авторами гипотезу. Результаты исследования являются развитием идеи, предложенной авторами в статье об использовании методов машинного обучения при работе с математическими моделями временных рядов, которые базируются на данных сейсмического мониторинга [1].

Анализ полученных данных, их распределения во времени и пространстве выявил даты двух потенциально возможных опасных проявлений ГД 06.04.2020 и 03.12.2020. При этом фактические даты горных ударов 08.04.2020 и 04.12.2020 отличаются от предполагаемых на один-два дня. В случае с реальным горным ударом 06.07.2020 авторами был проведен дополнительный анализ временного ряда сейсмического мониторинга и внесены поправки в прогноз опасных проявлений ГД.

Проведем анализ критериев доли ложных (FAR) и пропущенных (MAR) тревог:

- краткосрочный горизонт прогнозирования (доля ложных срабатываний – две-три ложных тревоги на один горный удар, доля пропущенных горных ударов – 100 %);
- среднесрочный горизонт прогнозирования (доля ложных срабатываний – одно ложное событие на один горный удар, доля пропущенных горных ударов – 0 %);
- долгосрочный горизонт прогнозирования (доля ложных срабатываний – два-три события на один горный удар, доля пропущенных горных ударов – 100 %).

Таким образом, предложенный метод зависит от выбора горизонта прогноза и является эффективным при использовании среднесрочного горизонта прогнозирования. Можно утверждать, что композитная модель, основанная на анализе временного ряда сейсмического мониторинга и распределении кластеров – очагов сейсмических событий в массиве горных пород, является эффективным средством контроля опасных проявлений ГД.

Авторы выражают благодарность коллективу Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета за предоставленные исходные данные и научное сопровождение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Господариков А.П., Морозов К.В., Ревин И.Е. О методе обработки данных сейсмического и деформационного мониторинга при ведении подземных горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 8. С. 157-168. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-157-168
2. Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Федотова Ю.В. Концепция единой системы комплексного геомеханического мониторинга при ведении горных работ в скальных массивах горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 4. С. 168-191.



3. Шабаров А.Н., Заморкина Ю.В., Попов А.Л., Багаутдинов И.И. Комплексный подход при геодинамическом районировании шахтных полей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 49. С. 496-506. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-496-506
4. Корчак П.А., Жукова С.А. Методика получения исходных данных для обеспечения сейсмического мониторинга на подземных рудниках ОАО «Апатит» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 10. С. 15-20.
5. Сафиуллин Р.Н., Афанасьев А.С., Резниченко В.В. Концепция развития систем мониторинга и управления интеллектуальных технических комплексов // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 322-330. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.322
6. Трушко В.Л., Протосеня А.Г. Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 162-166. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.162
7. Litvinenko V.S. Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29. P. 1521-1541. DOI: 10.1007/s11053-020-09716-1
8. Trushko V.L., Protosenya A.G., Ochukrov V.I. Prediction of the geomechanically safe parameters of the stopes during the rich iron ores development under the complex mining and geological conditions // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. Iss. 22. P. 11095-11103.
9. Господариков А.П., Выходцев Я.Н., Зацепин М.А. Метод расчета воздействия сейсмозрывной волны на неоднородный массив горных пород, включающий горизонтальную выработку // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 6. С. 30-41. DOI: 10.15372/FTPRI20200603
10. Карасев М.А., Сотников Р.О. Прогноз напряженного состояния набрызг-бетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 626-638. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2
11. Игнатьев С.А., Сударииков А.Е., Имашев А.Ж. Современные математические методы прогноза условий поддержания и крепления горных выработок // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 371-375. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.371
12. Захаров Л.А., Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н. Прогнозирование динамического пластового давления методами искусственного интеллекта // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 23-32. DOI: 10.31897/PMI.2022.11
13. Beloglazov I.I., Petrov P.A., Bazhin V.Yu. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry // Eurasian Mining. 2020. Vol. 2 (34). P. 50-54. DOI: 10.17580/em.2020.02.12
14. Zhukovskiy Yu.L., Korolev N.A., Babanova I.S., Boikov A.V. The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. № 032056. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032056
15. Jia Qiong, Zhessakov A. Study on ecological evaluation of urban land based on GIS and RS technology // Arabian Journal of Geosciences. 2021. Vol. 14. Iss. 4. № 261. DOI: 10.1007/s12517-021-06586-6
16. Golyandina N., Osipov E. The «Caterpillar»-SSA method for analysis of time series with missing values // Journal of Statistical Planning and Inference. 2007. Vol. 137. Iss. 8. P. 2642-2653. DOI: 10.1016/j.jspi.2006.05.014
17. Golyandina, N., Stepanov D. SSA-based approaches to analysis and forecast of multidimensional time series // Proceedings of the 5th Saint Petersburg Workshop on Simulation, 26 June – 2 July 2005, Saint Petersburg, Russia. P. 293-298.
18. Golyandina N.E., Usevich K.D. 2D-extension of Singular Spectrum Analysis: algorithm and elements of theory // Matrix Methods: Theory, Algorithms and Applications. World Scientific Publishing, 2010. P. 449-473.
19. Golyandina N., Shlemov A. Variations of Singular Spectrum Analysis for separability improvement: non-orthogonal decompositions of time series // Statistics and its interface. 2015. Vol. 8. P. 277-294. DOI: 10.4310/SII.2015.v8.n3.a3
20. Опарин В.Н. Багаев С.Н., Маловичко А.А. Методы и системы сейсмореформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 1. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2009. 304 с.
21. Bhattacharjee P., Mitra P. A survey of density based clustering algorithms // Frontiers of Computer Science. 2021. Vol. 15. № 151308. DOI: 10.1007/s11704-019-9059-3
22. Malzer C., Baum M. A Hybrid Approach To Hierarchical Density-based Cluster Selection // IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), Karlsruhe, Germany, 2020. P. 223-228. DOI: 10.1109/MFI49285.2020.9235263
23. Абрамович Б.Н., Бабанова И.С. Разработка нейросетевых моделей в целях управления и прогнозирования режимов электропотребления предприятий минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 5. С. 206-221. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-206-213
24. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6. № 2. P. 182-197. DOI: 10.1109/4235.996017
25. Comaniciu D., Meer P. Mean shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. Vol. 24. № 5. P. 603-619. DOI: 10.1109/34.1000236
26. Sander J., Ester M., Kriegel H.P., Xu X. Density-Based Clustering in Spatial Databases: The Algorithm GDBSCAN and Its Applications // Data Mining and Knowledge Discovery. Berlin: Springer-Verlag, 1998. Vol. 2. P. 169-194. DOI: 10.1023/A:1009745219419
27. Кочнев А.А., Козырев Н.Д., Кочнева О.Е., Галкин С.В. Разработка комплексной методики прогноза эффективности геолого-технических мероприятий на основе алгоритмов машинного обучения // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 3. С. 79-86. DOI: 10.18599/grs.2020.3.79-86
28. Hoang Nguyen, Xuan-Nam Bui, Tran Quang Hieu et al. A comparative study of empirical and ensemble machine learning algorithms in predicting air over-pressure in open-pit coal mine // Acta Geophysica. 2020. Vol. 68. Iss. 2. P. 325-336. DOI: 10.1007/s11600-019-00396-x
29. Campello R., Kröger P., Sander J., Zimek A. Density-based clustering // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. 2020. Vol. 10. Iss. 2. DOI: 10.1002/widm.1343
30. Moulavi D., Jaskowiak P., Campello R. et al. Density-Based Clustering Validation // SIAM Proceedings of the 2014 SIAM International Conference on Data Mining (SDM). 2014. P. 839-847. DOI: 10.1137/1.9781611973440.96



31. *Ke-ping Zhou, Yun Lin, Hong-wei Deng et al.* Prediction of rockburst classification using cloud model with entropy weight // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2016. Vol. 26. Iss. 7. P. 1995-2002. DOI: [10.1016/S1003-6326\(16\)64313-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64313-3)
32. *Ma T.H., Tang C.A., Tang L.X. et al.* Rockburst characteristics and micro-seismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station // Tunnelling and Underground Space Technology. 2015. Vol. 49. P. 345-368. DOI: [10.1016/j.tust.2015.04.016](https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.04.016)
33. *Garza-Fabre M., Toscano P.G., Coello Coello C.A.* Ranking Methods for Many-Objective Optimization // MICAI 2009: Advances in Artificial Intelligence 8th Mexican International Conference on Artificial Intelligence Guanajuato, 9-13 November 2009, México. 2009. Vol. 5845. P. 633-645. DOI: [10.1007/978-3-642-05258-3_56](https://doi.org/10.1007/978-3-642-05258-3_56)
34. *Zitzler E., Laumanns M., Thiele L.* SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm // TIK-Report. Vol. 103. ETH Zurich: Computer Engineering and Networks Laboratory. DOI: [10.3929/ETHZ-A-004284029](https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-004284029)
35. *Гладырь А.В., Курсакин Г.А., Рассказов М.И., Константинов А.В.* Разработка метода выделения опасных участков в массиве горных пород по данным сейсмоакустических наблюдений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 8. С. 21-32. DOI: [10.25018/0236-1493-2019-08-0-21-32](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-21-32)

Авторы: **А.П.Господариков**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0003-1018-6841> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **И.Е.Ревин**, аспирант, revine@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4459-8724> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **К.В.Морозов**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0003-3597-756X> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Лабораторная, численная и промысловая оценка эффективности циклического геомеханического воздействия на карбонатном коллекторе турнейского яруса

И.М.ИНДРУПСКИЙ¹ ✉, И.И.ИБРАГИМОВ², Т.Н.ЦАГАН-МАНДЖИЕВ¹, А.А.ЛУТФУЛЛИН³, А.П.ЧИРКУНОВ³, Р.И.ШАКИРОВ³, Ю.В.АЛЕКСЕЕВА¹

¹ Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

² Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Россия

³ СП «Татнефть-Добыча», Альметьевск, Россия

Как цитировать эту статью: Индрупский И.М., Ибрагимов И.И., Цаган-Манджиев Т.Н., Лутфуллин А.А., Чиркунов А.П., Шакиров Р.И., Алексеева Ю.В. Лабораторная, численная и промысловая оценка эффективности циклического геомеханического воздействия на карбонатном коллекторе турнейского яруса // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 581-593. EDN GSVEJA. DOI: 10.31897/PMI.2023.5

Аннотация. Рассматриваются результаты работ по оценке эффективности применения метода циклического геомеханического воздействия на карбонатный коллектор турнейского яруса. Представлен анализ выполненных лабораторных экспериментов по оценке изменения проницаемости образцов турнейского яруса при циклическом изменении порового давления. Основной вывод состоит в положительной избирательности циклического геомеханического воздействия: прирост проницаемости наблюдается для образцов, насыщенных углеводородами (керосином) с остаточной водой, при этом максимальный прирост характерен для наиболее плотных образцов. В водонасыщенных образцах проницаемость после воздействия снижается. Таким образом, циклическое геомеханическое воздействие улучшает условия дренирования уплотненных нефтенасыщенных интервалов. Также подтвержден вывод о том, что циклическое геомеханическое воздействие снижает давление разрыва в карбонатных коллекторах. Путем расчетов на детализированных секторных моделях с учетом результатов лабораторных экспериментов оценен возможный прирост коэффициента продуктивности при циклическом геомеханическом воздействии при различной амплитуде воздействия. Представлена интерпретация результатов опытно-промышленных работ по апробации циклического геомеханического воздействия на скважине, эксплуатирующей карбонатный коллектор турнейского яруса, включая контрольные гидродинамические и промыслово-геофизические исследования. Прирост коэффициента продуктивности по жидкости оценивается в 44-49 %, по нефти – в 21-26 % при более равномерном профиле притока после воздействия. Итоги опытно-промышленных работ подтверждают выводы о механизмах и особенностях циклического геомеханического воздействия, полученные по результатам лабораторных исследований и секторного моделирования.

Ключевые слова: циклическое геомеханическое воздействие; карбонатный коллектор; зависимость проницаемости от давления; микротрещиноватость; коэффициент продуктивности; прирост продуктивности; профиль притока; секторные модели; ОПР; ГДИ

Благодарность. Представленные результаты получены в рамках совместных исследований АГНИ и ПАО «Татнефть», а также выполнения государственного задания ИПНГ РАН по теме «Совершенствование методов моделирования, лабораторных и промысловых исследований для создания новых технологий эффективного экологически чистого извлечения углеводородов в сложных горно-геологических условиях» (122022800272-4).

Поступила: 20.06.2022

Принята: 17.11.2022

Онлайн: 05.05.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Нефтедобывающие компании уделяют все больше внимания значительным запасам углеводородов в карбонатных коллекторах. При этом эффективность их извлечения ниже, чем для терригенных пластов. Возрастающий интерес недропользователей становится причиной развития технологий, нацеленных именно на карбонатные объекты. Метод циклического геомеханического воздействия (ЦГВ) состоит в организации на скважине высокоамплитудных циклов



с последовательным созданием депрессии и репрессии на пласт. Предполагаемый механизм влияния связан с образованием вокруг скважины зоны разуплотнения с улучшенными фильтрационными свойствами. Карбонатные породы отличаются хрупкостью, а в их структуре (наряду с первичной пустотностью) есть система естественных трещин разного масштаба [1]. Под действием меняющихся эффективных напряжений в процессе разработки происходит деформация коллектора, для изучения которой применяются методы и модели геомеханики [2, 3].

Теоретические, экспериментальные и численные геомеханические исследования карбонатных коллекторов используются для решения различных задач:

- прогнозирования параметров естественной трещиноватости [4] и влияния разломов на распределение напряжений в карбонатном пласте [5] для оптимизации размещения скважин;
- совершенствования дизайна проппантного [6] и кислотного [7] гидравлического разрыва пласта (ГРП) для эффективной добычи углеводородов из плотных низкопроницаемых карбонатных коллекторов;
- оценки взаимовлияния гидродинамических процессов и изменений напряженно-деформированного состояния на фильтрационные параметры матрицы и системы трещин при добыче газа [8];
- выбора оптимального метода повышения нефтеотдачи с учетом влияния состава нагнетаемой воды на динамику деформационных процессов [9];
- прогнозирования влияния кислотного воздействия на механическую устойчивость ствола и уплотнение коллектора в окрестности стимулируемых горизонтальных скважин [10];
- оценки влияния термических [11] и геохимических [12, 13] процессов при подземном захоронении диоксида углерода на изменение геомеханических характеристик карбонатного коллектора и связанные с ним риски потери герметичности хранилища;
- учета различного характера и количественных характеристик деформаций матрицы и трещин коллектора по экспериментальным данным для более точного прогнозирования осадки горных пород при истощении месторождений [14] и оптимизации режимов эксплуатации скважин [15] и др.

Возможность увеличения проницаемости карбонатного коллектора в околоскважинной зоне при глубоком снижении и последующем восстановлении давления экспериментально показана группой исследователей под руководством С.Н.Закирова применительно к месторождению Тенгиз в конце 1980-х годов, что нашло отражение в патенте [16]. Предполагаемый механизм воздействия связан с возникновением микротрещиноватости за счет сдвиговых разрушений, возникающих в породе коллектора под действием высоких эффективных напряжений. Близкий метод (метод георыхления) представлен в [17], на основе которого предложены технологии для освоения пробуренных скважин [18] и повышения продуктивных характеристик действующих скважин [19]. В исследовании [20] описан пример его применения для увеличения приемистости нагнетательной скважины. В работе [21] классифицированы особенности изменения проницаемости при снижении забойного давления в зависимости от типа и свойств коллектора. Лабораторные исследования керна на установке трехосного независимого нагружения для обоснования параметров применения метода рассмотрены в работе [22]. Пример лабораторных исследований керна и результаты реализации георыхления совместно с кислотной обработкой для двух скважин представлены в [23]. Патент [24] описывает усовершенствованную модификацию метода (метод направленной разгрузки пласта). Эффективность повышается за счет создания в призабойной зоне пласта концентраторов напряжений, например, с помощью перфорации. В работе [25] описаны результаты лабораторных исследований применительно к методу направленной разгрузки пласта на образцах ачимовских отложений Уренгойского месторождения.

Похожий метод воздействия, названный гидродинамическим сжатием пласта (ГСП) и реализуемый в процессе капитального ремонта скважины путем свабиrowания или с применением струйного насоса, описан в работе [26]. По результатам гидродинамических (ГДИ) и промыслово-геофизических (ПГИ) исследований в процессе опытных работ отмечался существенный прирост производительности скважин и дренируемых эффективных толщин. Также отмечается заметное улучшение параметров удаленной зоны пласта, что вызывает сомнения, учитывая характер производимого воздействия. Возможно, результаты объяснимы приобщением к работе дополнительных проппантов.



В патенте [27] предложен метод ЦГВ, а в работе [28] рассмотрены особенности его реализации. В отличие от описанных методов, при ЦГВ полуцикл создания глубокой депрессии дополняется последующим полуциклом репрессии для раскрытия и дальнейшего роста созданных микро-трещин. В отличие от метода ГРП, основанного на создании преобладающей единичной трещины разрывного нарушения, метод ЦГВ инициирует формирование более равномерной зоны трещиноватости (разуплотнения) в околоскважинной зоне. Таким образом, метод направлен не только на повышение продуктивности скважин, но и на улучшение равномерности дренирования коллектора и выработки запасов за счет комплексного воздействия на скважины обрабатываемого участка. В исследовании [29] описан пример естественного проявления аналогичного эффекта повышения продуктивности при периодической эксплуатации скважин на карбонатной залежи.

В работах [30, 31] описаны результаты специализированных лабораторных экспериментов на образцах карбонатного керна турнейских и башкирских отложений Республики Татарстан по оценке изменения проницаемости и упругих модулей при циклическом изменении давления. Влияние учета полученных зависимостей на динамику распределения давления и равномерность выработки запасов оценено по результатам численного моделирования в [32]. Экспериментальные и численные исследования показали, что метод ЦГВ представляет интерес для дальнейшего изучения применительно к основным карбонатным отложениям Волго-Уральского региона.

В данной работе рассматриваются результаты оценки потенциальной эффективности и особенностей ЦГВ для коллекторов турнейского яруса по комплексу лабораторных, численных и промысловых исследований.

Методы. Для проведения лабораторных экспериментов отобраны шесть образцов керна турнейского яруса длиной 61 мм и диаметром 30 мм. Основные параметры образцов приведены в табл.1.

Таблица 1

Параметры образцов турнейского яруса

Образец	Глубина, м	Литология	Пористость, %	Проницаемость по газу, мД	Флюид	Остаточная водонасыщенность, %
2	1224,29	Известняк	14,24	484	Керосин	10,81
5к	1224,67		12,88	270	Керосин	14,33
6	1224,71		12,31	60	Керосин	19,04
1	1222,04		10,41	126	Вода	–
3	1223,59		13,50	156	Вода	–
5в	1228,25		14,10	31	Вода	–

Эксперименты проводились на установке ПИК-УИДК/ПЛ лаборатории геомеханики ТатНИПИнефть по разработанной авторами программе. Для оценки влияния насыщения образцов использовано два варианта флюида: модель пластовой воды и керосин. В образцах, насыщенных керосином, предварительно создавалась остаточная водонасыщенность.

Исследования проводились в условиях псевдотрехосного сжатия с моделированием характерного для рассматриваемого объекта вертикального горного давления (осевая нагрузка на образец) и минимального бокового напряжения (давление обжима), оцененного по формуле Итона [3]. В процессе эксперимента осуществлялось циклическое изменение порового давления в соответствии с программой (рис.1). Начальное поровое давление флюида соответствовало начальному пластовому давлению моделируемого объекта.

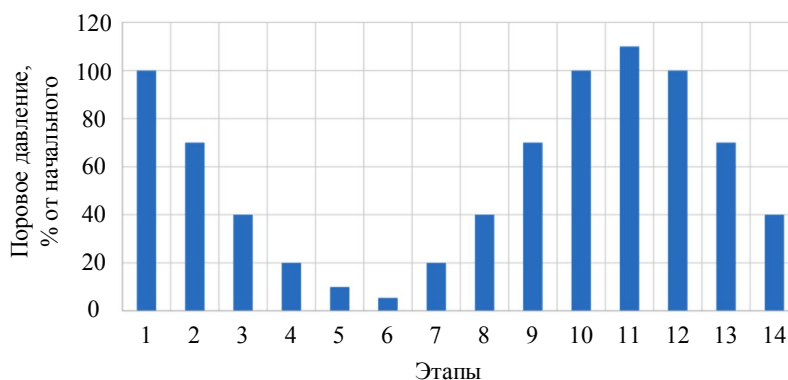


Рис.1. Этапы эксперимента

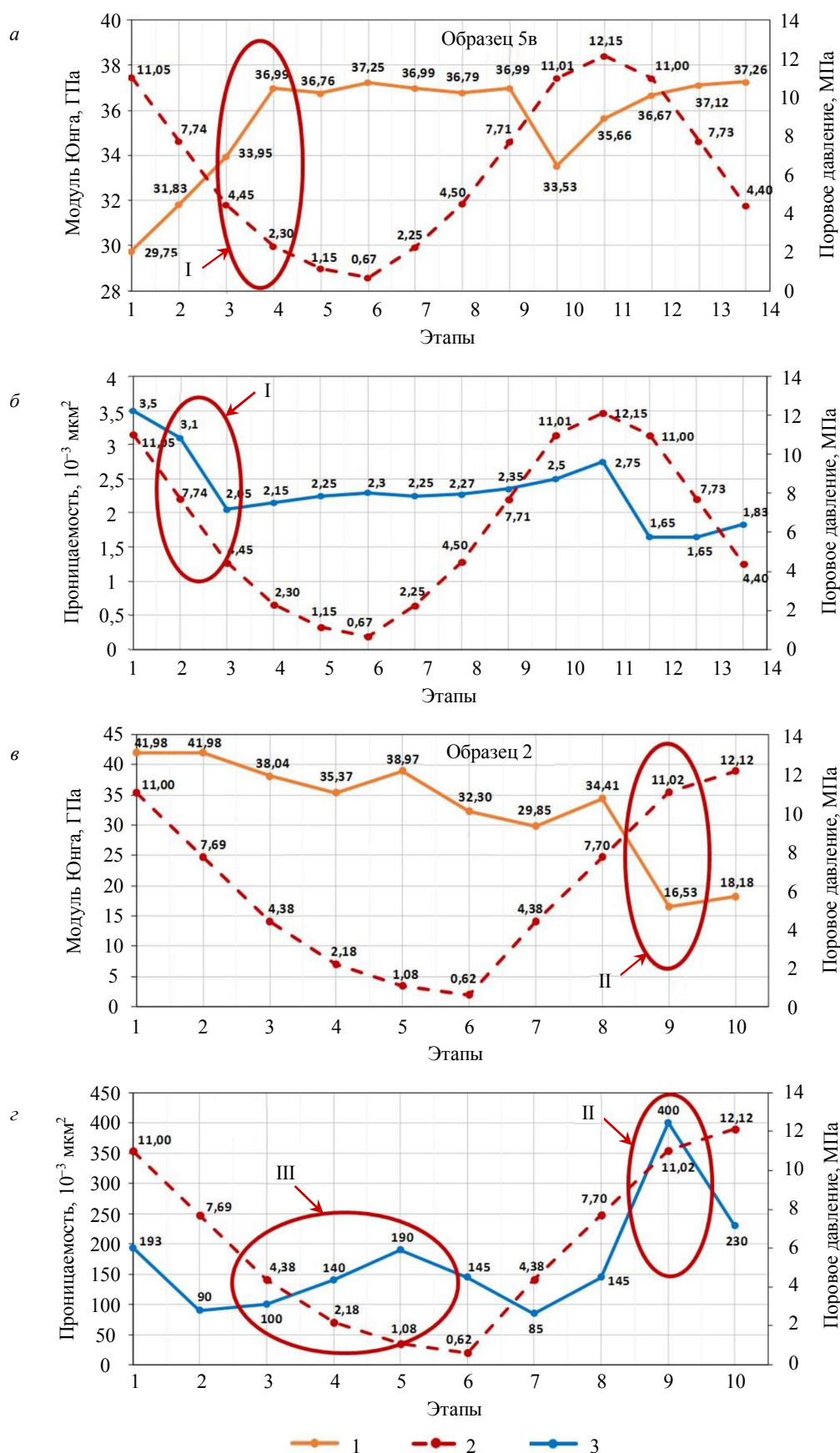


Рис.2. Результаты лабораторных исследований для образцов, насыщенных водой (а, б) и керосином с остаточной водой (в, г)

1 — модуль Юнга; 2 — поровое давление; 3 — проницаемость
I — уплотнение; II — трещина разрыва; III — разрыхление при сжатии



На каждом этапе эксперимента поровое давление поддерживалось постоянным. Осуществлялась прокачка насыщающего флюида с расходом $0,1 \text{ см}^3/\text{мин}$ до стабилизации перепада давления и определялось текущее значение проницаемости. Время до стабилизации в среднем составляло около двух часов. Также акустическим методом оценивались текущие значения динамических упругих модулей – модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Характерные результаты исследований по двум образцам приведены на рис.2. На рис.3 представлены зависимости проницаемости исследованных образцов от изменения порового давления в гистерезисных циклах снижения – повышения – обратного снижения давления.

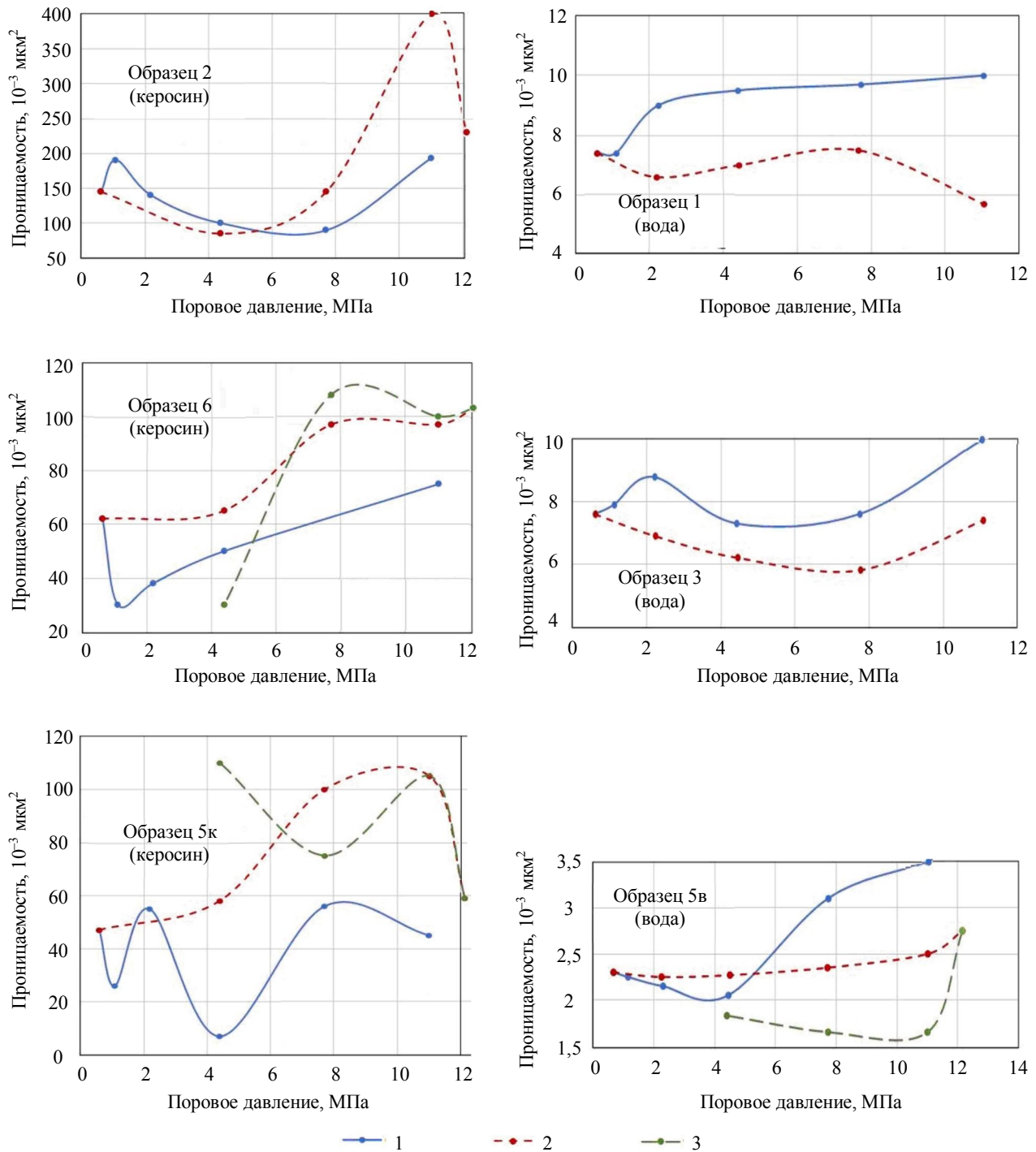


Рис.3. Результаты лабораторных исследований: зависимости проницаемости в гистерезисных циклах изменения порового давления

1 – первичное снижение давления; 2 – повышение давления; 3 – вторичное снижение давления



Для водонасыщенных образцов отмечается уплотнение (снижение либо сохранение проницаемости при увеличении модуля Юнга) в ходе первичного снижения давления, а также дальнейшее уменьшение проницаемости или ее незначительный рост при последующем повышении давления.

Подобное поведение водонасыщенного карбонатного коллектора объясняется эффектом *water induced compaction* (уплотнения под воздействием воды). Наиболее известное проявление данного эффекта и значительный объем исследований связаны с меловыми породами месторождения Ekofisk в Северном море [33]. В дальнейшем влияние уплотнения меловых пород под воздействием воды рассматривалось и применительно к другим объектам [34], в том числе в качестве возможного механизма повышения нефтеотдачи при низкоминерализованном заводнении [35]. Часто используется термин *water weakening* (ослабление под воздействием воды), под которым понимают различные эффекты снижения механической прочности горных пород при контакте с водой (например, усиление пескопроявлений обводняющихся скважин в слабосцементированных песчаниках [36] или снижение прочности плотных и сланцевых пород вокруг трещин ГРП при контакте с жидкостью разрыва [37]). Также ослабление под воздействием воды отмечалось как один из факторов, приводящих к техногенным землетрясениям при нагнетании в истощенную залежь [38].

Образцы, насыщенные керосином, демонстрируют другой вид зависимостей: у всех наблюдались признаки разуплотнения внутренней структуры под действием сжимающих напряжений при снижении порового давления, а также последующий рост проницаемости при повышении давления за счет раскрытия образовавшихся микротрещин. Также по ряду образцов при превышении начального давления отмечался характерный резкий рост проницаемости со снижением модуля Юнга, соответствующий образованию трещины разрыва из-за разуплотнения. Эффект прироста проницаемости сохранялся на стадии вторичного снижения давления до начального или меньших величин.

Помимо насыщения, на характер изменения фильтрационных характеристик при изменении давления влияют и начальные параметры образцов. Образцы с пониженными значениями модуля Юнга и повышенными величинами пористости, т.е. изначально более «рыхлые» с вероятным присутствием микротрещин, характеризуются более интенсивным уменьшением проницаемости в процессе первичного снижения давления. Это согласуется с результатами работы [39] по карбонатным коллекторам турнейско-фаменского яруса Верхнекамского региона. Для более плотных образцов отмечаются наибольшие приросты проницаемости в результате ЦГВ.

Совместный анализ результатов рассматриваемых лабораторных экспериментов с предшествующими исследованиями, описанными в [30, 31], представлен на рис.4. Здесь отображены зависимости коэффициентов прироста проницаемости k_2/k_1 и k_2/k_3 от пористости и начального динамического модуля Юнга образцов, где k_1 – проницаемость при начальном пластовом давлении на стадии первичного снижения порового давления; k_2 – проницаемость при начальном пластовом давлении на стадии обратного снижения порового давления; k_3 – минимальное значение проницаемости на стадии снижения порового давления.

Зависимости на рис.4 подтверждают влияние насыщения на изменение проницаемости. Практически все образцы, насыщенные керосином, показали увеличение проницаемости, замеренной при начальном пластовом давлении по завершении циклического воздействия, по сравнению с проницаемостью на начало эксперимента $k_2/k_1 > 1$. Исключением является образец, исследованный с частичным нарушением режимов, поэтому он не учитывался в дальнейшем анализе (на рис.4 ему соответствует квадратный оранжевый маркер с максимальным значением пористости и минимальным значением модуля Юнга). У всех образцов, насыщенных водой, проницаемость снизилась $k_2/k_1 < 1$. Аналогичные выводы справедливы для соотношения проницаемости, замеренной при начальном пластовом давлении по завершении циклического воздействия, к минимальной проницаемости k_2/k_3 . Данное соотношение отражает эффект от ЦГВ по сравнению с состоянием истощенного коллектора. Также видно наличие прямой зависимости прироста проницаемости от начальных упругих характеристик образцов: отношение k_2/k_1 имеет тенденцию к росту с увеличением начального динамического модуля Юнга, что соответствует более высокому эффекту от ЦГВ в плотных интервалах коллектора. Однозначные зависимости от пористости не прослеживаются, что можно объяснить влиянием сложной структуры порового пространства (пористая матрица, микротрещины).

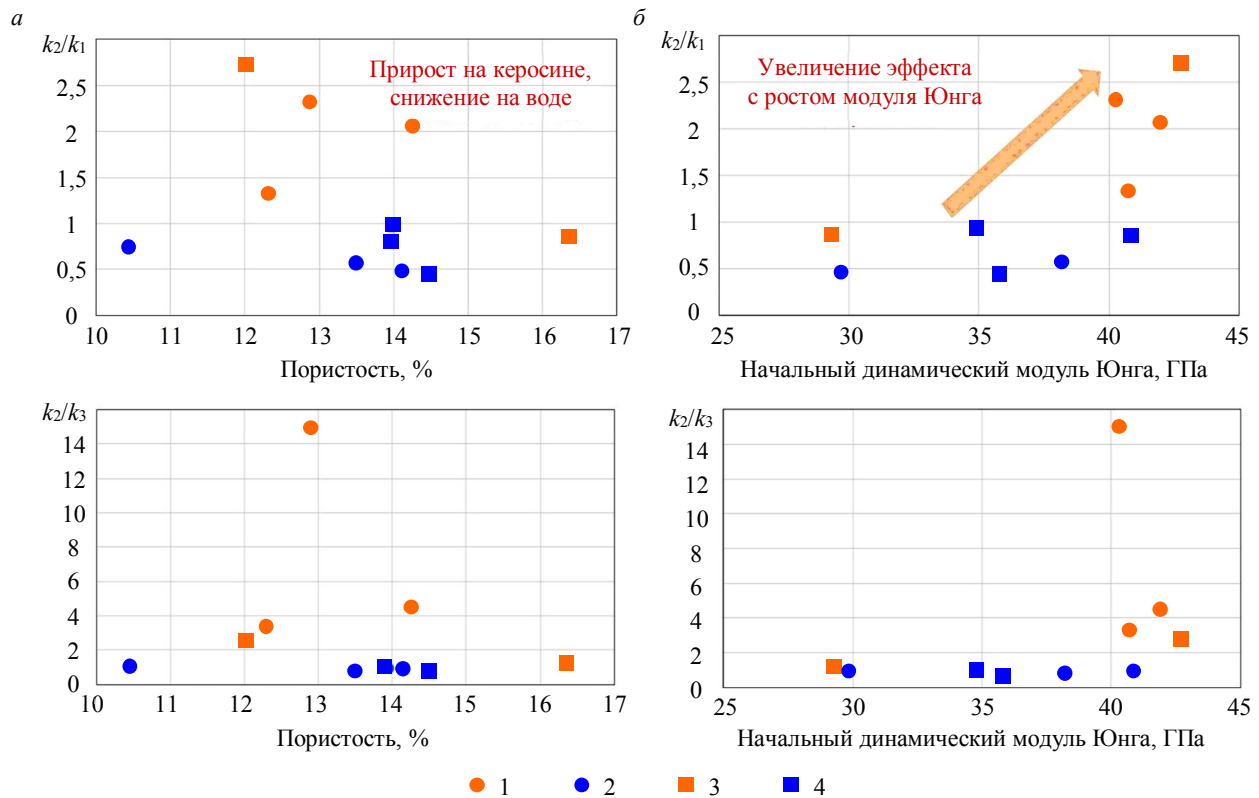


Рис.4. Зависимость прироста проницаемости от пористости (а) и начального модуля Юнга (б) образцов
Образцы, насыщенные: 1 – керосином (2020); 2 – водой (2020); 3 – керосином (2019); 4 – водой (2019)

Таким образом, из анализа экспериментальных данных можно ожидать прироста проницаемости от ЦГВ в необходимых интервалах турнейского яруса при сохранении или снижении проницаемости в обводненных интервалах. Оба фактора являются положительными для добывающих скважин. В нагнетательных скважинах не исключено снижение проницаемости в промытых интервалах, но возможно приобщение неработающих или слабо работающих толщин.

В табл.2 сопоставлена оценка теоретического давления ГРП и фактического давления начала разрывного разрушения для образцов, по которым зафиксированы такие признаки. В качестве признаков начала разрыва принималось резкое снижение модуля Юнга ниже начального значения и (или) резкий рост проницаемости образца. Показано, что для всех образцов фактическое давление начала разрыва существенно ниже теоретического, что может свидетельствовать о снижении прочности образцов в процессе ЦГВ и раскрытии микротрещин, формирующихся на стадиях глубокого снижения и последующего повышения порового давления.

Таблица 2

**Взаимосвязь фактического и теоретического давления ГРП
по образцам турнейского яруса**

Образец	Давление ГРП		Образец	Давление ГРП	
	Теоретическое (давление обжима), МПа	Фактическое, МПа		Теоретическое (давление обжима), МПа	Фактическое, МПа
2020 г.			2019 г.		
2 (керосин)	14,21	11,02	2 (вода)	17,45	13,6
5в (вода)		12,15	3 (вода)		13,8
5к (керосин)		11,02	4 (керосин)		13,6
6 (керосин)		12,12			



Численное моделирование. Полученные по керновым данным гистерезисные зависимости изменения проницаемости использовались для оценки прироста коэффициента продуктивности скважины от ЦГВ при различной амплитуде изменения забойного давления. Для численного моделирования ЦГВ на карбонатный коллектор использована секторная модель с квазиравномерной сеткой по осям Ox и Oy и одним слоем по вертикали. Центральной ячейке со скважиной соответствовал минимальный размер $0,5 \times 0,5$ м. Оптимальный коэффициент увеличения размера ячеек от центра подобран на основе серии пробных расчетов и составил $q = 1,1$. Это позволило детально моделировать распределение давления в околоскважинной зоне для корректного определения изменения проницаемости с учетом ее удаления от скважины. Свойства динамической системы – значения начальной проницаемости, пористости, кривые относительных фазовых проницаемостей, данные инициализации, свойства флюидов – заимствованы из гидродинамической модели реальной залежи в турнейском ярусе.

Расчеты выполнялись с использованием гидродинамического симулятора tNavigator компании Rock Flow Dynamics. Гистерезисная зависимость проницаемости от давления принята по одному из исследованных образцов, насыщенных керосином с остаточной водой. Она реализовывалась в модели с использованием опции ROCKTAB с настройкой HYSTER путем задания кривой для первичного снижения давления и серии кривых для последующего повышения давления, соответствующих разной точке смены направления его изменения. Кривая с минимальной точкой строилась по керновым данным, другие кривые – с учетом уменьшения наклона (эффекта от воздействия) по мере уменьшения амплитуды первичного снижения давления [40].

Для оценки прироста коэффициента продуктивности рассматривалось ЦГВ, реализуемое путем увеличения проектного дебита скважины в 2 (слабое воздействие), 3 (сильное) или 3,5 (максимальное) раза, с последующим возвратом к проектному дебиту и определением изменения депрессии. Прирост стабилизированной величины коэффициента продуктивности при рассмотренных исходных данных составил 17, 45 и 62 % для слабого, сильного и максимального воздействия соответственно [40].

Опция ROCKTAB с настройкой HYSTER позволяет задавать гистерезисную зависимость проницаемости от давления, но без «закрепления эффекта» при вторичном снижении давления и без учета влияния водонасыщенности коллектора. Последний фактор не предусмотрен доступными опциями использованного гидродинамического симулятора. Моделирование ЦГВ с учетом переменного насыщения коллектора реализовано с помощью собственных скриптов. Функционал скриптов включал обработку и анализ выгруженных на отчетные моменты времени полей давления и насыщенности из симулятора, расчет текущих множителей на начальное значение проницаемости для каждой ячейки с учетом истории изменения давления и текущей водонасыщенности:

$$k'(S_B) = k'_{\max} \left(1 - \frac{S_B - S_{B \text{ ост}}}{1 - S_{B \text{ ост}}} \right) + k'_{\min} \left(\frac{S_B - S_{B \text{ ост}}}{1 - S_{B \text{ ост}}} \right),$$

где k' – рассчитанный для ячейки текущий множитель проницаемости; S_B – текущая водонасыщенность; $S_{B \text{ ост}}$ – остаточная водонасыщенность; k'_{\max} – множитель проницаемости, соответствующий нефтенасыщенному коллектору при текущем давлении с учетом гистерезиса (по зависимости для образца, насыщенного керосином с остаточной водой); k'_{\min} – множитель проницаемости, соответствующий водонасыщенному коллектору при текущем давлении с учетом гистерезиса (по зависимости для образца, насыщенного водой). Полученное поле множителя проницаемости применялось для расчета гидродинамической модели до следующего отчетного момента времени.

С использованием описанных скриптов моделировался эффект от ЦГВ для различных сценариев эксплуатации обводняющейся скважины в условном пятиточечном элементе разработки (центральная добывающая скважина и по четверти нагнетательных скважин в углах). Использована пятислойная секторная модель с квазиравномерным сгущением сетки по латерали вблизи скважин. Рассмотрены сценарии ЦГВ в различных ситуациях: при безводной эксплуатации; наличии подошвенной воды с проявлением конусообразования; прорыве нагнетаемой воды по высоко-

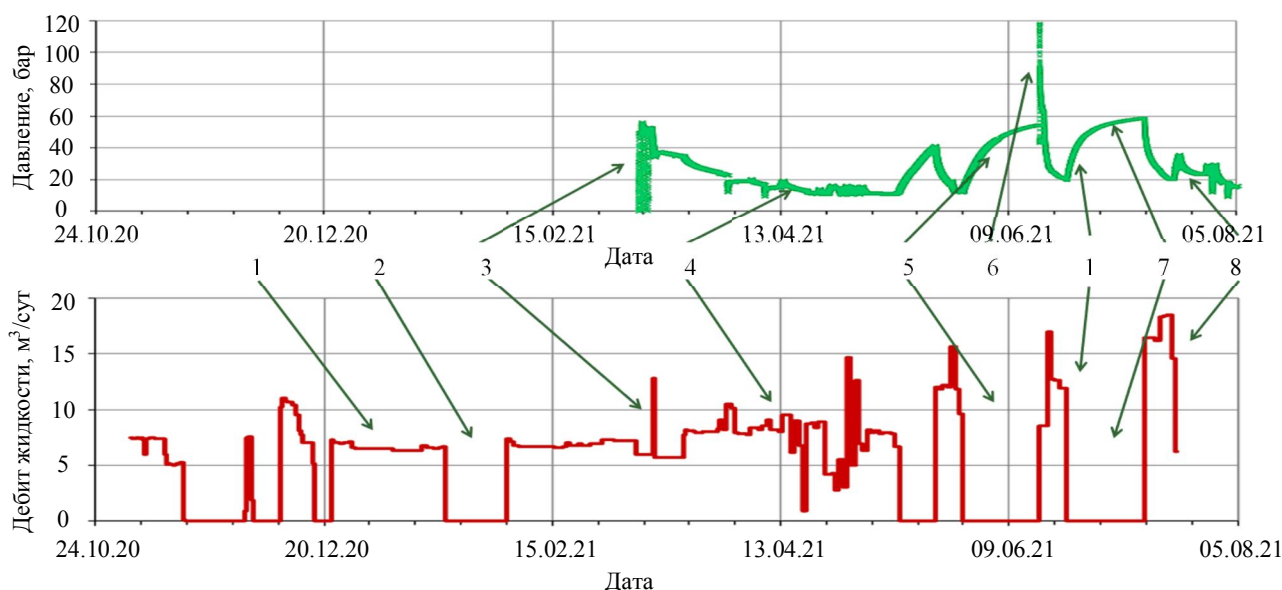


Рис.5. Промысловые исследования: сводный график ОПР по ЦГВ

1 – вывод на режим; 2 – КВД 1; 3 – вывод на режим, ПГИ 1; 4 – отработка на режимах повышенной депрессии; 5 – КВД 2; 6 – закачка нефти; 7 – КВД 3; 8 – вывод на режим, ПГИ 2

проницаемому пропластку. Оценен технологический эффект от ЦГВ в виде прироста дебита жидкости и нефти, изменения обводненности. При рассмотренных исходных данных прирост стабилизированного дебита нефти после ЦГВ составил по всем вариантам около 30 %. Основной эффект достигался за счет прироста дебита жидкости. Когда интервал перфорации включал водонасыщенный интервал пласта, дополнительно отмечалось краткосрочное снижение обводненности с последующим выходом на прежний уровень.

Опытная апробация и промысловые исследования. Для практического подтверждения изученных эффектов проведены опытно-промышленные работы (ОПР) по ЦГВ на скважине, эксплуатирующей пласт турнейского яруса, с комплексом гидродинамических (кривые восстановления давления – КВД) и промыслово-геофизических (ПГИ – термометрия) исследований до и после воздействия и постоянным мониторингом режима работы скважины.

На рис.5 представлен сводный график ОПР с обозначением ключевых этапов и данными об изменении забойного давления и дебита жидкости. Длительность работ связана с рядом организационно-технических осложнений, возникших из-за отсутствия опыта применения метода на подобных объектах.

Записи забойного давления проводились с помощью двух автономных манометров с дискретностью 60 и 120 с, показания по которым хорошо согласуются. До подъема датчиков оперативный контроль забойного давления осуществлялся по замерам динамического уровня эхолотом СУДОС.

Основной ожидаемый эффект от ЦГВ – увеличение продуктивности скважины за счет формирования области разуплотнения (микротрещиноватости) в околоскважинной зоне в процессе создания глубокой депрессии с последующим раскрытием созданных микротрещин и/или формированием трещин разрыва (без закрепления) на этапах обратного повышения давления (КВД) и закачки. Как показывают результаты лабораторных исследований на образцах керна, эффект прироста проницаемости сохраняется при дальнейшей эксплуатации с созданием депрессии, т.е. созданные трещины полностью не смыкаются.

Для промысловой оценки эффекта предложена следующая стратегия ОПР: вывод на режим; остановка скважины, КВД 1 (фоновая кривая до воздействия); вывод на режим, ПГИ 1 (термометрия, фоновый профиль притока до воздействия); последовательная отработка на режимах с повышением депрессии до максимальной; остановка скважины, КВД 2 (оценка параметров до закачки); закачка нефти; вывод на режим; остановка скважины, КВД 3 (оценка параметров после полного цикла воздействия); вывод на режим, ПГИ 2 (после полного цикла воздействия).



Как видно на рис.5, вывод на режим после завершения полного цикла ЦГВ характеризуется значительным приростом дебита жидкости (до $\sim 16 \text{ м}^3/\text{сут}$) и нефти (до $\sim 12 \text{ т/сут}$). При этом забойное давление выше, чем на режиме максимальной депрессии перед закачкой, на котором дебит жидкости составлял $\sim 12 \text{ м}^3/\text{сут}$, нефти $\sim 10 \text{ т/сут}$. Таким образом, заметно увеличивается продуктивность, точная количественная оценка которой приводится по данным ГДИ. Объем добычи флюида после закачки нефти значительно превысил закачанный объем, давление полностью перераспределилось в результате КВД 3, поэтому итоговые продуктивные характеристики отражают фактический приток из пласта.

По итогам ЦГВ отмечается небольшой прирост обводненности с ~ 5 до 20% . Данное значение сохраняется стабильным при дальнейшей эксплуатации, т.е. обводнения скважины не происходит. Прирост обводненности можно объяснить по данным ПГИ приобщением в работу верхней части вскрытого интервала с пониженными фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС).

Интерпретация и анализ данных ПГИ и ГДИ. После окончания исследований комплексно интерпретированы полученные данные. Сопоставление ПГИ 1 и ПГИ 2 позволяет оценить изменение

в профиле притока в результате ЦГВ. Обе записи ПГИ качественные и позволяют решить данную задачу. Сопоставление КВД 1, КВД 2 и КВД 3 позволяет оценить изменение параметров призабойной зоны и продуктивных характеристик скважины после этапов снижения забойного давления и полного цикла ЦГВ (по аналогии с циклом изменения давления при лабораторных исследованиях керна).

На рис.6 представлено сопоставление профилей притока до (ПГИ 1) и после (ПГИ 2) воздействия по данным термометрии. После ЦГВ отмечается подключение к работе верхнего, недреннируемого ранее интервала, а также более равномерное дренирование вскрытого пласта.

Из-за проблемы с записью данных автономными манометрами по КВД 1, ее сопоставление с КВД 2 осуществлялось по пересчитанным данным об изменении уровней по СУДОС. Отмечается хорошее согласие кривых по параметрам удаленной зоны (гидропроводность) и пластовому давлению, при небольшом снижении скин-фактора (повышении продуктивности) на КВД 2.

Основной эффект от ЦГВ в виде прироста коэффициента продуктивности отмечается после этапа закачки. На рис.7 сопоставлены на едином билогарифмическом графике записи забойного давления по данным автономного манометра и логарифмической производной для

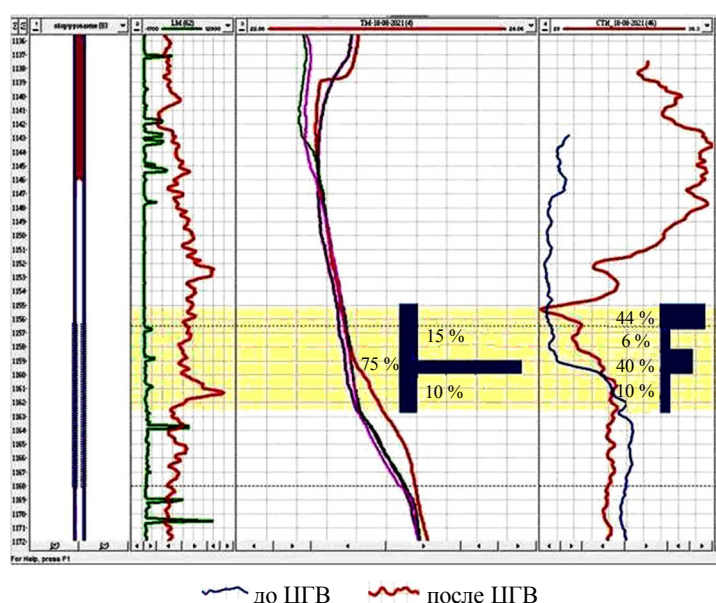


Рис.6. Сопоставление результатов ПГИ

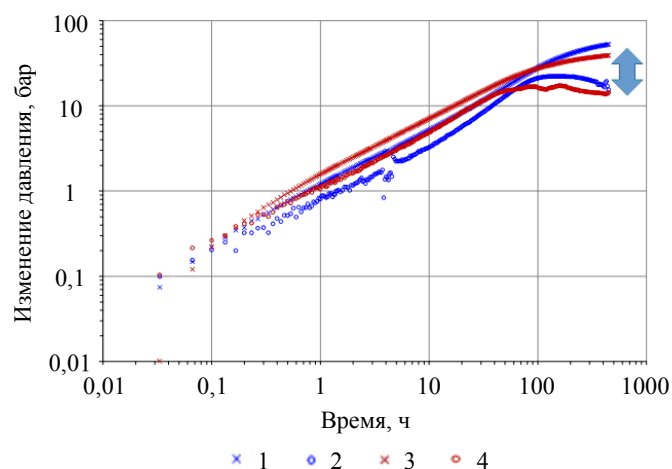


Рис.7. Сопоставление билогарифмических графиков
КВД 2 и КВД 3

1, 3 – давление КВД 2 и КВД 3; 2, 4 – производная КВД 2 и КВД 3



КВД 2 и КВД 3. Прослеживается ожидаемый выход производных давления на одинаковую «полку» радиального режима. Также виден существенный прирост продуктивности между КВД 2 и КВД 3. Результаты интерпретации КВД (КВД 2/КВД 3): коэффициент продуктивности 0,166/0,248 м³/сут/бар; проницаемость 30/30 мД; скин-фактор –3,24 / –4,34; пластовое давление 70/70 бар. Отмечается существенное уменьшение скин-фактора и увеличение коэффициента продуктивности.

Обсуждение результатов. По данным ГДИ, прирост коэффициента продуктивности по жидкости в результате реализации ЦГВ оценивается в 44-49 %. Результат согласуется с существенным увеличением дебита жидкости по сравнению с предшествующими показателями на аналогичных режимах. По данным ПГИ, в результате ЦГВ подключился к работе ранее недренируемый интервал в прикровельной части пласта. В целом профиль притока после воздействия более равномерно охватывает верхнюю и нижнюю части пласта. Приобщение недренируемого интервала согласуется с выводом о преимущественном влиянии воздействия на наиболее плотные участки коллектора, полученным по итогам лабораторных экспериментов.

Отмечается прирост обводненности с ~5 до 20 %, что можно связать с подключением в работу прикровельного интервала с пониженными ФЕС. Обводненность при дальнейшей эксплуатации сохранялась в среднем на том же уровне ~20 %. С учетом изменения обводненности, прирост коэффициента продуктивности по нефти оценивается в 21-26 %. Основной прирост коэффициента продуктивности (уменьшение скин-фактора) отмечается после этапа закачки нефти и последующего вывода на режим максимальной депрессии, т.е. после завершения полного цикла ЦГВ.

Данный результат согласуется с закономерностями, выявленными в лабораторных экспериментах на образцах керна, где основной прирост проницаемости отмечался на этапе роста давления после создания максимальной депрессии. Вероятный механизм связан с раскрытием формируемых на предшествующих этапах сдвиговых микротрещин, а также с возможным началом формирования трещины разрыва (авто-ГРП) при закачке, достигаемым за счет снижения давления разрыва породы после предшествующего воздействия глубокой депрессии. Максимальное забойное давление при закачке нефти в скважину составило около 12 МПа, что согласуется с оценкой давления ГРП после ЦГВ по керновым данным (см. табл.2). Также с керновыми результатами согласуется тот факт, что повторное создание депрессии на скважине не привело к обратному снижению проницаемости околоскважинной зоны (полному закрытию сформированной трещиноватости). Поэтому прирост продуктивности фиксируется по КВД 3 и дебиту на итоговом режиме.

Для оценки продолжительности эффекта от ЦГВ рекомендуется сохранение итогового режима эксплуатации скважины и анализ показателей ее работы в сравнении с динамикой по соседним скважинам. Также целесообразно проведение контрольных ГДИ и ПГИ через 3-6 мес. На рассматриваемой скважине данные рекомендации полностью реализовать не удалось из-за устранения технических проблем, возникших при проведении финальных ПГИ.

Заключение. По итогам реализации специальной программы лабораторных экспериментов отмечается положительная избирательность ЦГВ. Прирост проницаемости наблюдается для образцов, насыщенных керосином с остаточной водой, и максимален для наиболее плотных образцов. В водонасыщенных образцах проницаемость после ЦГВ снижается. Таким образом, ЦГВ улучшает условия дренирования уплотненных нефтенасыщенных интервалов, снижается давление разрыва карбонатного коллектора.

Выполнены численные оценки прироста коэффициента продуктивности при ЦГВ с различной амплитудой, в том числе для ряда сценариев эксплуатации обводняющейся скважины. Расчеты проводились на секторных моделях с квазиравномерным измельчением сетки, использованием опции гистерезиса зависимости проницаемости от давления и созданных авторами скриптов для учета влияния водонасыщенности по керновым данным. В зависимости от исходных параметров расчетный прирост стабилизированного коэффициента продуктивности составил 17-62 % с сохранением значения обводненности или временным ее снижением после воздействия.



Проведены ОПР с комплексом ГДИ и ПГИ для оценки эффективности ЦГВ на скважине, эксплуатирующей пласт турнейского яруса. По итогам ЦГВ получен прирост коэффициента продуктивности по жидкости на 44-49 %, по нефти 21-26 %. Также фиксируется приобщение ранее не дренируемого интервала с пониженными ФЕС у кровли пласта.

Основные результаты и выводы по итогам ОПР – диапазон оценок прироста коэффициента продуктивности, достижение основного эффекта после закачки нефти, приобщение недренируемого интервала – согласуются с заключениями о механизмах и особенностях ЦГВ, полученными по результатам лабораторных исследований и численного моделирования. Продолжительность эффекта от ЦГВ требует исследования в рамках дальнейшей апробации метода. Таким образом, результаты исследований подтверждают перспективность ЦГВ для карбонатных коллекторов турнейского яруса.

Авторы выражают признательность И.И.Гирфанову и И.Ф.Идиятуллину за реализацию лабораторных экспериментов, Д.Н.Гуляеву за помощь в интерпретации данных ГДИ и ПГИ, а также благодарят компанию Rock Flow Dynamics за предоставленную возможность использования программного обеспечения RFD tNavigator на правах академической лицензии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lucia F.J. Carbonate Reservoir Characterization: An Integrated Approach. 2nd Edition. Berlin: Springer Science & Business Media, 2007. 336 p. DOI: 10.1007/978-3-540-72742-2
2. Fjær E., Holt R.M., Horsrud P. et al. Petroleum Related Rock Mechanics. 2nd Edition. Amsterdam: Elsevier, 2008. 492 p.
3. Zoback M.D. Reservoir Geomechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 505 p. DOI: 10.1017/CBO9780511586477
4. Padhy G.S., Al-Rashidi T., Gezeeri T.M. et al. Role of Geomechanics and Integrated Reservoir Characterization in Production Enhancement from a Heterogeneous Carbonate Reservoir: A Success Story From Kuwait // SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 18-21 March 2019, Manama, Bahrain. OnePetro, 2019. № SPE-194920-MS. DOI: 10.2118/194920-MS
5. Zhenzhong Cai, Hui Zhang, Haijun Yang et al. Investigation of Geomechanical Response of Fault in Carbonate Reservoir and Its Application to Well Placement Optimization in YM2 Oilfield in Tarim Basin // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 28-30 September 2015, Houston, USA. OnePetro, 2015. № SPE-175017-MS. DOI: 10.2118/175017-MS
6. Youngho Jang, Hyunsang Yoo, Wonmo Sung et al. Novel Assessment of Hydraulic Fracturing with Geomechanical Characteristics in Tight Carbonate Formations // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 12-15 November 2018, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, 2018. № SPE-192995-MS. DOI: 10.2118/192995-MS
7. Islam A., Ziarani A.S., Cui A. et al. Experimental and Analytical Core and Geomechanical Data Analysis of a Tight Oil Carbonate Formation // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 27-29 October 2014, Amsterdam, Netherlands. OnePetro, 2014. № SPE-170943-MS. DOI: 10.2118/170943-MS
8. Ahmed B.I., Al-Jawad M.S. Geomechanical modelling and two-way coupling simulation for carbonate gas reservoir // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2020. Vol. 10. Iss. 8. P. 3619-3648. DOI: 10.1007/s13202-020-00965-7
9. Talebian S.H., Fahimifar A., Heidari A. Review of Enhanced Oil Recovery Decision Making in Complex Carbonate Reservoirs: Fluid Flow and Geomechanics Mechanisms // Journal of Computational Applied Mechanics. 2021. Vol. 52. Iss. 2. P. 350-365. DOI: 10.22059/JCAMECH.2021.318511.596
10. Safari R., Smith C., Fragachan F. Improved Recovery of Carbonate Reservoir by Optimizing Acidizing Strategy; Coupled Wellbore, Reservoir, and Geomechanical Analysis // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 13-16 November 2017, Abu Dhabi, UAE. № SPE-188683-MS. DOI: 10.2118/188683-MS
11. Zareidarmiyani A., Salarirad H., Vilarrasa V. et al. Geomechanical Response of Fractured Reservoirs // Fluids. 2018. Vol. 3. № 4. P. 70-86. DOI: 10.3390/fluids3040070
12. Nguyen M.T., Bemer E., Dormieux L. Micromechanical Modeling of Carbonate Geomechanical Properties Evolution During Acid Gas Injection // 45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, 26-29 June 2011, San Francisco, USA. OnePetro, 2011. № ARMA-11-207. 10 p.
13. Попов С.Н. Проявление механико-химических эффектов при экспериментальных исследованиях изменения упругих и фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов под воздействием фильтрации воды, насыщенной углекислым газом // Актуальные проблемы нефти и газа. 2021. № 2 (33). С. 3-14. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2021-33.art1
14. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Экспериментальная оценка коэффициентов сжимаемости трещин и межзерновых пор коллектора нефти и газа // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 658-666. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.5
15. Мартюшев Д.А. Экспериментальное исследование влияния забойного давления добывающих скважин на выработку запасов из сложнопостроенных карбонатных коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 5. С. 110-119. DOI: 10.18799/24131830/2021/05/3190
16. Патент № 1609978 СССР. Способ обработки призабойной зоны пласта / Э.А.Бакиров, С.Н.Закиров, Г.А.Щербаков и др. Опубл. 30.11.1990. Бюл. № 44.
17. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. Увеличение продуктивности нефтяных скважин с помощью метода георыхления // Нефть и газ Евразия. 2000. № 2. С. 90-94.



18. Патент № 2179239 РФ. Способ освоения скважин / Ю.Ф.Коваленко, Ю.В.Кулинич, В.И.Карев и др. Оpubл. 10.02.2002. Бюл. № 4.
19. Патент № 2285794 РФ. Способ обработки призабойной зоны скважины / В.И.Карев, Д.М.Климов, Ю.Ф.Коваленко и др. Оpubл. 20.10.2006. Бюл. № 29.
20. Климов Д.С., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. Реализация метода георыхления для увеличения приемистости нагнетательной скважины // Технологии ТЭК. 2003. № 4. С. 59-64.
21. Карев В.И. Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на фильтрационный процесс и дебит скважин: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ИПМех РАН, 2010. 34 с.
22. Karev V.I., Kovalenko Yu.F. Well stimulation on the basis of preliminary triaxial tests of reservoir rock // Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment. London: Taylor & Francis Group, 2013. P. 935-940.
23. Коваленко Ю.Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ИПМех РАН, 2012. 50 с.
24. Патент № 2645684 РФ. Способ направленной разгрузки пласта / Д.М.Климов, В.И.Карев, Ю.Ф.Коваленко, М.Ю.Титоров. Оpubл. 27.02.2018. Бюл. № 6.
25. Karev V.I., Khimulia V.V. Physical modeling of deformation and filtration processes in low-permeability reservoir rocks when implementing the directional unloading method // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 266. № 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/202126601001
26. Хузин Р.Р., Андреев В.Е., Мухаметшин В.В. и др. Влияние гидравлического сжатия пласта на фильтрационно-емкостные свойства пластов-коллекторов // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 688-697. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.8
27. Патент № 2620099 РФ. Способ повышения продуктивности добывающих и приемистости нагнетательных скважин / С.Н.Закиров, А.Н.Дроздов, Э.С.Закиров и др. Оpubл. 23.05.2017. Бюл. № 15.
28. Закиров С.Н., Дроздов А.Н., Закиров Э.С. и др. Техничко-технологические аспекты геомеханического воздействия на пласт // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2018. № 6 (78). С. 24-29.
29. Закиров С.Н., Дроздов А.Н., Алексеев Б.Г., Колобанов А.В. Природные проявления геомеханических процессов // Недропользование XXI век. 2018. № 3 (73). С. 72-77.
30. Индрупский И.М., Ибрагимов И.И., Закирянов Р.А., Гирфанов И.И. Изменение проницаемости карбонатного коллектора при циклическом геомеханическом воздействии // Нефтяная провинция. 2020. № 3 (23). С. 85-98. DOI: 10.25689/NP.2020.3.85-98
31. Indrupskiy I.M., Ibragimov I.I., Zakiryanov R.A. et al. Permeability Alteration of Carbonate Reservoir Rock Under Cyclic Geomechanical Treatment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 921. Iss. 1. № 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/921/1/012009
32. Аникоев Д.П., Закиров Э.С., Индрупский И.М. и др. Моделирование циклического геомеханического воздействия на карбонатный коллектор // Нефтяное хозяйство. 2021. № 1. С. 52-56. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-1-52-56
33. Keszthelyi D., Dyshe D.K., Jantveit B. Compaction of North-Sea Chalk by Pore-Failure and Pressure Solution in a Producing Reservoir // Frontiers in Physics. 2016. Vol. 4. № 4. DOI: 10.3389/fphy.2016.00004
34. Tron Golder K., Plischke B. History Matched Full Field Geomechanics Model of the Valhall Field Including Water Weakening and Re-Pressurisation // SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, 14-17 June 2010, Barcelona, Spain. OnePetro, 2010. № SPE-131505-MS. DOI: 10.2118/131505-MS
35. Jiasheng Hao, Shapiro A. Effect of Compaction on Oil Recovery Under Low Salinity Flooding in Homogeneous and Heterogeneous Chalk // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September – 2 October 2019, Calgary, Canada. OnePetro, 2019. № SPE-195831-MS. DOI: 10.2118/195831-MS
36. Sarout J., Dautriat J., David C. Monitoring Strength Reduction in Sandstones Associated with Fluid Substitution Using Advanced Rock Mechanics Testing // Offshore Technology Conference Asia, 22-25 March 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. OnePetro, 2016. № OTC-26636-MS. DOI: 10.4043/26636-MS
37. Gupta I., Rai Ch., Sondergeld C., Hofmann R. Water Weakening: A Laboratory Study of Marcellus, Woodford, Eagle Ford, and Wolfcamp Shales // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. 2019. Vol. 22. Iss. 2. № SPE-194482-PA. P. 418-427. DOI: 10.2118/194482-PA
38. Bois A.-P., Mohajerani M., Dousi N., Harms S. Inducing Earthquake By Injecting Water In A Gas Field: Water-Weakening Effect // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September – 2 October 2013, New Orleans, Louisiana, USA. OnePetro, 2013. № SPE-166430-MS. DOI: 10.2118/166430-MS
39. Martyushev D.A., Galkin S.V., Shelepov V.V. The Influence of the Rock Stress State on Matrix and Fracture Permeability under Conditions of Various Lithofacial Zones of the Tournaisian-Famennian Oil Fields in the Upper Kama Region // Moscow University Geology Bulletin. 2019. Vol. 74. № 6. P. 573-581. DOI: 10.3103/S0145875219060061
40. Ибрагимов И.И., Индрупский И.М., Лутфуллин А.А. Оценка эффекта геомеханического воздействия с помощью гидродинамического моделирования // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. 2020. Т. 1. С. 89-98.

Авторы: И.М.Индрупский, д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник, i-ind@ipng.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0038-6279> (Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия), И.И.Ибрагимов, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-1278-5955> (Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Россия), Т.Н.Цаган-Манджиев, канд. техн. наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8445-3151> (Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия), А.А.Лутфуллин, канд. техн. наук, заместитель начальника департамента, <https://orcid.org/0000-0002-6219-1848> (СП «Татнефть-Добыча», Альметьевск, Россия), А.П.Чиркунов, заместитель начальника управления, <https://orcid.org/0000-0002-9822-0479> (СП «Татнефть-Добыча», Альметьевск, Россия), Р.И.Шакиров, главный специалист управления, <https://orcid.org/0000-0002-8557-2213> (СП «Татнефть-Добыча», Альметьевск, Россия), Ю.В.Алексеева, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5108-5874> (Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Стратегия управления проветриванием рудника в оптимальном режиме с использованием аппарата нечеткой логики

А.В.КАШНИКОВ ✉, Ю.В.КРУГЛОВ

Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

Как цитировать эту статью: Кашников А.В., Круглов Ю.В. Стратегия управления проветриванием рудника в оптимальном режиме с использованием аппарата нечеткой логики // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 594-605. EDN BGJLGA. DOI: 10.31897/PMI.2022.75

Аннотация. Рассматриваются вопросы, которые связаны с повышением эффективности систем автоматического управления проветриванием рудников, обеспечивающих регулирование подачи воздуха в шахту в соответствии с потребностью. В ходе испытаний такой системы в руднике ЗРУ ОАО «Беларуськалий» выявлены недостатки ее существующей реализации, связанные с некорректным выбором самого труднопроветриваемого направления. Продемонстрированы возможности реализации стратегии управления, при которой система автоматически определяет оптимальную конфигурацию режимов работы вентиляторов и регуляторов. В качестве альтернативы реализованным алгоритмам предлагается использование аппарата нечеткого управления для учета нелинейности зависимости входных и выходных параметров вентиляционного оборудования и задания условий оптимального режима работы системы в декларативной форме. Для оценки эффективности предлагаемого подхода проанализированы данные имитационного моделирования текущего режима проветривания и перехода из одного режима проветривания в другой с сопоставлением с фактическими данными работы системы. Результаты моделирования показывают, что применение модернизированной схемы управления вентилятором главного проветривания на основе нечеткой логики в рамках реализации систем автоматического управления проветриванием позволяет исключить возможность дефицита свежего воздуха на регулируемых направлениях его движения, а также избыточное энергопотребление вентилятора главного проветривания.

Ключевые слова: система автоматического управления проветриванием; нечеткое управление; ПИД-регулирование; главная вентиляторная установка; аэродинамическое сопротивление; воздушно-депресссионная съемка; рудник

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по Государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (№ 1021062110595-3-1.5.7).

Поступила: 21.01.2022

Принята: 21.07.2022

Онлайн: 16.03.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Подход к вентиляции подземных рудников (вентиляция по требованию – ventilation-on-demand) [1-3] предполагает построение систем автоматического управления проветриванием (САУП). Системы позволяют регулировать объем подаваемого в шахту воздуха в зависимости от текущих потребностей и, как следствие, снижать энергопотребление вентиляторов [4, 5]. К САУП предъявляются следующие требования [6]:

- обеспечивать требуемые расходы воздуха в заданных точках распределенной вентиляционной сети в соответствии с технологическим регламентом по проветриванию подземных горных выработок горнодобывающего предприятия;
- обеспечивать минимально возможное для обеспечения заданных условий проветривания энергопотребление главной вентиляторной установки (ГВУ);
- не допускать колебаний параметров работы оборудования во время переходных процессов;
- продолжительность смены режимов проветривания не должна превышать интервал изменения потребности в проветривании.

Модель вентиляционной сети рудника представляет собой ориентированный граф, каждая ветвь которого характеризуется аэродинамическим сопротивлением. В случае установки в ветви



вентиляционного регулятора (например, автоматической вентиляционной двери – АДВ) создается дополнительное сопротивление. В ветвях могут находиться источники тяги – вентиляционные установки, создающие перепад давления.

Критерий оптимальности проветривания можно сформулировать следующим образом:

$$\begin{cases} Q_i = Q_i^{\text{тп}} \forall i = 1 \dots K; \\ N_{\text{ГВУ}}(\omega, \phi_1, \dots, \phi_K) \rightarrow \min \text{ при } \omega \rightarrow \omega^{\text{опт}}, \phi_i \rightarrow \phi_i^{\text{опт}} \forall i = 1 \dots K, \end{cases} \quad (1)$$

где Q_i , $Q_i^{\text{тп}}$ – фактический и требуемый расход воздуха на i -м вентиляционном регуляторе соответственно; $N_{\text{ГВУ}}$ – потребляемая мощность ГВУ; ω – частота вращения ГВУ; ϕ_i – угол открытия вентиляционного регулятора; $\omega^{\text{опт}}$, $\phi_i^{\text{опт}}$ – оптимальные значения частоты вращения ГВУ и угла открытия вентиляционных регуляторов для заданных условий; K – количество вентиляционных регуляторов.

Первое условие в (1) означает соответствие фактического воздушного потока в регулируемых участках вентиляционной сети нормативным требованиям, обеспечивающим безопасные и комфортные условия труда. Второе условие указывает на зависимость энергопотребления вентилятора не только от его собственных параметров работы (частоты вращения), но и от положения вентиляционных регуляторов. Один и тот же расход воздуха на проветриваемых участках рудника может обеспечиваться множеством комбинаций их углов открытия, каждая из которых приводит к разному потреблению энергии вентилятором.

Задача поиска оптимального режима проветривания заключается в нахождении таких углов открытия АДВ и частоты вращения ГВУ, при которых требуемые расходы воздуха на вентиляционных регуляторах будут обеспечиваться, а энергопотребление вентилятора будет минимальным. Вентиляционные регуляторы (АДВ) должны создавать минимально возможное дополнительное аэродинамическое сопротивление в выработках, в которых они установлены, при обеспечении требуемого воздухораспределения в руднике.

Подход, который основан на модели вентиляционной сети рудника, представляемой ориентированным графом, является наиболее общим к решению задачи оптимизации. Данные с датчиков текущего расхода воздуха в контрольных точках вентиляционной сети передаются в компьютерную модель вентиляционной сети рудника. Если между требуемыми и фактическими значениями расхода воздуха обнаружено отклонение, с помощью модели вентиляционной сети рассчитывается воздухораспределение для определения новых параметров работы средств регулирования. Определенные в результате решения задачи воздухораспределения параметры передаются в систему управления, которая устанавливает вычисленные значения частоты вращения ГВУ и положений АДВ. Процесс повторяется каждый раз при рассогласовании заданных и фактических расходов воздуха в контрольных точках.

В реальных условиях эксплуатации рудников данный подход обладает рядом недостатков. Во-первых, он требует установки большого количества датчиков расхода воздуха, достаточного для калибровки модели, что для подземной сети выработок требует значительных затрат на обустройство линий связи и последующее техническое обслуживание. Во-вторых, ввиду постоянного развития горных работ модель вентиляционной сети требует постоянного обновления в ручном режиме (изменяется протяженность существующих горных выработок, выводятся из эксплуатации отработанные участки, вводятся новые) [7]. Такая актуализация требует регулярных замеров специалистами рудника и отражения всех изменений в модели, что увеличивает влияние человеческого фактора на качество управления.

Существующие реализации систем управления вентиляционным оборудованием в рамках проектов вентиляции по требованию (Garpenberg, Boliden, Швеция [8]; рудники ЮАР [9]; El Teniente, Чили [10]; Totten Mine, Vale Inco Ltd, Канада [11] и др.) отличаются относительной компактностью рудников, отрабатывающих полиметаллические и железорудные месторождения. Однако для рудников на территории ЕАЭС (в частности, для калийных месторождений) характерны большие площади

шахтных полей (более 100 км²), объемы подаваемого в шахту воздуха (более 50 000 м³/мин) и значительное количество одновременно действующих рабочих зон (добычных участков), сильно удаленных друг от друга. При этом высокая интенсивность горных работ, сопряженная с большой производительностью рудников (до 20 млн т руды в год), приводит к постоянному изменению конфигурации выработок рудника и, соответственно, вентиляционной сети. Данные особенности усложняют задачу оперативного перераспределения воздуха при минимизации энергопотребления вентилятора главного проветривания.

В подходе к построению систем оптимального управления проветриванием [12-14], разработанном в ГИ УрО РАН, исключается трансляция оперативных данных о фактическом воздухораспределении в модель вентиляционной сети. При этом управляющий алгоритм системы корректирует задания средствам регулирования на основе данных о текущих расходах воздуха непосредственно на АВД и ГВУ без необходимости пересчета общего воздухораспределения в руднике на модели топологии вентиляционной сети [15]. Установлено, что необходимым условием оптимального режима проветривания является наличие хотя бы одного вентиляционного регулятора в полностью открытом состоянии (т.е. положении, при котором дополнительное сопротивление в соответствующей горной выработке равно нулю). Текущие реализации систем построены на основе управления вентиляционным оборудованием (АВД и ГВУ) при помощи ПИД-регулирования [16]. Широкое распространение в различных областях промышленности получило использование нечетких контроллеров [17].

Традиционное применение аппарата нечеткой логики при реализации систем автоматического управления сводится к решению задачи нелинейного преобразования входных сигналов в выходной при следующих условиях: зависимость выходных параметров от входных является неизвестной либо сложновычислимой; существуют значительные динамические возмущения и зашумленность измерений; постоянная изменчивость самой системы, из-за чего необходима постоянная коррекция параметров управления.

Нечеткие множества первого порядка [18] позволяют учесть нелинейность взаимосвязи параметров, а нечеткие множества второго порядка [19, 20] – преодолеть проблемы, связанные с неопределенностью измерений входных параметров, а также параметров модели. Использование нечетких контроллеров призвано уменьшить продолжительность выхода системы в требуемое устойчивое состояние. Независимые от конкретной задачи алгоритмы настройки нечетких контроллеров [21-23] позволяют корректировать параметры нечеткого управления вслед за изменениями управляемой системы. База правил для нечеткого регулятора может быть как тривиальной (например, малой ошибке управления соответствует малая реакция системы), так и содержать более сложную логику управления, задаваемую экспертом. Существуют методы автоматической коррекции базы правил, позволяющие добиться желаемых характеристик работы оборудования [24]. Одним из применений нечеткого управления является определение коэффициентов для ПИД-регулятора [25, 26]. Нечеткие контроллеры применяются в широком круге областей, в том числе при реализации управления в гидравлических системах [27, 28] и системах управления вентиляцией (поддержание требуемых параметров воздуха в теплицах [29] и реанимациях [30], проветривание промышленных помещений [31]).

Цель статьи – реализация стратегии управления САУП, предполагающей обеспечение требуемых расходов воздуха на вентиляционных регуляторах при минимизации энергопотребления главной вентиляторной установки на основе задания условий оптимальности непосредственно в базе правил нечеткого регулятора.

Методология. Для анализа работы существующей реализации системы автоматического управления проветриванием проведен ряд испытаний в условиях рудника ЗРУ ОАО «Беларуськалий» [32, 33]. Это позволяет оценить скорость перехода системы из одного режима проветривания в другой, ее реакцию на возмущения, устойчивость работы оборудования и эффективность ее функционирования.

САУП рудника состоит из одной поверхностной ГВУ, включающей основную и резервный вентиляторы, и шести автоматических регуляторов жалюзийного типа (АВД), установленных на каждом из главных направлений («Север», «Восток», «Юг») отрабатываемых горизонтов (–420 и –620 м) [34] (рис. 1).

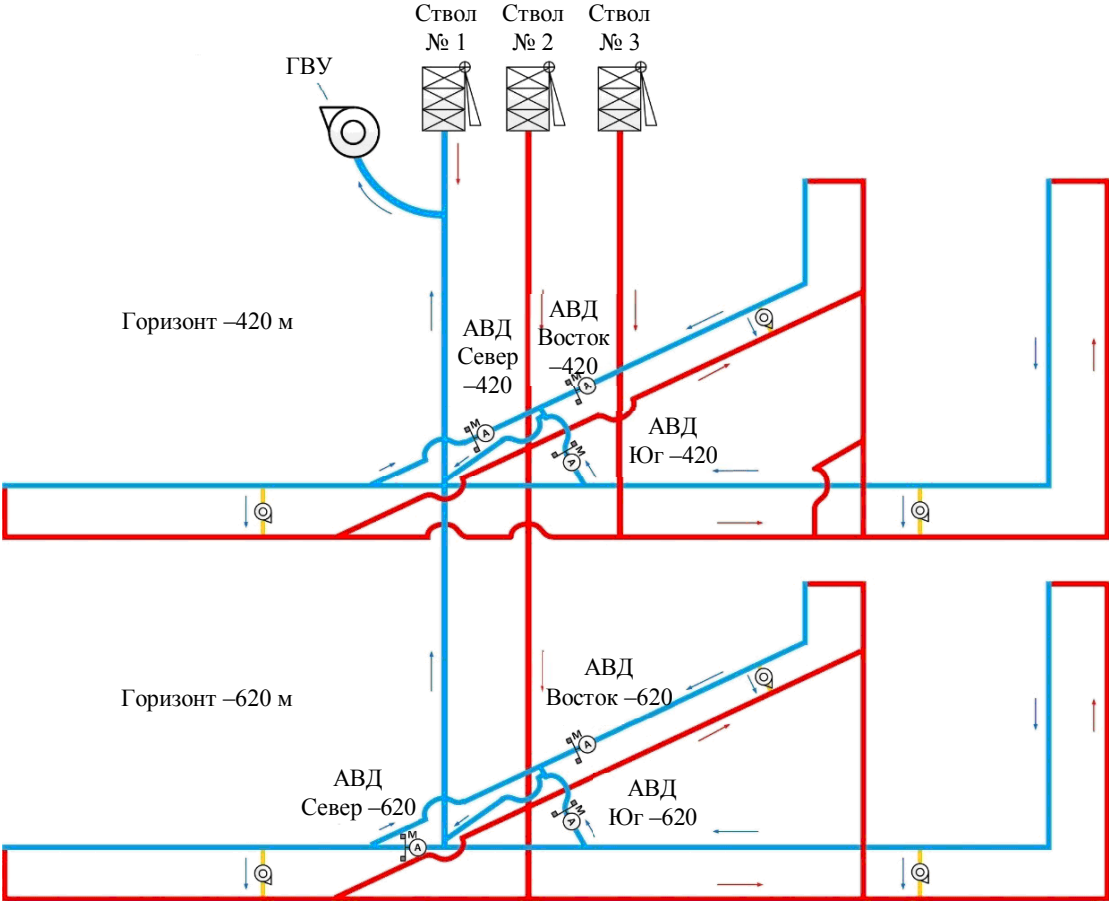


Рис.1. Принципиальная схема проветривания рудника ЗРУ ОАО «Беларуськалий» с указанием расположения ГВУ и АВД

	ДОБЫЧА						РЕМОНТ					
	ШВУ вкл.			ШВУ выкл.			ШВУ вкл.			ШВУ выкл.		
	АВД, м³/мин	ШВУ, м³/мин	Коэффициент рециркуляции, %	АВД, м³/мин	ШВУ, м³/мин	Удаленная панель, м³/мин	АВД, м³/мин	ШВУ, м³/мин	Коэффициент рециркуляции, %	АВД, м³/мин	ШВУ, м³/мин	Удаленная панель, м³/мин
-420 м												
Север	500	500	0.00	3480	500	0	500	500	0.00	2650	500	1000
Восток	500	500	0.00	1740	500	0	500	500	0.00	1420	500	270
Юг	4480	1500	0.00	6000	500	0	2630	1500	0.00	4640	500	668
-620 м												
Север	5040	1600	0.00	4750	500	0	4770	1500	0.00	3550	500	1000
Восток	1920	1700	0.00	4030	500	0	700	1710	0.43	2560	500	900
Юг	4380	1800	0.00	6000	500	0	2650	1800	0.00	5150	500	900

Рис.2. Фрагмент видеограммы интерфейса диспетчера для управления режимами работы САУП

Управление проветриванием рудника состоит в изменении углов поворота жалюзийных регуляторов в зависимости от отклонения заданного расхода воздуха от фактического (если расход воздуха больше требуемого, то регулятор прикрывается, увеличивая аэродинамическое сопротивление выработки, в которой он установлен, и наоборот), а также изменении производительности ГВУ (за счет изменения частоты вращения рабочего колеса). Для разных режимов работы рудника для каждого регулятора задается требуемый расход воздуха (рис.2). Диспетчер в начале каждой



смены выбирает необходимый режим для каждой АВД в зависимости от того, ведутся на направлении добычные работы (большой расход воздуха) или ремонтные.

Требуемая подача вентилятора главного проветривания, регулируемая частотой вращения ω , определяется как сумма заданных расходов по всем регуляторам Q_{Σ}^{TP} и установленной величины внешних утечек Q^{UT} (коэффициент утечек рассчитывается регулярными замерами службой вентиляции). Рассчитанная подача вентилятора корректируется на величину недостатка/избытка воздуха $\Delta Q_{\text{гл}}$ на «главном» направлении, на котором значение угла открытия фиксируется в соответствии с предустановленным значением $\phi_{\text{гл}}$ (рис.3).

При оптимальном режиме проветривания «главное» направление соответствует самому труднопроветриваемому направлению, на котором регулятор должен находиться в полностью открытом положении. Однако в силу того, что каждый регулятор самостоятельно определяет степень своего открытия в зависимости от заданной установки расхода воздуха, а также технической сложностью определения аэродинамического сопротивления соответствующей выработки в текущий момент времени, «главное» направление определяется из максимального значения требуемого расхода воздуха либо задается оператором вручную. Неправильно выбранное «главное» направление приводит к одной из ситуаций: вентилятор главного проветривания потребляет излишнюю электроэнергию, так как общая конфигурация положения регуляторов создает избыточное сопротивление в вентиляционной сети; на одном из направлений (не «главном») возникает недостаток воздуха, когда соответствующий регулятор находится в полностью открытом положении.

С целью определения возможностей для усовершенствования схемы управления САУП проведены испытания, позволяющие оценить возможность автоматического определения наиболее труднопроветриваемого направления в цикле управления САУП. На рис.4 представлены характеристики ГВУ и АВД, установленные в исследуемом руднике.

В рамках проведения испытаний регулирование производительности вентилятора главного проветривания осуществлялось в ручном режиме с помощью ступенчатого изменения частоты вращения рабочего колеса ГВУ, приводящего к перераспределению воздуха в шахте и автоматическому открытию регулятора на самом труднопроветриваемом направлении. В начале испытаний в качестве «главного» направления выбрано «–620 Юг» (что соответствовало самому труднопроветриваемому направлению для текущего режима проветривания согласно результатам моделирования), для которого заданный расход воздуха был изменен с 4620 до 2770 м³/мин.

Последовательное снижение частоты вращения ГВУ (рис.5) приводило к перенастройке положения дверей, что увеличивало фактическую подачу ГВУ на каждом отрезке фиксированного значения частоты вращения (за счет снижения аэродинамического сопротивления сети).

Динамика положения АВД демонстрирует сначала их прикрытие (когда фактический расход на вентиляторе был избыточным), затем в процессе снижения частоты вращения вентилятора, приводящего к недостатку воздуха на некоторых направлениях, постепенное открытие до уровня, соответствующего оптимальному положению. Колебания регулятора «АВД –620 Юг» обусловлены запаздывающим влиянием изменения режима работы вентилятора на удаленные точки вентиляционной сети (т.е. регулятор успевает отработать изменение уставки самостоятельно, прежде чем окажет влияние вентилятор). В результате самым труднопроветриваемым направлением стало «–420 Юг», автоматический регулятор на котором перешел в полностью открытое (технически возможное) положение.

По результатам испытаний можно сделать вывод, что система автоматического управления проветриванием может самостоятельно определить самое труднопроветриваемое направление, т.е. направление с наибольшим аэродинамическим сопротивлением, на котором регулятор будет находиться в максимально открытом состоянии. В случае недостатка воздуха в вентиляционной сети увеличение подаваемого в рудник расхода воздуха может быть достигнуто только за счет изменения положения регуляторов без увеличения частоты вращения вентилятора, если ни один из регуляторов не находится в полностью открытом положении.

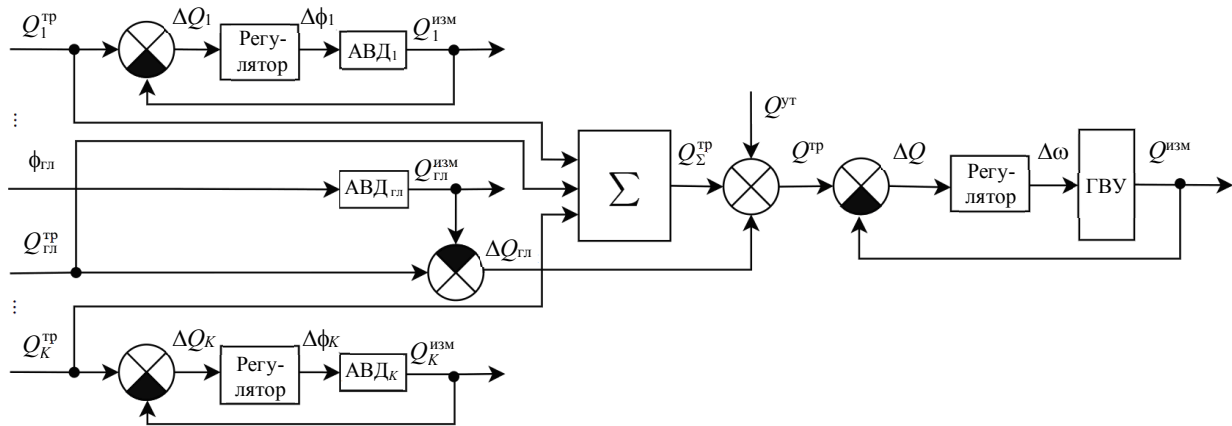


Рис.3. Информационная структура существующей САУП

$Q_i^ИЗМ$, $Q^ИЗМ$ – измеренный (фактический) расход воздуха на i -й АВД и ГБУ; Q_i^TP , Q^TP – требуемый (заданный) расход воздуха на i -й АВД и ГБУ; ΔQ_i , ΔQ – отклонение расхода воздуха на i -й АВД и ГБУ; $Q_{ГЛ}^ИЗМ$, $Q_{ГЛ}$ – измеренный (фактический) расход воздуха и его отклонение на АВД «главного» направления; $\Delta\phi_i$ – вычисленное приращение угла i -й АВД; $\Delta\omega$ – вычисленное приращение частоты вращения ГБУ

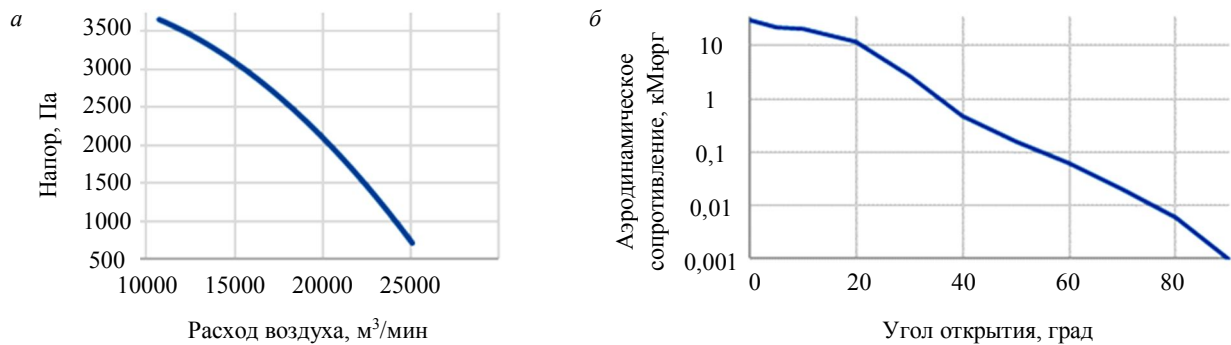


Рис.4. Зависимость напора от расхода воздуха ГБУ (а) и аэродинамического сопротивления регулятора от угла его открытия (б)

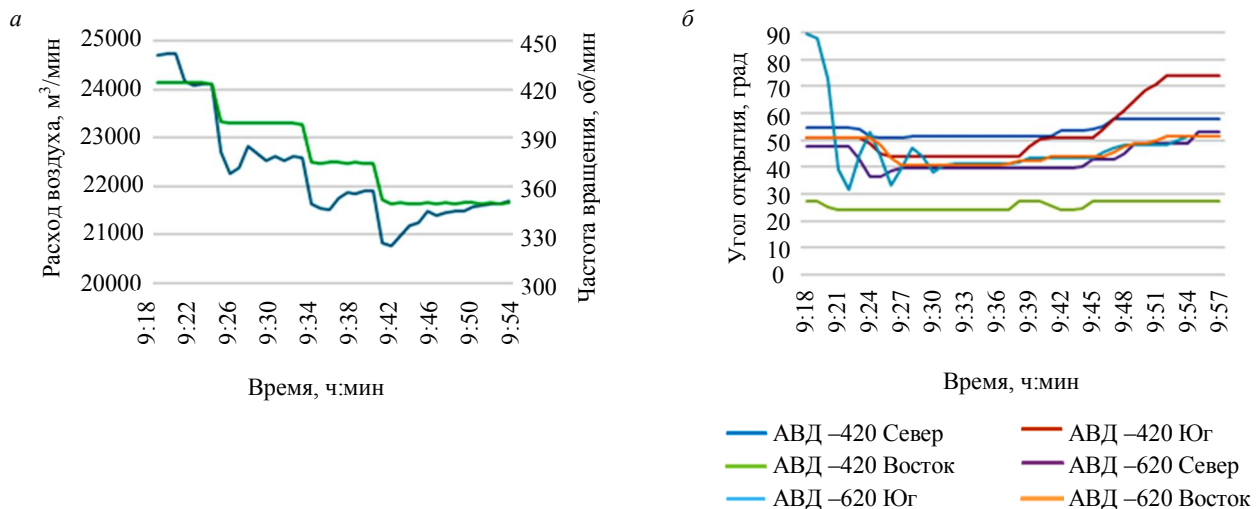


Рис.5. Расход воздуха на ГБУ (а) при одновременном изменении углов открытия АВД (б)

Для реализации стратегии управления, позволяющей компенсировать побочные эффекты исключения предопределения самого труднопроветриваемого направления, целесообразно применить аппарат нечеткого управления ввиду следующих обстоятельств:

- изменение положения регулятора на самом труднопроветриваемом направлении приводит к изменению аэродинамического сопротивления вентиляционной сети, которое нелинейным образом влияет на расход воздуха, обеспечиваемый вентилятором;
- использование лингвистических переменных и базы продукционных правил, определяемых в терминах предметной области, позволяет отразить критерии выбора самого труднопроветриваемого направления.

Рассмотрим математическое описание модели управления вентилятором на основе нечеткой логики. Необходимо установить нечеткие переменные ΔQ и ϕ_{\max} в качестве входных параметров для определения приращения частоты вентилятора:

$$\Delta Q = \min_{i=1 \dots K} (Q_i^r - Q_i)^+ - \max_{i=1 \dots K} (Q_i^r - Q_i)^+; \quad (2)$$

$$(x)^+ = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & x \geq 0 \end{cases},$$

где ΔQ – недостаток/перерасход воздуха, определяемый как разность между минимальным перерасходом и максимальным недостатком воздуха по всем регуляторам.

Выбор максимального недостатка и минимального избытка расхода по всем регуляторам в выражении (2) обусловлен необходимостью обеспечить фактический расход не менее заданного, так как соблюдение нормативных требований является приоритетной задачей управления;

$$\phi_{\max} = \max_{i=1 \dots K} \phi_i, \quad (3)$$

где ϕ_{\max} – максимальный угол открытия среди всех регуляторов.

Для нечетких переменных определим следующие терм-множества:

$$\Delta Q - \{NL, NS, Z, PS, PL\};$$

$$\phi_{\max} - \{S, M, L\};$$

$$\Delta \omega - \{NL, NS, Z, PS, PL\},$$

где $\Delta \omega$ – приращение частоты вращения рабочего колеса вентилятора; N, P – «отрицательное» и «положительное», Z, S, M, L – «нулевое», «малое», «среднее», «большое». Например, обозначение NL соответствует терму «отрицательное большое».

Нечеткие множества, составляющие терм-множества для нечетких переменных, определяются функциями принадлежности:

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{\sigma}}, \quad (4)$$

где \bar{x}, σ – параметры, определяющие центр и ширину графика функции.

При наличии одного вентилятора главного проветривания правила выбора оптимального режима проветривания для заданных расходов воздуха можно сформулировать следующим образом: на каждом регуляторе должен обеспечиваться заданный расход воздуха; хотя бы один из регуляторов должен быть полностью открыт (т.е. не создавать дополнительное аэродинамическое сопротивление).

Правила для управления вентилятором можно сформулировать следующим образом:

- если в совокупности на регуляторах наблюдается избыток воздуха, необходимо уменьшить частоту вращения;



- если наблюдается недостаток воздуха, при этом хотя бы один из регуляторов полностью открыт, необходимо увеличить частоту вращения;
- если наблюдается недостаток воздуха и при этом ни один регулятор полностью не открыт, частота вращения остается неизменной.

Если в системе наблюдается недостаток воздуха, но при этом ни один из регуляторов полностью не открыт, регуляторы изменяют свое положение при постоянной частоте вращения вентилятора. В ходе испытаний продемонстрировано, что в этом случае общий расход воздуха, подаваемого в шахту, увеличивается. Такую передачу управления с вентилятора на регуляторы можно отразить в логике базы правил.

Рассмотрим базы правил нечеткого вывода для определения требуемого приращения частоты вращения рабочего колеса вентилятора (табл.1) [35]. Заголовки строк и столбцов соответствуют множествам входных переменных (ΔQ и ϕ_{\max}), входящих в антецеденты правил, значения на пересечении строк и столбцов соответствуют множествам выходной переменной из консеквента правил.

Таблица 1

Базы правил для управления вентилятором

	<i>NL</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PL</i>
<i>L</i>	<i>NL</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PL</i>
<i>M</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>
<i>S</i>	<i>NL</i>	<i>NL</i>	<i>NL</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>

Правило, соответствующее первым строке и столбцу, выглядит следующим образом: если ΔQ – отрицательное большое, ϕ_{\max} – большой, то $\Delta\omega$ – отрицательное большое.

Выделенные красным цветом ячейки соответствуют ситуации, когда ни один из регуляторов полностью не открыт, при этом в системе наблюдается совокупный недостаток воздуха. В этом случае сигналы управления передаются на регуляторы: частота вентилятора остается неизменной, а регуляторы должны перестроиться таким образом, чтобы снизить общее сопротивление сети для увеличения общего расхода подаваемого в шахту воздуха при той же частоте вращения вентилятора.

Степень истинности k -го правила вычисляется по формуле

$$\mu_{B_k}(\Delta\omega) = \mu_{A_k^{\Delta Q}}(\Delta Q) \mu_{A_k^{\phi_{\max}}}(\phi_{\max}), \quad (5)$$

где $\mu_{A_k^{\Delta Q}}$, $\mu_{A_k^{\phi_{\max}}}$ – функции принадлежности нечетких множеств входных переменных; μ_{B_k} – функция принадлежности нечеткого множества выходной переменной.

Для вычисления результирующего значения выходной переменной используется формула

$$\Delta\omega = \frac{\sum_k \overline{\Delta\omega_k} \mu_{B_k}(\Delta\omega)}{\sum_k \mu_{B_k}(\Delta\omega)}, \quad (6)$$

где $\overline{\Delta\omega_k}$ – центральное значение нечеткого множества выходной переменной k -го правила.

Формулы (5) и (6) представляют собой один из вариантов реализации нечеткого логического вывода, не зависящего от решения конкретной задачи, в котором для вычисления функций принадлежности каждого правила используется операция произведения. Результирующее значение выходной переменной определяется как средневзвешенное значение степеней принадлежности всех правил.

На рис.6 показана модернизированная схема управления САУП: сначала АД изменяют угол открытия в соответствии с текущим рассогласованием расхода воздуха ΔQ_i , затем ГВУ изменяет частоту вращения в соответствии с приведенной моделью нечеткого управления. Измеренные в результате совокупного изменения угла открытия каждой АД и частоты вращения ГВУ значения

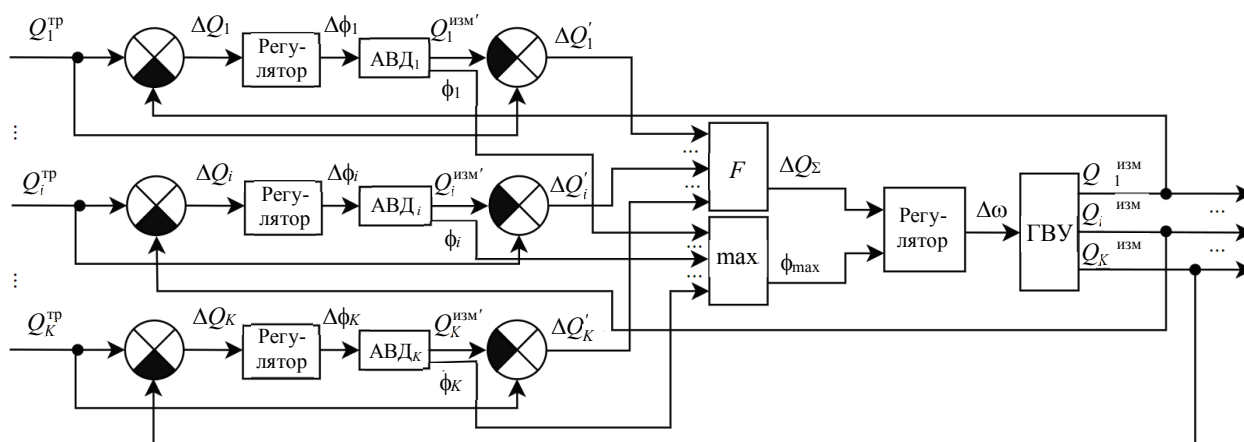


Рис.6. Схема управления САУП с автоматическим выходом на оптимальный режим проветривания

$\Delta Q_i'$ – отклонение расхода воздуха на i -й АВД (до изменения частоты ГВУ); $Q_i^{\text{изм}'}$, $Q_i^{\text{изм}}$ – измеренный (фактический) расход воздуха на i -й АВД (до изменения частоты ГВУ)

расхода воздуха $Q_i^{\text{изм}}$ используются для расчета ошибки управления на АВД. В схеме исключается предварительный выбор самого труднопроветриваемого направления, на котором, согласно логике регулятора ГВУ (табл. 1), соответствующая АВД автоматически перейдет в полностью открытое состояние. Функция F определяется в соответствии с формулой (2) и рассчитывает суммарное отклонение ΔQ_Σ по всем АВД.

Обсуждение. Для оценки эффективности предлагаемых алгоритмов смоделирована работа САУП в разработанном модуле для аналитического комплекса «АэроСеть» на вентиляционной сети рудника, построенной по результатам воздушно-депресссионной съемки, и результаты моделирования сопоставлены с фактическими данными работы оборудования в следующих ситуациях: текущий режим проветривания с заданными расходами воздуха; переход из одного режима проветривания в другой, сопровождающийся изменением заданных расходов воздуха на вентиляционных регуляторах.

Для моделирования текущего режима проветривания использовались данные работы САУП за 18 декабря 2019 г.

Таблица 2

Фактические и модельные расходы воздуха для текущего режима проветривания

АВД	Заданный расход, м³/мин	Фактический расход, м³/мин	Отклонение от заданного расхода, %	Модельный расход, м³/мин	Отклонение от заданного расхода, %
–420 Восток	1420	1190	–16,2	1421	0,07
–420 Север	1830	1790	–2,19	1830	0,0
–420 Юг	4590	5439	18,5	4596	0,13
–620 Восток	3300	3259	–1,24	3112	–5,7
–620 Север	3200	3078	–3,81	3202	0,06
–620 Юг	3520	4021	14,23	3401	–3,38

Примечание. Красным выделен существенный недостаток воздуха, зеленым – избыток.

Сравнение фактических и заданных расходов (табл.2) показывает, что по главным направлениям отклонения расхода воздуха находятся в пределах 10 %, но по отдельным направлениям наблюдается значительный перерасход или дефицит воздуха.

В установившейся конфигурации параметров элементов САУП по результатам моделирования расход воздуха на вентиляторе составляет 19997 м³/мин при 352 об/мин, тогда как фактическая производительность вентилятора составляет 19292 м³/мин при 373 об/мин.



Сравнение положения автоматических вентиляционных дверей на расчетной модели и в системе управления (табл.3) показывает, что конфигурация положения дверей в САУП установлена неоптимальным образом.

Таблица 3

Фактические и модельные углы открытия регуляторов для текущего режима проветривания

АВД	Угол открытия фактический, град	Угол открытия модельный, град	АВД	Угол открытия фактический, град	Угол открытия модельный, град
–420 Восток	24	35	–620 Восток	47	90*
–420 Север	45	37	–620 Север	40	62
–420 Юг	77*	78	–620 Юг	44	90*

* Регуляторы с максимальным углом открытия.

В качестве «главного» направления в САУП выбрано направление «–420 Юг» (самое большое значение требуемого расхода воздуха), что приводит к неоптимальной работе вентилятора для обеспечения заданных расходов. Исходя из результатов моделирования, самым труднопроветриваемым направлением является «–620 Восток» или «–620 Юг».

Для моделирования изменения режима проветривания использовались данные работы САУП за 26 февраля 2019 г. В течение дня требуемый расход воздуха изменен на нескольких регуляторах, что привело к существенному перераспределению воздуха по руднику (табл.4).

Таблица 4

Фактические и модельные расходы воздуха при изменении режима проветривания

АВД	Начальный заданный расход, м³/мин	Конечный заданный расход, м³/мин	Конечный фактический расход, м³/мин	Отклонение от заданного расхода, %	Конечный модельный расход, м³/мин	Отклонение от заданного расхода, %
–420 Восток	1400	1400	1420	1,4	1411	0,8
–420 Север	2510	2810	2812	0,0	2817	0,2
–420 Юг	4290	2880	3006	4,3	2884	0,1
–620 Восток	2890	2890	2954	2,2	2955	2,2
–620 Север	2620	2620	2592	–1,1	2624	0,2
–620 Юг	5310	3800	3929	3,4	3609	–5,0

Применение алгоритмов на основе нечеткого управления позволяет ГВУ быстрее выйти на заданный режим проветривания (рис.7). Существенное проседание частоты вращения, как и угла открытия регулятора на самом труднопроветриваемом направлении «–620 Юг», обусловлено значительным снижением требуемого расхода на этом регуляторе и отработкой данной уставки АВД до снижения фактического расхода на ГВУ, что является оправданным с точки зрения устойчивости управления. Возврат регулятора «АВД –620 Юг» в полностью открытое состояние подтверждает способность системы самой определять самое труднопроветриваемое направление.

В данной ситуации «главное» направление в САУП установлено корректно и соответствует условию самого большого расхода воздуха. Установившиеся расходы воздуха в случае фактических и модельных данных находятся в допустимом 5 %-ном интервале отклонений.

Заключение. Проведенные исследования показали, что при реализации САУП предварительный выбор самого труднопроветриваемого направления на основе самого большого расхода воздуха (либо на усмотрение оператора) может приводить к необеспечению заданных расходов на направлениях и перерасходу электроэнергии вентилятором.

Предложенный подход к формированию базы правил нечеткого регулятора позволяет реализовать возможность автоматического выбора самого труднопроветриваемого направления, обеспечивается выход САУП на оптимальный режим проветривания, минимизирующий энергопотребление ГВУ.

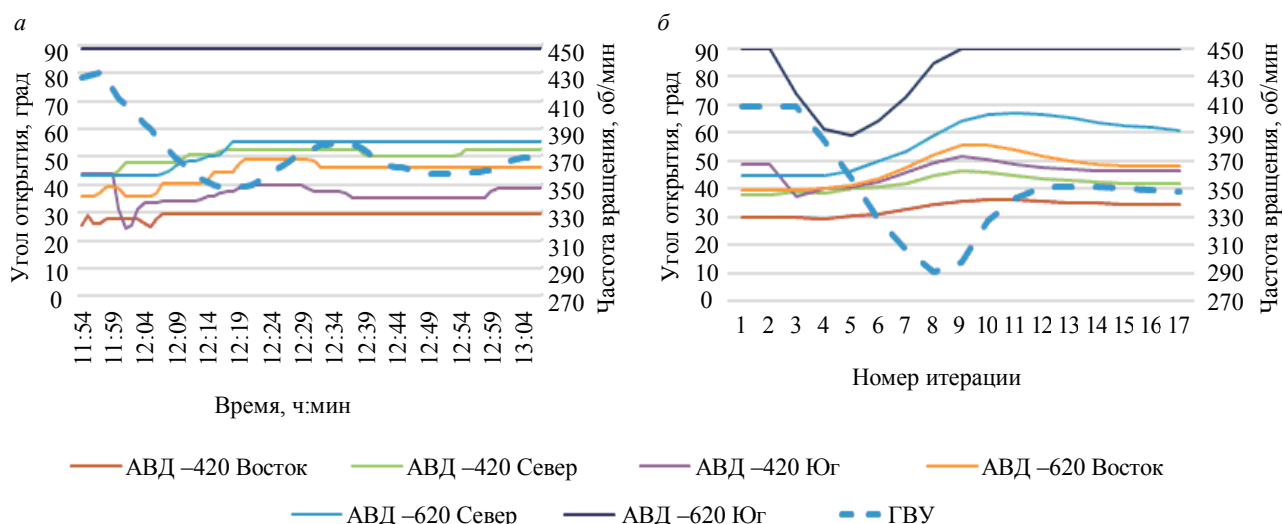


Рис. 7. Изменение углов открытия регуляторов и частоты вращения ГБУ при переходе из одного режима проветривания в другой: ГБУ и АВД данные САУП (а), результаты моделирования (б)

Модернизированная схема управления протестирована на актуальной модели вентиляционной сети рудника ЗРУ ОАО «Беларуськалий», при этом результаты модельных расчетов сопоставлены с фактическими данными САУП за конкретные временные интервалы ее работы.

Предложенная стратегия управления проветриванием исключает недостаток воздуха на регулируемых направлениях без необходимости внешнего контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Acuña E., Alvarez R., Hurtado J. Updated Ventilation on Demand review: implementation and savings achieved // Proceedings of the 1st International Conference of Underground Mining, 19-21 October 2016, Chile, Santiago. 2016. P. 606-617.
2. De Vilhena Costa L., Margarida da Silva J. Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand // Mining Technology. 2019. Vol. 129. Iss. 1. P. 1-8. DOI: 10.1080/25726668.2019.1651581
3. Chatterjee A., Zhang L., Xia X. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff // Applied Energy. 2015. Vol. 146. P. 65-73. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.134
4. Hardcastle S., Kocsis C., Lacroix R. Strategic mine ventilation control: a source of potential energy savings // Proceedings of Montreal Energy & Mines, Montreal, Canada. 2007. P. 255-263.
5. Moreau K., Laamanen C., Bose R. et al. Environmental impact improvements due to introducing automation into underground copper mines // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. Vol. 31. № 6. P. 1159-1167. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.11.009
6. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Kiryakov A.S. Energy-saving mine ventilation // Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49. № 3. P. 475-481. DOI: 10.1134/S1062739149030155
7. Семин М.А., Гришин Е.Л., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 623-632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4
8. Sjöström S., Klintenäs E., Johansson P., Nyqvist J. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30. № 4. P. 533-539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016
9. Nel A.J.H., Arndt C., Vosloo J.C., Mathews M.J. Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South African mines // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 232. P. 379-390. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.376
10. Acuña E., Feliú A. Considering ventilation on demand for the developments of the New Level Mine Project, El Teniente // Deep Mining 2014: Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia. 2014. P. 813-821. DOI: 36487/ACG_rep/1410_59_Acuna
11. Acuña E., Allen C. Ventilation control system implementation and energy consumption reduction at Totten Mine with Level 4 Tagging and future plans // Proceedings of the First International Conference on Underground Mining, Technology, Canada, Sudbury. 2017. P. 89-95. DOI: 10.36487/ACG_rep/1710_06_Acuna
12. Семин М.А., Круглов Ю.В. Динамические граничные условия типа вентилятор в нестационарных задачах рудничной вентиляции // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 5. С. 259-263.
13. Kруглов Y.V., Levin L.Y., Zaitsev A.V. Calculation method for the unsteady air supply in mine ventilation networks // Journal of Mining Science. 2011. Vol. 47. № 5. P. 651-659. DOI: 10.1134/S1062739147050145



14. Мальцев С.В., Казаков Б.П., Семин М.А. Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 4. С. 283-291.
15. Круглов Ю.В., Семин М.А., Зайцев А.В. Математическое моделирование работы оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2011. № 2. С. 116-126.
16. Круглов Ю.В., Семин М.А. Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. Т. 12. № 9. С. 106-115.
17. Precup R.-E., Hellendoorn H. A survey on industrial applications of fuzzy control // Computers in Industry. 2011. Vol. 62. Iss. 3. P. 213-226. DOI: 10.1016/j.compind.2010.10.001
18. Pal S.K., Mandal D.P. Fuzzy Logic and Approximate Reasoning: An Overview // IETE Journal of Research. 1991. Vol. 37. Iss. 5-6. P. 548-560.
19. Tai K., El-Sayed A.-R., Biglarbegian M. et al. Review of recent type-2 fuzzy controller applications // Algorithms. 2016. Vol. 9. Iss. 2. № 39. DOI: 10.3390/a9020039
20. Rojas J.D., Salazar O., Serrano H. Nie-Tan Method and its Improved Version: A Counterexample // Ingeniería. 2016. Vol. 21. № 2. P. 138-153. DOI: 10.14483/udistrital.jour.reving.2016.2.a02
21. García P., García C.A., Fernández L.M. et al. ANFIS Based Control of a Grid-Connected Hybrid System Integrating Renewable Energies, Hydrogen and Batteries // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014. Vol. 10. № 2. P. 1107-1117. DOI: 10.1109/TII.2013.2290069
22. Pratihari D.K., Hui N. Evolution of Fuzzy Controllers and Applications // Studies in Computational Intelligence. 2007. P. 47-69. DOI: 10.1007/978-3-540-72377-6_3
23. Duy-Trung Nguyen, Ngoc-Khoat Nguyen, Hung-Lan Le, Van-Tiem Nguyen. Designing PSO-Based PI-type Fuzzy Logic Controllers: A Typical Application to Load-Frequency Control Strategy of an Interconnected Hydropower System // Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Automation, Control and Robots, 11-13 October 2019, Prague, Czech Republic. China University of Geosciences, 2019. P. 61-66. DOI: 10.1145/3365265.3365278
24. Kondratenko Y., Kondratenko G., Sidenko I. Two-stage method of fuzzy rule base correction for variable structure of input vector // Proceedings of 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 29 May – 02 June 2017, Kiev, Ukraine. IEEE, 2017. P. 1043-1049. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100409
25. Bejarbaneh E., Bagheri A., Bejarbaneh B. et al. A new adjusting technique for PID type fuzzy logic controller using PSOSCALF optimization algorithm // Applied Soft Computing. 2019. Vol. 85. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105822
26. Kirui G., Wang J. Design of a Fuzzy FOPID Controller for Power Level Control of a Pressurized Water Reactor // Proceedings of the 2020 12th International Conference on Machine Learning and Computing (ICMLC 2020), 15-17 February 2020, Shenzhen, China. Association for Computing Machinery, 2020. P. 549-553. DOI: 10.1145/3383972.3384004
27. Ksantini M., Ellouze A., Delmotte F. Control of a hydraulic system by means of a fuzzy approach // An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications. 2013. Vol. 3. № 2. P. 121-131. DOI: 10.11121/ijocta.01.2013.00153
28. Tamilselvan G.M., Aarthi P. Online tuning of fuzzy logic controller using Kalman algorithm for conical tank system // Journal of Applied Research and Technology. 2017. Vol. 15. P. 492-503. DOI: 10.1016/j.jart.2017.05.004
29. Hameed I.A. Simplified architecture of a type-2 fuzzy controller using four embedded type-1 fuzzy controllers and its application to a greenhouse climate control system // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2009. Vol. 223. № 5. P. 619-631. DOI: 10.1243/09596518JSCE708
30. Saritas I., Etik N., Allahverdi N., Sert I. Fuzzy expert system design for operating room air-condition control systems // Expert Systems With Applications. 2007. Vol. 36. Iss. 6. P. 23-30. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.02.028
31. Фащиленко В.Н., Варфоломеев С.В. Система управления электроприводами приточно-вытяжной вентиляции обогащательных фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 2. С. 182-188.
32. Гришин Е.Л., Накаряков Е.В., Трушкова Н.А., Саникович А.Н. Опыт внедрения систем динамического управления проветриванием рудников // Горный журнал. 2018. № 8. С. 103-108. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.15
33. Semin M.A., Levin L.Y., Maltsev S.V. Development of automated mine ventilation control systems for belarusian potash mines // Archives of Mining Sciences. 2020. Vol. 65. № 4. P. 803-820. DOI: 10.24425/ams.2020.135178
34. Kashnikov A.V., Levin L.Y. Applying machine learning techniques to mine ventilation control systems // Proceedings of 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 24-26 May 2017, St. Petersburg, Russia. IEEE, 2017. P. 391-393. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970595
35. Kashnikov A.V., Levin L.Y. Fan and Regulators Fuzzy Control in Mine Ventilation Systems // Proceedings of 2019 XXII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 23-25 May 2019, St. Petersburg, Russia. IEEE, 2019. P. 85-88. DOI: 10.1109/SCM.2019.8903698

Авторы: А.В.Кашников, младший научный сотрудник, alexey.kashnikov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3872-5862> (Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия), Ю.В.Круглов, д-р техн. наук, руководитель проектно-инновационного центра, <https://orcid.org/0000-0003-0977-7484> (Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Оценка сдвиговой прочности горных пород по трещинам на основе результатов испытаний образцов сферическими инденторами

В.А.КОРШУНОВ, А.А.ПАВЛОВИЧ ✉, А.А.БАЖУКОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: 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. EDN CAWDMN. DOI: 10.31897/PMI.2023.16

Аннотация. Представлены экспериментальные данные о связи остаточной сдвиговой прочности горных пород по сомкнутым трещинам с функциональными характеристиками ненарушенных пород – растягивающей и сжимающей составляющими сцепления, шероховатостью поверхностей трещин и уровнем нормальных напряжений. Разработан единый комплексный подход к определению сдвиговой прочности ненарушенных и разрушенных пород, остаточной сдвиговой прочности по сомкнутым шероховатым трещинам. Подход предусматривает выделение интервалов напряжений, соответствующих различным видам разрушения, для каждого из которых предлагается критерий прочности, выражаемый через функциональные характеристики ненарушенной породы. Разработан экспресс-метод оценки остаточной сдвиговой прочности пород по трещинам с шероховатой поверхностью, при котором в качестве базового метода испытаний применяется усовершенствованный метод нагружения образцов сферическими инденторами. Экспресс-метод реализует переход от данных механических испытаний образцов сферическими инденторами к показателям сдвиговой прочности по трещинам в массиве горных пород с учетом уровня нормальных напряжений и шероховатости поверхностей трещин, измеряемых в натурных условиях. При этом применяется шкала шероховатости, разработанная Бартоном. Экспресс-метод информативен и доступен в полевых условиях.

Ключевые слова: ненарушенная порода; разрушенная порода; трещина; шероховатость; остаточная сдвиговая прочность; критическое состояние; сцепление; угол внутреннего трения; сферические инденторы

Поступила: 25.05.2022

Принята: 19.01.2023

Онлайн: 20.04.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Разрушение горных пород в массиве в процессе эксплуатации месторождения происходит в условиях неоднородного напряженного состояния в режиме перераспределения напряжений при ведении горных работ и имеет вероятностный характер [1, 2]. Поэтому для геомеханического подбора процессов, встречающимся в горной практике [3, 4], при лабораторных механических испытаниях пород и их поверхностей ослабления (трещин) особое внимание следует уделять представительности испытаний в отношении вида напряженного состояния и механизма разрушения, характерных для реальных условий в массиве. Указанным требованиям отвечают методы раскалывания образцов сосредоточенными нагрузками [5] – метод нагружения образцов сферическими инденторами [6] и его аналог point-load strength test [7]. Эти методы испытаний реализуют сложный механизм разрушения образцов, включающий локальные разрушения ненарушенной породы путем отрыва и среза, а также деформирование разрушенной породы при высоких сжимающих напряжениях. Учитывая техническую простоту и доступность для массового применения, усовершенствованный метод нагружения образцов сферическими инденторами применяется в качестве базового метода испытаний при упрощенной оценке показателей паспортов предельной и остаточной прочности горной породы [8, 9].

Для массива характерно существенное различие прочностных свойств слагающих пород и поверхностей ослабления (трещин) [10-12]. Сопротивление сдвигу по трещинам в массиве горных пород чаще оценивается на основе лабораторных испытаний малогабаритных образцов по сомкнутым



(закрытым) трещинам и описанию природных трещин в полевых условиях [13-15]. На практике для описания природных трещин применяют как шкалу стандартных профилей шероховатости, разработанную Бартоном [16], так и оценку шероховатости в первом приближении, основанную на выделении ровного, волнистого или ступенчатого морфологических типов закрытых трещин согласно отечественной классификации [17]. При этом определение сдвиговой прочности (СП) по трещинам в лабораторных условиях¹ нередко затрудняется отсутствием необходимого объема проб, разбросом характеристик трещин, несоответствием геометрических размеров трещин и параметров их шероховатости в образце и массиве. К тому же повреждения поверхностей природных трещин при отборе проб и подготовке к испытаниям образцов дополнительно искажают экспериментальные данные. Из-за сложности отбора представительных проб актуальной является разработка доступных в полевых условиях ускоренных методов определения сдвиговой прочности пород по трещинам по данным технически простых испытаний малогабаритных образцов.

Представлены результаты исследований, направленных на разработку нового подхода к оценке сдвиговой прочности горных пород по трещинам на основе данных испытаний ненарушенных образцов сферическими инденторами. Подход учитывает уровень напряжений и шероховатость трещин в реальных условиях, предназначен для получения исходных данных о СП массива горных пород по поверхностям ослабления.

Методы. Для оценки предельного напряженного состояния трещиноватого массива в качестве эмпирического критерия разрушения широко используются данные построения огибающей предельных кругов напряжений Мора (паспорта прочности). При этом сдвиговую прочность массива горных пород принято оценивать на основе определения свойств ненарушенных пород и интегральной оценки влияния на них поверхностей ослабления (трещин) [18-20].

Одни и те же горные породы в различных напряженных состояниях могут хрупко разрушаться и пластически деформироваться [21, 22]. При этом переход от одного вида разрушения к другому при изменении напряженного состояния происходит постепенно [23], с определенной вероятностью его реализации [24]. На диаграмме Мора это проявляется в том, что сдвиговая прочность породных образцов, как ненарушенных, так и разрушенных при трехосном сжатии либо ослабленных трещинами, характеризуется подобными по форме огибающими предельных кругов напряжений [16, 23]. Огибающие кривые прочности как ненарушенной, так и структурно ослабленной породы при переходе из интервала растягивающих напряжений в интервал сжимающих напряжений выполаживаются и имеют тенденцию к слиянию при высоком уровне напряжений [25, 26].

Построение огибающих кругов напряжений Мора, соответствующих предельной и остаточной прочности пород, по данным лабораторных испытаний цилиндрических образцов, связано с проведением многочисленных испытаний в широком диапазоне напряжений на сложном оборудовании. Учитывая сложность и трудоемкость этого подхода, широкое распространение получили упрощенные расчетные методы построения огибающих предельной и остаточной прочности, основанные на эмпирических зависимостях сдвиговой прочности от нормальных напряжений с учетом особенностей конкретных пород [25, 27, 28]. В качестве основных параметров эмпирических зависимостей (критериев разрушения) обычно используют значения механических показателей, характеризующих различные виды разрушения (сдвиг и отрыв), и которые определяются технически простыми и доступными способами [29, 30]. Наиболее распространены два подхода к представлению эмпирических зависимостей (критериев разрушения).

Первый подход заключается в использовании математических формул, описывающих единую зависимость для всего диапазона возможных значений нормальных напряжений [16, 29, 31]. Недостатком подобных эмпирических критериев разрушения обычно является ограниченность их области применения особенностями конкретных пород, видом разрушения или диапазоном напряжений [32]. Например, расчетный метод построения паспорта прочности по данным определения

¹ ASTM D5607-16. Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2016.



пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении (ГОСТ 21153.8) не рекомендуется применять в диапазоне нормальных напряжений, превышающем значения 1,5 предела прочности при одноосном сжатии.

Второй (комплексный) подход предусматривает условное выделение интервалов нормальных напряжений, соответствующих различным видам разрушения, для каждого из которых предлагается отдельный критерий прочности. При построении зависимостей в выделенных интервалах напряжений предпочтение отдается простым эмпирическим формулам. Например, при описании прочности на сдвиг по шероховатой трещине в соответствии с критерием Паттона и при определении предельной и остаточной прочности горных пород при трехосном сжатии в соответствии со стандартом ISRM² используется билинейная аппроксимация предельных огибающих. А в соответствии с модифицированным критерием прочности Мора – Кулона прямолинейная предельная огибающая в интервале растягивающих напряжений заменяется дугой окружности [30].

Сопротивление сдвигу по трещинам различного типа в осадочных, магматических и метаморфических породах может быть описано общими зависимостями, учитывающими для сомкнутых трещин углы наклона неровностей поверхности, прочностные свойства стенок трещин и уровень нормальных напряжений. При этом сопротивление сдвигу существенно различается для трещин ровного, волнистого и ступенчатого морфологических типов [33-35]. С учетом этого предложен нелинейный эмпирический критерий СП по трещинам в массиве горных пород (критерий Бартона – Бандиса), который учитывает шероховатость и прочность породных стенок трещин [36]:

$$\tau_{\max} = \sigma_n \operatorname{tg} \left(JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right), \quad (1)$$

где σ_n – эффективное нормальное напряжение; JRC – коэффициент шероховатости трещин, изменяется от 0° для гладких поверхностей скольжения до 20° для ступенчатых шероховатых поверхностей; JCS – предел прочности поверхности трещины при сжатии; φ_r – остаточный угол трения (около 30°).

Эмпирическая формула Бартона – Бандиса позволяет учитывать особенности изменения параметров предельных огибающих прочности по трещинам в массиве горных пород. Анализ данного подхода показал, что при нормальном напряжении σ_n , превышающем прочность поверхности трещин JCS , либо низком напряжении σ_n , соответствующем величине угла трения более 70° , уравнение (1) перестает работать. Учитывая это, в работе [37] отмечено, что при проектировании бортов карьеров критерий Бартона – Бандиса следует использовать с осторожностью. Опубликовано большое количество исследований, направленных на совершенствование этого критерия [38-40].

Аналогичный комплексный подход предложен и для построения паспорта прочности горной породы по результатам испытаний на раскалывание образцов сферическими инденторами усовершенствованным методом, разработанным в Санкт-Петербургском горном университете [41, 42]. Суть этого метода испытаний заключается в осевом сжатии образца двумя сферическими инденторами, фиксации разрушающей силы P и измерении в разрушенном образце площади поверхности отрыва S и зон разрушенной срезов породы вблизи инденторов F_1 и F_2 , из которых учитывают большую F (рис.1, а). Таким образом, в рамках известного подхода предложено существенное уточнение – помимо определения растягивающей составляющей напряжений σ_t в образце дополнительно оценивается сжимающая составляющая напряжений p при локальном разрушении срезом. Это позволяет, в отличие от стандартного метода испытаний (ГОСТ 24941), учитывать сложный характер разрушения образца, включающий деформирование разрушенной породы на контактах с инденторами и разрушение породы путем отрыва внутри образца и среза на границе разрушенных зон.

При вычислении параметров паспорта прочности в качестве функциональных характеристик, определяющих разрушение горной породы, приняты растягивающая и сжимающая составляющие предельного сопротивления срезу (сцепления):

² Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression // ISRM: Suggested Methods for Triaxial Compression Testing. 1983. Vol. 20. № 6. P. 283-290. DOI: 10.1016/0148-9062(83)90598-3

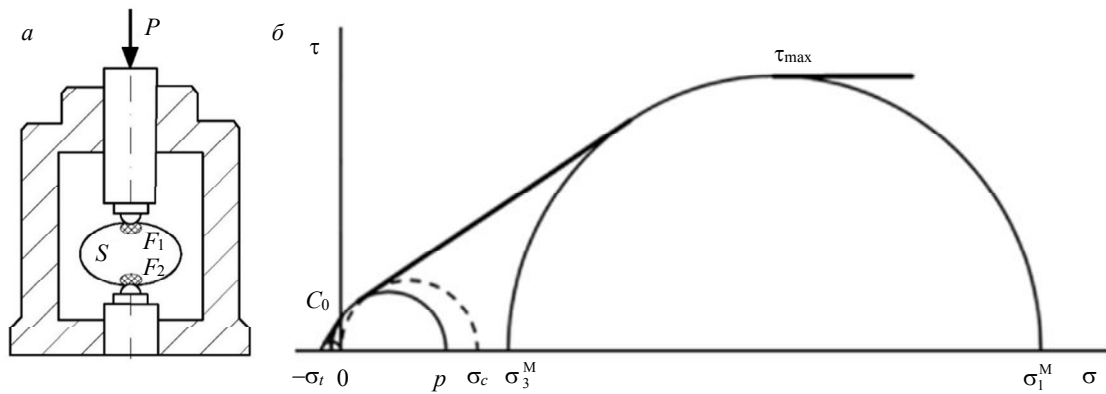


Рис. 1. Построение паспорта прочности ненарушенного образца горной породы [5]:
а – схема испытания образца сферическими инденторами; б – построение паспорта прочности образца в системе координат Мора

$$\sigma_t = \frac{P}{S}; \quad (2)$$

$$p = \frac{P}{F}; \quad (3)$$

$$C_0 = \sqrt{\sigma_t p}. \quad (4)$$

Для удобства расчетов формулы могут выражаться при помощи показателя хрупкости K ($K = p/\sigma_t$) или коэффициента хрупкости K_f , равного отношению пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении ($K_f = \sigma_c/\sigma_t$). При этом установлена взаимосвязь σ_t и p с пределами прочности:

$$\sigma_c = p + C_0; \quad (5)$$

$$\sigma_t = \frac{2\sigma_t p}{\sigma_t + p} = \sigma_t \frac{2K}{1+K}. \quad (6)$$

На диаграмме Мора огибающую предельных кругов напряжений породы аппроксимировали комплексом взаимосвязанных отрезков – прямолинейными отрезками, соответствующими устойчивым видам макроразрушения (отрывом, срезом и квазипластическим деформированием), и дугами окружностей предельных кругов напряжений Мора, для которых вид разрушения носит вероятностный характер (рис.1, б). При этом вероятностному разрушению отрывом или сдвигом соответствовало сцепление C_0 , которое аппроксимировали отрезком дуги круга Мора $\{-\sigma_t; p\}$ в интервале нормальных напряжений от 0 до $(p - \sigma_t)/2$, а вероятностному разрушению срезом или квазипластическому деформированию соответствовало максимальное сопротивление срезу τ_{\max} , которое аппроксимировали отрезком дуги круга Мора $\{\sigma_3^M; \sigma_1^M\}$:

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \sqrt{\sigma_t p} + \frac{p}{\sigma_t} \frac{(p - 3\sigma_t)}{4}; \quad (7)$$

$$\sigma_3^M = \sqrt{K} \left(\frac{\sigma_c}{2} - 2\sigma_t \right); \quad (8)$$

$$\sigma_1^M = \sigma_c + K \left(\frac{\sigma_c}{2} - 2\sigma_t \right). \quad (9)$$

В интервалах нормальных напряжений, соответствующих устойчивым видам макроразрушения, огибающую предельных кругов напряжений предложено аппроксимировать касательными



к кругам вероятностного разрушения. При этом необходимо отметить, что прямолинейный отрезок огибающей, соответствующий разрушению срезом, аппроксимируется единой касательной к кругам Мора, соответствующим условной величине прочности при «чистом» сдвиге (при главных нормальных напряжениях $\{-C_0; C_0\}$) и максимальному сопротивлению срезу τ_{\max} (при напряжениях $\{\sigma_3^M; \sigma_1^M\}$).

Результаты сопоставления экспериментальных и расчетных данных свидетельствуют о том, что комплексный подход применим и для упрощенной оценки остаточной прочности разрушенных пород [9] и сдвиговой прочности по сомкнутым трещинам [43]. При этом установлены зависимости [43], связывающие параметры остаточной СП с функциональными характеристиками ненарушенной породы σ_i и p без учета особенностей шероховатости поверхностей трещин. Принимая во внимание предварительный характер таких результатов, в Санкт-Петербургском горном университете выполнены комплексные исследования, направленные на разработку экспресс-метода оценки сдвиговой прочности горных пород по шероховатым трещинам на основе результатов испытаний малогабаритных образцов сферическими инденторами.

Под остаточной прочностью понимается «запредельная» прочность разрушенного образца при деформациях, которые могут быть разумно получены в трехосных испытаниях [5]. В ходе исследований изучены следующие вопросы:

- основные закономерности изменения остаточной СП разрушенной при трехосном сжатии породы и шероховатых трещин в зависимости от уровня нормальных напряжений (общий вид огибающих предельной и остаточной прочности на диаграмме Мора, интервалы возможных значений сдвиговой прочности, зависимость параметров огибающих предельных кругов напряжений Мора от вида макроразрушения);
- влияние шероховатости и относительной прочности поверхности стенок трещин, хрупкости породы на прочность при сдвиге;
- связь параметров остаточной СП разрушенной породы и шероховатых трещин с параметрами прочности ненарушенной породы.

Для обеспечения представительности испытаний в отношении вида напряженного состояния и механизма разрушения выполнены сопоставительные испытания широкого круга твердых горных пород от слабых и пластичных до прочных и хрупких (кембрийская глина, мрамор, известняк, аргиллит, алевролит, уголь, хромит и т.д.) на раскалывание образцов сферическими инденторами [9, 43], на одноосное и трехосное сжатие в режиме регулируемой осевой деформации образцов. Предел прочности пород σ_c изменялся от 2,55 до 179,34 МПа, а коэффициент хрупкости K_f от 5,8 до 13,9. При этом испытаниям на сжатие подвергнуты как монолитные, так и содержащие естественные и искусственные трещины образцы.

Испытания на сжатие проведены в соответствии с требованиями стандартных методов Российской Федерации (ГОСТ 21153.2 и 21153.8) и международного общества ISRM³ в жестком нагрузочном устройстве БВ-21, которое установлено на прессе, рассчитанном на создание сжимающего усилия до 1000 кН, и укомплектовано насосной станцией, рассчитанной на давление рабочей жидкости до 60 МПа. Испытания образцов пород сферическими инденторами проведены в нагрузочном устройстве БУ-11 (Россия), которое установлено в универсальной испытательной машине Insight 50 (USA), рассчитанной на создание сжимающего усилия до 50 кН. Приложение нагрузок к образцам осуществляли в соответствии с ГОСТ 24941 через стальные инденторы диаметром 15 мм с твердостью по Роквеллу HRC 60-65 единиц. Испытаниям подвергали образцы толщиной 20-50 мм с ожидаемой площадью поверхности разрыва 5-20 см².

Обсуждение результатов. По результатам комплексных исследований механических свойств горных пород получены новые экспериментальные данные о связи остаточной сдвиговой прочности горных пород по сомкнутым трещинам с функциональными характеристиками ненарушенных пород σ_i и p , шероховатостью поверхностей трещин и уровнем нормальных напряжений.

³ ISRM: Suggested methods for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1999. Vol. 36. Iss. 3. P. 279-289. DOI: 10.1016/S0148-9062(99)00006-6

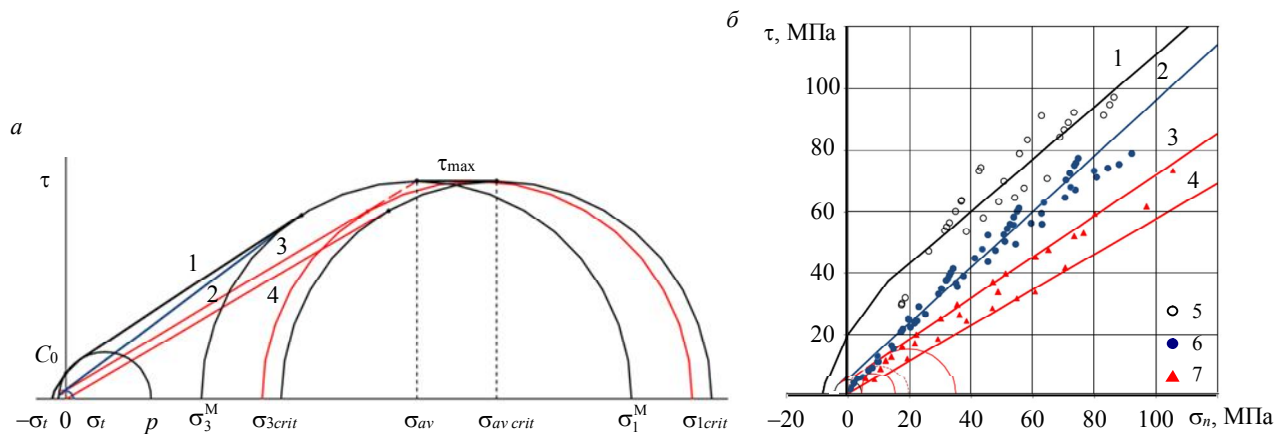


Рис.2. Построение огибающих СП горной породы и трещин (а); экспериментальные данные сопоставительных испытаний мрамора (б)

1, 2 – предельная и остаточная прочность породы; 3, 4 – остаточная СП по трещинам ($JRC = 20$; $JRC = 0$); 5, 6 – предельная и остаточная прочность разрушенной при трехосном сжатии породы; 7 – остаточная прочность при срезе со сжатием по трещинам

Принято считать, что на диаграмме Мора предельное «критическое» состояние, соответствующее максимальному сопротивлению срезу τ_{max} , характеризуется отношением минимального и максимального главных нормальных напряжений, равным 1/3 [25, 33]. Учитывая это, компоненты предельного критического напряженного состояния (σ_{3crit} и σ_{1crit}) приняты в качестве характеристики СП вдоль наиболее ослабленных поверхностей. Критическое состояние $\{\sigma = \sigma_{avcrit}; \tau = \tau_{max}\}$ рассматривалось как переходное предельное напряженное состояние, соответствующее вероятностному характеру разрушения при сдвиге вдоль плоских трещин.

Сделанные допущения позволили построить огибающую остаточной СП по плоским трещинам на основе результатов испытаний монолитного образца инденторами. На диаграмме Мора огибающая остаточной прочности при сдвиге по плоской трещине аппроксимируется комплексом взаимосвязанных отрезков – дугой окружности предельного круга напряжений Мора $\{\sigma_{3crit} = \tau_{max}; \sigma_{1crit} = 3\tau_{max}\}$, для которого вид разрушения носит вероятностный характер, и двумя прямолинейными отрезками, касательными к этому кругу, и соответствующими устойчивым видам макроразрушения (рис.2, а, огибающая 4). Один из отрезков проходит через начало координат под углом остаточного трения φ_r , равным 30° , и касается круга в точке с координатами $\{\sigma = (2 - \sin \varphi_r)\tau_{max}; \tau = \cos \varphi_r \tau_{max}\}$, а горизонтальный отрезок касается круга в точке с координатами $\{\sigma = 2\tau_{max}; \tau = \tau_{max}\}$.

На диаграмме Мора обоснованность такой аппроксимации подтверждает совпадение нижней границы области значений остаточной СП по ровным трещинам в мраморе, установленной при трехосных испытаниях, с расчетной огибающей остаточной СП по плоской ровной трещине (рис.2, б).

В интервале средних нормальных напряжений, соответствующих устойчивому макроразрушению образцов срезом, огибающая остаточной прочности разрушенной породы аппроксимируется отрезком единой касательной к кругам Мора, соответствующим максимальному сопротивлению срезу и условной прочности чистого сдвига разрушенной породы [9, 37]. Установлено, что в интервале средних нормальных напряжений, превышающих условные пределы прочности при одноосном сжатии, огибающие остаточной СП как разрушенной породы (рис.2, а, огибающая 2), так и остаточной СП по шероховатой трещине с $JRC = 20$ (рис.2, а, огибающая 3) достоверно аппроксимируются отрезками общих касательных к кругам Мора. Они соответствуют условной прочности при чистом сдвиге разрушенной породы (при главных нормальных напряжениях $\{-\sigma_t; \sigma_t\}$) и максимальному сопротивлению срезу τ_{max} . При этом остаточной прочности разрушенной породы соответствует отрезок касательной к кругу Мора, общему для ненарушенной и разрушенной породы, а остаточной СП по шероховатой трещине соответствует отрезок касательной к кругу Мора, направленный в условную точку с координатами $\{\sigma = \sigma_{av}; \tau = \tau_{max}\}$.

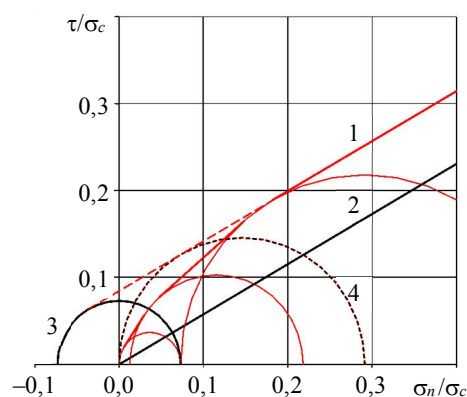


Рис.3. Построение расчетной огибающей относительной остаточной СП по трещинам в интервале низких нормальных напряжений для $K_f = 7,5$

1 – $JRC = 20$; 2 – $JRC = 0$; 3 – разрушенная порода при чистом сдвиге; 4 – $JRC = 20$ (прочность стенок трещины)

На диаграмме Мора обоснованность предлагаемой аппроксимации для огибающей сдвиговой прочности по трещинам с шероховатыми поверхностями стенок подтверждает совпадение верхней границы области значений остаточной СП по шероховатым трещинам в мраморе, установленной при трехосных испытаниях, с расчетной огибающей остаточной прочности при сдвиге (рис.2, б, огибающая 3).

При низких нормальных напряжениях огибающая остаточной прочности разрушенной породы имеет нелинейный вид и касается круга Мора, соответствующего остаточной прочности при одноосном сжатии (рис.3) [9]. Для уточнения вида предельных огибающих остаточной прочности разрушенной породы и остаточной сдвиговой прочности по трещинам в этом интервале нормальных напряжений проведены дополнительные лабораторные испытания.

Экспериментально установлено, что при нормальных напряжениях, не превышающих условные пределы прочности при одноосном сжатии, определяющими параметрами паспортов остаточной сдвиговой прочности разрушенной породы и трещин с шероховатой поверхностью ($JRC = 20$) являются: абсолютная величина растягивающей составляющей сцепления σ_t , условные пределы прочности при одноосном сжатии, которые подобны параметрам паспорта прочности ненарушенной породы – сцеплению C_0 и пределу прочности при одноосном сжатии σ_c :

$$\sigma_{0R} = \sigma_t \frac{(\sigma_1^M + \sigma_3^M)}{(\sigma_3^M + \sigma_t)}; \quad (10)$$

$$\sigma_{0r} = \frac{2\sigma_t}{(1 - \sin \varphi_r)}, \quad (11)$$

где φ_r – условный угол трения по шероховатой трещине с $JRC = 20$.

Для интервала нормальных напряжений (меньших σ_{0r}) характерными являются два предельных напряженных состояния поверхностей трещин, описываемые дугами окружностей кругов Мора $\left\{ \sigma_3 = \frac{2\sigma_t}{(1+K)}; \sigma_1 = (\sigma_{0r} - \sigma_t) \right\}$ и $\left\{ \sigma_3 = 0; \sigma_1 = \sigma_t \right\}$, аналогичные предельным напряженным состояниям ненарушенной породы – переходному состоянию от разрушения срезом к разрушению отрывом $\left\{ \sigma_3 = -\sigma_t; \sigma_1 = p \right\}$ и разрушению отрывом при напряжениях $\left\{ \sigma_3 = -2\sigma_t + \frac{\sigma_t}{\sqrt{K}}; \sigma_1 = C_0 \right\}$.

Промежутки между ними аппроксимируются прямолинейными отрезками, образованными общими касательными к окружностям (рис.3, огибающая 1).

По результатам исследований установлено, что отклонение от прямолинейного вида огибающей остаточной сдвиговой прочности по трещинам с шероховатой поверхностью ($JRC = 20$) происходит при среднем нормальном напряжении, меньшем условного предела прочности при одноосном сжатии σ_{0r} . Этому напряженному состоянию соответствует круг Мора с минимальным главным нормальным напряжением, равным σ_t (рис.4). Радиус этого предельного круга Мора соответствует аналогу сжимающей составляющей сцепления p , численно равному разности между условным пределом прочности при одноосном сжатии и аналогом сцепления $(\sigma_{0r} - \sigma_t)$.

На диаграмме Мора огибающую остаточной прочности разрушенной породы при низких нормальных напряжениях в первом приближении допустимо аппроксимировать отрезком, параллельным аналогичному отрезку огибающей предельной прочности [9]. Уточняется вид кривой

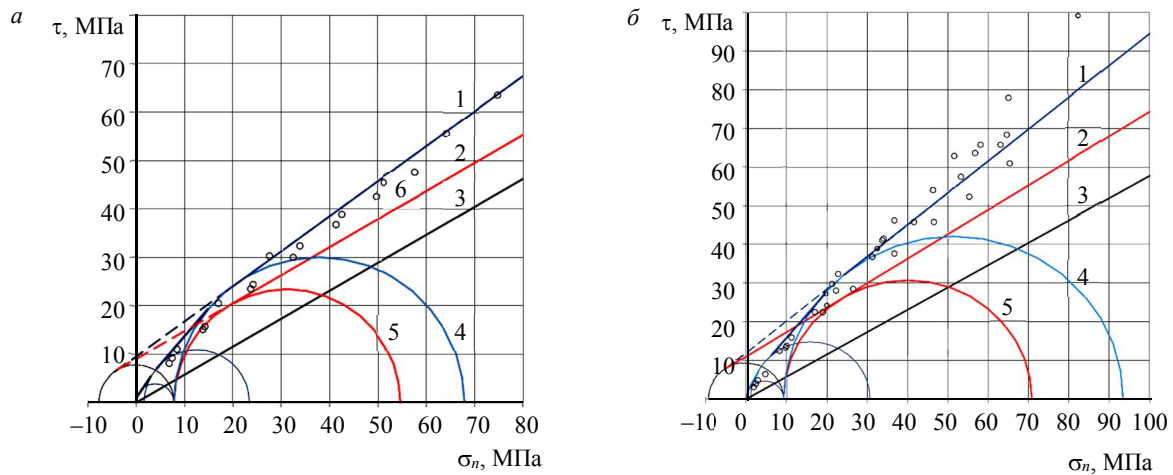


Рис.4. Построение расчетных огибающих остаточной СП в алевролите (а) и песчанике (б)
1 – разрушенная порода; 2, 3 – трещина ($JRC = 20$ и $JRC = 0$); 4, 5 – прочность при $\sigma_3 = \sigma_1$ разрушенной породы и стенок трещины ($JRC = 20$); 6 – остаточная прочность разрушенной при трехосном сжатии породы

в области низких напряжений в соответствии с комплексным подходом. Экспериментально установлено, что огибающие остаточной прочности породы, разрушенной при сжатии и срезе по сомкнутым шероховатым трещинам ($JRC = 20$), практически не отличаются в интервале нормальных напряжений, не превышающем σ_t . Этому интервалу соответствуют круги Мора со значениями σ_3 не более $\frac{2\sigma_t}{(1+K)}$.

Учитывая, что вероятностному состоянию, переходному к устойчивому разрушению образцов срезом, соответствует круг Мора со значением σ_3 , равным σ_t , предельную огибающую в интервале, который характеризуется значениями σ_3 от $\frac{2\sigma_t}{(1+K)}$ до σ_t , допустимо аппроксимировать

общей касательной к соответствующим кругам Мора, соответствующим срезе по сомкнутым шероховатым трещинам. Параметры кругов Мора, характеризующих подобные напряженные состояния при сдвиге по ненарушенной и разрушенной породе и сомкнутым шероховатым трещинам при низких нормальных напряжениях, представлены в табл.1.

Таблица 1

Соответствие параметров кругов Мора для характерных предельных напряженных состояний ненарушенных и разрушенных сжатием пород и их трещин

Описание предельного напряженного состояния ненарушенной породы	Описание поверхности сдвига					
	Ненарушенная порода, МПа		Разрушенная порода, МПа		Ступенчатая сомкнутая поверхность, МПа	
	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1
Разрушение отрывом при растяжении со сжатием	$\frac{\sigma_t}{\sqrt{K}} - 2\sigma_t$	C_0	0	σ_t	0	σ_t
Вероятное разрушение отрывом или срезом при растяжении со сжатием	$-\sigma_t$	$p = \sigma_c - C_0$	$\frac{2\sigma_t}{(1+K)}$	$\sigma_{0r} - \sigma_t$	$\frac{2\sigma_t}{(1+K)}$	$\sigma_{0r} - \sigma_t$
Разрушение срезом при неравномерном сжатии	C_0	$2\sigma_c - C_0$	σ_t	$2\sigma_{0r} - \sigma_t$	σ_t	$2\sigma_{0r} - \sigma_t$

Разработан единый комплексный подход к определению предельной и остаточной сдвиговой прочности горных пород и остаточной сдвиговой прочности по сомкнутым шероховатым трещинам. В соответствии с этим на диаграмме Мора предельная огибающая остаточной СП по шероховатым трещинам имеет криволинейный вид при низких нормальных напряжениях, прямолинейный при среднем уровне нормальных напряжений и выполаживается при высоком уровне напряжений.

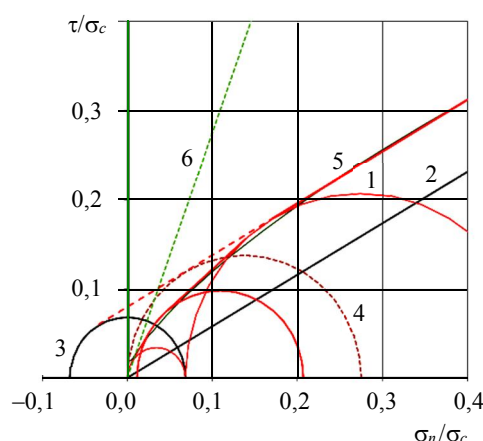


Рис.5. Построение расчетной огибающей относительной остаточной СП по шероховатой ($JRC = 20$) трещине в интервале низких нормальных напряжений для $K_f = 8$

См. условные обозначения 1-4 на рис.3; 5 – по критерию Бартона – Бандиса; 6 – граница области применения критерия Бартона – Бандиса

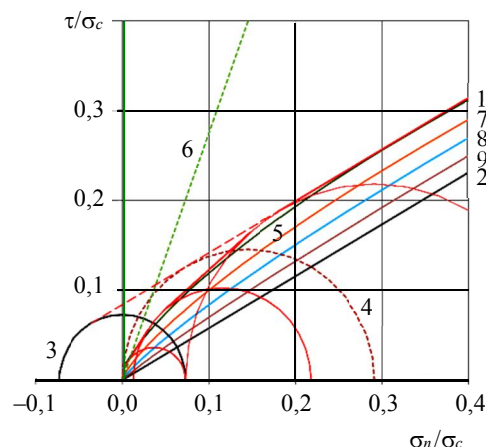


Рис.6. Построение огибающих относительной остаточной СП по трещинам различного морфологического типа в интервале низких нормальных напряжений для $K_f = 7,5$

1 – $JRC = 20$; 2 – $JRC = 0$; 3 – разрушенная порода при чистом сдвиге; 4 – $JRC = 20$ (прочность стенок трещины); 5 – $JRC = 20$ (по критерию Бартона – Бандиса); 6 – граница области применения критерия Бартона – Бандиса; 7 – $JRC = 15$; 8 – $JRC = 10$; 9 – $JRC = 5$

Для обоснования предлагаемого комплексного подхода проведены сравнительные расчеты сдвиговой прочности по трещинам с использованием критерия прочности Бартона – Бандиса по формуле (1) для заданных значений остаточного угла трения $\varphi_r = 30^\circ$ и коэффициента шероховатости трещин JRC (0; 5; 10; 15; 20°). Также расчетные данные сопоставлены с экспериментальными данными запредельных испытаний при одноосном и трехосном сжатии монолитных и содержащих естественные и искусственные трещины образцов.

Установлено, что при низких нормальных напряжениях отклонение расчетных значений сдвиговой прочности по шероховатым трещинам, вычисленных по результатам испытаний сферическими инденторами, от аналогичных значений, вычисленных в соответствии с критерием прочности Бартона – Бандиса для значения коэффициента $JRC = 20^\circ$, варьирует в зависимости от величины нормального напряжения и хрупкости породы и для $K_f = 5-10$ составляет около 5 % (рис.5). Отклонение расчетных значений сдвиговой прочности по шероховатым трещинам в интервале средних нормальных напряжений, превышающих условные пределы прочности при одноосном сжатии, увеличивается от 3-6 % в интервале $\sigma \approx 0,2-0,6\sigma_c$ до 6-9 % при $\sigma = 0,7\sigma_c$ и достигает 10-18 % при $\sigma = \sigma_c$.

Сравнение расчетных показателей сдвиговой прочности, выполненное в относительных (в долях от σ_c) величинах нормального напряжения, показало, что при низких нормальных напряжениях для большинства осадочных пород (аргиллитов, мергелей, алевролитов, известняков, глинистых и карбонатных песчаников), которым соответствуют значения коэффициента хрупкости пород K_f от 6,5 до 8,5, интервалы возможных значений сдвиговой прочности (от минимальных, соответствующих плоским трещинам, до максимальных, соответствующих ступенчатым шероховатым трещинам) практически совпадают. Для более хрупких пород ($K_f \geq 10$) интервал возможных значений прочности при оценке прочности с применением предлагаемого комплексного подхода уже, а для более пластичных пород ($5 \leq K_f \leq 6$) шире.

Установлено, что в интервале нормальных напряжений 0,01-0,7 σ_c огибающие сдвиговой прочности по плоским ровным и ступенчатым шероховатым трещинам, построенные в соответствии с предлагаемым комплексным подходом, тесно согласуются с семейством предельных огибающих остаточной СП для значений коэффициента JRC от 0 до 20°, построенных в соответствии с критерием Бартона – Бандиса (рис.6). Принимая это во внимание при построении предельных огибающих для учета влияния шероховатости в интервалах низких и средних нормальных напряжений, рекомендуется придерживаться пропорциональной зависимости изменения СП от коэффициента шероховатости, аналогичной формуле (1).



Разработан экспресс-метод оценки остаточной сдвиговой прочности пород по шероховатым сомкнутым трещинам, при котором в качестве базового метода испытаний применяется усовершенствованный метод нагружения образца сферическими инденторами. Экспресс-метод реализует переход от данных механических испытаний ненарушенных образцов сферическими инденторами к показателям СП по трещинам в породном массиве на основе единого подхода к оценке показателей сдвиговой прочности горных пород по сомкнутым трещинам с учетом уровня нормальных напряжений и шероховатости трещин, измеряемых в природных условиях. При этом для описания шероховатости трещин допускается применение как шкалы шероховатости, разработанной Бартоном [16], так и оценка шероховатости в первом приближении, основанная на морфологическом типе трещин [34].

Экспресс-метод включает следующие этапы:

- Оценка шероховатости стенок трещин и нормальных напряжений в полевых условиях.
- Проведение испытаний на раскалывание ненарушенных малогабаритных образцов породы нагружением сферическими инденторами в лабораторных или полевых условиях; построение паспорта прочности и определение параметров СП ненарушенной породы по результатам испытаний образцов сферическими инденторами в соответствии с методикой (см. рис.1, б).

- Построение на диаграмме Мора огибающих остаточной прочности и определение параметров остаточной СП по ступенчатым шероховатым ($JRC = 20$) и плоским ровным трещинам ($JRC = 0$). При построении огибающей остаточной СП по ступенчатой шероховатой трещине в качестве исходных данных принимаются предельные напряженные состояния. Они описываются

дугами окружностей кругов Мора $\{\sigma_3 = 0; \sigma_1 = \sigma_t\}$, $\left\{ \sigma_3 = \frac{2\sigma_t}{(1+K)}; \sigma_1 = (\sigma_{0r} - \sigma_t) \right\}$, $\{\sigma_3 = \sigma_t;$

$\sigma_1 = (2\sigma_{0r} - \sigma_t)\}$ и условной точкой достижения ненарушенной породой максимального сопротивления срезам τ_{max} при высоких нормальных напряжениях с координатами $\{\sigma = \sigma_{av}; \tau = \tau_{max}\}$ (см. рис.2, огибающая 3). При этом промежутки между дугами аппроксимируются прямолинейными отрезками, образованными общими касательными к окружностям (см. рис.3).

- Построение на диаграмме Мора огибающей остаточной СП по трещине с учетом шероховатости и уровня нормальных напряжений в природных условиях и определение параметров остаточной СП по трещине. Для этого на диаграмме Мора проводятся отрезки, соединяющие точки на огибающих остаточной СП для ступенчатых шероховатых и плоских ровных трещин и соответствующие одинаковым характерным значениям σ_3 ,

равным 0, $\frac{2\sigma_t}{(1+K)}$, σ_t и условной точке с координатами

$\{\sigma = \sigma_{av}; \tau = \tau_{max}\}$ (см. рис.2, а, огибающая 3).

Отрезки разбиваются на интервалы точками, которые соотносятся с заданными значениями JRC относительно $JRC = 20$ (рис.7). Затем через семейство этих точек проводятся огибающие остаточной прочности при сдвиге, соответствующие заданной шероховатости стенок трещин. Расчетные параметры огибающей остаточной прочности (условное остаточное сцепление C_r и угол остаточного трения ϕ_r) вычисляются для заданных интервалов нормальных напряжений.

В качестве примера использования экспресс-метода на рис.7 показано построение огибающих относительной остаточной СП по трещинам различного морфологического типа в интервале низких и средних нормальных напряжений для $K_f = 8$

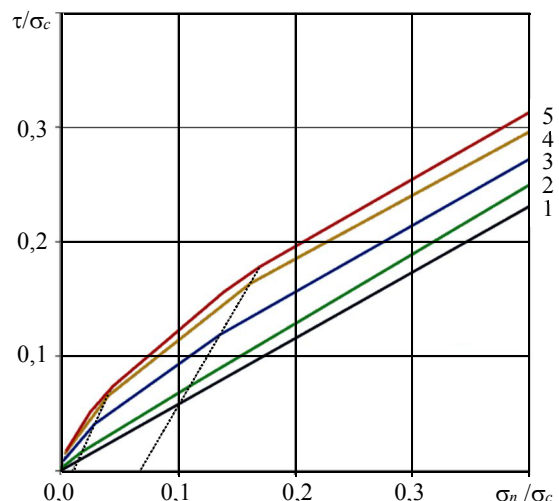


Рис.7. Построение огибающих относительной остаточной СП по трещинам различного морфологического типа в интервале низких и средних нормальных напряжений для $K_f = 8$

1 – ровный ($JRC = 0$); 2 – ровный тип; 3 – волнистый; 4 – ступенчатый; 5 – шероховатый ($JRC = 20$)



оценочные величины коэффициента шероховатости для вычислений по формуле (1): для гладких плоских трещин $JRC = 0-5$; гладких волнистых тектонических трещин $JRC = 8-12$; шероховатых волнистых трещин $JRC = 15-20$ [34]. В качестве исходных данных о шероховатости трещин приняты средние для типов значения. Заданное значение $K_f = 8$ характерно для осадочных пород типа алевролитов и известняков [8].

Результаты расчета средних значений параметров огибающих относительной остаточной сдвиговой прочности (относительного C_r/σ_c и φ_r) по сомкнутым (закрытым) трещинам различных морфологических типов для заданных интервалов нормальных напряжений, соответствующих низкому, среднему и высокому уровням нормальных напряжений, представлены в табл. 2.

Предлагаемый экспресс-метод определения остаточной сдвиговой прочности по сомкнутым трещинам может быть реализован также по данным определения двух других прочностных характеристик ненарушенной породы – пределов прочности при одноосном сжатии σ_c и растяжении σ_t . В этом случае необходимые для расчетов значения растягивающей σ_t и сжимающей p составляющих сцепления C_0 предварительно вычисляются алгебраически по приведенным формулам (4)-(6).

Таблица 2

Расчетные значения параметров C_r/σ_c и φ_r огибающих остаточной СП породы по сомкнутым трещинам различных морфологических типов ($K_f = 8$)

Морфологический тип трещин	Интервал 1			Интервал 2			Интервал 3		
	σ/σ_c , МПа	C_r/σ_c	φ_r , град	σ/σ_c , МПа	C_r/σ_c	φ_r , град	σ/σ_c , МПа	C_r/σ_c	φ_r , град
Ровные	0,0006-0,017	0,002	39	0,017-0,110	0,004	32	0,110-2,773	0,007	31
Волнистые	0,0025-0,029	0,006	50	0,029-0,136	0,019	36	0,136-2,838	0,040	30
Ступенчатые	0,0044-0,041	0,007	54	0,041-0,162	0,040	39	0,162-2,904	0,074	30

Закключение. Представлены новые экспериментальные данные о связи остаточной сдвиговой прочности горных пород по сомкнутым трещинам с функциональными характеристиками ненарушенных пород – растягивающей σ_t и сжимающей p составляющими предельного сопротивления срезу без нормальных напряжений (сцепления) C_0 , шероховатостью поверхностей трещин и уровнем нормальных напряжений.

Установлено, что на диаграмме Мора предельная огибающая остаточной СП по шероховатым трещинам имеет криволинейный вид при «низких» нормальных напряжениях, прямолинейный при среднем уровне нормальных напряжений и выполаживается при высоком уровне. При этом в диапазоне низких нормальных напряжений определяющими параметрами паспортов остаточной сдвиговой прочности породы и трещин со ступенчатой шероховатой поверхностью являются абсолютная величина растягивающей составляющей σ_t сцепления C_0 и условные пределы прочности при одноосном сжатии σ_{0R} и σ_{0r} , которые подобны параметрам паспорта прочности ненарушенной породы – сцеплению C_0 и пределу прочности при одноосном сжатии σ_c . В диапазоне средних нормальных напряжений огибающие остаточной прочности аппроксимируются прямолинейными отрезками общих касательных к окружностям Мора, соответствующих предельным состояниям разрушенной породы при чистом сдвиге и квазипластическом деформировании.

Разработан единый комплексный подход к определению сдвиговой прочности ненарушенных и разрушенных пород и остаточной сдвиговой прочности по сомкнутым шероховатым трещинам, основанный на оценке предельных напряжений, при которых вид разрушения имеет вероятностный характер. Подход предусматривает выделение интервалов напряжений, соответствующих различным видам разрушения, для каждого из которых предлагается критерий прочности, выражаемый через функциональные характеристики ненарушенной породы σ_t и p .

Результаты сопоставительных механических испытаний горных пород и сравнительных расчетов прочности по трещинам, согласно комплексному подходу и в соответствии с критерием прочности Бартона – Бандиса, свидетельствуют об обоснованности предлагаемого подхода. Установлено, что в интервале нормальных напряжений $0,01-0,7\sigma_c$ огибающие сдвиговой прочности по ровным плоским и ступенчатым шероховатым трещинам, построенные в соответствии с разработанным комплексным



подходом, тесно согласуются с семейством предельных огибающих остаточной СП для значений коэффициента JRC от 0 до 20°, построенных в соответствии с критерием Бартона – Бандиса.

Разработан экспресс-метод оценки остаточной сдвиговой прочности пород по трещинам с шероховатой поверхностью, при котором в качестве базового метода испытаний применяется усовершенствованный метод нагружения образцов сферическими инденторами. Экспресс-метод реализует переход от данных механических испытаний образцов сферическими инденторами к показателям СП по трещинам в массиве горных пород с учетом уровня нормальных напряжений и шероховатости поверхностей трещин, измеряемых в натурных условиях. При этом применяется шкала шероховатости, разработанная Бартоном. Экспресс-метод информативен и доступен в полевых условиях при помощи технически простых нагрузочных устройств. Допускается испытание малогабаритных образцов неправильной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трушко В.Л., Протосеня А.Г. Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада // Записки Горного института. 2019. Т. 236. 2019. С. 162-166. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.162
2. Trushko V.L., Sergeev I.B., Shabarov A.N. The Development of Geomechanical Engineering in Mining // ISRM European Rock Mechanics Symposium – EUROCK 2018, 22-26 May 2018, Saint-Petersburg, Russia. 2018. OnePetro, 2018. Vol. 1. P. 95-104. № ISRM-EUROCK-2018-009.
3. Зуев Б.Ю. Методология моделирования нелинейных геомеханических процессов в блочных и слоистых горных массивах на моделях из эквивалентных материалов // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 542-552. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.7
4. Shabarov A.N., Zuev B.Y., Krotov N.V. Prospects of the physical model-based study of geomechanical processes // ISRM European Rock Mechanics Symposium – EUROCK 2018, 22-26 May 2018, Saint Petersburg, Russia. 2018. OnePetro, 2018. Vol. 1. P. 423-430. № ISRM-EUROCK-2018-052.
5. Протождяконов М.М., Вобликов В.С., Ильницкая Е.И. Методика определения прочности горных пород на образцах неправильной формы. М.: Изд-во Института горного дела им. А.А.Скочинского, 1961. 8 с.
6. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. М.: Недра, 1979. 269 с.
7. Franklin J.A. Suggested Methods for Determining Points Load Strength // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1985. Vol. 22. Iss. 2. P. 51-60. DOI: 10.1016/0148-9062(85)92327-7
8. Коршунов В.А., Карташов Ю.М. Новый способ определения предела прочности при растяжении горных пород // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 202-206.
9. Korshunov V.A., Solomoichenko D.A., Bazhukov A.A. Strength Estimation of Fractured Rock Using Compression – A Specimen with Spherical Indenters // ISRM European Rock Mechanics Symposium – EUROCK 2018, 22-26 May 2018, Saint Petersburg, Russia. 2018. OnePetro, 2018. Vol. 1. P. 299-305. № ISRM-EUROCK-2018-034.
10. Фисенко Г.Л. Прочностные характеристики массива горных пород. Механика горных пород и маркшейдерское дело. М.: Углетехиздат, 1959. С. 91-100.
11. Ismail M.K.A., Mohd-Nordin M.M., Hasan A.S.Md. et al. Shear strength behaviour of rock joint material influenced by different weathering grade // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1349. Iss. 1. № 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/1349/1/012069
12. Li Y., Oh J., Mitra R., Canbulat I. A Fractal Model for the Shear Behaviour of Large-Scale Opened Rock Joints // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2017. Vol. 50. Iss. 1. P. 67-79. DOI: 10.1007/s00603-016-1088-8
13. Фисенко Г.Л. Методы количественной оценки структурных ослаблений массива горных пород в связи с анализом их устойчивости // Современные проблемы механики горных пород. Л.: Наука, 1972. С. 21-29.
14. Stigsson M., Mas Ivars D. A Novel Conceptual Approach to Objectively Determine JRC Using Fractal Dimension and Asperity Distribution of Mapped Fracture Traces // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019. Vol. 52. P. 1041-1054. DOI: 10.1007/s00603-018-1651-6
15. Rios-Bayona F., Johansson F., Mas-Ivars D. Prediction of Peak Shear Strength of Natural, Unfilled Rock Joints Accounting for Matedness Based on Measured Aperture // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021. Vol. 54. Iss. 3. P. 1533-1550. DOI: 10.1007/s00603-020-02340-8
16. Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 5. Iss. 4. P. 249-261. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.05.008
17. Patton F.D. Multiple Modes of Shear Failure in Rock // 1st ISRM Congress, 25 September – 1 October 1966, Lisbon, Portugal. OnePetro, 1966. Vol. 1. P. 509-513. № ISRM-1CONGRESS-1966-087.
18. Гудман Р. Механика скальных пород. М.: Стройиздат, 1987. 232 с.
19. Латышев О.Г., Франц В.В., Прищепа Д.В. Моделирование и прогноз прочности при сдвиге горных пород по трещине // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 2. С. 50-56.
20. Протосеня А.Г., Вербило П.Э. Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 51-57. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.51
21. Протосеня А.Г., Иовлев Г.А. Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в призабойной зоне тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5. С. 128-139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139



22. Protosenya A., Vilner M. Assessment of Excavation Intersections' Stability in Jointed Rock Masses Using the Discontinuum Approach // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2022. Vol. 37. Iss. 2. P. 137-147. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.12
23. Мюллер Л. Инженерная геология. Механика скальных массивов. М.: Мир, 1971. 240 с.
24. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. Задачи и методы их изучения в связи с вопросами управления горным давлением. М.: Углетехиздат, 1947. 180 с.
25. Тарасов Б.Г. Закономерности деформирования и разрушения горных пород при высоких давлениях: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб: ЛПИ, 1991. 46 с.
26. Ladanyi B., Archambault G. Simulation of the Shear Behavior of a Jointed Rock Mass // The 11th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 16-19 June 1970, Berkeley, California. OnePetro, 1970. P. 105-125. № ARMA-69-0105.
27. Bieniawski Z.T. Estimating the strength of rock materials // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1974. Vol. 74. № 8. P. 312-320.
28. Eberhardt E. The Hoek-Brown Failure Criterion // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2012. Vol. 45. P. 981-988. DOI: 10.1007/s00603-012-0276-4
29. Протодаьяконов М.М. Обобщенное уравнение огибающих к предельным кругам напряжений Мора // Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. С. 82-89.
30. Labus J.F., Zang A. Mohr-Coulomb Failure Criterion // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2012. Vol. 45. P. 975-979. DOI: 10.1007/s00603-012-0281-7
31. Singh H.K., Basu A. Evaluation of existing criteria in estimating shear strength of natural rock discontinuities // Engineering Geology. 2018. Vol. 232. P. 171-181. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.11.023
32. Thirukumaran S., Indraratna B. A review of shear strength models for rock joints subjected to constant normal stiffness // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 8. Iss. 3. P. 405-414. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.10.006
33. Quansheng Liu, Yongchao Tian, Dongfeng Liu, Yalong Jiang. Updates to JRC-JCS model for estimating the peak shear strength of rock joints based on quantified surface description // Engineering Geology. 2017. Vol. 228. P. 282-300. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.08.020
34. Могилевская С.Е. Экспресс-метод ВНИИГ определения параметров сопротивления сдвигу по трещинам в скальных породах. Опыт и перспективы использования // Геотехника. Оценка состояния оснований и сооружений: Труды международной конференции, 13-16 июня 2001, Санкт-Петербург, Россия. 2001. Т. 1. С. 41-49.
35. Liren Ban, Weisheng Du, Tianwei Jin et al. A roughness parameter considering joint material properties and peak shear strength model for rock joints // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. Vol. 31. Iss. 3. P. 413-420. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.03.007
36. Barton N.R. Shear Strength of Rock, Rock Joints and Rock Masses // The 11th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 16-19 June 1969, Berkeley, California. OnePetro, 1969. P. 3-16. № ARMA-69-0105.
37. Read J., Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design. Clayton: CSIRO Publishing, 2009. 496 p. DOI: 10.1071/9780643101104
38. Jie Yang, Guan Rong, Di Hou et al. Experimental study on peak shear strength criterion for rock joints // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. P. 821-835. DOI: 10.1007/s00603-015-0791-1
39. Zhi Cheng Tang, Louis Ngai Yuen Wong. New Criterion for Evaluating the Peak Shear Strength of Rock Joints Under Different Contact States // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. Iss. 4. P. 1191-1199. DOI: 10.1007/s00603-015-0811-1
40. Rihong Cao, Hang Lin, Ping Cao. Strength and failure characteristics of brittle jointed rock-like specimens under uniaxial compression: Digital speckle technology and a particle mechanics approach // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 4. P. 669-677. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.02.002
41. Коршунов В.А., Карташов Ю.М., Козлов В.А. Определение показателей паспорта прочности горных пород методом разрушения образцов сферическими инденторами // Записки Горного института. 2010. Т. 185. С. 41-45.
42. Korshunov V.A., Tsirel S.V., Melnikov N.Ya., Bazhukov A.A. Geomechanical Substantiation of Calculate Indentors of the Rock Mass Strength for Slopes Stability Analysis of Open Pit // ISRM European Rock Mechanics Symposium – EUROCK 2018, 22-26 May 2018, Saint Petersburg, Russia. OnePetro, 2018. Vol. 2. P. 1053-1058. № ISRM-EUROCK-2018-149
43. Павлович А.А., Коршунов В.А., Бажуков А.А., Мельников Н.Я. Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 502-509. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.502

Авторы: В.А.Коршунов, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0002-6330-0230> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.А.Павлович, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, pavlovich_aa@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3467-3639> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.А.Бажуков, инженер, <https://orcid.org/0000-0001-7202-3832> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, Н.А.БЕЛЯКОВ ✉, М.А.БУСЛОВА

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Протосеня А.Г., Беляков Н.А., Буслова М.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 619-627. EDN EGDXXKM

Аннотация. Статья посвящена анализу подходов к моделированию напряженно-деформированного состояния блочного горного массива в окрестности одиночной горной выработки и в зоне влияния породной консоли при разработке апатит-нефелиновых месторождений Хибин. Произведен анализ существующих в международной инженерной практике представлений о тектонических нарушениях как о геомеханическом элементе и опыта прогнозирования напряженно-деформированного состояния блочного горного массива. На основании анализа выполнена постановка базовых задач моделирования и приведены его основные результаты. Выработаны методологические рекомендации по решению аналогичных задач.

Ключевые слова: геомеханика; горный массив; тектоническое нарушение; напряженно-деформированное состояние; численная модель; породная консоль

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

Поступила: 24.08.2022

Принята: 13.02.2023

Онлайн: 23.06.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Мировой опыт разработки месторождений полезных ископаемых и строительства подземных горных выработок показывает, что определяющими устойчивости массива факторами являются параметры структурной нарушенности горного массива, его прочностные и деформационные свойства и параметры действующего в нем поля напряжений. Соотношения между количественными показателями указанных факторов определяют механизм деформирования системы отдельных блоков и характер потери ее устойчивости в целом. Самые распространенные на сегодняшний день методики прогноза устойчивости подземных горных выработок в явном виде не учитывают эти процессы и поэтому в отдельных случаях могут оказаться недостоверными. Существующий опыт предлагает применение рейтинговых подходов, которые в наибольшей мере учитывают описанные механизмы, но все классификации массива по трещиноватости и основанные на них методы оценки устойчивости (Дир, Бенявский, Лобшир, Хоек, Браун, Мэтьюз, Потвин, Бартон, Мавдесли) – это продукты статистической обработки данных об устойчивости породных обнажений горных выработок в различных горно-геологических условиях. В частных условиях разработки рудных месторождений могут возникать ситуации, когда эти методы не позволяют достоверно оценить и спрогнозировать устойчивость выработок и камер. На практике это приводит либо к завышению условий устойчивости, вследствие чего появляется необходимость постоянных перекреплений горных выработок и ликвидации различного рода аварий, либо к занижению условий устойчивости и, следовательно, к перерасходу материалов на крепление. В связи с этим актуальнейшим вопросом, стоящим перед фундаментальной геомеханикой, является формулирование методологии прогноза процессов, протекающих в трещиноватых горных массивах на разных масштабных уровнях.



Анализ состояния вопроса учета структурной нарушенности горного массива при выполнении обоснования параметров систем разработки рудных месторождений и существующих подходов к его решению позволяет выделить две основных группы методов – прямые и косвенные [1]. Прямые методы основаны на непосредственном использовании результатов лабораторных исследований фрагментов горного массива и натурных экспериментов, выполняемых в условиях шахт и рудников [2-4]. Косвенные методы базируются на применении моделей реального трещиноватого горного массива, построенных на некоторых изначальных предположениях о механическом поведении такого массива. Эти методы можно разделить на аналитические [5], эмпирические [6-8] и численные [9, 10]. Выбор методов учета структурной нарушенности горного массива в условиях конкретной геомеханической задачи обуславливается их достоинствами и недостатками [11, 12].

При определении деформационных и прочностных свойств горных пород в лабораторных условиях испытаниям подвергаются образцы, преимущественно полученные из керна [13, 14]. При таких испытаниях интегрально учитывается только структурная нарушенность с характерными размерами менее образца, что недостаточно для полноценного описания реального горного массива, так как он включает в себя иерархическую систему трещин и нарушений, в том числе с характерными размерами больше размеров породного образца [15, 16]. В качестве обоснованного дополнения к лабораторным исследованиям на образцах может выступать физическое моделирование структурно нарушенного горного массива с применением эквивалентных материалов, базирующееся на теории подобия [17]. Такой подход при корректной постановке задачи позволяет воспроизвести механизм деформирования и разрушения структурно нарушенного горного массива.

В практике проектирования геотехнических систем в качестве основного инженерного решения оценки структурной нарушенности горного массива выступают эмпирические методы [18, 19]. Они являются отражением накопленного опыта строительства подземных объектов в разных горнотехнических условиях в горных массивах с различной структурной нарушенностью [20-22]. Их широкая распространенность обуславливается возможностью количественного определения эквивалентных деформационных и прочностных свойств структурно нарушенного горного массива путем корректировки результатов лабораторных испытаний образцов горных пород на основании качественных оценок структурной нарушенности. Такая взаимосвязь свойств реализуется посредством эмпирически установленных закономерностей и, как правило, опирается на рейтинговые классификации массива горных пород [23-25]. Следует отметить, что за удобством применения эмпирических методов кроется очевидная привязанность используемых зависимостей деформационных и прочностных свойств в образце и в массиве к локализации места их установления [26, 27]. Вопрос корректности экстраполяции таких зависимостей на иные горные массивы может быть разрешен только после начала подземного строительства [28]. Использование представления структурно нарушенного горного массива в виде некоторой сплошной среды с эквивалентными прочностными и деформационными свойствами является существенным упрощением реального механизма его деформирования и разрушения.

В современных условиях для решения задач настоящей статьи применяются численные методы моделирования горного массива с трещиноватостью [29], основанные на положениях механики дискретных сред. Численное моделирование позволяет создавать цифровые двойники реальных структурно нарушенных горных массивов и при относительно малых затратах времени и труда осуществлять многовариантные эксперименты для оценки влияния структурной нарушенности на устойчивость геомеханических объектов. Очевидной проблемой такого подхода является то, что достоверность получаемых геомеханических оценок будет привязана к тому, насколько точно были определены исходные данные и граничные условия.

Развитие численных методов для решения задач прогноза напряженно-деформированного состояния трещиноватого горного массива требует разделить эту комплексную задачу на ряд более простых различных масштабных уровней. В этом случае решение задачи сводится к последовательному движению в массиве горных пород от мелкомасштабных задач (регионального уровня) в размерах целых месторождений полезных ископаемых или более мелких к более крупномасштабным в рамках повышения детализации отдельных расчетных областей внутри региональной



модели. Очевидно, что в рамки такой последовательности хорошо вписывается известный метод субмоделирования [30, 31]. Настоящая публикация посвящена моделированию напряженно-деформированного состояния блочного горного массива в окрестности одиночных горных выработок и в зоне влияния породной консоли при разработке крутопадающих месторождений полезных ископаемых системами разработки с обрушением.

Постановка задач моделирования. Для анализа влияния способа задания тектонических нарушений на напряженно-деформированное состояние горного массива и на горные выработки было проведено многовариантное численное моделирование методом конечных элементов. Задача реализована в плоскодеформационной постановке.

Реализованы расчетные схемы двух видов:

- количество систем трещин $n = 1$, угол падения $\alpha = 60^\circ$, расстояние между нарушениями $L = 200; 350; 500$ м;
- количество систем трещин $n = 2$, углы падения $\alpha_1 = 60^\circ$ и $\alpha_2 = 30^\circ$, расстояние между нарушениями $L = 350$ м.

Основной особенностью моделирования была реализация тектонических нарушений тремя разными способами: 1) неоднородность в рамках модели механики сплошной среды; 2) жесткий контакт трения; 3) когезионный контакт.

В первом способе тектоническое нарушение задавалось слоями: нарушенные породы – разрушенные породы – нарушенные породы с толщиной каждого слоя 5 м. Второй способ основан на задании попарных поверхностей контакта, соответствующих поверхностям нарушения; использован жесткий контакт с коэффициентом трения 0,4. Третий способ подразумевал создание на этапе разбиения сетки конечных элементов в зоне разлома прослойки когезионных элементов. Когезионная зона представляет собой слой конечной толщины, соответствующий мощности разрушенных пород 5 м. Такая зона служит для моделирования сцепления между поверхностями нарушения, при этом реализует возможность смещения двух поверхностей разлома без накопления значительных растягивающих напряжений.

Уровень напряжений в целиках между подготовительными выработками подконсольного пространства зависит от следующих горно-геологических условий: физико-механические свойства горного массива, геометрические параметры рудного тела, особенности распределения естественных напряжений, параметры очистных работ (глубина разработки, удаленность фронта работ, величины защитных углов). Защитные углы определяют величину опережения ведения работ на вышележащих горизонтах по отношению к нижележащим и зависят от прочностных свойств пород и параметров начального поля напряжений. В этой части исследования была предпринята попытка установить характер влияния на уровень напряженности массива в подконсольном пространстве глубины ведения работ.

Для решения задачи прогноза напряженно-деформированного состояния горного массива в зоне влияния породной консоли в программном комплексе Simulia Abaqus была разработана пространственная численная модель (рис.1). Для реализации многовариантного моделирования геометрия модели разрабатывалась идеализированной на основании месторождений Кукисвумчорр и Юкспор [32, 33]. Таким образом, истинная мощность рудного тела принята равной 200 м, угол падения – 45° . Отметка поверхности модели соответствует абсолютной отметке поверхности месторождения Кукисвумчорр +500 м. Для исключения влияния торцевого эффекта по оси Oy модель имеет буферные участки горного массива.

Расчетные шаги реализуются как последовательная ступенчатая выемка рудного тела. При этом извлекаемый фрагмент модели представляет собой четырехугольную призму. Форма призмы определяется в первую очередь отметкой горизонта, а во вторую –

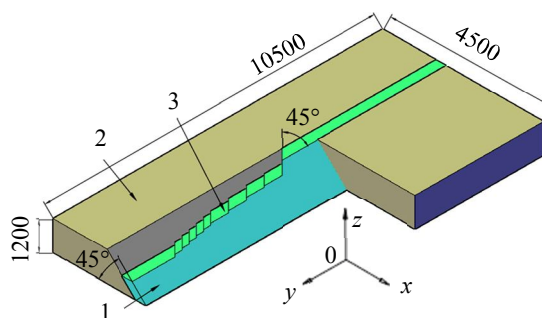


Рис. 1. Геометрия пространственной численной модели для моделирования НДС в зоне влияния породной консоли

1 – рудное тело; 2 – вмещающий массив; 3 – моделируемые шаги отработки



защитными углами отработки в горизонтальной плоскости. Отметки горизонтов модели приняты соответствующими реальным горизонтам месторождения Кукисвумчорр (+314, +296, +263, +236, +209, +183, +158, +133, +108, +75 м), а защитный угол соответствует среднему рекомендуемому значению для месторождений Кукисвумчорр и Юкспор и составляет 45°.

Размер шагов отработки принят переменным и увеличивается по направлению отработки. Длина шага отработки составляет 25; 50; 200; 500; 1000 м. Размер обрабатываемой части составляет 5475 м, а количество таких участков – 21.

Граничные условия модели реализованы следующим образом. На всех гранях модели за исключением верхней наложены запреты на перемещения по направлению нормалей. Поле напряжений модели генерировалось на основании данных о распределении компонент поля естественных напряжений на месторождении Кукисвумчорр и реализовано с кусочно-линейной зависимостью горизонтальных компонент напряжений от вертикальных для учета переменного коэффициента бокового распора.

Физико-механические свойства горного массива приняты соответствующими усредненным физико-механическим свойствам горных пород, характерных для горно-геологических условий апатит-нефелиновых месторождений Хибин, и представлены в табл.1. Для определения физико-механических свойств горного массива на участках тектонических нарушений авторами были использованы рекомендации монографии [34]. Параметры поля начальных напряжений приняты согласно табл.2.

Таблица 1

Физико-механические свойства массива

Материал	Удельный вес, МН/м ³	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, МПа
Вмещающие породы и руда	0,028	0,25	16200
Разрушенный массив	0,018	0,23	6350
Нарушенный массив	0,018	0,023	635

Таблица 2

Параметры поля начальных напряжений

Абсолютная отметка, м	Отметка модели, м	Вертикальные напряжения σ_y , МПа	Горизонтальные напряжения σ_x , МПа	$\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$	Горизонтальные напряжения σ_z , МПа	$\frac{\sigma_x}{\sigma_z}$
+500	+1000	5,6	12,3	2,2	15,9	2,8
0	+500	19,6	43,1		48,6	
-500	0	33,6	73,9		83,3	

Результаты моделирования. Некоторые представительные результаты многовариантного численного моделирования формирования естественного напряженно-деформированного состояния горного массива блочной структуры и его перераспределения в окрестности одиночной горной выработки в постановке плоской деформации приведены на рис.2.

Результаты моделирования формирования напряженного состояния подконсольной области горного массива представлены в виде выявленных закономерностей распределения напряжений на отметке горных выработок в подконсольном пространстве (рис.3). Фактором, в наибольшей степени влияющим на напряженное состояние массива, является глубина ведения работ. Данные представлены для случая полного раскрытия текущего и вышележащего горизонтов.

Анализ и обсуждение результатов. Анализ полученных результатов численного моделирования формирования естественного напряженно-деформированного состояния горного массива блочной структуры и его перераспределения в окрестности одиночной горной выработки позволяет сделать следующие выводы. Модели неоднородности механики сплошной среды и когезионного контакта показывают идентичные результаты как при единственном тектоническом нарушении, так и при их системе. Модель твердого контакта трения в каждом случае дает несколько завышенные напряжения.

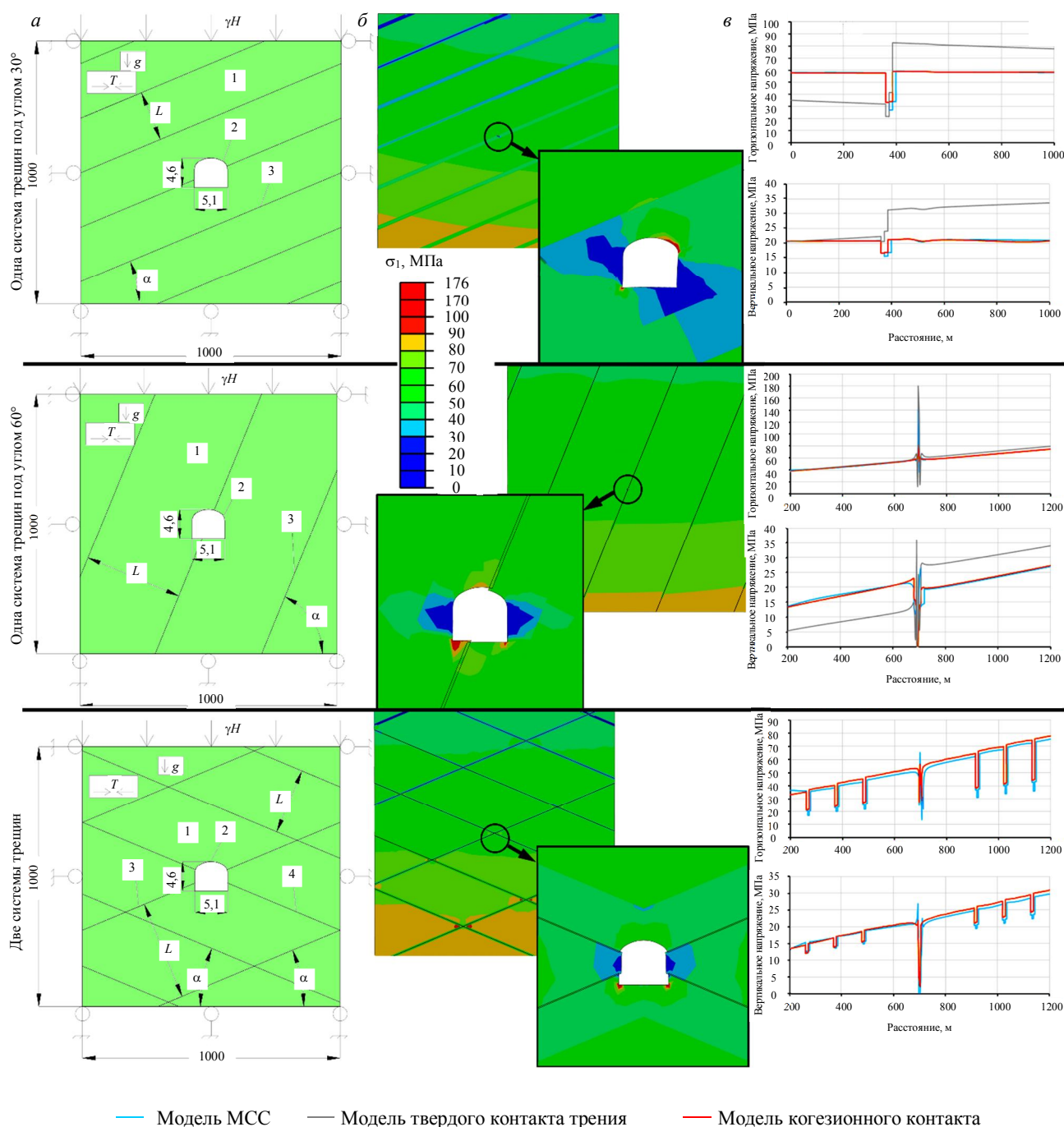


Рис.2. Расчетные схемы и основные результаты расчетов в постановке плоской деформации: а – расчетная схема; б – эпюра распределения главных напряжений; в – графики горизонтальных и вертикальных напряжений; L – расстояние между нарушениями в системе; α – угол падения нарушения

1 – массив горной породы; 2 – контур горной выработки; 3 – система тектонических нарушений № 1; 4 – система тектонических нарушений № 2

Моделирование тектонического нарушения в виде неоднородной среды в рамках модели механики сплошной среды не дает возможности сдвижения блоков горного массива друг относительно друга в явном виде. В результате в области контакта блоков появляются растягивающие напряжения, несколько искажающие характер распределения поля напряжений вблизи тектонического нарушения в целом. НДС массива с количеством систем трещин $n = 2$ обуславливает более высокий уровень напряжений, чем в случае $n = 1$, независимо от того, сколько систем одновременно пересекаются в рассматриваемом поперечном сечении выработки. Вместе с тем,

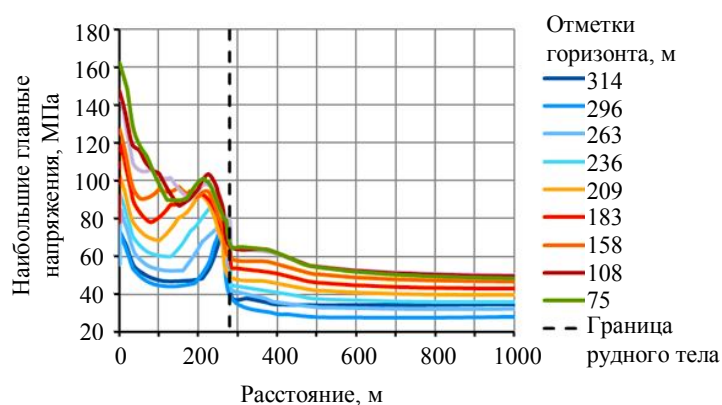


Рис.3. Кривые распределения наибольших главных напряжений в подконсольном пространстве при различной глубине ведения работ

моделирование тектонического нарушения в виде неоднородной среды в рамках механики сплошной среды является наиболее эффективным с точки зрения расчетного времени и наиболее предсказуемым и стабильным для механического поведения.

Моделирование жесткого контакта трения оказывает влияние на напряженное состояние в окрестности тектонического нарушения, но размеры зоны такого влияния меньше, а растягивающих напряжений ввиду возможности сдвижения блоков не возникает. Однако такое сдвижение при достижении напряжениями

прочности на сдвиг будет мгновенным, без возможности проникновения пород, слагающих контактные поверхности, друг в друга. В характерных точках выработки значения тангенциальных напряжений ниже, но в массиве в целом будут наблюдаться более высокие напряжения, чем при задании нарушений другими способами.

Наиболее подходящим для моделирования тектонических нарушений сдвижения представляется задание тектонического нарушения с помощью когезионных элементов, создающих слой конечной толщины с заданными физико-механическими свойствами. Уровень тангенциальных напряжений в пиковых точках превышает уровень начальных напряжений в два-три раза, что соответствует натурным данным. Такой способ моделирования тектонического нарушения показывает соответствие между уровнями напряжения при пересечении выработки одним нарушением вне зависимости от общего количества систем таких нарушений в массиве. Кроме того, когезионный контакт хорошо показывает себя при оценке совместного влияния нескольких разнонаправленных нарушений, пересекающихся с выработкой в одном месте.

Анализ полученных результатов численного моделирования формирования напряженного состояния подконсольной области горного массива позволяет сделать следующие выводы.

Распределение кривых по уровню напряжений соответствует распределению самих горизонтов по глубине. Зона опорного давления составляет порядка 100-120 м, далее уровень напряжений становится фоновым. Характер поведения кривых как в подконсольном пространстве (0-280 м), так и во вмещающем массиве одинаков. Поэтому для дальнейших исследований будет целесообразно аппроксимировать данные на участке, соответствующем расположению подготовительных выработок и целиков между ними.

Внешний вид кривых на обозначенном участке имеет полиномиальный вид. Была предпринята попытка описать их полиномиальными функциями второй степени вида $y = Ax^2 + Bx + C$, где y – наибольшие главные напряжения, МПа; x – расстояние, м; A, B, C – коэффициенты квадратного уравнения (табл.3).

Таблица 3

Значения коэффициентов аппроксимации

Горизонт, м	A	B	C	Горизонт, м	A	B	C
314	0,0016	-0,4328	+72,534	183	0,0022	-0,5018	+110,06
296	0,0018	-0,4560	+70,32	158	0,0012	-0,3531	+116,59
263	0,0015	-0,4054	+79,493	133	0,0008	-0,3143	+124,83
236	0,0018	-0,4351	+86,862	108	0,0017	-0,5733	+139,66
209	0,0026	-0,5392	+97,771	75	0,0030	-0,9365	+162,27



На основании данных табл.3 можно определить зависимость наибольших главных напряжений от абсолютной отметки и положения точки измерения относительно подготовительного горизонта:

$$\sigma_1 = (8 \cdot 10^{-6} H + 0,0036) x^2 + (0,0007 H - 0,6287) x - (0,3712 H - 179,36),$$

где H – абсолютная отметка горизонта, м; x – расстояние от проекции нижней границы рудного тела (лежащий бок), м.

В целом по месторождению Кукисвумчорр следует отметить гораздо большую неравномерность распределения напряжений в рудном теле по сравнению с месторождением Юкспор. Это можно объяснить большей неправильностью геометрии самого рудного тела, наличием участка выхода рудного тела на земную поверхность, значительными перепадами рельефа в зоне расположения рудного тела месторождения Кукисвумчорр, а также наличием в нем большего количества тектонических нарушений.

Наличие выхода на поверхность рудного тела вносит значительный вклад в формирование его напряженного состояния. В блоках рудного тела, которые имеют выход на поверхность, средний уровень напряжений выше по сравнению с блоками, не имеющими такого выхода. Это связано с тем, что топография земной поверхности, заложенная в конечно-элементную модель, имеет впадины, ориентированные наибольшим линейным размером перпендикулярно направлению действия наибольших гравитационно-тектонических естественных горизонтальных напряжений, и выступает их геометрическим концентратором.

Заключение. Авторами была предпринята попытка сформулировать основные положения методики численного моделирования напряженно-деформированного состояния блочных горных массивов при разработке наклонных и крутопадающих месторождений полезных ископаемых системами разработки с обрушением в окрестности одиночных горных выработок и в зоне влияния породной консоли. Основные положения методики являются результатом критического анализа информации, содержащейся в научных и нормативных источниках, а также многовариантного моделирования.

Моделирование в мелком масштабе не является конечной целью, анализ его результатов позволяет выявлять в блочном горном массиве месторождений наиболее высоконапряженные и опасные участки, в результате чего становится возможным корректно прогнозировать критическую глубину их удароопасности, а также заблаговременно планировать мероприятия по разгрузке горного массива, тем самым повысив безопасность горных работ.

Перспективным для дальнейших исследований в направлении моделирования напряженного состояния горного массива представляется изучение вопросов, связанных с использованием выходных данных численного моделирования в региональном масштабе в качестве исходных данных для выполнения численного моделирования блочного горного массива на более крупном масштабе, учитывающем наличие в нем трещин и нарушений более мелких размеров (т.е. с учетом иерархической структуры нарушений и трещин) с применением методики субмоделирования. Для изучения геомеханических процессов в горном массиве в зоне влияния породной консоли перспективным представляется установление влияния удаления фронта работ от исследуемой области, а также частичного и полного раскрытия вышележащего горизонта на напряженное состояние массива в подконсольном пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2013. Vol. 60. P. 345-352. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2013.01.011](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.01.011)
2. Qibin Lin, Ping Cao, Jingjing Meng et al. Strength and failure characteristics of jointed rock mass with double circular holes under uniaxial compression: Insights from discrete element method modeling // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2020. Vol. 109. № 102692. DOI: [10.1016/j.tafmec.2020.102692](https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102692)
3. Peitao Wang, Meifeng Cai, Fenhua Ren. Anisotropy and directionality of tensile behaviors of a jointed rock mass subjected to numerical Brazilian tests // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 73. P. 139-153. DOI: [10.1016/j.tust.2017.12.018](https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.12.018)



4. Сохраби А., Надими А., Таловина И.В., Сафари Х. Модель структуры и тектоническая эволюция системы разломов в южной части региона Хур, Центральный Иран // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 142-152. DOI: [10.31897/PMI.2019.2.142](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.2.142)
5. Peitao Wang, Fenhua Ren, Shengjun Miao et al. Evaluation of the anisotropy and directionality of a jointed rock mass under numerical direct shear tests // Engineering Geology. 2017. Vol. 225. P. 29-41. DOI: [10.1016/j.enggeo.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.004)
6. Hoek E., Carter T.G., Diederichs M.S. Quantification of the Geological Strength Index Chart // 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 23-26 June 2013, San Francisco, USA. OnePetro, 2013. 9 p. № ARMA-2013-672.
7. Özkan I., Erdem B., Ceylanoglu A. Characterization of jointed rock masses for geotechnical classifications utilized in mine shaft stability analyses // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 73. P. 28-41. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2014.10.001](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.10.001)
8. Meda A., Rinaldi Z., Spagnuolo S. et al. Hybrid precast tunnel segments in fiber reinforced concrete with glass fiber reinforced bars // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 86. P. 100-112. DOI: [10.1016/j.tust.2019.01.016](https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.01.016)
9. Peitao Wang, Fenhua Ren, Shengjun Miao et al. Evaluation of the anisotropy and directionality of a jointed rock mass under numerical direct shear tests // Engineering Geology. 2017. Vol. 225. P. 29-41. DOI: [10.1016/j.enggeo.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.004)
10. Yang Jian Ping, Chen Wei Zhong, Yang Dian Sen, Yuan Jing Qiang. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling // Computers and Geotechnics. 2015. Vol. 64. P. 20-31. DOI: [10.1016/j.compgeo.2014.10.011](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.10.011)
11. Esfahani M.H., Hejazi F., Vaghei R. et al. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete // Structural Engineering International. 2017. Vol. 27. Iss. 1. P. 68-78. DOI: [10.2749/101686616X1081](https://doi.org/10.2749/101686616X1081)
12. Ivars D.M., Pierce M.E., Darcel C. et al. The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2011. Vol. 48. Iss. 2. P. 219-244. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2010.11.014](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.11.014)
13. Козловский Е.Я., Журавков М.А. Определение и верификация параметров расчетной модели соляных пород с учетом разупрочнения и ползучести // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 33-38. DOI: [10.31897/PMI.2021.1.4](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.4)
14. Myung Sagong, Duhee Park, Jaeho Yoo, Jun S. Lee. Experimental and numerical analyses of an opening in a jointed rock mass under biaxial compression // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2011. Vol. 48. Iss. 7. P. 1055-67. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2011.09.001](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.09.001)
15. Kuranov A.D., Zuev B.Y., Istomin R.S. The forecast deformations of the ground surface during mining under protected objects // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects. CRC Press, 2018. P. 39-50.
16. Coli N., Berry P., Boldini D. In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterization of a bimrock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2011. № 48. Iss. 1. P. 95-102. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2010.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.09.012)
17. Зуев Б.Ю. Методология моделирования нелинейных геомеханических процессов в блочных и слоистых горных массивах на моделях из эквивалентных материалов // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 542-552. DOI: [10.31897/PMI.2021.4.7](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.7)
18. Qing-Xiang Meng, Huan-Ling Wang, Wei-Ya Xu, Yu-Long Chen. Numerical homogenization study on the effects of columnar jointed structure on the mechanical properties of rock mass // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. Vol. 124. № 104127. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2019.104127](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104127)
19. Yingjie Xia, Chuanqing Zhang, Hui Zhou et al. Mechanical behavior of structurally reconstructed irregular columnar jointed rock mass using 3D printing // Engineering Geology. 2020. Vol. 268. № 105509. DOI: [10.1016/j.enggeo.2020.105509](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105509)
20. Subash Bastola, Ming Cai. Investigation of mechanical properties of jointed granite under compression using lattice-spring-based synthetic rock mass modeling approach // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020. Vol. 126. № 104191. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2019.104191](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104191)
21. Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И. и др. Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2019. 431 с. DOI: [10.37614/978.5.91137.391.7](https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7)
22. Куранов А.Д. Применение численного моделирования для выбора безопасных параметров систем разработки рудных месторождений в высоконапряженных массивах // Записки Горного института. 2013. Т. 206. С. 60-64.
23. Protosenya A.G., Karasev M.A., Verbilo P.E. Research of the mechanical characteristics' anisotropy of apatite-nepheline ores block rock mass // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. № 11. P. 1962-1972.
24. Verbilo P.E., Karasev M.A., Belyakov N.A., Iovlev G.A. Experimental and numerical research of jointed rock mass anisotropy in a three-dimensional stress field // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2022. Vol. 37. № 2. P. 109-122. DOI: [10.17794/rgn.2022.2.10](https://doi.org/10.17794/rgn.2022.2.10)
25. Козырев А.А., Панин В.И., Семенова И.Э. и др. Геомеханическое обеспечение технических решений при ведении горных работ в высоконапряженных массивах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 2. С. 46-55.
26. Shabarov A.N., Kuranov A.D., Kiselev V.A. Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores // Eurasian Mining. 2021. № 2. P. 3-7.
27. Sánchez-Martín J., Galindo R., Arévalo C. et al. Optimized Design of Earth Dams: Analysis of Zoning and Heterogeneous Material in Its Core // Sustainability. 2020. Vol. 12. № 6667. DOI: [10.3390/su12166667](https://doi.org/10.3390/su12166667)
28. Protosenya A.G., Vilner M.A. Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2022. Vol. 37. № 2. P. 137-147. DOI: [10.17794/rgn.2022.2.12](https://doi.org/10.17794/rgn.2022.2.12)
29. Mirenkov V.E. Deformation of Rock Mass in the Vicinity of Underground Opening at Great Depth // Journal of Mining Science. 2021. Vol. 57. Iss. 3. P. 380-385. DOI: [10.1134/S1062739121030030](https://doi.org/10.1134/S1062739121030030)
30. Chenyang Zhao, Lavasan A.A., Schanz T. Application of Submodeling Technique in Numerical Modeling of Mechanized Tunnel Excavation // International Journal of Civil Engineering. 2018. Vol. 17. Iss. 1. P. 75-89. DOI: [10.1007/s40999-018-0318-8](https://doi.org/10.1007/s40999-018-0318-8)
31. Майборода-Хидирова Л.П. Использование субмоделирования для численного решения задач геомеханики на разных масштабных уровнях // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2021. Т. 2. С. 60-65.



32. Козырев А.А., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В. Геомеханическое обеспечение горных работ на горно-добывающих предприятиях Мурманской области // Горный журнал. 2019. № 6. С. 45-50. DOI: [10.17580/gzh.2019.06.05](https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.05)
33. Козырев А.А., Панин В.И., Семенова И.Э. Опыт применения экспертных систем оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород для выбора безопасных способов отработки рудных месторождений // Записки Горного института. 2012. № 198. С. 16-23.
34. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.

Авторы: А.Г.Протосеня, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0001-7829-6743> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Н.А.Беляков, канд. техн. наук, доцент, Belyakov_NA@ptrs.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9754-501X> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), М.А.Буслова, аспирант, <https://orcid.org/0000-0003-2098-1478> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Разработка новой системы оценки применимости цифровых проектов в нефтегазовой сфере

А.Е.ЧЕРЕПОВИЦЫН, Н.А.ТРЕТЬЯКОВ ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Череповицын А.Е., Третьяков Н.А. Разработка новой системы оценки применимости цифровых проектов в нефтегазовой сфере // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 628-642. EDN QYBNMC

Аннотация. Цифровая трансформация является одним из мировых трендов, охвативших большинство отраслей экономики и промышленности. Для нефтегазовых компаний внедрение цифровых технологий стало не просто тенденцией, а одним из факторов обеспечения конкурентоспособности и удержания устойчивых позиций на рынке в стремительно меняющихся условиях макросреды. При этом цифровая трансформация, несмотря на достигаемые положительные эффекты, является сложным процессом с позиции реализации и сопряжен с высокими технологическими и финансово-экономическими рисками. Цель работы состоит в разработке и апробации новой системы оценки применимости цифровых проектов в нефтегазовой сфере. Методология исследования включает применение кривой Гартнера, методов экспертных оценок и инструментов оценки экономической эффективности инвестиционных проектов. Разработанная система оценки основана на комплексном учете четырех составляющих: уровня цифровой зрелости компании; соответствия внедряемой технологии целям и задачам организации; уровня надежности внедряемой технологии; уровня инновационности внедряемого проекта. Особое внимание уделено практической апробации предложенной методики на основе оценки цифрового проекта, реализуемого российской нефтегазовой компанией.

Ключевые слова: цифровая трансформация; нефтегазовый сектор; инновации; критерии применимости проекта; цифровые технологии; месторождения нефти и газа

Поступила: 07.04.2022

Принята: 03.04.2023

Онлайн: 18.07.2023

Опубликована: 28.08.2023

Введение. Развитие нефтегазового сектора связано с целым рядом сдерживающих факторов [1, 2]. Нефтегазовая промышленность не может в полной мере полагаться на устойчивость рынков и цен, которые за десятилетие демонстрировали высокую степень волатильности. Одним из важных факторов, предопределивших стагнацию на мировых рынках, включая нефтегазовый сектор, стали последствия COVID-19 [1, 3]. Считается, что дальнейший спад на нефтегазовом рынке будет поддерживать давление на рыночную стоимость углеводородов и побудит энергетические компании сильнее сосредоточиться на реформировании их портфеля проектов и активов [4]. Большинство отраслевых экспертов заявляют, что время «простой» нефти закончилось.

Почти половина нефти (~43 %) извлекается из месторождений, находящихся в состоянии эксплуатации уже более 25 лет¹. Экономическая ситуация на рынке углеводородов и увеличение затрат при разработке новых активов сменили ориентацию нефтегазодобывающих компаний с разработки новых месторождений на максимальную оптимизацию эксплуатации уже разработанных активов. Директор компании ConocoPhillips Р.М.Лэнс очень точно охарактеризовал текущую ситуацию, отметив, что «низкая капиталоемкость является лучшим другом финансового директора»².

Еще одна проблема состоит в том, что традиционные запасы углеводородов постепенно истощаются. Ввиду чего особую актуальность приобретает освоение нетрадиционных запасов, а также

¹ BP. The Energy Outlook 2020 Edition. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf> (дата обращения 04.03.2022).

² Phillips C. Goldman Sachs Energy Conference. URL: <https://static.conocophillips.com/files/resources/goldman-sachs-deck-final-1-5-2017-2.pdf> (дата обращения 10.02.2022).



ресурсного потенциала Арктических нефтегазовых месторождений (включая шельфовые запасы) [4-7]. Эффективное освоение месторождений с нетрадиционными запасами требует особых подходов и обуславливает актуальность внедрения цифровых технологий [8, 9].

С каждым годом перед отраслью будет вставать все больше вызовов, связанных с физико-химическими свойствами нефти, фильтрационно-емкостными параметрами коллекторов, сложными природными условиями, нехваткой кадров и компетенций и строгими экологическими нормами [10-12]. Единственный путь погасить разрыв между эпохой расцвета нефтегазовой отрасли и тем, что индустрия имеет сейчас, – это повышать эффективность всех бизнес-процессов, «борясь за каждую каплю нефти». И только комплексная цифровая трансформация компаний индустрии сможет ответить этому запросу [8, 13, 14].

Прогноз, опубликованный IDC, говорит о том, что объемы инвестиций в цифровые проекты каждый год будут демонстрировать постепенный рост³. Доля инвестиций нефтегазовых компаний в проекты по цифровизации варьируется в пределах 25-40 % в зависимости от реализуемых стратегий, что позволяет сделать вывод об их заинтересованности в создании современных, высокотехнологичных производств [15]. Согласно прогнозу Technology Outlook – BP (2018), технологическое развитие и внедрение цифровых технологий позволят к 2050 г. снизить себестоимость добычи более чем на 30 % и увеличить объемы извлекаемых запасов нефти в мире [16].

Преимущества использования цифровых технологий охватывают совокупность экономических, технологических, экологических и управленческих аспектов [17-20]. Новые технологии могут быть успешными или провальными. Внедрение новой технологии, как правило, требует осуществления множества пилотных проектов, и даже это не гарантирует успех. Учитывая степень капиталоемкости предприятий нефтегазовой отрасли, остро стоит вопрос совмещения принципа быстрого прототипирования и сохранения максимальной устойчивости производственных показателей, а также состояния компании в целом [21]. Но основная проблема заключается в том, что большинство компаний не реализует комплексный подход к цифровизации: зачастую цифровые решения используются для укрепления слабых мест, в маркетинговых целях или локально и по запросу от производственных подразделений. Этот подход неверен и противоречит самому смыслу использования цифровых технологий. В данном случае компаниям может помочь подробная и четко сформированная дорожная карта по проведению цифровой трансформации бизнеса [22].

Результатом разрозненного подхода по отношению к обмену информацией становятся петабайты данных, которые генерируются буровыми платформами либо используются неэффективно, либо не используются вовсе, что является негативным аспектом как с точки зрения общей цифровизации сектора, так и формирования большого объема упущенных выгод. Анализ 5000 тематических статей из пяти крупнейших нефтегазовых журналов, проведенный компанией Deloitte, подтверждает перенасыщение рынка наименованиями новых технологий и то, что большинство новых технологий не достигают этапа своего промышленного применения, затухая в самом начале пути – это касается целых типов технологий, а не отдельных цифровых инициатив⁴. В связи с этим перед менеджментом нефтегазовых компаний встает серьезная задача отбора цифровых проектов, основанного на комплексных системах оценки.

Цель исследования состоит в разработке новой системы оценки применимости цифровых проектов в нефтегазовой сфере. Для достижения цели работы необходимо ответить на ряд исследовательских вопросов: Почему цифровая трансформация важна для нефтегазового комплекса, а данный процесс сопряжен с высокими рисками? Какие методы можно использовать для оценки проектов, направленных на внедрение цифровых технологий в деятельность компаний? Как оценить применимость цифровых проектов в нефтегазовом секторе? Какие показатели и методы следует использовать?

³ IDC, Why Your Organization Should Create a Digital Innovation Graph. URL: <https://www.idc.com/promo/thirdplatform/RESOURCES/ATTACHMENTS/idc-dx-graph-ebook.pdf> (дата обращения 04.03.2022).

⁴ Deloitte. From bytes to barrels. URL: <https://www.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Energy-and-Resources/gx-online-from-bytes-to-barrels.pdf> (дата обращения 10.02.2022).



Рис.1. Общий алгоритм проведения исследования

технологий в бизнес-процессы, который постепенно проникает во все сферы деятельности, и нефтегазовый сектор не является исключением [7, 20, 23, 24].

В своем исследовании S.Whitfield поднимает обоснованный вопрос: «Цифровая трансформация: огромный риск или широкие возможности?»⁵. Данный тезис фактически отражает противоречивость исследуемой тематики. С одной стороны, нефтегазовые компании вынуждены адаптироваться к постоянно меняющимся условиям макросреды, повышать эффективность и сохранять устойчивую позицию на рынке. С другой – сам процесс цифровой трансформации сопряжен с высокими рисками и повышенной степенью неопределенности.

Энергетические компании сталкиваются со значительным числом различных проблем и угроз, как внутренних, так и внешних (рис.2). Для их эффективного преодоления требуется внедрение принципиально новых подходов к организации производственных процессов и принятию управленческих решений. Все это актуализирует необходимость внедрения цифровых технологий и решений [11, 25-27].

Использование цифровых технологий позволяет сократить затраты и повысить уровень производительности⁶, что не раз доказано на примере зарубежных компаний. Например, использование технологии «месторождение будущего» (Field of the Future) позволило компании BP увеличить объемы производства на 1-2 % [15]. Австралийская нефтегазовая компания Woodside смогла повысить уровень производительности на 10-15 % за счет внедрения прогрессивных цифровых технологий в производственный процесс [28]. Также опыт нефтегазовых компаний свидетельствует о возможности повышения экономической эффективности деятельности за счет цифровизации и интеллектуализации. Например, компания Halliburton достигла снижения показателя CAPEX на 20 % за счет внедрения современного технологического комплекса Real time operation.

Цифровые технологии используются и в деятельности крупнейших отечественных нефтегазовых компаний, однако по уровню цифровой зрелости страна все же отстает от международных

Методология. Основу исследования составляет информационно-аналитический базис. Для получения релевантной информации о ключевых трендах цифровой трансформации и текущем состоянии нефтегазового сектора проведен контент-анализ не только академической литературы, но и отраслевых международных и национальных отчетов.

Результатом исследования стал вывод о почти полном отсутствии научных изысканий на тему оценки цифровых проектов в нефтегазовой сфере. В связи с этим представляется целесообразным сформировать инструмент, который позволит учесть критерии, значимые для цифровых проектов в нефтегазовой сфере или недостаточно используемые в классических методиках отбора проектов. На рис.1 представлен базовый алгоритм исследования.

Цифровая трансформация представляет собой процесс интеграции цифровых

⁵ Whitfield S. The Digital Transformation: Great Risk or Greater Opportunity? URL: <https://jpt.spe.org/digital-transformation-great-risk-or-greater-opportunity> (дата обращения 25.03.2022).

⁶ The #1 Key to Successful Digital Transformation in Oil & Gas. Vista projects. Vista Projects Integrated Engineering Consulting. URL: <https://www.vistaprojects.com/blog/digital-transformation-in-oil-gas/#:~:text=Digital%20transformation%20in%20oil%20%26%20gas%20is%20the%20embracing%20of%20technology,efficiency%2C%20and%20increased%20cost%20savings> (дата обращения 20.03.2022).



Рис.2. Ключевые вызовы для нефтегазовых компаний

партнеров, что неоднократно отмечалось Министерством природных ресурсов и экологии РФ. Национальная компания «Роснефть» оценивает текущий уровень развития и внедрения цифровых решений в производственно-технологическую деятельность как низкий. При этом цифровизация определена компанией как один из главных приоритетов будущего развития бизнеса⁷.

В работе [29] установлено, что, несмотря на все трудности цифровой трансформации, реализация данного процесса является оправданной. Авторы утверждают, что внедрение цифровых технологий открывает новые возможности не только в сегменте upstream, но и downstream. Они позволяют сокращать временные затраты, связанные с обработкой информации на этапах проведения геологоразведочных работ (ГРП), более чем на 50-60 %. Внедрение таких технологий позволяет снизить затраты на 20-30 % и повысить продуктивность до 5 % непосредственно на стадиях реализации проектов [29].

Размер возможных экономических эффектов цифровой трансформации вызывает все большую заинтересованность со стороны бизнеса. Цифровая трансформация в отрасли может принести пользу на сумму около 640 млрд дол.: ~170 млрд дол. США за счет экономии ресурсов, ~10 млрд дол. США – повышения производительности, 30 млрд дол. США – сокращения потребления воды, 430 млрд дол. США – сокращения выбросов^{8,9}. Также использование цифровых технологий может привести к получению климатических эффектов и возможности снижения суммарных выбросов CO₂ более чем на 1300 млн т, экономии расхода водных ресурсов на 3 млрд л, предотвращению разливов нефти [5, 30].

Нельзя отрицать, что цифровая трансформация является сложным процессом. Отраслевые компании относят данный процесс к комплексу высокорискованных мероприятий. Согласно исследованию, проведенному Deloitte, перечень наиболее распространенных рисков, выделяемых компаниями в рамках тематики внедрения цифровых технологий, включает в себя: опасения по

⁷ «Роснефть». Стратегия компании. Приоритет цифровизации и технологий. URL: <https://www.rosneft.ru/docs/report/2020/ru/strategy/digitaltransformation-technology.html> (дата обращения 16.08.2022).

⁸ Randall T. The World Nears Peak Fossil Fuels for Electricity. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-06-13/we-ve-almost-reached-peak-fossil-fuels-for-electricity> (дата обращения 19.09.2021).

⁹ International Renewable Energy Agency (IRENA), The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025, June 2016. URL: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf (дата обращения 16.03.2022).



поводу конфиденциальности данных; отсутствие стандартизации информационных данных и процессов; сложность интеграции технологических и управленческих решений; нехватка квалифицированного персонала [31]. Перечисленные факторы усложняют процесс принятия управленческих решений¹⁰.

Для выбора правильной стратегии в сфере цифровизации компаниям необходимо принимать комплексные инвестиционные решения. Любые вложения в цифровые технологии должны быть обоснованы. Для этого требуются особые подходы, позволяющие оценить проекты и технологии, принимая во внимание не только потенциальные преимущества, но и недостатки. В академической литературе практически не отражены комплексные подходы к оценке применимости новых технологий (цифровых). Для устранения сформировавшегося пробела целесообразно предложить комплексный подход к решению обозначенной задачи, что обуславливает актуальность и значимость проводимого исследования.

Подходы к оценке цифровых проектов. С целью проведения комплексной оценки проекта необходимы технологические расчеты [32]. Для отображения на примере цепочки взаимосвязей реализованных проектов, вызванных ими изменений бизнес-процессов, а также возникающих экономических эффектов, при поддержке отраслевых экспертов сформирован перечень соответствующих примеров (табл.1).

Таблица 1

Технологические и экономические эффекты внедрения цифровых технологий [12, 18, 32]

Проект	Изменения в бизнес-процессах	Возможные экономические эффекты (включая предотвращенные ущербы)
Создание системы идентификации буровых труб	Снижение количества аварий, вызванных обрывом буровых труб, и дней простоя	Для оценки экономического эффекта (ЭЭ) необходимо рассчитать убытки за один день простоя процесса бурения скважины, оценить издержки, связанные с ликвидацией аварии, и спрогнозировать процент аварий, которых удастся избежать за счет внедрения проекта: $\text{ЭЭ} = (\text{количество дней простоя, которого удалось избежать}) \times (\text{стоимость дня простоя}) + (\text{издержки на ликвидацию аварии})$
Внедрение системы интеллектуальной интерпретации данных сейсморазведки	Снижение необходимого времени протекания бизнес-процесса интерпретации данных сейсморазведки	За счет того, что функцию интерпретации данных сейсморазведки на себя берет информационная система, менеджмент организации может сократить количество специалистов данного профиля, сэкономив этим на фонде оплаты труда. Также ускорение данного процесса увеличивает прохождение всего цикла подготовки к разработке месторождения (участка), что влечет за собой экономический эффект, который увеличивает скорость разработки проекта, более быстрый выход на проектную мощность, что позволит снизить сроки возврата инвестиций
Имплементация предиктивной аналитики в процесс бурения	Автоматическое изменение осевой нагрузки на долото, угла наклона и прочих параметров бурения в режиме реального времени на основании оценки и анализа множества внешних факторов	За счет использования максимального потенциала буровых установок и особенностей забуриваемых пород значительно уменьшится время проходки, износ долота, количество аварий, отказов и операций, выполненных не в полном соответствии с техническим заданием. Как следствие, значительно снизится стоимость бурения и возрастет качество проводимых работ. Для оценки экономического эффекта необходимо проанализировать технологические параметры, заявленные подрядчиком, оценить их в стоимостном выражении и сравнить с полной стоимостью работы, выполненной без использования технологии

Все выгоды от внедрения цифровых технологий в деятельность нефтегазовых компаний можно отразить через ряд основных критериев, которые влияют на бизнес-процессы (рис.3).

При этом экономическая эффективность – не единственный параметр, который важно учитывать. На основе систематизации данных об используемых зарубежными и российскими компаниями методик оценки цифровых проектов, а также с учетом особенностей цифровых решений в нефтегазовом секторе, сформирован перечень параметров, которые могли бы способствовать повышению эффективности принятия управленческих решений: соответствие проекта целям

¹⁰ Accelerating digital transformation in oil and gas. URL: https://www.publicissapient.com/content/dam/ps-rebrand/insights/2022/research-center/pdf/PS_Accelerating_Digital_Transformation_Oil_and_Gas.pdf (дата обращения 14.03.2022).



Рис.3. Цепочка измерения влияния изменения бизнес-процессов на NPV-проект по нефтегазодобыче

и задачам компании; цифровая зрелость компании; степень надежности и инновационности внедряемых технологий.

Первый параметр отражает базовую возможность реализации проектов, второй – уровень готовности компании к осуществлению цифрового проекта, третий – ценность технологии. Таким образом, происходит переход от стратегического до операционного уровня управления компаниями. Параметры дополняют друг друга и позволяют сформировать целостную картину не только о самих технологиях, но и том, как они могут использоваться компанией и насколько эффект от их применения будет соответствовать направлениям деятельности компании. При этом для перехода к количественной оценке важно определить методы и подходы к ее осуществлению.

Оценка соответствия проекта целям и задачам компании является одним из важнейших этапов принятия управленческого решения. Проект не должен противоречить заявленным целевым приоритетам, иначе его реализация приведет не к положительным результатам (ожидаемым), а вызовет совокупность отрицательных последствий.

Менеджмент компании должен определить цели каждой бизнес-единицы и выделить ключевые показатели эффективности для контроля за исполнением каждой поставленной цели, а также выявления связей между ними [33-37].

Внедрение какого-либо цифрового проекта является инструментом для воздействия на ряд показателей, увязанных со стратегическими целями компании, а значит и успешность реализации цифрового проекта зависит от изменения этих показателей до желаемого уровня [38]. Главная сложность этой методологии – трудоемкий процесс отбора репрезентативных показателей, которые поддаются измерению и демонстрируют достижение заданных целей.

Для использования данной модели в дальнейших расчетах итогового показателя, разработка которого является основной целью работы, необходимо найти пути оцифровки результатов его применения. Для этого в рамках применения предлагаемой системы оценки организации необходимо создать типовую таблицу своих целей и задач (пример в табл.2).

Чтобы получить показатель C_g , необходимый для проведения комплексной многопараметрической оценки, можно воспользоваться формулой

$$C_g = \frac{V_f}{V_g},$$

если цель – увеличить определенный показатель; если цель состоит в снижении фактического значения показателя, то используется формула



$$C_g = \frac{V_g}{V_f},$$

где C_g – коэффициент соответствия целям и задачам организации; V_f – прогнозное значение показателя, отражающего достижение поставленной цели или задачи, который будет достигнут в случае реализации цифрового проекта; V_g – целевое значение показателя, отражающего достижение поставленной цели или задачи.

Таблица 2

Оценка соответствия внедряемого проекта целям и задачам компании

Цель	Показатель	Фактическое значение	Целевое значение	Прогнозируемое значение после внедрения проекта
Увеличение добычи	Годовая добыча нефти, млн т	32,5	36,7	34,2
Увеличение коэффициента извлечения нефти (КИН)	КИН, %	23,4	31	27,2
Снижение межремонтного периода работы скважин	Время простоя, сут	13	6	8
Снижение стоимости ГРП	Объем расходов на ГРП, млрд руб.	12,5	10	9

В отличие от оценки результативности проекта, основанной на задействовании относительных показателей рентабельности, оценка соответствия проекта целям и задачам предполагает четкую взаимосвязку с утверждаемыми целевыми приоритетами и не может быть универсальной для всех компаний на уровне рассматриваемой в исследовании нефтегазовой отрасли.

Оценка цифровой зрелости компании. Важные факторы при оценке применимости цифрового проекта: уровень развития цифровой инфраструктуры компании; степень квалификации персонала в сфере новых технологий; состояние корпоративной культуры [34]. Организация вынуждена развиваться эволюционно и комплексно, иначе новые цифровые проекты, внедренные в деятельность компании, не смогут осуществляться эффективно (с достижением ожидаемых результатов). Должно происходить поступательное планомерное развитие аппаратного обеспечения бизнес-процессов, уровня компетенций сотрудников и адаптивности корпоративной культуры – только в этом случае компания сможет соответствовать современным вызовам рынка и планомерно внедрить элементы прогрессивной индустрии 4.0 [39-41].

Существуют различные методики, позволяющие оценить как степень цифровизации компании, так и уровень ее компетенций при работе с конкретными и прикладными задачами по внедрению инновационных технологий. Каждая из методик имеет свои преимущества и недостатки.

Существует несколько наиболее востребованных моделей, позволяющих оценить цифровую зрелость организации, – это модели, разработанные компаниями Forrester, IDC и Erricson. Данные модели соответствуют стандартам CMMI и достаточно полно раскрывают суть цифровизации организации, а также рассматривают ее по всем основным направлениям: корпоративной культуре; менеджменту; бизнес-процессам; технологиям; обучению [42].

Методология Forrester размещена в открытом доступе¹¹, поэтому возможна ее комплексная оценка. Методика оценки базируется на опроснике, который состоит из 28 вопросов по четырем ключевым направлениям и имеет четыре варианта ответа, поддающихся оцифровке: 0 – абсолютно не согласен; 1 – относительно не согласен; 2 – относительно согласен; 3 – полностью согласен. По результатам прохождения опроса экспертами организации сумма баллов по всем вопросам суммируется, и компания определяется в одну из четырех групп в соответствии с уровнем ее цифровой зрелости. Данная методология основана на использовании экспертного мнения, поэтому не является объективной. Для более точной оценки цифровой зрелости организации разработан чек-лист на основе ведущих методик, разделенный на три основных раздела: уровень технологической

¹¹ Forrester Research Inc, Model of assesstment of Digital Maturity. URL: <https://clck.ru/S4Adt> (дата обращения 19.03.2022).



оснащенности; квалификация персонала; структура бизнес-процессов. Каждый раздел имеет определенный набор вопросов и ответов, имеющих удельный вес в итоговой оценке уровня цифровой зрелости. Максимальное количество баллов – 100. Коэффициент цифровой зрелости определяется как деление полученного в результате заполнения чек-листа балла на 100. Алгоритм проведения оценки состоит из следующих этапов: сбор ключевых данных; проведение оценки по показателям, представленным в чек-листе; расчет суммарного балла; отнесение в одну из четырех групп по уровню цифровой зрелости (низкий, невысокий, средний, высокий). Методика, основанная на использовании чек-листа, качественно отличается от существующих инструментов на рынке тем, что все варианты ответа опираются на фактологическую базу и не зависят от экспертного мнения; проверяются исключительно факты, связанные с деятельностью организации в сфере цифровых технологий. Группы компаний по цифровой зрелости, сформированные по разработанной методике, представлены в табл.3.

Таблица 3

Классификация уровней цифровой зрелости

Уровень цифровой зрелости	Группа цифровой зрелости	Поведенческая характеристика	Суммарный балл
Высокий	Инноваторы	Демонстрируют превосходство на рынке	80-100
Средний	Продвинутые	Комплексные, но не инновационные действия	64-79
Невысокий	Испытатели	Ситуационное использование в операционной деятельности	42-63
Низкий	Скептики	Игнорирование цифровизации	0-41

Значение 100 свидетельствует о высоком уровне цифровой зрелости компании и наличии конкурентных преимуществ, связанных с процессом цифровизации. Если значение показателя варьируется в пределах 0-41, то это говорит о полном игнорировании компанией цифровизации и неготовности (инертности) к осуществлению цифровых проектов.

Оценка инновационности и надежности технологии. Следующий важный аспект – оценка степени инновационности и надежности внедряемой цифровой технологии. Для оценки актуальности внедряемых цифровых технологий предлагается использовать существующие и авторитетные системы отслеживания актуальных технологических трендов, одним из которых является кривая компании Гартнер (Gartner). Это ведущая научно-исследовательская организация, деятельность которой направлена на изучение ситуации в сфере цифровых технологий. Наиболее известна введением в употребление понятия ERP (Enterprise Resource Planning – планирование ресурсов предприятия) и регулярными исследовательскими отчетами в форматах «магический квадрант» и «цикл хайпа». Нуре cycle отражает степень актуальности технологий [43, 44]. Кривая Гартнера разделена на несколько зон: инновационных триггеров; пик завышенных ожиданий; впадина разочарования; склон просвещения; плато продуктивности. Также на данной кривой отражены современные технологии, отмеченные специальным символом, который означает прогнозное время достижения технологий достаточного уровня развития для повсеместного применения в хозяйственной деятельности организаций.

Для проведения комплексной многопараметрической оценки внедрим два коэффициента – надежности технологии и актуальности инновации. Диапазон измерений у каждого параметра лежит во множестве чисел от 0 до 1, где 0 в случае с коэффициентом надежности технологии означает полное отсутствие статистической информации и успешно реализованных проектов, основанных на данной технологии; 1 означает наличие у технологии кейса успешного промышленного применения во временном промежутке не менее года после прохождения ей границы «плато продуктивности». В случае с коэффициентом актуальности 1 означает присутствие технологии в зоне инновационных триггеров и положительно сказывается на общем значении итогового показателя, так как ранняя разработка перспективной технологии может обеспечить лидерство организации в данной сфере; 0 присваивается технологиям, получившим более современный заменитель на



рынке, позволивший изменить предыдущую бизнес-модель. Данные коэффициенты предлагается определять внутренним или внешним экспертам компании или опираясь на кривую Гартнера. Эталонные значения коэффициента актуальности: инновационный триггер – 1,0; пик завышенных ожиданий – 0,8; впадина разочарования – 0,6; склон просвещения – 0,4; плато продуктивности – 0,2; устаревание технологии – 0. Эталонные значения коэффициента надежности: полное отсутствие статистической информации – 0; создание минимально жизнеспособного продукта (MVP), основанного на технологии, – 0,2; обратная связь и статистические данные по первому использованию MVP, внесение соответствующих корректировок – 0,4; первый успешный опыт применения технологии в реальных бизнес-процессах компаний – 0,5; начало промышленного применения технологии – 0,7; начало промышленного использования крупными компаниями – 0,85; успешное промышленное применение на протяжении года после прохождения границы плато продуктивности – 1. Для устаревших технологий значение коэффициента будет приравнено к нулю, для наиболее актуальных и инновационных – к единице.

Данные оценки систематизированы по итогам проведенных опросов экспертов компаний «Газпром нефть», «Роснефть» и Deloitte.

Шкала для оценки коэффициента надежности имеет аналогичные значения. При полном отсутствии статистической информации коэффициент будет приравниваться к нулю. Если же технологии имеют опыт успешного промышленного использования, то коэффициент равен единице.

Комплексная многопараметрическая оценка. Для оценки эффективности и применимости цифровых проектов могут быть задействованы традиционные инвестиционные показатели (NPV, IRR, ROI, PI, DPP). Их использование позволяет сформировать основу для принятия результативного управленческого решения. Тем не менее цифровые технологии значительно отличаются от технологий Экономики 3.0, поэтому кроме классических методов инвестиционного анализа требуется применение особых инструментов, способных учесть специфику таких технологий и проектов. Для обеспечения комплексного подхода к оценке важно рассматривать готовность организации к внедрению инноваций, актуальность технологий, их надежность и пр.

Новизна методики состоит в интеграции наиболее значимых показателей в единую систему для обеспечения системного подхода к принятию управленческих решений относительно реализации цифровых инвестиционных проектов. Формируемая методика обеспечивает снижение уровня неопределенности и позволяет преодолеть пробелы, обусловленные отсутствием методов системной оценки цифровых проектов. Для решения данных задач предлагается использовать следующий показатель:

$$C_{int} = C_{dm} \leftarrow C_g \leftarrow C_{rel} \leftarrow C_r,$$

где C_{dm} – коэффициент цифровой зрелости организации; C_{rel} – коэффициент актуальности технологий; C_r – коэффициент надежности технологий.

В рамках исследования определенного множества проектов сделан вывод о том, что критическим значением, являющимся барьерным для принятия проекта, является 0. При данном значении итогового показателя внедрение проекта нецелесообразно. Рассмотрим показатель: он состоит из четырех множителей и принимает значение 0 в то время, когда в 0 обращается один из параметров, включенных в итоговый показатель комплексной многопараметрической оценки.

При $C_{rel} = 0$ можно сделать вывод о том, что рассматриваемая технология имеет более эффективный аналог на рынке, интегрированный с подавляющим объемом имеющейся инфраструктуры. Примером может стать предложение о внедрении системы освещения, основанной на керосиновых лампах, при наличии LED-заменителей, опережающих данную технологию по всем технологическим и экономическим показателям. Когда коэффициент надежности технологии обращается в 0, целесообразно говорить о работе с проектом, основанным только на идее и не имеющим под собой достаточного массива практических испытаний. В связи с высокой ценой ошибки, которая присуща нефтегазовому комплексу, внедрение и использование подобных технологий является невозможным.



При $C_g = 0$ внедряемая технология не решает задач и целей организации, не влияет на важные для нее технологические и экономические показатели, а сами предложения о внедрении подобной технологии вызваны сиюминутными эмоциональными всплесками, которые можно заметить в первой зоне кривой Гартнера. Когда значение C_{dm} тождественно 0, следует говорить о полной неготовности компании внедрить в свою деятельность проект на основе цифровых технологий в следствии отсутствия необходимых технических условий, компетенций и налаженных бизнес-процессов. Таким образом, предложенный результирующий показатель C_{int} призван не заменить существующие методики оценки проектов, а пополнить перечень актуального инструментария, чем снизит степень неопределенности в рамках принятия управленческих решений по внедрению цифровых проектов. Его использование позволит повысить эффективность управленческих решений, связанных с внедрением цифровых технологий на уровне компаний нефтегазового сектора.

Результаты. Предложенная методология требует практической апробации. В ходе исследования рассмотрен частный случай внедрения цифровых технологий – протестированный в 2020 г. компанией «Газпром нефть» проект по внедрению учета состояния бурильных труб с использованием технологии BlockChain (блокчейн).

Суть проекта заключается в верификации истории бурового оборудования. Нарботка бурильного инструмента не всегда достаточно контролируется, вследствие чего допустимый уровень наработки превышает, что приводит к авариям (в том числе со смертельными случаями) и продолжительным простоям. Реализация проекта направлена на учет наработки оборудования и контроль его инспекций для предупреждения аварий и вызванных ими последствий. Смысл состоит в нанесении специальных меток на бурильное оборудование, которые при считывании дают актуальную информацию о наработке инструмента. Обязка проекта технологией блокчейн позволяет обеспечить прозрачность и неизменность данных.

Альтернатива подобной технологии заключается в проведении полной дефектоскопии бурильного оборудования, которая в среднем может занимать несколько суток, что недопустимо с учетом стоимости простоя буровой бригады.

Оценка соответствия проекта целям и задачам компании. В первую очередь необходимо понять, соответствует ли реализуемый проект целям и задачам компании. Для расчета коэффициента соответствия, входящего в итоговый показатель комплексной многопараметрической оценки, необходимо описать цели и задачи компании ПАО «Газпром нефть». Согласно разработанному подходу, реализация проекта должна соответствовать хотя бы одной цели либо задаче, установленной менеджментом компании. Если таких целей или задач несколько, то оценка проводится по показателю, на который реализация проекта оказывает наибольшее влияние. В данном случае подобным показателем является увеличение экономического эффекта за счет оптимизации процесса бурения:

$$C_g = \frac{118070}{50000} = 2,36.$$

Значение коэффициента выше единицы свидетельствует о соответствии цифрового проекта целям и задачам организации (табл.4).

Таблица 4

Цели и задачи ПАО «Газпром нефть» в разрезе оцениваемого проекта

Цель	Показатель	Фактическое значение	Целевое значение	Прогнозируемое значение после внедрения проекта
Снижение простоя прочих подрядчиков	Непроизводственное время, сут/год	279,62	220	128,42
Снижение количества аварий и инцидентов в год	Количество аварий, шт.	376,5	300	194,22
Увеличение экономического эффекта за счет оптимизации бурения	NPV, тыс. руб.	1	50000	118070

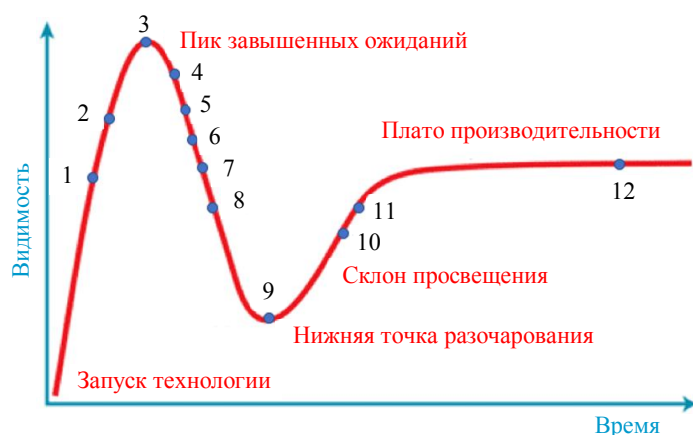


Рис.4. Кривая Гартнера для технологий нефтегазового сектора [6]

1 – Edge AI; 2 – устройства объемного отображения; 3 – умное рабочее место; 4 – IoT платформы; 5 – блокчейн; 6 – виртуальные ассистенты; 7 – смешанная реальность; 8 – цифровые двойники; 9 – дополненная реальность; 10 – предиктивная аналитика при бурении; 11 – машинное обучение; 12 – компьютерное моделирование

Оценка цифровой зрелости компании. На следующем этапе необходимо оценить цифровую зрелость рассматриваемой компании. «Газпром нефть» на текущий момент является одним из флагманов цифровой трансформации в мире. У организации выстроена эффективная нормативно-регламентная база, позволяющая быстро тестировать различные гипотезы и ускоренно внедрять различные цифровые технологии в деятельность компании.

Если говорить о корпоративной культуре, то цифровая трансформация является одним из ключевых векторов развития, который пронизывает компанию на всех уровнях, начиная от менеджмента и заканчивая линейным персоналом. С точки зрения технологической подготовленности «Газпром нефть» также может называться бенчмарком в отрасли,

так как располагает развитой цифровой инфраструктурой: от мощных центров обработки данных до продвинутой телеметрии, установленной на скважинах [45].

Согласно результату заполнения разработанного опросника о состоянии ПАО «Газпром нефть», организация получила 89 баллов, следовательно, ее коэффициент цифровой зрелости равен 0,89, что позволяет отнести компанию к группе «инноваторы» и свидетельствует о ее подготовленности к реализации проекта.

Оценка надежности технологии. Технология блокчейн активно используется с 2008 г. и успела накопить достаточный массив данных о своем применении и подтвердила свою состоятельность во многих сферах – от финансовых операций до государственного документооборота. Например, Deutsche Bank использует инновацию для продуктов в сфере инвестиций, а Amazon применяет для работы в сфере медицинского страхования [46]. В связи с большим количеством подтвержденных кейсов успешного использования и принятия технологии на уровне многих государств ей присваивается коэффициент надежности со значением 1.

Оценка инновационности технологии. Согласно авторской методологии, необходимо определить уровень инновационности технологии. Чтобы рассчитать коэффициент инновационности технологий, преобразуем кривую и нанесем на нее наиболее актуальные для нефтегазового сектора технологии в соответствии с данными, приведенными в исследовании Gartner (рис.4).

Как видно из представленной диаграммы (рис.4), рассматриваемая технология пребывает в «области впадины» разочарования на кривой Гартнера, следовательно, ее коэффициент инновационности принимает значение $C_{rel} = 0,6$.

Расчет показателя применимости цифрового проекта. Для обеспечения системного подхода к комплексной многопараметрической оценке необходимо рассчитать итоговый показатель, включающий в себя все описанные элементы. Ни один из коэффициентов не принял значение, равное 0 ($C_{rel} > 0$). Из этого следует, что технология не имеет современных заменителей и является актуальной. $C_g > 1$ означает, что реализация проекта полностью совпадает с целями и задачами, которые устанавливает организация, благотворно влияя на важные показатели для хозяйственной деятельности нефтегазовой компании. $C_{dm} > 0,8$ свидетельствует о достаточном уровне цифровой трансформации нефтегазовой компании, которая позволяет ей имплементировать оцениваемую технологию. Значение $C_r > 0$ сигнализирует о том, что технология является апробированной и достаточно изученной для ее безрискового использования в деятельности нефтегазодобывающей организации. Соответственно, $C_{int} > 0$, что означает отсутствие преград в реализации проектов с точки зрения неэкономических показателей, присущих цифровым проектам:

$$C_{int} = 2,36 \leftarrow 0,89 \leftarrow 0,6 \leftarrow 1.$$



По результатам использования разработанной системы критериев на реальном цифровом проекте, внедряемом в деятельность нефтегазовой компании, можно сделать вывод о возможностях применения данной методики для обеспечения системного подхода к принятию и осуществлению управленческих решений на уровне компаний нефтегазового сектора.

Сопоставление предлагаемой методики оценки с традиционными подходами. Одним из основных подходов, используемых для оценки эффективности инвестиционных проектов, является расчет и интерпретация инвестиционных показателей – NPV, IRR, ROI, PI, DPP. Показатель чистой приведенной стоимости (NPV) позволяет оценить, насколько целесообразна реализация проекта с экономической точки зрения. При этом использование данного показателя не позволяет отразить специфику отдельных проектов, в том числе в сфере цифровых решений. Ввиду этого требуется оценка дополнительных параметров, что предполагает совершенствование подходов к ее осуществлению и обосновывает значимость разработанной методики.

Одновременное применение обозначенного традиционного подхода и предлагаемой в исследовании методики могут давать различные результаты. В рассмотренном кейсе NPV (≥ 0) и значение итогового показателя указывают на целесообразность реализации проекта, однако ситуации могут быть различными. В табл.5 приведено сопоставление предлагаемой методики оценки с традиционным подходом в контексте интерпретации получаемых результатов и принятия управленческих решений.

Проведенный анализ доказывает неполноту информации, получаемой при использовании исключительно традиционных подходов к оценке применимости цифровых проектов в нефтегазовой сфере, и обосновывает необходимость задействования предложенного показателя для повышения качества и эффективности принимаемых, а также реализуемых управленческих решений.

Обсуждение. Критерии, рассчитанные для одного проекта, не несут ценности для менеджмента компаний, которые используют методику для оценки цифровых проектов. Рассчитанный в рамках комплексной многопараметрической оценки итоговый показатель максимально репрезентативен при сравнении нескольких проектов. Основные конкурентные преимущества разработанной системы оценки применимости цифровых проектов в нефтегазовой сфере (по сравнению с аналогами): учет всех ключевых аспектов, специфичных для цифровых технологий; низкая степень зависимости от человеческого фактора, выражающегося в экспертных оценках различных критериев. Основными недостатками разработанной методики являются зависимость от других аналитических систем (Gartner Hype Cycle) и необходимость задействования экспертных оценок в рамках определения надежности и актуальности внедряемой цифровой технологии, что негативно влияет на точность оценки данных параметров.

Дальнейшие исследования будут направлены на анализ дополнительных массивов информации о цифровых проектах в нефтегазовой сфере, необходимых для повышения уровня точности оценки критериев применимости, а также на совершенствование методики оценки каждого из критериев, входящих в представленную систему, для максимального снижения уровня неопределенности и учета максимального количества факторов.

Заключение. Одна из ключевых задач нефтегазовой индустрии в текущее время, характеризующее нестабильной экономической и геополитической конъюнктурой, – поиск путей повышения эффективности и сокращения расходов. Решением является применение новых технологических решений, большая часть из которых относится к цифровым технологиям, которые перешли от статуса «имиджевых проектов» к эффективным инструментам повышения рентабельности разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений. Данный факт подтверждается и резким ростом спроса на инновационные решения во всех сферах отрасли, каждое из которых нужно детально оценивать и отбирать среди других. Стоит учитывать, что цифровые технологии являются не только возможностью для нефтегазовых компаний, но и определенным вызовом, так как помимо обновления технологической инфраструктуры требуют от организаций активного развития компетенций сотрудников и даже частичной смены бизнес-моделей.

С целью снижения неопределенности при принятии эффективных управленческих решений в рамках отбора цифровых проектов в нефтегазовой сфере, разработана система критериев оценки подобных проектов, основанная на четырех ключевых составляющих: уровень цифровой зрелости компании; соответствие внедряемой технологии целям и задачам организации; уровень надежности внедряемой технологии; уровень инновационности внедряемого проекта.



Таблица 5

Сопоставление предлагаемой методики комплексной многопараметрической оценки с традиционными подходами

Условия		Характеристика	Интерпретация результатов	Принятие управленческого решения
Показатель NPV	Итоговый показатель C_{int}			
$NPV \geq 0$	$C_{int} > 0$	Оба показателя дают положительный результат	Полученные результаты указывают на целесообразность и эффективность реализации проекта как с точки зрения экономики, так и инновационности и результативности самого проекта	В условиях доказанной результативности проекта его реализация представляется целесообразной
$NPV < 0$	$C_{int} > 0$	NPV дает отрицательный результат, итоговый показатель – положительный	Полученные результаты свидетельствуют о том, что реализация заявленного проекта неэффективна с экономической точки зрения, но используемые технологии являются прогрессивными, а их внедрение соответствует целевым приоритетам компании	Необходимо обратиться к результатам экономической оценки, рассмотреть возможности поддержки цифрового проекта и обосновать значимость его реализации для компании
$NPV \geq 0$	$C_{int} = 0$	NPV дает положительный результат, итоговый показатель – отрицательный	С точки зрения экономической эффективности, проект является результативным. Чтобы сделать вывод о значении итогового показателя, необходимо оценить значения каждого коэффициента: $C_g = 0$ – реализация проекта не соответствует установленным целям компании, требуется его адаптация к реализуемым приоритетам; $C_{dm} = 0$ – текущий уровень цифровой зрелости компании не позволяет реализовать имеющийся потенциал, что обуславливает необходимость принятия соответствующих мер; $C_{rel} = 0$ – предлагаемая технология имеет более эффективный аналог на рынке, ввиду чего следует расширить перечень рассматриваемых вариантов (рассмотреть более прогрессивные и конкурентоспособные технологические решения); $C_r = 0$ – отсутствуют релевантные данные о внедрении предлагаемой технологии, что обуславливает наличие повышенных производственно-технологических и финансово-экономических рисков	Принятие управленческого решения в отношении реализации проекта должно быть пересмотрено в зависимости от того, какой именно аспект итогового показателя является пробелом. При наличии более прогрессивных аналогов предлагаемой технологии необходимо оценить возможности их внедрения. Если осуществление проекта в целом противоречит целям компании, то вне зависимости от экономического эффекта вопрос о принятии его к осуществлению должен быть пересмотрен
$NPV < 0$	$C_{int} = 0$	Оба показателя дают отрицательный результат	Полученные результаты свидетельствуют о неэффективности реализации проекта с экономической стороны, его потенциальной нежизнеспособности с точки зрения инновационности, надежности, соответствия целям и задачам компании	В условиях доказанной отрицательной экономической эффективности и нерезультативности реализации проекта целесообразно его отклонение (или перенос сроков реализации в случае пересмотра технологической составляющей или изменения приоритетов деятельности компании)

Коэффициент соответствия проекта целям и задачам компании рассчитывается при помощи соотношения технологического эффекта, принесенным за счет внедрения проекта и существующих целей организации относительно измеряемой метрики. Значение коэффициента цифровой зрелости определяется при помощи метода экспертных оценок или с использованием специального опросника. Актуальность технологии оценивается за счет использования существующих систем отслеживания технологических трендов. Надежность технологии, применяемой в рамках проекта, определяется на базе информации об истории ее использования.



Все разработанные метрики учитываются при расчете итогового критерия – итогового показателя. Именно с его помощью можно сравнивать разноплановые цифровые проекты, внедряемые в деятельность нефтегазовой компании. Итоговый показатель, как и вся разработанная система критериев оценки применимости цифровых проектов, призвана не заменить, а дополнить существующие экономические показатели эффективности проектов для учета особенностей подобных бизнес-инициатив.

В рамках исследования разработанная система критериев применимости была апробирована на реальном цифровом проекте нефтегазовой компании. Тестирование методики показало ее практическую применимость и позволило определить точки роста для дальнейшего развития системы критериев. Таким образом, в рамках проведенного научного исследования разработан комплексный подход к оценке применимости цифровых проектов в нефтегазовом секторе, направленный на минимизацию уровня неопределенности при принятии управленческих решений и, как следствие, максимизацию технологической и экономической эффективности реализуемых на уровне компаний цифровых проектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kuzemko C., Bradshaw M., Bridge G. et al. Covid-19 and the Politics of Sustainable Energy Transitions // *Energy Research & Social Science*. 2020. Vol. 68. № 101685. DOI: [10.1016/j.erss.2020.101685](https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101685)
2. Jinfang Tian, Longguang Yu, Rui Xue et al. Global low-carbon energy transition in the post-COVID-19 era // *Applied Energy*. 2021. Vol. 307. № 118205. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.118205](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118205)
3. Anh Tuan Hoang, Nizetić S., Olcer A.I. et al. Impacts of COVID-19 pandemic on the global energy system and the shift progress to renewable energy: Opportunities, challenges, and policy implications // *Energy Policy*. 2021. Vol. 154. № 112322. DOI: [10.1016/j.enpol.2021.112322](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112322)
4. Ilinova A., Chanysheva A. Algorithm for assessing the prospects of offshore oil and gas projects in the Arctic // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. S. 2. P. 504-509. DOI: [10.1016/j.egy.2019.11.110](https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.110)
5. Ильинова А.А., Ромашева Н.В., Стройков Г.А. Перспективы и общественные эффекты проектов секвестрации и использования углекислого газа // *Записки Горного института*. 2020. Т. 244. С. 493-502. DOI: [10.31897/PMI.2020.4.12](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.12)
6. Romasheva N., Dmitrieva D. Energy Resources Exploitation in the Russian Arctic: Challenges and Prospects for the Sustainable Development of the Ecosystem // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 24. № 8300. DOI: [10.3390/en14248300](https://doi.org/10.3390/en14248300)
7. Samylovskaya E., Makhovikov A., Lutonin A. et al. Digital Technologies in Arctic Oil and Gas Resources Extraction: Global Trends and Russian Experience // *Resources*. 2022. Vol. 11. Iss. 3. № 29. DOI: [10.3390/resources11030029](https://doi.org/10.3390/resources11030029)
8. Алексеев А.Д., Жуков В.В., Стрижнев К.В., Черевко С.А. Изучение трудноизвлекаемых и нетрадиционных объектов согласно принципу «фабрика коллектора в пласте» // *Записки Горного института*. 2017. Т. 228. С. 695-704. DOI: [10.25515/PMI.2017.6.695](https://doi.org/10.25515/PMI.2017.6.695)
9. Maizi Y., Bendavid Y., Belarbi T. Evaluation of RFID technology for real time drill pipes efficient management in harsh environments: A discrete event simulation model // *Proceedings of the International Conference on Modeling and Applied Simulation* 2018, 17-19 September 2018, Budapest, Hungary. Rende, 2018. Vol. 17. P. 83-88.
10. Hassani H., Silva E.S., Al Kaabi A.M. The role of innovation and technology in sustaining the petroleum and petrochemical industry // *Technological Forecasting and Social Change*. 2017. Vol. 119. P. 1-17. DOI: [10.1016/j.techfore.2017.03.003](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.03.003)
11. Matkovskaya Ya.S., Vechkinzova E., Petrenko Y., Steblyakova L. Problems of Innovative Development of Oil Companies: Actual State, Forecast and Directions for Overcoming the Prolonged Innovation Pause // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 4. № 837. DOI: [10.3390/en14040837](https://doi.org/10.3390/en14040837)
12. Navarro J., Sanchidrian J.A., Segarra P. et al. On the mutual relations of drill monitoring variables and the drill control system in tunneling operations // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. Vol. 72. P. 294-304. DOI: [10.1016/j.tust.2017.10.011](https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.10.011)
13. Beloglazov I.I., Petrov P.A., Bazhin V.Yu. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry // *Eurasian Mining*. 2020. № 2. P. 50-54. DOI: [10.17580/em.2020.02.12](https://doi.org/10.17580/em.2020.02.12)
14. Clemens T., Viechtbauer-Gruber M. Impact of Digitalization on the Way of Working and Skills Development in Hydrocarbon Production Forecasting and Project Decision Analysis // *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. 2020. Vol. 23. Iss. 4. P. 1358-1372. № SPE-200540-PA. DOI: [10.2118/200540-PA](https://doi.org/10.2118/200540-PA)
15. Козлова Д.В., Пугарев Д.Ю. Интеллектуальная добыча. Почему России необходимо изменить подход к государственному стимулированию отрасли // *Neftegas.RU*. 2018. № 7 (79). С. 32-39.
16. Абдрахманова Г.И., Быховский К.Б., Веселитская Н.Н. и др. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты // Доклад к XXII Апрельской международной научной конференции по проблемам развития экономики и общества, 13-30 апреля 2021, Москва, Россия. М.: Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2021. 239 с.
17. Dmitrievskiy A.N., Eremin N.A., Stolyarov V.E. Digital transformation of gas production // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 700. Iss. 1. № 012052. DOI: [10.1088/1757-899X/700/1/012052](https://doi.org/10.1088/1757-899X/700/1/012052)
18. Линник Ю.Н., Кирихин М.А. Цифровые технологии в нефтегазовом комплексе // *Вестник университета*. 2019. Т. 1. № 7. С. 37-40. DOI: [10.26425/1816-4277-2019-7-37-40](https://doi.org/10.26425/1816-4277-2019-7-37-40)
19. Kyunghwan Oh, Hyeonseog Kho, Youngjin Choi, Seogjun Lee. Determinants for Successful Digital Transformation // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 3. № 1215. DOI: [10.3390/su14031215](https://doi.org/10.3390/su14031215)



20. *Pereira C.S., Durão N., Moreira F., Veloso B.* The Importance of Digital Transformation in International Business // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 2. № 834. DOI: [10.3390/su14020834](https://doi.org/10.3390/su14020834)
21. *Litvinenko V.S.* Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector // *Natural Resources Research*. 2019. Vol. 29. Iss. 3. P. 1521-1541. DOI: [10.1007/s11053-019-09568-4](https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4)
22. *Van Looy A.* On the Synergies Between Business Process Management and Digital Innovation // *Business Process Management*. Cham: Springer, 2018. P. 359-375. DOI: [10.1007/978-3-319-98648-7_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98648-7_21)
23. *Shiqian Wang.* Shale gas exploitation: Status, problems and prospect // *Natural Gas Industry B*. 2018. Vol. 5. Iss. 1. P. 60-74. DOI: [10.1016/j.ngib.2017.12.004](https://doi.org/10.1016/j.ngib.2017.12.004)
24. *Tewari S., Dwivedi U.D.* Ensemble-based big data analytics of lithofacies for automatic development of petroleum reservoirs // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 128. P. 937-947. DOI: [10.1016/j.cie.2018.08.018](https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.08.018)
25. *Golovina E., Pasternak S., Tsiglianu P., Tselishev N.* Sustainable Management of Transboundary Groundwater Resources: Past and Future // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 21. № 12102. DOI: [10.3390/su132112102](https://doi.org/10.3390/su132112102)
26. *Уланов В.Л., Уланова Е.Ю.* Влияние внешних факторов на национальную энергетическую безопасность // *Записки Горного института*. 2019. Т. 238. С. 474-480. DOI: [10.31897/PMI.2019.4.474](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.474)
27. *Юрак В.В., Душин А.В., Мочалова Л.А.* Против устойчивого развития: сценарии будущего // *Записки Горного института*. 2020. Т. 242. С. 242-247. DOI: [10.31897/PMI.2020.2.242](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.242)
28. *Куклина Е.А.* Стратегия цифровой трансформации как инструмент реализации бизнес-стратегии компании нефтегазового сектора современной России // *Управленческое консультирование*. 2021. № 6. С. 40-53. DOI: [10.22394/1726-1139-2021-6-40-53](https://doi.org/10.22394/1726-1139-2021-6-40-53)
29. *Samoun M.H.B., Holmås H., Santamarta S. et al.* Going Digital Is Hard for Oil and Gas Companies—but the Payoff Is Worth It. URL: https://web-assets.bcg.com/img-src/BCG-Going-Digital-Is-Hard-for-Oil-and-Gas-Companies-but-the-Payoff-Is-Worth-It-Mar-2019_tcm9-215951.pdf (дата обращения 15.03.2022).
30. *Petrenko Ye., Denisov I., Metsik O.* Foresight Management of National Oil and Gas Industry Development // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 2. № 491. DOI: [10.3390/en15020491](https://doi.org/10.3390/en15020491)
31. *Kane G.C., Palmer D., Phillips A.N. et al.* Strategy, Not Technology, Drives Digital Transformation // *MIT Sloan Management Review*. 2015. Vol. 14. P. 1-25.
32. *Berg C.F., Lopez O., Berland H.* Industrial applications of digital rock technology // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017. Vol. 157. P. 131-147. DOI: [10.1016/j.petrol.2017.06.074](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.074)
33. *Grabowska S., Saniuk S.* Assessment of the Competitiveness and Effectiveness of an Open Business Model in the Industry 4.0 Environment // *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2022. Vol. 8. Iss. 1. № 57. DOI: [10.3390/joitmc8010057](https://doi.org/10.3390/joitmc8010057)
34. *Ivanova I.A., Pulyaeva V.N., Vlasenko L.V. et al.* Digitalization of organizations: Current issues, managerial challenges and socio-economic risks // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399. Iss. 3. № 033038. DOI: [10.1088/1742-6596/1399/3/033038](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/3/033038)
35. *Rafiq M., Maqbool S., Martins J.M. et al.* A Study on Balanced Scorecard and Its Impact on Sustainable Development of Renewable Energy Organizations; A Mediating Role of Political and Regulatory Institutions // *Risks*. 2021. Vol. 9. Iss. 6. № 110. DOI: [10.3390/risks9060110](https://doi.org/10.3390/risks9060110)
36. *Kaplan R.S., Norton D.P.* The Balanced Scorecard – Measures That Drive Performance // *Harvard Business Review*. 1992. № 70 (1). P. 71-79.
37. *Stalmachova K., Chinoracky R., Strenitzerova M.* Changes in Business Models Caused by Digital Transformation and the COVID-19 Pandemic and Possibilities of Their Measurement—Case Study // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 1. № 127. DOI: [10.3390/su14010127](https://doi.org/10.3390/su14010127)
38. *Chih-Chao Chung, Li-Chung Chao, Chih-Hong Chen, Shi-Jer Lou.* A Balanced Scorecard of Sustainable Management in the Taiwanese Bicycle Industry: Development of Performance Indicators and Importance Analysis // *Sustainability*. 2016. Vol. 8. Iss. 6. № 518. DOI: [10.3390/su8060518](https://doi.org/10.3390/su8060518)
39. *Hussain A., Farooq M.U., Habib M.S. et al.* COVID-19 Challenges: Can Industry 4.0 Technologies Help with Business Continuity? // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 21. № 11971. DOI: [10.3390/su132111971](https://doi.org/10.3390/su132111971)
40. *Hongfang Lu, Lijun Guo, Azimi M., Kun Huang.* Oil and Gas 4.0 era: A systematic review and outlook // *Computers in Industry*. 2019. Vol. 111. P. 68-90. DOI: [10.1016/j.compind.2019.06.007](https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.007)
41. *Vukanović Herceg I., Kuć V., Mijušković V.M., Herceg T.* Challenges and Driving Forces for Industry 4.0 Implementation // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Iss. 10. № 4208. DOI: [10.3390/su12104208](https://doi.org/10.3390/su12104208)
42. *Недосекин А.О., Рейшахрит Е.И., Козловский А.Н.* Стратегический подход к оценке экономической устойчивости объектов минерально-сырьевого комплекса России // *Записки Горного института*. 2019. Т. 237. С. 354-360. DOI: [10.31897/PMI.2019.3.354](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.3.354)
43. *Arcese G., Campagna G., Flammini S., Martucci O.* Near Field Communication: Technology and Market Trends // *Technologies*. 2014. Vol. 2. Iss. 3. P. 143-163. DOI: [10.3390/technologies2030143](https://doi.org/10.3390/technologies2030143)
44. *Muñoz-Saavedra L., Miró-Amarante L., Domínguez-Morales M.* Augmented and Virtual Reality Evolution and Future Tendency // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Iss. 1. № 322. DOI: [10.3390/app10010322](https://doi.org/10.3390/app10010322)
45. *Pashkevich M.A., Petrova T.A.* Development of an operational environmental monitoring system for hazardous industrial facilities of Gazprom Dobycha Urengoy // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1384. Iss. 1. № 012040. DOI: [10.1088/1742-6596/1384/1/012040](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1384/1/012040)
46. *Berdik D., Otoum S., Schmidt N. et al.* A Survey on Blockchain for Information Systems Management and Security // *Information Processing & Management*. 2021. Vol. 58. Iss. 1. № 102397. DOI: [10.1016/j.ipm.2020.102397](https://doi.org/10.1016/j.ipm.2020.102397)

Авторы: А.Е.Череповицын, д-р экон. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-0472-026X> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Н.А.Третьяков, аспирант, tretyakov@leadercup.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8184-7497> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.