

Издается Санкт-Петербургским горным университетом императрицы Екатерины II

С 1907 ГОДА

E-ISSN 2541-9404  
ISSN 2411-3336

# ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



ТОМ 272

№ 2 • 2025

ИНДЕКСИРУЕТСЯ  
SCOPUS (Q1)  
WEB OF SCIENCE (ESCI)

[WWW.PMI.SPMI.RU](http://WWW.PMI.SPMI.RU)



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

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

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

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

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

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

Статьи публикуются на безвозмездной основе. Перевод предоставляется автором.

---

На обложке экспонат Горного музея – трилобиты в известняке. Ленинградская область. *Asaphus kowalewskii* Lawrow отличается полным спинным панцирем и высокими стебельчатыми глазами, туловище состоит из восьми сегментов с округленными боковыми шипами. Очень длинные глазные стебельки напоминают перископы подводной лодки. Такое расположение глаз связано с образом жизни этих трилобитов – они зарывались в толщу осадков до глубины, равной длине глазных стебельков, и вели скрытный образ жизни. *Iliaenus schmidti* Nieszkowski характеризуется полным спинным панцирем овальной формы, щечными шипами и узкими серповидными глазами, туловище состоит из 10 сегментов. Эти трилобиты позволили провести детальное разделение отложений нижнего-среднего ордовика Русской платформы на 18 трилобитовых зон.

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.



### Учредитель Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

#### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

#### ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

#### ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

**С.В.Синявина**, канд. техн. наук, директор издательского дома (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

**В.Н.Бричкин**, д-р техн. наук, профессор, руководитель проекта «Наука» (Международный центр компетенций в горнотехническом образовании под эгидой ЮНЕСКО, Санкт-Петербург, Россия)

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

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

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

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

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

**А.Д.Куранов**, канд. техн. наук, директор по проектированию технологических дисциплин (ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### Разделы

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-70453 от 20.07.2017

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.02

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

© Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II, 2025

Подписано к печати 25.04.2025. Формат 60 × 84/8. Уч.-изд.л. 41.  
Тираж 300 экз. Заказ 212. 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

- Гракова О.В., Никулова Н.Ю., Симакова Ю.С.** Геохимическая характеристика кор выветривания на увале Джежимпарма и Немской возвышенности (Южный Тиман) ..... 3
- Гусев Н.И., Романова Л.Ю.** Палеопротерозойский Салтахский плутон (Анабарский щит): вещественный состав, возраст, геодинамическая обстановка формирования ..... 16
- Крылов Д.П.** Сравнительный анализ фракционирования изотопов азота и углерода при образовании алмаза на основе определения  $\beta$ -факторов ..... 40

## Геотехнология и инженерная геология

- Быковский Н.А., Кантор Е.А., Шулаев Н.С., Фанаков В.С.** Комбинированный метод переработки отработанного кислого травильного раствора производства изделий из титана ..... 51
- Вилли К. Нузраха, Хуйхо Чон, Фан Динь Куан, Рэнди Новирса, Томохиро Коморита, Ясухиро Исибаси, Дзюн Кобаяси, Кодзи Аризоно, Асен Баю Дани Нандиянто.** Загрязнение ртутью речных отложений водораздела реки Сиухунь в Индонезии: вклад кустарной мелкомасштабной добычи золота ..... 59
- Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Попов М.М.** Обоснование безопасной эксплуатации закрытого угольного склада по газовому фактору ..... 72
- Господариков А.П., Зацепин М.А., Киркин А.П.** Определение потенциала удароопасности горных пород Норильского промышленного района ..... 83
- Орехова Т.Н., Сивальнева М.Н., Фролова М.А., Строкова В.В., Бондаренко Д.О.** Влияние механической и тепловой обработки на характеристики сапонитсодержащего материала ..... 91
- Патутин А.В., Скулкин А.А., Рыбалкин Л.А., Дробчик А.Н.** Лабораторные исследования особенностей гидравлического разрыва пересекающихся скважин в неоднородном поле напряжений ..... 100
- Попов С.Н., Чернышов С.Е., Ванг Ксяопу.** Анализ трансформации напряженного состояния горных пород вблизи горизонтальной скважины при проведении кислотной обработки на основе метода численного моделирования ..... 110
- Садуакасов Д.С., Жолбасарова А.Т., Баямирова Р.У., Тогашева А.Р., Табылганов М.Т., Сарбонеева М.Д., Касанова А.Г., Гусаков В.Н., Телин А.Г.** Глушение скважин с контролем поглощения .. 119
- Шемякин С.А., Шишкин Е.А.** Определение касательной составляющей сопротивления резанию мерзлых осадочных пород по блокированной, глубокоблокированной и сотовой схемам ..... 136

## Экономика сырьевых отраслей

- Лавлинский С.М., Панин А.А., Плясунов А.В.** Государственно-частное партнерство в минерально-сырьевом комплексе РФ: как реализовать классическую модель? ..... 145

## Энергетика

- Соснина Е.Н., Асабин А.А., Бедретдинов Р.Ш., Крюков Е.В., Гусев Д.А.** Тиристорное вольтодобавочное устройство для снижения колебаний напряжения в системах электроснабжения горно-рудных предприятий ..... 159
- Токарев И.С.** Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности ..... 171
- Шановало А.А.** Методология управления развитием энергетики производственных объектов газовой отрасли ..... 181



## Геохимическая характеристика кор выветривания на увале Джежимпарма и Немской возвышенности (Южный Тиман)

О.В.Гракова✉, Н.Ю.Никулова, Ю.С.Симакова

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

**Как цитировать эту статью:** Гракова О.В., Никулова Н.Ю., Симакова Ю.С. Геохимическая характеристика кор выветривания на увале Джежимпарма и Немской возвышенности (Южный Тиман) // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16405. С. 3-15. [EDN EBLEPI](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.16405)

### Аннотация

На Южном Тимане известны многочисленные локальные разновидности кор выветривания (КВ), различающиеся по положению в разрезе, типу продуктов выветривания, субстратам и формам залегания. Целью исследований является выявление закономерностей распределения породообразующих, редких и редкоземельных элементов и состава глинистых минералов в глинистых образованиях КВ. Основная задача – охарактеризовать условия залегания и геохимические особенности, позволяющие установить генетический тип и условия формирования КВ. Приведены результаты изучения распределения петрогенных, редкоземельных, редких элементов и глинистых минералов в различных по возрасту, генетическому типу и условиям залегания КВ на увале Джежимпарма и Немской возвышенности на Южном Тимане. Установлено, что в зоне контакта фундамент – чехол на возвышенности Джежимпарма по породам позднерифейской джежимской свиты развита КВ гидрослюдисто-каолинитового типа, а ранее считавшийся КВ слой тонкозернистой породы в основании девонского разреза образован в результате механического разрушения девонских песчаников при перемещении в зоне надвига. В расположенном на Немской возвышенности карьере Вадьявож изучены и охарактеризованы образования мезозойско-кайнозойских площадной и линейной КВ по породам позднерифейской джежимской свиты. Установлено, что слюдястые алевролиты в составе алевролитопесчаной толщи джежимской свиты связаны с рифейским этапом корообразования и сложены материалом КВ, переотложенным в эпиконтинентальном бассейне.

### Ключевые слова

кора выветривания; джежимская свита; песчаники; химический состав; обломочный материал; условия осадконакопления; Южный Тиман

### Финансирование

Работа выполнена в рамках тем Государственного задания НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН: «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы», 122040600012-2; «Осадочные формации: вещество, седиментация, литогенез, геохимия, индикаторы литогенеза, реконструкция осадконакопления», 122040600013-9; «Фундаментальные проблемы минералогии и минералообразования, минералы как индикаторы петро- и рудогенеза, минералогия рудных районов и месторождений Тимано-Североуральского региона и арктических территорий», 122040600009-2.

Поступила: 11.03.2024

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 06.03.2025

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

С корами выветривания (КВ) на Тимане связаны промышленные месторождения бокситов, титановых руд, рудопроявления золота, алмазов и др. [1-3]. На Северном Урале показано, что перераспределение и накопление рудных компонентов, в частности никеля, происходило в КВ гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса [4]. С эндогенными процессами и гидротермальными преобразованиями связано обогащение циркона редкометалльными и редкоземельными элементами (РЗЭ) из гранитоидов Чукотского плутонического пояса [5] и образование РЗЭ-минералов в нижнепротерозойских метаморфических сланцах архипелага Шпицберген [6]. Древние раннерифейские КВ (вторичные кварциты) южной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита предшествовали заложению гранитов рапакиви – 1,65 млрд лет [7].



На равнинном с развитым чехлом четвертичных отложений Южном Тимане КВ палеозойской и мезозойско-кайнозойской эпох корообразования вскрыты картировочными скважинами<sup>1,2,3</sup> и фиксируются на дневной поверхности лишь в пределах немногочисленных выступов рифейского фундамента (рис.1, а), где площадь их распространения совпадает с выходами аркозовых песчаников джежимской свиты верхнего рифея [8, 9]. Отметим, что в последнее время появились данные об обнаружении в породах джежимской свиты комплекса макрофоссилий, на основании которого возраст джежимской свиты может соответствовать позднему венду [10-12]. Однако, поскольку Межведомственным стратиграфическим комитетом не внесены изменения в действующую стратиграфическую схему, в настоящей работе применяется стратиграфическое расчленение, принятое на существующих геологических картах [13, 14].

На территории Южного Тимана по данным бурения в ходе геологической съемки установлены многочисленные локальные разновидности КВ, различающиеся по положению в разрезе, типу продуктов выветривания, субстратам и формам залегания. Выделяют, например, остаточные КВ, развитые по субстрату терригенных позднерифейских и вендских отложений, для которых характерно площадное или линейное распространение, и переотложенные – по карбонатным породам ышкемесской и вапольской свит, присутствующие в составе глинисто-песчаных пород в карстовых понижениях допалеозойского рельефа и базальных горизонтах асывовожской и изьяельской свит. Мезо-кайнозойские КВ по субстрату джежимской свиты представлены как площадными (карьеры Вадьявож и Джежимский), так и линейными, связанными с позднеюрской разломной тектоникой (карьер Вадьявож). Находка в 1998 г. кристаллов алмаза в гравелито-песчаниковой толще основания девонского разреза в непосредственной близости от выходящих на дневную поверхность образований КВ в карьере Асывовож<sup>1</sup> в зоне контакта фундамент – чехол предопределила дальнейшее направление проводившихся на Южном Тимане исследований [15-18]. Образования КВ и базальная часть девонского разреза рассматривались как перспективные объекты при поисках алмазных россыпей так называемого вишерского типа [19].

За более чем двадцатилетний период, прошедший со времени проведения последних исследований, изменились технические возможности и приборная база, позволяющая провести изучение объектов, перспективных на поиски россыпных месторождений и глиняного сырья на качественно новом уровне, а в действующих карьерах созданы новые искусственные обнажения, вскрывающие образования КВ. Геохимическое изучение КВ необходимо для проведения палеогеографических реконструкций, установления истории развития и закономерностей осадконакопления слабоизученного потенциально алмазоносного района, а также выяснения перспектив глинистого сырья.

Основная задача исследования – характеристика геохимических особенностей, распределения породообразующих, редких и РЗЭ и минерального состава глинистых пород, считающихся образованиями КВ.

### Методы и материал исследований

Образцы КВ (11 шт.) и пород субстрата (4 шт.) отобраны в искусственных обнажениях карьеров Асывовож и Джежимский на увалах Джежимпарма и Вадьявож Немской возвышенности (рис.1, а). Все аналитические работы выполнялись в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Содержания породообразующих оксидов определены традиционным весовым химическим методом в лаборатории химии минерального сырья, работающей в рамках метрологических норм (Заключение № 774). Определены содержания редких и РЗЭ на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7700х. Для перевода пробы в раствор использовался метод многокислотного разложения (смесь кислот в соотношении  $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{HCl} = 1:5:2$ ) в условиях микроволнового нагрева. Разложение велось в микроволновой системе пробоподготовки Sineo MDS-10.

<sup>1</sup> Терешко В.В., Кириллин С.В., Казанцева Г.Я. и др. Групповая геологическая съемка масштаба 1:50000 на территории листов Р-40-73-В,Г; Р-40-74-В; Р-40-85-Б; Р-40-86-А. Сыктывкар, 1991.

<sup>2</sup> Кулбакова Ф.А., Шаметько В.Г., Торлопова С.М. и др. Поиски алмазных россыпей «Вишерского типа» на Южном Тимане и юго-западном Притиманье. Ухта, 2001.

<sup>3</sup> Кириллин С.В., Жарков В.А., Шумилов А.В. и др. Отчет о групповой геологической съемке масштаба 1:200000 на территории листов Р-40-XX, Р-40-XXVI (Немская площадь). Сыктывкар, 2002.



Фазовый состав пород определен при помощи рентгендифрактометрического анализа неориентированных и ориентированных препаратов, подвергнутых стандартным диагностическим обработкам, на рентгеновском дифрактометре Наоуан DX-2700ВН, излучение  $\text{CuK}\alpha$ , 40 кВ на 30 мА, интервал сканирования при  $2\theta - 2-70^\circ$ , шаг сканирования при  $2\theta - 0,05^\circ$ , скорость съемки –  $1^\circ/\text{мин}$ . Полуколичественный рентгендифракционный анализ образцов выполнен с помощью программы Profex.

### Краткое описание геологического положения

Изучаемый район расположен на юго-востоке Тиманского складчато-глыбового сооружения и является северо-восточной частью Джемимско-Ксенофонтовского мегавала, формирование которого связывают с развитием в ранней юре взбросово-надвиговых дислокаций и выдвиганием крупных блоков-чешуй [10]. Такими блоками, представляющими выступы фундамента, в которых породы выведены на поверхность по серии надвигов, являются Джемимпарминская и Вадьявожская антиклинальные структуры.

Карьеры Асывож (I на рис.1, а) и Джемимский (II на рис.1, а) расположены на увале Джемимпарма, совпадающим с Джемимпарминской антиклинальной структурой [13]. В карьере Асывож ( $61^\circ 47' 12''$  с.ш.,  $54^\circ 06' 35''$  в.д.) образования КВ установлены в зоне контакта рифейских

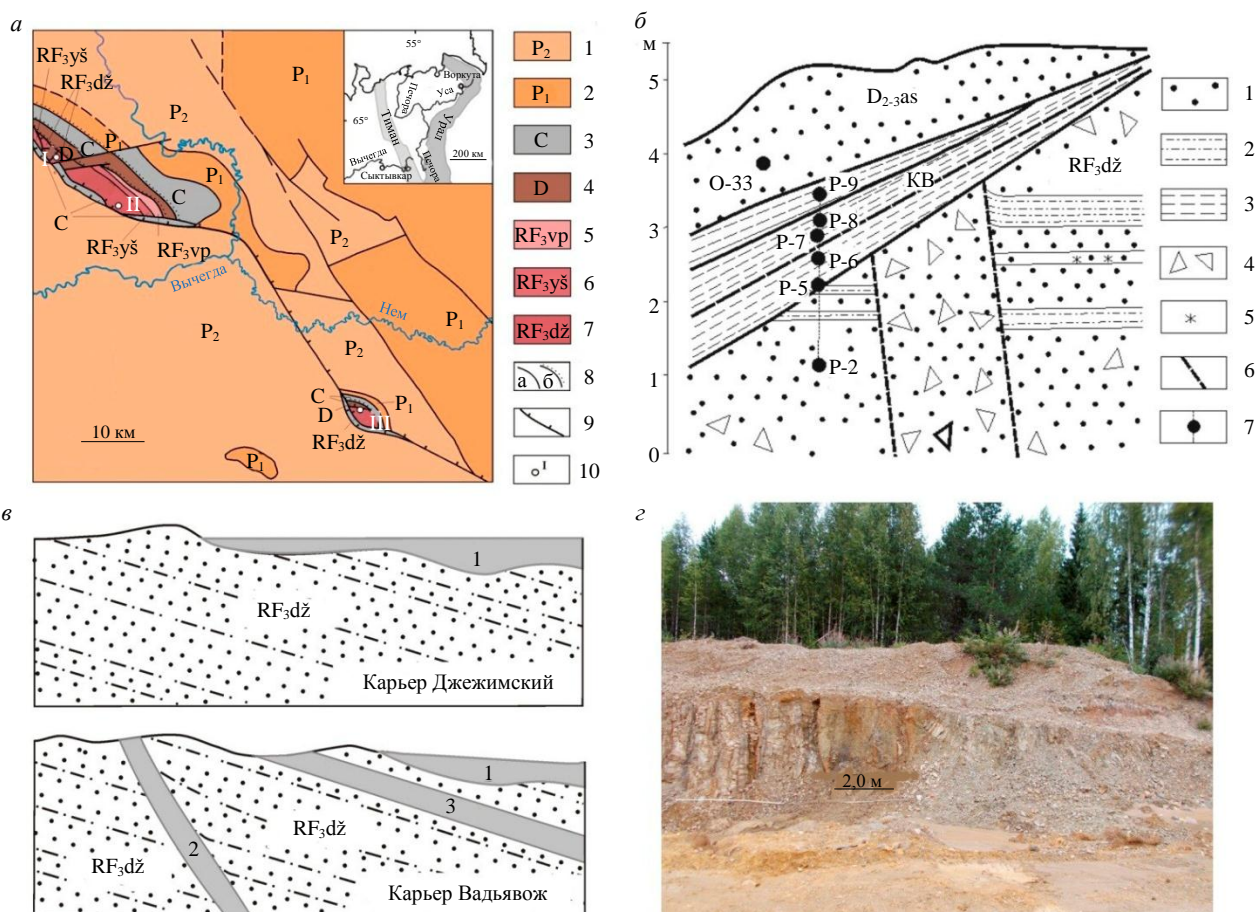


Рис.1. Схематическая геологическая карта по [6]: а – 1, 2 – пермская система (1 – нижний отдел – известняки, доломиты, алевролиты, песчаники, гипсы, 2 – верхний отдел – глины, известняки, песчаники); 3 – каменноугольная система – известняки, доломиты, глинистые известняки, глины; 4 – девонская система, средний-верхний отделы – гравелиты, песчаники, конгломераты, алевролиты; 5-7 – рифейская подзона (5 – вапольская свита – доломиты с прослоями песчаников, аргиллитов и кремней, 6 – ышкемесская свита – доломиты, алевролиты, аргиллиты, 7 – джемимская свита – песчаники, алевролиты, гравелиты); 8 – геологические границы – согласные (а), несогласные (б); 9 – надвиг; 10 – изученные разрезы в карьерах (I – Асывож, II – Джемимский, III – Вадьявож); б – схема строения разреза зоны контакта рифейских и девонских отложений в карьере Асывож: 1 – песчаник; 2 – алевропесчаник; 3 – глина; 4 – крупноглыбовые развалы; 5 – ожелезнение; 6 – разрывные нарушения; 7 – линия разреза и точки отбора пробы; в – схема взаимоотношения отложений джемимской свиты и КВ в карьерах Джемимский и Вадьявож: 1 – мезозойско-кайнозойская площадная; 2 – линейная; 3 – КВ в составе рифейского разреза; 4 – линейная КВ по породам джемимской свиты в карьере Вадьявож



и палеозойских отложений (рис. 1, а, б). Отложения позднерифейской джежимской свиты (RF<sub>3</sub>dž), представленные полевошпат-кварцевыми песчаниками с подчиненными прослоями алевролитов и гравелитов, залегают с азимутом падения 190° ЮЮЗ и углом падения 20-25°. В зоне контакта породы джежимской свиты на мощность примерно 10-12 см дезинтегрированы и состоят из мелких оскольчатых обломков. Средне-позднедевонская асывовожская свита представлена кварцевыми песчаниками с линзами конгломератов, гравелитов, алевролитов и глин (азимут падения 310° СЗ и угол 15°). Докембрийскую и палеозойскую части разреза разделяет выклинивающийся глинистый слой, залегающий на различных слоях рифейской алеврито-песчаниковой толщи и имеющий трехчленное строение (рис. 1, б). В нижней части залегают слои с максимальной мощностью около 40 см лилово-розовой глинистой тонкогоризонтальнослоистой породы (рис. 1, б, обр. Р-5, б). В основной глинистой массе встречаются зерна песчаной размерности и редкие угловатые обломки песчаников, сланцев и кислых магматических пород размером до 3 см. Выше залегают слои (0,5-0,6 м) аналогичной по структуре и текстуре розовато-серой глинистой породы (рис. 1, б, обр. Р-7 и О-33), в которой присутствуют единичные обломки перечисленных выше пород размером до 1,5 см. Непосредственно под подошвой девонских песчаников располагается выклинивающийся слой серовато-бежевой песчанисто-глинистой породы мощностью до 0,5 м (рис. 1, б, в, обр. Р-8). В основной массе этой породы неравномерно распределены крупнопесчаные зерна кварца, единичные обломки углистых сланцев и кварцевых песчаников размером до 1,5 см. Порода имеет очевидное внешнее сходство с перекрывающими песчаниками, несогласно залегают на подстилающих глинах и, по нашему мнению, могла образоваться в результате механического разрушения девонских пород. В отчете о геологической съемке<sup>4</sup> глинистые породы в этом разрезе отнесены к связанным с тектоническим нарушением линейным КВ, развитым как по рифейским, так и девонским породам. Сомнения в такой трактовке происхождения глинистых пород возникают при детальном изучении строения глинистой толщи и ее взаимоотношения с подстилающими породами (рис. 1, б), поскольку гипергенные преобразования вдоль разрывных нарушений не приводят к механическому перераспределению обломочного материала и возникновению тонкогоризонтальнослоистых отложений, залегающих на подстилающих породах несогласно.

Образования мезозойско-кайнозойской КВ остаточного площадного типа, поле развития которой, по данным геологической съемки [14], практически совпадает с выходами джежимской свиты верхнего рифея, вскрыты карьерами Джежимский и Вадьявож (рис. 1, а). В карьере Джежимский (61°42'55" с.ш., 54°21'80" в.д.) отложения джежимской свиты представлены вишнево-коричневыми полевошпат-кварцевыми песчаниками с линзами и прослоями мелкогалечных полимиктовых конгломератов и серовато-коричневых алевролитов. Кора выветривания, развитая по различным слоям джежимской свиты, выражена розовато-серой песчанистой глиной с редкими мелкими (до 1,0 см) обломками подстилающих пород (рис. 1, з). Вскрытая карьером Вадьявож (61°27'47" с.ш., 55°49'33" в.д.) позднерифейская джежимская свита сложена полевошпат-кварцевыми песчаниками с прослоями гравелитов, алевролитов и сланцев. Отложения мезозойско-кайнозойской площадной остаточной КВ, мощностью первые метры, в нижней части представляющие собой сцементированный глинистым материалом дресву исходных песчаников, алевролитов и сланцев, постепенно сменяются розовато-желтоватой глинистой массой с примесью песка и обломками (до 1,0 см) песчаников, алевролитов и сланцев (рис. 1, з). О том, что эти коры переотложению не подвергались, свидетельствуют распознающиеся иногда реликты структур субстрата<sup>5</sup>. Образования КВ перекрываются почвенно-растительным слоем.

Большая часть слоя площадной КВ в карьерах Джежимский и Вадьявож разрушена в результате проводившихся ранее геолого-поисковых работ и современной добычи бутового камня, поэтому в ненарушенном залегании образования КВ сохранились лишь в виде отдельных небольших выходов и глыб. Образования линейной КВ, обнаруженные нами в южной стенке карьера, вне зоны распространения площадной КВ, где рифейские породы перекрываются непосредственно почвенно-растительным слоем, приурочены к тектоническому нарушению в рифейских породах и представлены рыхлой оливково-коричневой дресвяно-песчано-глинистой смесью (рис. 1, в). В терригенной толще

<sup>4</sup> Терешко В.В., Кириллин С.В., Казанцева Г.Я. и др. Групповая геологическая съемка масштаба 1:50000 на территории листов Р-40-73-В,Г; Р-40-74-В; Р-40-85-Б; Р-40-86-А. Сыктывкар, 1991.

<sup>5</sup> Кириллин С.В., Жарков В.А., Шумилов А.В. и др. Отчет о групповой геологической съемке масштаба 1:200000 на территории листов Р-40-XX, Р-40-XXVI (Немская площадь). Сыктывкар, 2002.



джежимской свиты присутствуют прослои значительно отличающихся от окружающих пород серых слюдястых алевролитов (рис.1, з). Анализ полученных нами ранее данных о составе и условиях образования терригенной толщи в карьере Вадьявож [20] позволяет предположить присутствие в тонкозернистых породах значительного количества материала рифейской внутриформационной КВ.

### Геохимическая характеристика пород

Содержания главных породообразующих оксидов, литохимические модули и индикаторные соотношения, использованные для характеристики отложений и реконструкции условий их образования, приведены в табл.1. Исследованные породы характеризуются низким содержанием щелочей с заметным преобладанием калия над натрием и являются аркозами (табл.1, рис.2, а) [21]. На диаграмме  $\log(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{K}_2\text{O}) - \log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  [22] фигуративные точки пород из карьеров Асывож и Вадьявож распределены в полях аркозов и субаркозов, а точки мезозойско-кайнозойской КВ из карьеров Асывож и Джежимский попали в поле вакков (рис.2, б).

Таблица 1

Химический состав пород (мас. %), индикаторные соотношения, коэффициенты и модули

Карьер	Асывож							Вадьявож					Джежимский			
	RF	Досреднедевонский					D		RF	MZ-KZ		RF (?)		RF	MZ-KZ	
Порода	Песчаник	Переотложенная КВ					Песчаник	Тектоническая глина	Песчаник	Площадная КВ	Линейная КВ	Площадная КВ		Песчаник	Площадная КВ	
		P-2	P-5	P-6	P-7	P-8						O-33	P-9		B 9.4	B 14.4
SiO <sub>2</sub>	86,2	84,36	75,60	80,64	81,12	86,79	83,52	93,74	86,48	80,48	62,56	62,22	89,80	62,14	69,40	
TiO <sub>2</sub>	0,23	0,22	0,50	0,43	0,31	0,34	0,44	0,11	0,26	0,38	0,83	0,71	0,09	0,91	0,62	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,57	7,55	11,43	9,50	10,03	7,94	9,04	2,15	6,03	8,90	19,75	17,28	3,59	16,43	13,56	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,42	0,43	2,47	1,14	0,42	0,39	0,47	0,53	1,49	1,78	1,15	3,07	2,22	5,14	3,57	
FeO	0,56	0,24	0,24	0,24	0,24	0,14	0,24	1,52	1,34	0,85	0,62	1,68	1,24	0,91	0,88	
MnO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,06	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	
MgO	0,26	0,30	0,62	0,46	0,62	0,22	0,46	0,70	0,14	1,02	2,15	3,23	0,15	2,28	1,23	
CaO	0,12	0,40	0,40	0,02	0,20	0,26	0,40	0,12	0,23	0,47	0,35	0,47	0,23	0,64	0,70	
Na <sub>2</sub> O	0,24	0,25	0,34	0,28	0,28	0,07	0,09	0,03	0,16	1,35	0,40	0,32	0,56	1,48	2,67	
K <sub>2</sub> O	4,19	4,17	5,14	4,87	4,09	1,39	1,06	0,26	1,52	1,52	6,15	5,21	2,12	4,75	3,67	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,02	0,03	0,05	0,04	0,16	0,05	0,17	0,04	0,13	0,12	
ППП	2,03	1,91	2,97	2,11	2,59	2,41	2,41	0,87	2,04	3,01	4,94	5,43	0,67	5,22	3,61	
Сумма	100,90	99,89	99,76	99,73	99,90	99,98	98,20	100,00	99,70	100,00	99,00	99,81	100,70	100,06	100,05	
log (Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O)	-1,24	-1,22	-1,18	-1,24	-1,16	-1,30	-1,07	-0,94	-0,98	-0,05	-1,19	-1,21	-0,58	-0,51	-0,14	
log (SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,12	1,05	0,82	0,93	0,91	1,04	0,97	1,64	1,16	0,96	0,50	0,56	1,40	0,58	0,71	
log (Fe <sub>2</sub> O <sub>3общ</sub> /K <sub>2</sub> O)	-1,00	-0,99	-0,32	-0,63	-0,99	-0,55	-0,35	0,31	-0,01	0,07	-0,73	-0,23	0,02	0,03	-0,01	
F1	-3,44	-3,19	-3,53	-3,60	-3,16	-3,71	-3,47	-3,59	-3,51	-1,72	-2,51	-1,68	-3,41	-2,16	-1,12	
F2	-4,26	-3,55	-4,01	-3,93	-2,78	0,65	2,22	2,49	-1,11	2,17	-2,59	-0,63	-2,93	-0,29	-0,78	
F3	16,13	13,64	8,66	12,04	8,96	0,60	-1,23	-4,10	-1,53	-0,07	5,85	3,70	5,39	3,03	3,52	
F4	4,58	3,98	2,51	4,12	3,43	0,56	0,83	5,01	-3,19	-0,08	4,22	4,46	-5,95	2,24	-0,13	
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	17,46	16,68	15,12	17,39	14,61	19,86	11,78	8,67	9,50	1,13	15,38	16,28	3,79	3,21	1,37	
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,12	11,17	6,61	8,49	8,09	10,93	9,24	43,60	14,34	9,04	3,17	3,60	25,01	3,78	5,12	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0,08	0,09	0,15	0,12	0,12	0,09	0,11	0,02	0,07	0,11	0,32	0,28	0,04	0,26	0,20	
СIA	56,01	57,13	62,47	62,17	65,59	79,11	81,69	79,63	72,12	65,31	71,25	71,06	49,65	65,24	58,42	
СIW	91,46	86,88	89,87	95,03	92,40	93,10	91,16	88,92	89,84	74,31	93,84	92,59	72,82	82,02	70,52	



Окончание табл. 1

Карьер	Асывож						Вадьявож					Джежимский			
	RF	Досреднедевонский				D	RF	MZ-KZ		RF (?)	RF	MZ-KZ			
Порода	Песчаник	Переотложенная КВ				Песчаник	Тектоническая глина	Песчаник	Площадная КВ	Линейная КВ	Площадная КВ		Песчаник	Площадная КВ	
Элементы, модули	P-2	P-5	P-6	P-7	P-8	O-33	P-9	B 9.4	B 14.4	B 9.10	B 14.3	B 9.3	Дж 1	Дж 2	Дж 3
ICV	0,97	0,93	0,93	0,87	0,75	0,42	0,45	1,31	0,66	1,01	0,77	1,05	1,55	1,16	1,17
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,64	0,55	0,45	0,51	0,41	0,18	0,12	0,12	0,25	0,17	0,31	0,30	0,59	0,29	0,27
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	4,43	4,42	5,48	5,15	4,37	1,46	1,15	0,29	1,68	2,87	6,55	5,53	2,68	6,23	6,34
ГМ	0,09	0,10	0,19	0,14	0,14	0,10	0,12	0,05	0,11	0,15	0,36	0,37	0,08	0,38	0,27
НКМ	0,67	0,59	0,48	0,54	0,44	0,18	0,13	0,13	0,28	0,32	0,33	0,32	0,75	0,38	0,47

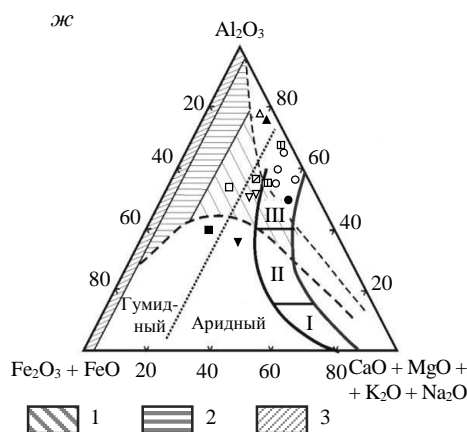
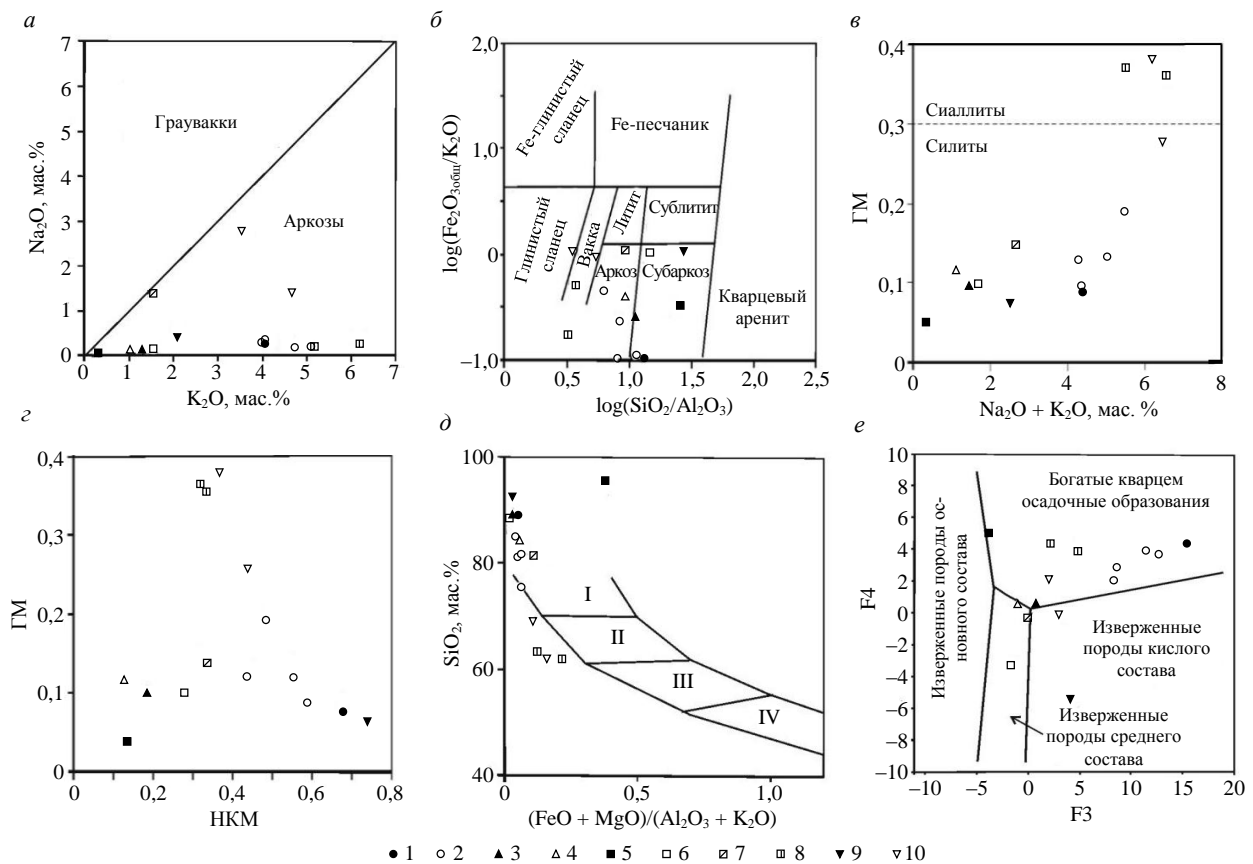


Рис. 2. Положение фигуративных точек составов пород на классификационных диаграммах: а –  $\text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O}$  [21]; 1-4 – карьер Асывож (1 – песчаник позднерифейской джежимской свиты, 2 – КВ по породам джежимской свиты, 3 – песчаник средне-позднедевонской асывожской свиты, 4 – тектоническая глина (?)); 5-7 – карьер Вадьявож (5 – песчаник позднерифейской джежимской свиты, 6 – площадная КВ по породам джежимской свиты, 7 – линейная КВ по породам джежимской свиты); 8 – древняя (рифейская) кора выветривания; 9, 10 – карьер Джежимский (9 – песчаник позднерифейской джежимской свиты, 10 – площадная КВ по породам джежимской свиты); б –  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{обш}}/\text{K}_2\text{O})$  [22]; в –  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{ГМ}$ ; г – НКМ – ГМ [23]; д –  $(\text{FeO} + \text{MgO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ : I – риолиты, граниты, II – дациты, гранодиориты, III – андезиты, диориты, IV – базальты, габбро [24]; е – F3 – F4 [25]; ж –  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  [26]: 1-3 – поля корреляции продуктов выветривания (1 – начальных, зона осветления и механической дезинтеграции, 2 – глинистых, глинистые продукты гипергенного преобразования горных пород, 3 – конечных, каолиновые и бокситовые глины, бокситы, железняки); I-III – поля корреляции магматических пород (I – ультраосновные, II – основные, III – средние и кислые)



По значениям гидролизатного модуля (ГМ) в соответствии с классификацией Я.Э.Юдовича и М.П.Кетрис [24] породы субстрата и большинство глинистых образований КВ являются силитами, а три точки, соответствующие образцам, отличающимся максимальными содержаниями элементов-гидролизатов, сиаллитами – породами, глиноземистость которых обусловлена присутствием каолинита (рис.2, в). Для большинства изученных образцов значение модуля нормированной щелочности (НКМ) превышает значение 0,3 (рис.2, з), что является критерием [23] наличия в породах неизмененного калиевого полевого шпата. Располагающиеся на классификационной диаграмме (рис.2, а, б) в поле субаркозов рифейские песчанки из карьера Вадьявож и образования линейной КВ, девонские песчаники и подстилающие их глины отличаются низкими значениями НКМ (рис.2, з).

На диаграмме  $(\text{FeO}+\text{MgO})/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$  [24], показывающей присутствие в составе отложений обломков различных типов магматических пород, большинство фигуративных точек оказались вблизи области кислых пород, а вблизи поля пород среднего состава выделяются точки мезозойско-кайнозойских площадных КВ из карьеров Вадьявож и Джежимский (рис.2, д). На факторной диаграмме F3 – F4 [25], учитывающей соотношение породообразующих оксидов, фигуративные точки, соответствующие этим образцам, также тяготеют к полю изверженных пород среднего состава (рис.2, е). Девонские песчаники и подстилающие их глины попали в поле пород, в формировании которых принимали участие изверженные породы кислого состава (рис.2, е). Расположение большинства фигуративных точек на диаграмме химизма продуктов выветривания [26] позволяет считать, что в составе большей части исследованных пород присутствует обломочный материал, унаследованный от слабо выветрелых в условиях аридного климата кислых и средних магматических пород (рис.2, ж).

Значения индекса химического выветривания (CIA) [27] для девонских песчаников и подстилающих их глин, мезозойско-кайнозойской и рифейской площадных КВ в карьере Вадьявож незначительно превышают 70 и соответствуют условиям теплого климата в области размыва (табл.1). Широкий разброс значений индекса изменения состава (ICV) [28] предполагает присутствие в породе обломочного материала различной степени зрелости [22]. Для большей части изученных образцов химический индекс выветривания (CIW) [21] в интервале 82-95 соответствует породам, содержащим материал КВ (рис.3, а). На диаграмме  $\text{K}/\text{Al} - \text{Mg}/\text{Al}$  [29] точки рифейских песчаников и КВ расположены в области пород, в которых преобладают иллит и калиевый полевой шпат; точки девонских песчаников и подстилающих их глин располагаются вблизи тренда каолинита (рис.3, б).

По данным рентгендифрактометрического анализа для изученных образцов примерное количественное содержание минералов составило, %: мусковит (иллит) ~ 6-25, хлорит ~ 1-3, смектит ~ 0-15, полевые шпаты ~ 0-10, кварц ~ 20-70. Различается состав и процентное соотношение минералов тонкодисперсной составляющей в образцах разных пород. Во всех изученных образцах постоянно присутствующим слоистым силикатом является мусковит упорядоченной политипной модификации  $2M_1$ . В образцах линейной КВ в карьере Вадьявож обнаружен также смектитоподобный минерал (смешанослойная разбухающая фаза) (рис.4, а, б). В КВ из карьера Джежимский отмечаются

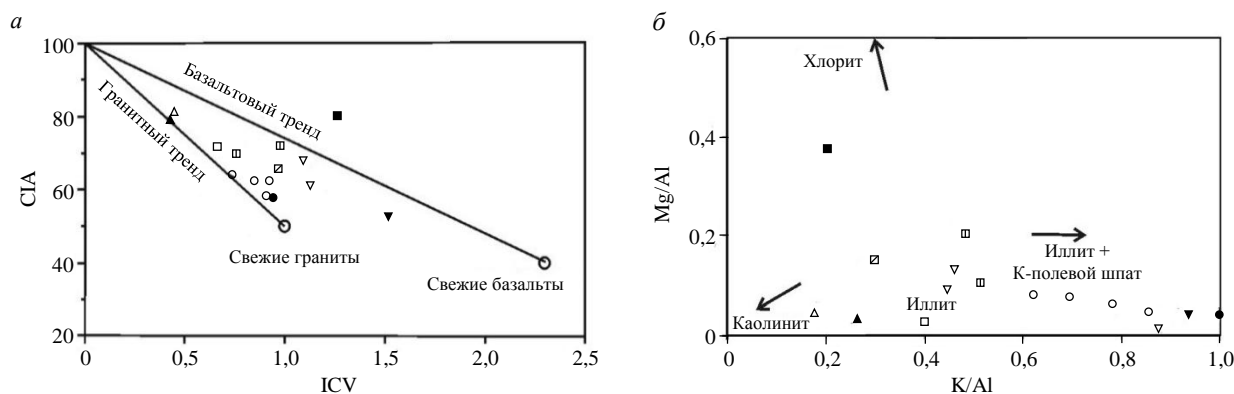


Рис.3. Положение фигуративных точек составов пород на диаграммах:  
а – ICV – CIA [30]; б – K/Al – Mg/Al [29]. Условные обозначения см. на рис.2

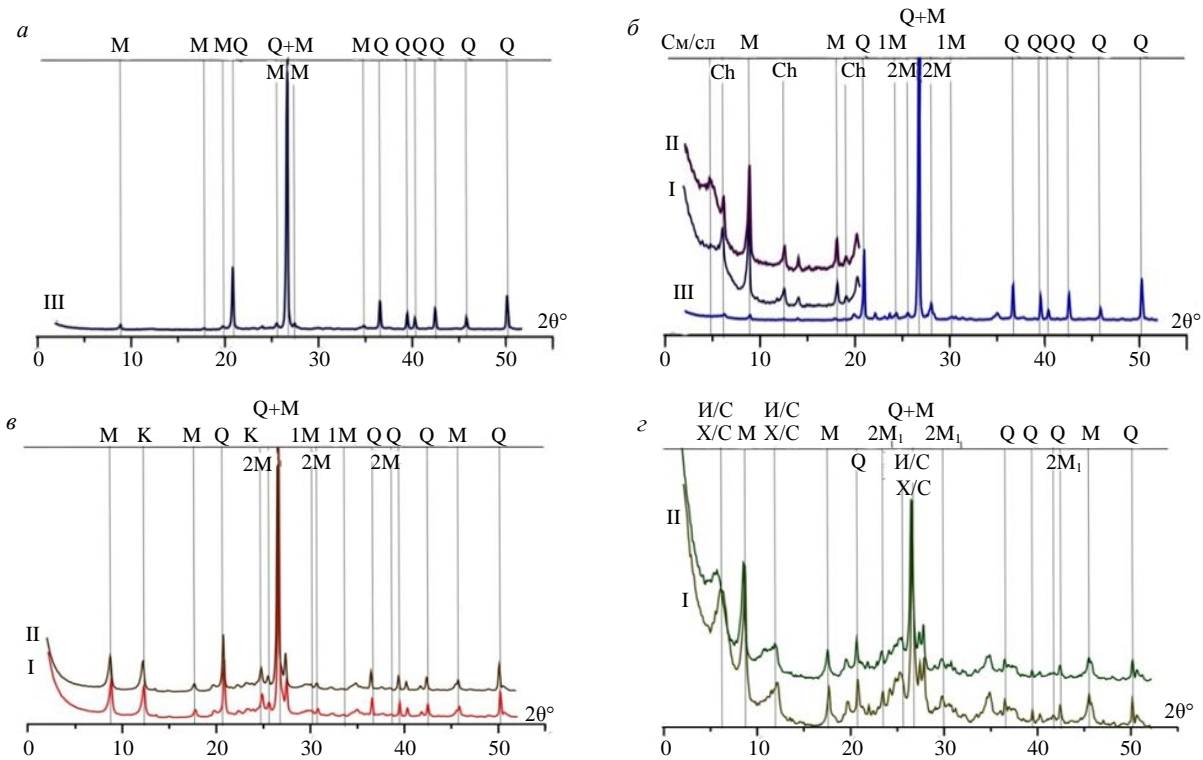


Рис.4. Дифрактограммы пород образцов В 14.4 (а), В 9.10 (б), Р-8 (в), Дж 2 (г)

I – ориентированных, воздушно-сухих; II – ориентированных, насыщенных этиленгликолем; III – неориентированных; М – мусковит (2M<sub>1</sub> и 1M – политипные модификации); Ch – хлорит; См/сл – разбухающая смектитоподобная смешанослойная фаза; И/С и X/С – неупорядоченные смешанослойные образования иллит/смектит и хлорит/смектит; К – каолинит; Q – кварц  
Номера образцов см. в табл.1

неупорядоченные разбухающие смешанослойные фазы типа иллит/смектит и хлорит/смектит (рис.4, г). Слоистые силикаты из глин, подстилающих девонские песчаники в карьере Асывож, представлены мусковитом и каолинитом (рис.4, в).

Содержания РЗЭ и редких элементов и их соотношения, использованные для построения диаграмм и сопоставления с породами рифея и девона, приведены в табл.2. Суммарные содержания РЗЭ в изученных породах отличаются незначительно и близки к постархейскому австралийскому сланцу (РААС). Наибольшие количества РЗЭ (263 г/т), в том числе  $\Sigma$  LREE (229 г/т), отмечаются в обр. В 9.3 из линейной коры выветривания в карьере Вадьявож. Графики распределения РЗЭ в песчаниках и глинистых образованиях карьера Асывож по наклону кривых и интенсивности европиевого минимума сходны с РААС (рис.5) [31]. Образцы глинистых пород из основания девонского разреза (Р-9) и девонских песчаников (О-33) отличаются от рифейских песчаников и связанных с ними глин большим содержанием легких РЗЭ (табл.2, рис.5, а) и отсутствием европиевого минимума (Eu/Eu\* 0,90 и 0,92 соответственно). Графики распределения РЗЭ в глинистых образованиях мезозойско-кайнозойской площадной КВ из карьера Джежимский отличаются пологим, по сравнению с исходными рифейскими песчаниками и РААС, наклоном в области LREE [32] и слабовыраженным европиевым минимумом (рис.5, в). Отношение Ce/Ce\* 0,8-1,0 (в обр. Дж 3 – 0,7) во всех исследованных образцах соответствует значениям, характерным для эпиконтинентальных обстановок [33, 34]. По значениям отношений La/Sc, Zr/Sc и Th/Sc изученные породы близки к палеозойским песчаникам, образованным в результате разрушения магматических пород среднего и кислого составов [35-37]. Незначительное превышение по сравнению с РААС содержания LREE в обр. Дж 2 и отсутствие европиевого минимума отражает, вероятно, увеличение в составе исходных пород обломков плагиоклазов.

Графики распределения РЗЭ в глинистых образованиях КВ в карьере Вадьявож различаются по характеру наклона кривых и значению соотношения Eu/Eu\*. Содержание РЗЭ в них выше, по сравнению с исходными рифейскими песчаниками. Максимальным содержанием РЗЭ, крутым наклоном в области LREE и интенсивным европиевым минимумом отличаются слюдястые алевролиты (обр. В 9.3), отнесенные к рифейской КВ в составе джежимской свиты (табл.2, рис.5, в).



Изученные породы близки по форме нормированным на верхнюю континентальную кору (UCC) [38] спектрам распределения элементов-примесей, содержание которых в глинистых образованиях КВ незначительно выше, чем в исходных породах (рис.6). Для глинистых образований КВ характерны пониженные по сравнению с UCC содержания Co, Ni, Cu, Sr и Cs и повышенные Zr, Mo и Pb.

Таблица 2

## Содержания РЗЭ и редких элементов, г/т

Карьер	Асывовож						Вадьявож					Джежимский			
Возраст	RF	Досреднедевонский				D		RF	MZ-KZ		RF (?)		RF	MZ-KZ	
Порода	Песчаник	Площадная КВ				Песчаник	Тектоническая глина	Песчаник	Площадная КВ	Линейная КВ	Площадная КВ		Песчаник	Площадная КВ	
Элемент	P-2	P-5	P-7	P-8	O-33	P-9	B 9.4	B 14.4	B 9.10	B14.3	B 9.3	Дж 1	Дж 2	Дж 3	
Sc	5,5	3,3	4,8	2,0	3,9	5,4	1,0	7,1	5,6	14,0	15,0	1,0	16,0	4,6	
V	21,0	21,0	29,0	9,0	16,0	43,0	6,0	45,0	39,0	170,0	119,0	10	110,0	61,0	
Cr	26,0	25,0	29,0	11,0	14,0	35,0	204,0	133,0	45,0	137,0	108,0	345,0	114,0	77,0	
Co	1,1	0,5	0,5	0,8	1,0	0,6	4,8	4,6	6,6	2,4	11,0	2,5	12,0	10,0	
Ni	3,0	2,0	2,0	4,0	6,0	1,0	29,0	20,0	17,0	30,0	42,0	31,0	74,0	51,0	
Cu	5,0	6,0	5,0	6,0	7,0	2,0	15,0	45,0	22,0	25,0	24,0	15,0	5,9	7,4	
Zn	8,0	5,0	5,0	4,0	10,0	3,0	12,0	16,0	40,0	16,0	39,0	8,3	89,0	50,0	
Ga	6,2	6,4	9,6	3,3	5,8	13,0	1,9	10,0	7,2	35,0	24,0	3,9	22,0	14,0	
Rb	61,0	62,0	81,0	23,0	37,0	114,0	7,0	61,0	28,0	66,0	93,0	51,0	158,0	41,0	
Sr	21,9	27,8	28,9	6,5	8,9	38,0	3,6	12,0	5,5	19,0	12,0	33,0	70,0	46,0	
Y	7,9	7,9	10,1	12,0	15,0	14,0	4,1	7,8	6,2	8,8	15,0	7,3	34,0	15,0	
Zr	95,0	107,0	147,0	152,0	173,0	189,0	52,0	153,0	62,0	189,0	119,0	38,0	176,0	142,0	
Nb	3,2	3,0	4,6	4,7	7,7	6,0	1,2	5,3	2,7	20,0	11,0	1,8	13,0	8,7	
Mo	0,9	0,8	0,2	0,2	0,5	0,2	21,0	2,3	0,9	0,8	0,4	4,8	0,5	0,8	
Cs	0,9	1,2	2,0	0,8	3,7	2,8	0,1	0,9	0,4	5,3	1,8	0,5	2,3	0,9	
La	17,2	19,8	14,7	11,0	17,0	24,0	4,6	22,0	4,5	12,0	51,0	13,0	45,0	12,0	
Ce	33,2	40,6	30,7	23,0	35,0	49,0	9,0	43,0	8,1	22,0	111,0	27,0	78,0	19,0	
Pr	4,1	5,0	3,8	2,9	4,2	6,4	1,1	4,9	1,2	3,7	12,0	3,5	12,0	3,6	
Nd	14,9	19,0	15,0	11,0	15,0	25,0	4,3	18,0	5,0	14,0	46,0	14,0	49,0	14,0	
Sm	2,7	3,6	3,0	2,1	2,9	4,8	0,8	3,1	1,3	3,1	8,0	2,5	9,8	3,0	
Eu	0,8	1,0	1,0	0,5	0,7	1,5	0,2	0,8	0,3	0,8	1,4	0,9	2,7	12,0	
Gd	3,0	3,9	3,9	2,6	3,5	5,1	1,0	3,6	1,4	3,2	8,4	2,6	10,0	3,3	
Tb	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,1	0,4	0,2	0,5	0,9	0,3	1,3	0,5	
Dy	1,7	1,9	2,1	2,0	2,5	3,0	0,8	1,7	1,2	3,1	3,7	1,4	6,5	2,7	
Ho	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,2	0,3	0,2	0,6	0,6	0,3	1,3	0,6	
Er	1,0	1,0	1,3	1,3	1,6	1,8	0,5	0,9	0,7	1,8	2,2	0,1	3,7	1,6	
Tm	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0,5	0,2	
Yb	1,0	0,9	1,3	1,3	1,5	1,1	0,4	1,1	0,6	1,8	1,9	0,7	3,1	1,5	
Lu	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	1,0	0,3	0,3	0,1	0,5	0,2	
Hf	2,9	3,1	4,4	4,2	5,0	5,8	1,4	4,3	1,6	5,3	3,4	1,0	4,9	3,8	
W	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,8	0,5	2,0	0,8	1,6	1,0	0,6	
Pb	31,5	130,3	13,8	12,0	23,0	19,0	26,0	51,0	21,0	239,0	70,0	8,3	8,4	3,7	
Th	4,9	6,4	5,5	3,7	5,0	8,1	1,7	8,3	3,6	5,8	9,9	2,5	11,0	3,2	
U	0,8	1,0	1,1	1,0	1,4	1,5	0,6	2,5	0,7	3,4	3,7	0,7	3,8	0,8	
Eu/Eu*	0,9	0,8	0,9	0,7	0,7	0,9	0,6	0,8	0,8	0,7	0,5	1,1	0,8	1,2	
Ce/Ce*	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	0,8	1,1	0,9	0,8	0,7	
Σ LREE	73,0	89,0	68,0	51,0	75,0	111,0	20,0	92,0	33,0	56,0	229,0	61,0	197,0	53,0	
Σ REE	89,0	106,0	88,0	71,0	101,0	138,0	27,0	108,0	53,0	76,0	263,0	75,0	257,0	78,0	

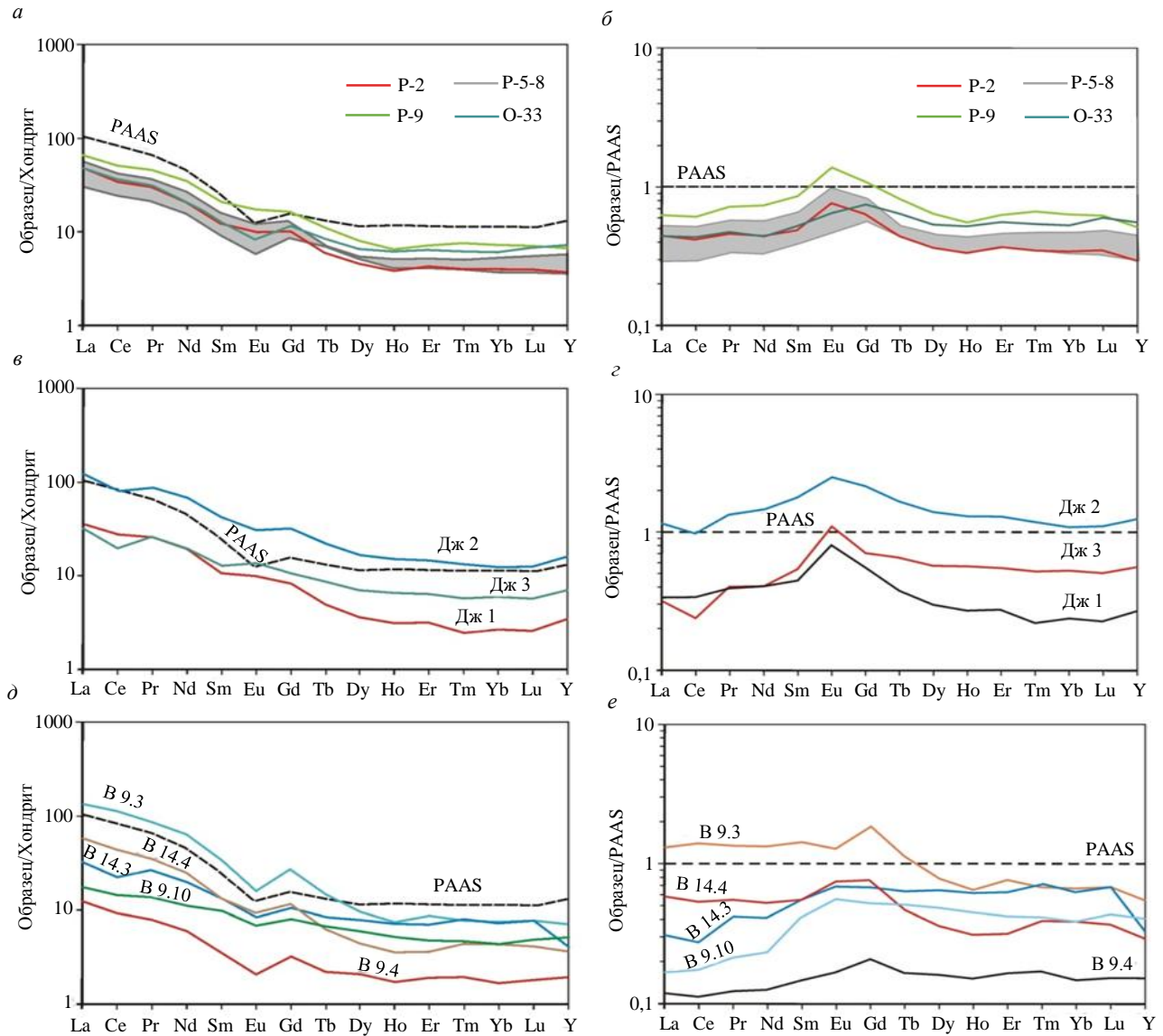


Рис.5. Нормированные спектры распределения содержаний РЗЭ: а, в, д – на хондрит [32]; б, г, е – на PAAS [31]

### Обсуждение результатов и выводы

Изученные разновидности КВ по породам рифейского возраста незначительно различаются по соотношению породообразующих элементов, содержанию и составу слюдястых минералов и диагностируются как породы зоны осветления и механической дезинтеграции. Фигуративные точки песчаников и глинистых образований по соотношению  $K_2O - Na_2O$  [22], являющиеся арками на диаграмме  $\log(Fe_2O_{3\text{общ}}/K_2O) - \log(SiO_2/Al_2O_3)$  (см. рис.2, б), расположены в поле субаркозов и вакков, в которое попали образцы КВ, отличающиеся наибольшим содержанием слюд. Диаграммы  $(Na_2O+K_2O) - GM$  и НКМ – ГМ [23] демонстрируют увеличение щелочности (общей и нормированной) в образцах КВ по рифейским породам и уменьшение этих параметров для глинистых образований в основании девонской толщи. Девонские песчаники и глины отличаются и максимальными значениями индексов выветривания CIA и CIW [21, 27]. Значения индекса CIW в девонских песчаниках и подстилающих их глинистых породах (93 и 91 соответственно) характеризуют их как образования КВ. Присутствие корового материала в породах средне-верхнедевонской асывожской свиты отмечалось всеми предшественниками при проведении геологосъемочных и исследовательских работ [13, 14] и явилось аргументом для поисков россыпных алмазов<sup>6</sup>. Высокие значения CIW (94 и 93) отмечаются также в алевритах джежимской свиты, что является

<sup>6</sup> Терешко В.В., Кириллин С.В., Казанцева Г.Я. и др. Групповая геологическая съемка масштаба 1:50000 на территории листов Р-40-73-В,Г; Р-40-74-В; Р-40-85-Б; Р-40-86-А. Сыктывкар, 1991.

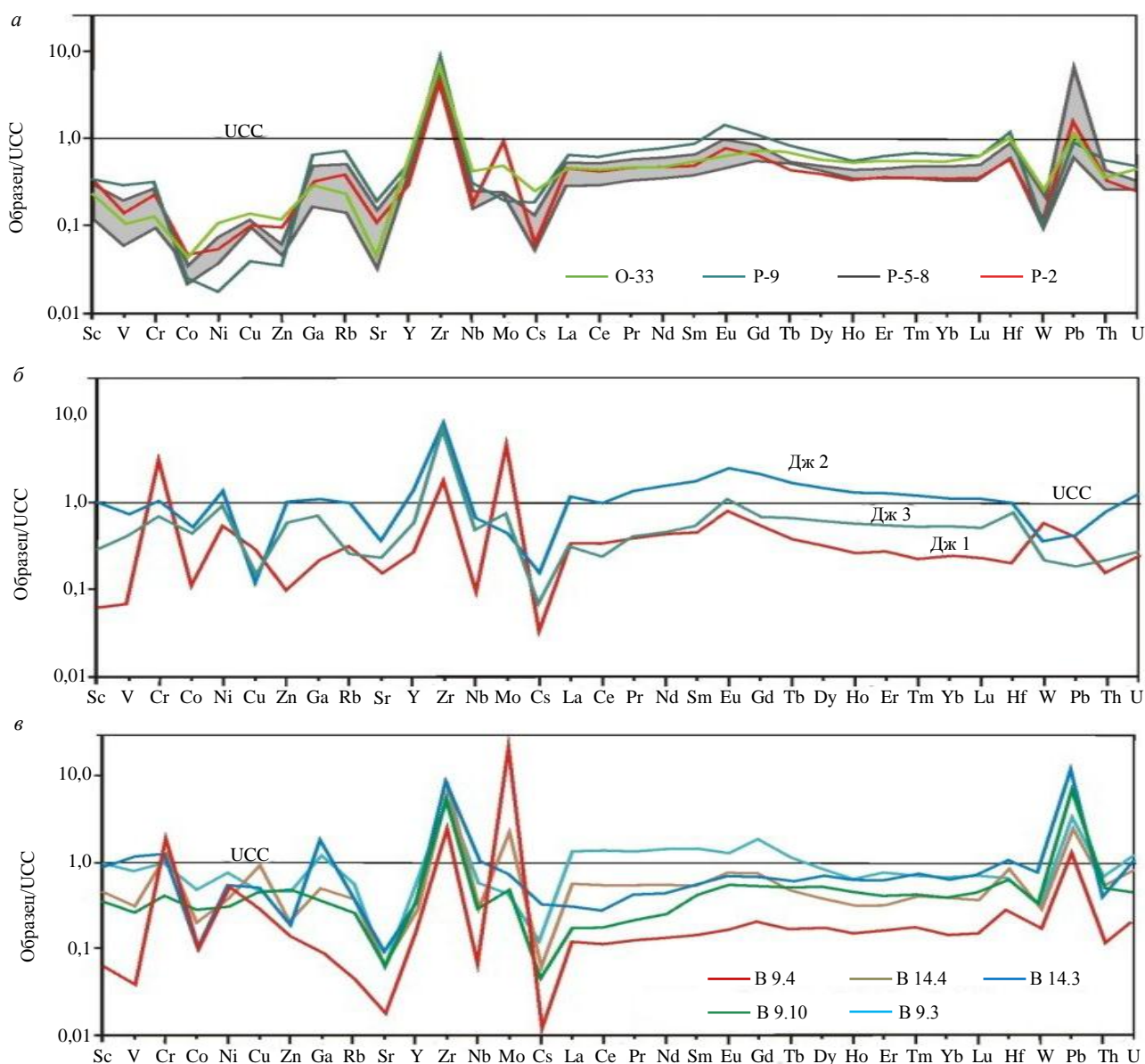


Рис.6. Нормированные на UCC [37] содержания элементов-примесей в исходных песчаниках и глинистых породах

подтверждением нашего предположения об их связи с КВ. Рифейские песчаники и связанные с ними глинистые образования КВ из карьера Асывож содержат заметную долю полевых шпатов и калиевых слюд, что, по данным статьи Я.Э.Юдовича и соавторов (1991 г.), характерно для аридных КВ, широко развитых в отложениях рифея.

Состав и соотношение глинистых минералов разновозрастных КВ различается. Появление неупорядоченных разбухающих смешанослойных образований (иллит/сметит, хлорит/сметит) в образцах из карьера Вадьявож свидетельствует о преобразовании исходных пород в КВ. В образцах мезозойско-кайнозойских КВ обнаружена смешанослойная разбухающая фаза, содержание которой может достигать 15 %. В них, помимо модификации 2M<sub>1</sub>, присутствует слабоупорядоченный мусковитовый политип 1M, появление которого является диагностическим признаком процессов корообразования. Фазовый состав слоистых силикатов коры выветривания карьера Асывож представлен только мусковитом и каолинитом.

В карьере Асывож содержание РЗЭ в рифейских песчаниках и глинистых образованиях КВ отличаются незначительно и близки к PAAS, а особенностью девонских песчаников и подстилающих их глин является отсутствие европиевого минимума. В карьере Вадьявож максимальным содержанием РЗЭ, крутым наклоном в области LREE и интенсивным европиевым минимумом отличаются слюдястые алевролиты древней КВ в составе джежимской свиты (см. табл.2, рис.5, в).



В глинах мезозойско-кайнозойской КВ по рифейским песчаникам сохраняются унаследованные от них низкие по сравнению с УСС содержания Co, Ni, Cu, Sr и Cs и повышенные Zr, Mo и Pb.

Отметим, что геологами производственных организаций при проведении геологосъемочных и поисковых работ отложения джежимской свиты и развитые по ним коры выветривания рассматривались в качестве потенциального промежуточного коллектора россыпных алмазов. Особенности распределения порообразующих оксидов и РЗЭ в изученных нами разновидностях кор выветривания по рифейским породам и в самих рифейских псаммитах не обнаруживают признаков присутствия продуктов разрушения кимберлитов [39, 40]. Наши исследования подтвердили правильность идентификации алевролитов в составе джежимской свиты в карьере Вадьявож как пород, образованных в результате переотложения измененного в коре выветривания материала рифейских терригенных пород.

Петрохимические характеристики тонкозернистой породы из основания девонского разреза и залегающих выше песчаников практически совпадают. Поскольку присутствие материала коры выветривания характерно для всех пород асывожской свиты, в том числе залегающих там, где при наличии тектонического контакта глинистый прослой в основании толщи отсутствует, мы считаем, что образование глинистого слоя обусловлено механическим истиранием исходных песчаников.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пыстин А.М., Глухов Ю.В., Бушенев А.А. Новая находка алмаза и перспективы коренной алмазоносности Четлаского поднятия (Средний Тиман) // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 842-855.
2. Красоткина А.О., Скублов С.Г., Кузнецов А.Б. и др. Первые данные о возрасте (U–Pb, SHRIMP-II) и составе циркона из уникального нефтетитанового месторождения Ярегское, Южный Тиман // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 495. № 2. С. 9-17. DOI: [10.31857/S2686739720120063](https://doi.org/10.31857/S2686739720120063)
3. Скублов С.Г., Макеев А.Б., Красоткина А.О. и др. Изотопно-геохимические особенности циркона из пижемского титанового месторождения (Средний Тиман) как отражение гидротермальных процессов // Геохимия. 2022. Т. 67. № 9. С. 807-829. DOI: [10.31857/S0016752522090060](https://doi.org/10.31857/S0016752522090060)
4. Илалова Р.К., Дурягина А.М., Агеев А.С. Последовательность минералообразования и процессы, происходящие в коре выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса (Северный Урал) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 7. С. 13-26. DOI: [10.25018/0236-1493-2020-7-0-13-26](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-7-0-13-26)
5. Alekseev V.I., Alekseev I.V. Zircon as a Mineral Indicating the Stage of Granitoid Magmatism at Northern Chukotka, Russia // Geosciences. 2020. Vol. 10. Iss. 5. № 194. DOI: [10.3390/geosciences10050194](https://doi.org/10.3390/geosciences10050194)
6. Акбарпуран Хайяти С.А., Гульбин Ю.Л., Сироткин А.Н., Гембицкая И.М. Эволюция состава акцессорных минералов REE и Ti в метаморфических сланцах серии Атомфелла, Западный Нью Фрисланд, Шпицберген и ее петрогенетическое значение // Записки Российского минералогического общества. 2020. Т. 149. № 5. С. 1-28. DOI: [10.31857/S0869605520050020](https://doi.org/10.31857/S0869605520050020)
7. Терехов Е.Н., Макеев А.Б., Скублов С.Г. и др. Кварцевые порфиры внешних островов Финского залива – вулканические комагматы гранитов рапакиви // Вулканология и сейсмология. 2023. № 6. С. 101-121. DOI: [10.31857/S020303062370030X](https://doi.org/10.31857/S020303062370030X)
8. Кузнецов Н.Б., Натанов Л.М., Белоусова Е.А. и др. Первые результаты U/Pb-датирования и изотопно-геохимического изучения детритных цирконов из позднедокембрийских песчаников Южного Тимана (увал Джежим-Парма) // Доклады Академии наук. 2010. Т. 435. № 6. С. 798-805.
9. Латышева И.В., Кузнецов Н.Б., Шаццлло А.В. и др. U-Pb возраст зерен детритового циркона из обломочных пород джежимской свиты (верхний докембрий Южного Тимана) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2022. Вып. 20. С. 166-169.
10. Колесников А.В., Латышева И.В., Шаццлло А.В. и др. Биота эдиакарского типа в верхнем докембрии Тиманского кряжа (возвышенность Джежим-Парма, Республика Коми) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510. № 1. С. 61-65. DOI: [10.31857/S2686739722602964](https://doi.org/10.31857/S2686739722602964)
11. Колесников А.В., Латышева И.В., Шаццлло А.В. и др. Открытие биоты эдиакарского типа на Южном Тимане // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий: Сборник статей X Всероссийской молодежной конференции. М.: Перо, 2022. С. 87-88.
12. Kolesnikov A.V. Stratigraphic correlation potential of the Ediacaran palaeopascichnids // Estudios Geológicos. 2019. Vol. 75. № 2. № e102. DOI: [10.3989/egool.43588.557](https://doi.org/10.3989/egool.43588.557)
13. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Р-40 – Североуральск. Объяснительная записка. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2005. 332 с.
14. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Тиманская. Лист Р-40-XXVI (Канавы). Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГБУ ВСЕГЕИ, 2018. 105 с.
15. Гракова О.В. Сравнительная характеристика и условия образования девонских алмазодержащих отложений Южного и Среднего Тимана: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2014. 19 с.
16. Гракова О.В., Уляшева Н.С. Петрографический состав и литохимические особенности алмазодержащих отложений асывожской свиты (D<sub>2-3</sub>AS) Южного Тимана // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 12 (252). С. 16-23. DOI: [10.19110/2221-1381-2015-12-16-23](https://doi.org/10.19110/2221-1381-2015-12-16-23)



17. *Макеев А.Б., Рыбальченко А.Я., Дудар В.А., Шаметко В.Г.* Новые перспективы алмазоносности Тимана // Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России. Новые результаты и новые перспективы: Материалы XIII Геологического съезда Республики Коми. Сыктывкар, 1999. Т. IV. С. 63-66.
18. *Цхадая Н.Д., Кобрунов А.И., Шилов Л.П. и др.* Тиманский кряж. В 2 томах. Том 2. Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2010. 437 с.
19. *Рыбальченко А.Я., Рыбальченко Т.М., Силаев В.И.* Теоретические основы прогнозирования и поисков коренных месторождений алмазов туффизитового типа // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2011. Вып. 1 (5). С. 54-66.
20. *Никулова Н.Ю.* Вещественный состав и особенности формирования метасадочных пород фундамента Вадьявожского выступа (Немская возвышенность, Южный Тиман) // Региональная геология и металлогения. 2017. № 69. С. 23-32.
21. *Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р.* Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 535 с.
22. *Herron M.M.* Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // Journal of Sedimentary Research. 1988. Vol. 58. № 5. P. 820-829. DOI: [10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D](https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D)
23. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Основы литохимии. СПб: Наука, 2000. 479 с.
24. *Kusunoki T., Musashino M.* Comparison of the Middle Jurassic to Earliest Cretaceous sandstones from the Japanese Islands and South Sikhote-Alin // Earth Science. 2001. Vol. 55. Iss. 5. P. 293-306. DOI: [10.15080/agcchikyukagaku.55.5\\_293](https://doi.org/10.15080/agcchikyukagaku.55.5_293)
25. *Roser B.P., Korsch R.J.* Determination of Tectonic Setting of Sandstone-Mudstone Suites Using SiO<sub>2</sub> Content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O Ratio // The Journal of Geology. 1986. Vol. 94. № 5. P. 635-650.
26. *Ерофеев В.С., Цеховский Ю.Г.* Парагенетические ассоциации континентальных отложений (семейство аридных парагенезов. Эволюционная периодичность). М.: Наука, 1983. 192 с.
27. *Nesbitt H.W., Young G.M.* Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. Vol. 299. № 5885. P. 715-717. DOI: [10.1038/299715a0](https://doi.org/10.1038/299715a0)
28. *Cox R., Lowe D.R.* A conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover // Journal of Sedimentary Research. 1995. Vol. 65. № 1a. P. 1-12. DOI: [10.1306/D4268009-2B26-11D7-8648000102C1865D](https://doi.org/10.1306/D4268009-2B26-11D7-8648000102C1865D)
29. *Turgeon S., Brumsack H.-J.* Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian–Turonian Boundary Event (Cretaceous) in the Umbria–Marche Basin of central Italy // Chemical Geology. 2006. Vol. 234. Iss. 3-4. P. 321-339. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2006.05.008](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.05.008)
30. *Yong Il Lee.* Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic–early Mesozoic mudrocks of the Pyeongan Super-group, Korea // Sedimentary Geology. 2002. Vol. 149. Iss. 4. P. 219-235. DOI: [10.1016/S0037-0738\(01\)00174-9](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00174-9)
31. *Мигдисов А.А., Балаиов Ю.А., Шаров И.В. и др.* Распространенность редкоземельных элементов в главных литологических типах пород осадочного чехла Русской платформы // Геохимия. 1994. № 6. С. 789-803.
32. *Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.* Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
33. *Murray R.W., Buchholtz Ten Brink M.R., Gerlach D.C. et al.* Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterey Group, California: Assessing REE sources to fine-grained marine sediments // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1991. Vol. 55. Iss. 7. P. 1875-1895. DOI: [10.1016/0016-7037\(91\)90030-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90030-9)
34. *Шатров В.А., Войцеховский Г.В.* Применение лантаноидов для реконструкций обстановок осадкообразования в фанерозое и протерозое (на примере разрезов чехла и фундамента Восточно-Европейской платформы) // Геохимия. 2009. № 8. С. 805-824.
35. *Cullers R.L.* Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // Chemical Geology. 2002. Vol. 191. Iss. 4. P. 305-327. DOI: [10.1016/S0009-2541\(02\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X)
36. *McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N.* Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics // Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Geological Society of America, 1993. Special Paper 284. P. 21-40. DOI: [10.1130/SPE284-p21](https://doi.org/10.1130/SPE284-p21)
37. *Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Мизенс Г.А. и др.* Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 2. Лито- и изотопно-геохимические подходы и методы // Литосфера. 2020. Т. 20. № 1. С. 40-62. DOI: [10.24930/1681-9004-2020-20-1-40-62](https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-1-40-62)
38. *Taylor S.R., McLennan S.M.* The geochemical evolution of the continental crust // Reviews of Geophysics. 1995. Vol. 33. Iss. 2. P. 241-265. DOI: [10.1029/95RG00262](https://doi.org/10.1029/95RG00262)
39. *Гусев Н.И., Антонов А.В.* Кимберлиты участка Сербьян (Анабарский щит) – продукт расплава, обогащенного натрием, хлором, карбонатом // Региональная геология и металлогения. 2020. № 81. С. 105-118.
40. *Опарин Н.А., Олейников О.Б.* Геологическое строение и вещественный состав кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022. Т. 27. № 4. С. 486-498.

**Авторы:** Оксана Васильевна Гракова, канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник, [ovgrakova@geo.komisc.ru](mailto:ovgrakova@geo.komisc.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5917-9218> (Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия), Наталья Юрьевна Никулова, д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1511-6124> (Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия), Юлия Станиславовна Симакова, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0409-4019> (Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Палеопротерозойский Салтахский плутон (Анабарский щит): вещественный состав, возраст, геодинамическая обстановка формирования

Н.И.Гусев<sup>1,2</sup>, Л.Ю.Романова<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

**Как цитировать эту статью:** Гусев Н.И., Романова Л.Ю. Палеопротерозойский Салтахский плутон (Анабарский щит): вещественный состав, возраст, геодинамическая обстановка формирования // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16344. С. 16-39. [EDN SRITGO](https://doi.org/10.26907/2411-3336.2025.16344)

### Аннотация

Салтахский массив расположен в северной части Анабарского щита в Салтахской зоне смятия. Массив сложен двупироксеновыми кристаллосланцами и плагиогнейсами гранулитовой фации метаморфизма, по химическому составу соответствующими дифференцированной серии пород от габбро до тоналитов с многочисленными жилами и телами аляскитовых гнейсогранитов. Большой частью породы калиевые ( $K_2O/Na_2O > 0,50$ ), магнезиальные ( $mg\# 50-70$ ), в мегагабброидах нормативный оливин составляет 6-9%, низкотитанистые ( $TiO_2 0,35-1,31$  мас.%) с низким содержанием  $TiO_2$  в клино- и ортопироксене. Породы характеризуются хорошо выраженными отрицательными аномалиями Ti, Nb, Ta, P, свойственными субдукционному магматизму. Двупироксеновые гнейсы отличаются высокими значениями  $St/Y = 67,6-88$ ,  $(La/Yb)_N = 24,8-25,6$ . По индикаторным отношениям Nb/La, La/Yb, Th/Nb, Ce/Yb породы массива относятся к шошонитовой серии. Все породы характеризуются положительными величинами  $\epsilon_{Nd}(T) = 1,9-4,1$ ,  $\epsilon_{Sr}(T) = 0,77-17,8$ , указывающими на мантийный источник магмы, и величиной  $T_{(Nd)DM} = 2,20-2,26$  млрд лет. По данным U-Pb датирования циркона (SHRIMP II) протолиты меланократовых пород массива имеют возраст 2100-2086 млн лет, двупироксеновых плагиогнейсов тоналитового состава –  $2025 \pm 7$  млн лет. Возраст аляскитовых гнейсогранитов  $1969 \pm 7$  млн лет. Изучение редкоэлементного состава циркона показало повсеместную обогащенность LREE. Причинами высокого содержания LREE являются как вторичные изменения циркона, так и шошонитовый характер расплава, высокотемпературные условия кристаллизации и аномальный флюидный режим. Геодинамическая обстановка формирования Салтахского массива соответствовала периконтинентальной магматической дуге. Формирование аляскитовых гнейсогранитов является следствием анатексиса в связи с более поздними коллизионными процессами. Магматические породы Салтахского массива по возрасту синхронны расположенным южнее ранее изученным магматическим образованиям Хапчанского участка (толеитовые метадиориты  $2095 \pm 10$  млн лет, известково-щелочные метатоналиты  $2030 \pm 17$  млн лет) и интерпретируются нами как часть метаморфизованного ювенильного палеопротерозойского надсубдукционного комплекса.

### Ключевые слова

Анабарский щит; Салтахский массив; гранулиты; U-Pb метод; геохронология

### Финансирование

Исследования выполнены в рамках проекта Российского научного фонда № 23-27-00098.

Поступила: 10.11.2023

Принята: 02.05.2024

Онлайн: 26.08.2024

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Сибирский кратон является древней платформой с раннедокембрийским глубокометаморфизованным фундаментом, расположенной в северной части Евразийского континента. В северо-восточной части Сибирского кратона выступом фундамента является Анабарский щит, сложенный гранулитовыми террейнами. В восточной части Анабарского щита проходит граница двух докембрийских провинций фундамента: архейской Анабарской и палеопротерозойской Оленекской, представленной здесь Хапчанским складчатым поясом. В пределах Попигайского террейна Оленекской провинции распространен салтахский габбро-диорит-тоналитовый комплекс, массив которого находится в северной части Салтахской зоны смятия.

Салтахская зона смятия прослеживается на северо-востоке Анабарского щита через верховья рек Старая, Попигай и правобережье р. Налим-Рассоха (рис.1) [1]. Видимая протяженность зоны порядка 130 км, на севере и юге она скрывается под рифейскими песчаниками. В южной части ширина зоны 1-2 км, на север увеличивается до 17-20 км [2].

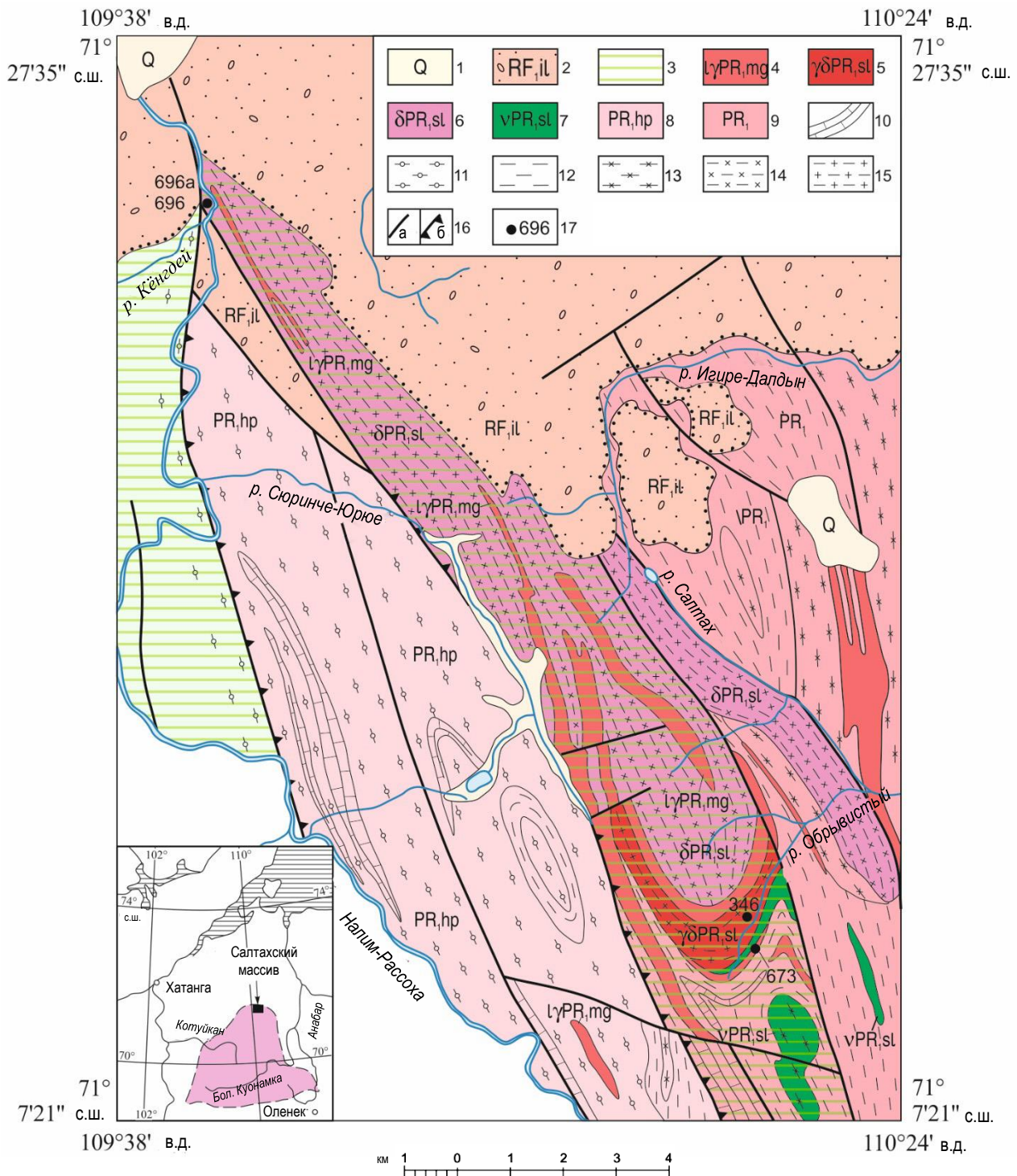


Рис. 1. Геологическая карта района Салтахского массива. Составлена по материалам Госгеолкарты-200 (А.И.Трухалев и др., 1972, неопубликованные данные) с уточнениями и дополнениями

1 – четвертичные отложения (Q); 2 – красноцветные песчаники и гравелиты ильинской свиты (RF<sub>il</sub>); 3 – катаклазированные и диафортированные гранулиты зон смятия; 4 – маганский аляскит-лейкогранит-мигматитовый комплекс (lγPR<sub>1</sub>,mg); 5–7 – салтахский комплекс габбро-диорит-тоналитовый (v, δ, γδ PR<sub>1</sub>sl); 5 – двупироксеновые плагиогнейсы (метатоналиты), 6 – двупироксеновые гнейсы (метадиориты), 7 – двупироксеновые кристаллосланцы (метагабброиды); 8 – халчанская серия (PR<sub>hp</sub>): гранатые, биотит-гранатые, гранат-пироксеновые и силлиманит-гранатые парагнейсы, силикатные мраморы, карбонатно-силикатные и пироксен-скаполитовые породы; 9 – палеопротерозойские нерасчлененные образования (PR<sub>1</sub>): ортопироксеновые и двупироксеновые гнейсы и плагиогнейсы, мезократовые и мафитовые кристаллосланцы; 10 – силикатные мраморы, карбонатно-силикатные и пироксен-скаполитовые породы; 11 – гранатые, гиперстен-гранатые гнейсы, плагиогнейсы и их разности с биотитом и графитом; 12 – гиперстенные, двупироксеновые и амфибол-пироксеновые плагиогнейсы; 13 – клинопироксен-плагиоклазовые, двупироксен-плагиоклазовые и амфибол-пироксен-плагиоклазовые кристаллические сланцы; 14 – мезократовые ортогнейсы и плагиокристаллосланцы; 15 – двупироксеновые плагиогнейсы; 16 – границы: а – крутопадающие разломы, б – надвиги; 17 – места отбора и номера проб на изотопные анализы



Салтахский комплекс объединяет два крупных массива: Салтахский (размер вместе с северо-восточным сателитом  $10 \times 24$  км) и Улханский ( $2 \times 20$  км), а также более 10 мелких линзовидных интрузивов метагабброноритов, выделенных в 1971-1972 гг. при составлении Гостгеолкарты-200 (А.И.Трухалев и др., 1972, неопубликованные данные). Ареал распространения интрузивов салтахского комплекса вытянут в северо-западном направлении на 100 км при ширине на севере 10 км, на юге – 20 км. Обнажения метаинтрузивных пород отличаются более массивным сложением, но границы массивов весьма условные, так как породы подверглись гранулитовому метаморфизму, переходы к вмещающим гнейсам и сланцам обычно постепенные, вдоль контактов часто развиты зоны катаклаза и милонитизации. Углы падения полосчатости и расслоенности в Салтахском массиве составляют  $40-60^\circ$  и направлены от центра массива к периферии [2].

Породы массива претерпели метаморфизм гранулитовой фации вместе с вмещающими породами. Подавляющая часть пород содержит гиперстен с антипертитовым полевым шпатом. Переходы от вмещающих интенсивно гранитизированных плагиогнейсов и кристаллосланцев к породам массива являются постепенными [3]. По западной границе плутона проходит Салтахская зона диафтореза с полиметаморфическими породами амфиболитовой фации, мигматитами и аляскитами [3]. В массиве широко проявлена мигматизация, он пронизан большим числом линзовидных тел биотитовых и аляскитовых гранитов разной мощности (до 0,5-0,9 км) и протяженностью от нескольких метров до десятков километров. Тела аляскитовых гранитов подчиняются зонам катаклаза, но сами не катаклазированы и конформны западной и южной границам массива. Нами изучены два участка Салтахского массива: один на севере ниже устья р. Кёнгдай, другой в южной части массива по бортам р. Обрывистый (рис.1). На севере массива породы более катаклазированы, в южной части их сохранность лучше.

### Методы

Содержание петрогенных элементов в породах определено методами XRF, окисное и закисное железо – методом титриметрии, редких элементов – методом ICP-MS в лаборатории Института Карпинского (Санкт-Петербург).

U-Pb датирование циркона осуществлялось на ионном микрозонде SHRIMP II в ЦИИ Института Карпинского (Санкт-Петербург, аналитик П.А.Львов) по общепринятой методике [4]. Полученные данные обрабатывались с использованием программы SQUID (К.Людвиг, 2000). U-Pb отношения нормализовались на значение 0,0668 для стандартного циркона TEMORA с возрастом 416,75 млн лет [5]. Погрешности единичных анализов (отношений и возрастов) приводятся на уровне  $1\sigma$ , погрешности вычисленных значений конкордантных возрастов и пересечений с конкордией – на уровне  $2\sigma$ . Построение графиков проводилось с помощью программы ISOPLOT/ET (К.Людвиг, 1999).

Анализ редких элементов в цирконе выполнен методом масс-спектрометрии вторичных ионов на ионном микрозонде Cameca IMS-4f в Ярославском филиале Физико-технологического института РАН, процедура исследования приведена в работе [6]. Данные по редкоэлементному составу циркона позволяют реконструировать условия образования этого минерала [7-9] и корректно проинтерпретировать результаты датирования [10-12].

Rb-Sr и Sm-Nd изотопные исследования проведены по опубликованной методике [13]. Изотопные измерения осуществлены с помощью масс-спектрометра ThermoFinnigan MAT TRITON (ЦИИ Института Карпинского, аналитик Е.С.Богомолв) в статическом режиме.

При расчете величин  $\epsilon_{Nd}(T)$  использовались следующие значения современных изотопных отношений для однородного хондритового резервуара (CHUR):  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,1967$  и  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512638$  [14]. Модельный возраст по одностадийной модели  $T_{Nd}(DM)$  рассчитан относительно деплетированной мантии (DM) с параметрами  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,2136$  и  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,51315$  [15]. Символы минералов приведены по статье [16].

### Результаты исследования

**Геолого-петрографическая характеристика.** На изученных участках Салтахского массива выделяются три породные группы: двупироксеновые кристаллосланцы (метагабброиды); двупироксеновые и ортопироксеновые гнейсы (метадiorиты и метатоналиты); гранитоиды.

Двупироксеновые кристаллосланцы. Текстура пород обычно массивная и хаотично гнейсовидная (свилеватая), в катаклазированных разностях полосчатая. В шлифах преобладает граногетеробластовая структура, местами сохраняется реликтовая габбровая. Выделяются две



разновидности пород, в одной содержание плагиоклаза равно или меньше содержания темноцветных минералов, во второй заметно преобладает плагиоклаз.

Меланократовые разности кристаллосланцев имеют минеральный состав, об. %: Pl (An<sub>45-58</sub>) 45-50, Сpx 20-25, Орх 5-10, Bt 10-25, Mag 4, Ilm 1, Ap 1. В лейкократовых разностях, об. %: Pl (An<sub>40</sub>) 55-60, Сpx 15, Орх 5, Bt 18-20, Mag 4, Ilm 1, Ap 1.

Плагиоклаз часто образует изометрические зерна, обычно лишенные двойникования, по краям раздробленные, где в гранулированной массе встречаются наложенные кварц и калиевый полевой шпат. Плагиоклаз в основном представлен андезин-лабрадором, в Улханском массиве, где сохранность исходных пород лучше, также встречается битовнит (An<sub>72</sub>).

Клинопироксен диопсид-геденбергитового ряда образует неправильные изометрические зерна, часто замещает ортопироксен. Кристаллы клинопироксена обычно содержат двойники и структуры распада твердых растворов с тонкими пластинками ортопироксена. В клинопироксене отмечается низкое содержание TiO<sub>2</sub> = 0,06-0,25 мас. % [2].

Ортопироксен представлен плеохроирующим в розовых тонах гиперстеном и бронзитом, образующими неправильные и короткопризматические зерна. Он замещается клинопироксеном, биотитом, амфиболом с выделением зерен магнетита. Для ортопироксена по сравнению с клинопироксеном характерно еще более низкое содержание TiO<sub>2</sub> = 0,02 мас. % [2]. Апатит распределен равномерно и образует идиоморфные зерна часто с гексагональными сечениями.

Двупироксеновые гнейсы в качестве отличительных особенностей содержат антипертитовый плагиоклаз, кварц и ортопироксен, преобладающий над клинопироксеном. Минеральный состав, об. %: Pl (An<sub>30-35</sub>) 55-70, Qz 10-15, Орх 6-10, Сpx 4-5, биотит 5-10, ортоклаз 0-8, Mag 2, Ilm 1, Ap 0,5.

Гнейсограниты красного цвета (пр. 347) имеют минеральный состав, об. %: Kfs 35, Pl (An<sub>20-30</sub>) 30, Qz 28-30, Bt 3, Mag 1. В единичных крупных зернах встречаются Ap и Ttn, реже отмечены Zrn, Mnz, Rt. Встречается ортопироксен, замещенный биотитом и идингситом. Плагиоклаз часто антипертитовый, корродирован кварцем и ортоклазом.

Аляскитовые гнейсограниты (пр. 673) сложены, об. %: Kfs 37, Qz 32, Pl (An<sub>12</sub>) 27. Выделения микроклина обычно превосходят плагиоклаз, достигая 1-3 мм в поперечнике. Часто содержат реликты мирмекитизированного плагиоклаза и ортоклаза. Темноцветный минерал представлен биотитом, рудные – магнетитом и ильменитом, иногда по ильмениту образуются коленчатые двойники рутила. В единичных зернах встречаются Ap, Zr, Mnz, Aln.

**Петро-геохимическая типизация пород.** Геохимические особенности пород изучены на основании 13 оригинальных анализов (табл.1). Кроме того, для петрохимической характеристики привлекались материалы предшественников: 18 силикатных анализов двупироксеновых кристаллосланцев и гнейсов (метадиоритов) из Салтахского массива [2] и три анализа кристаллосланцев (метагабброноритов) из Улханского массива. В составе Салтахского массива [2] присутствуют породы от монцогаббро до гранодиоритов, однако повсеместная мигматизация пород ставит под сомнение возможность использования в данном случае диаграммы TAS. В связи с преобладанием пород среднеосновного состава для классификации привлекаются все главные компоненты пород (рис.2, а), а также диаграммы, использующие отношения относительно немобильных высокозарядных элементов Zr/Ti-Nb/Yb (рис.2, д), эквивалентные диаграмме TAS (Дж.А.Пирс, 1996), и диаграмма Th-Co (рис.2, е), равнозначная диаграмме K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> [17]. Для классификации пород кислого состава (рис.2, з) используется соотношение нормативных полевых шпатов [18].

Двупироксеновые кристаллосланцы имеют химический состав (табл.1, рис.2, а), подобный габбро (пр. 672в, 672б), габброноритам (Улханский массив) и монцогаббро (пр. 672, 672а, 696). По содержанию редких элементов (рис.2, б) они являются аналогами базальтоидов нормальной щелочности. На диаграмме AFM (рис.2, в) породы принадлежат известково-щелочной серии, при этом анализы предшественников демонстрируют более высокую обогащенность железом, что, вероятно, связано с особенностями аналитического определения элементов методом мокрой химии и лабораторной погрешностью.

Тип щелочности калиевый K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O = 1,0-1,6, за исключением катаклазированных пород, обогащенных плагиоклазом с наложенным кварцем (пр. 694-696, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O = 0,2-0,5). На рис.2, е в координатах Th-Co все породы относятся к известково-щелочному ряду, однако следует учитывать, что в процессе гранулитового метаморфизма Th выносятся. На диаграмме Ce/Yb-Ta/Yb для разделения известково-щелочных и шошонитовых серий с использованием малоподвижных элементов Ce, Yb, Ta (рис.2, з) [19, 20] породы однозначно располагаются в поле шошонитовой серии.



Таблица 1

## Содержание петрогенных (мас.%) и редких (ppm) элементов в породах Салтахского массива

Группы пород	Орх-Срх кристаллосланцы					Срх-Орх плаггиогнейсы						Гнейсограниты	
	672в	672б	672	672а	696	696а	695	696б	346	347а	694	347	673
Проба	672в	672б	672	672а	696	696а	695	696б	346	347а	694	347	673
SiO <sub>2</sub>	50,9	50,7	51,6	50,8	53,0	62,4	63,4	66,3	62,3	64,6	68,2	70,2	75,2
TiO <sub>2</sub>	0,88	0,89	1,29	1,31	1,16	0,92	0,72	0,69	0,49	0,35	0,57	0,23	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,3	11,4	16,3	16,4	18	16,1	15,9	15,3	16,4	16,8	14,9	15,5	13,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,82	4,18	3,63	5,32	3,01	2,07	2,06	2,23	2,36	1,44	2,15	1,28	0,48
FeO	4,42	4,61	4,87	3,79	4,06	3,25	2,34	1,39	2,44	2,11	1,39	0,97	0,13
MnO	0,18	0,21	0,13	0,14	0,11	0,09	0,06	0,07	0,09	0,08	0,06	0,03	0,02
MgO	10,5	10,2	6,03	5,99	5,43	3,06	3,05	1,8	2,64	1,89	2,11	0,64	0,18
CaO	11,4	11,7	7,36	7,3	6,86	5,06	4,62	5,62	5,32	4,32	4,96	1,46	0,68
Na <sub>2</sub> O	2,0	2,21	3,36	3,47	5,14	4,7	4,46	4,95	3,84	3,61	3,83	2,75	2,65
K <sub>2</sub> O	2,89	2,29	3,46	3,41	1,67	1,39	2,13	0,79	2,64	3,60	0,70	6,05	6,27
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,48	0,50	0,69	0,68	0,34	0,27	0,22	0,2	0,22	0,18	0,18	0,14	0,02
п.п.п.	0,52	0,43	0,47	0,52	0,61	0,3	0,68	0,41	0,76	0,78	0,68	0,55	0,34
Сумма	99,29	99,32	99,19	99,13	99,39	99,61	99,64	99,75	99,50	99,76	99,73	99,80	99,72
Th	1,84	1,67	1,78	2,11	0,69	0,5	0,34	0,97	6,13	2,25	4,55	21,2	0,20
U	0,54	0,46	0,66	0,72	0,20	0,12	0,13	0,18	0,19	0,25	0,71	0,80	0,17
Rb	163	136	133	141	27,4	17,8	55,2	4,46	66,7	74,2	4,14	149	143
Cs	2,03	0,95	1,38	1,71	0,36	0,26	0,37	<0,1	0,27	0,22	0,11	0,27	0,22
Ba	1730	986	2210	2200	292	365	506	255	996	1120	80,9	1960	425
Sr	493	377	997	849	441	494	517	404	646	617	495	498	206
La	20,3	23,9	28,3	30,7	39,6	21,7	23,9	25,6	32,3	25,7	23,7	52,2	5,41
Ce	45,6	53,5	65,3	65	117	48,7	47,4	50,7	64,6	48,9	47,9	94,1	6,27
Pr	5,86	6,72	8,86	8,84	16,6	6,39	5,42	5,88	7,02	5,34	5,54	9,22	0,46
Nd	25	27	38,3	36,1	69,8	25,9	22,4	22,5	25,4	20,2	20,6	32,5	1,37
Sm	5,08	5,29	6,44	6,42	11,5	4,02	3,56	3,52	3,66	3,06	3,63	3,54	0,2
Eu	1,32	1,21	2,12	1,95	2,30	1,30	1,1	1,140	1,08	0,87	0,87	0,91	0,58
Gd	3,84	4,29	5,02	4,89	10	3,25	2,97	3,15	2,94	2,39	2,68	2,17	0,11
Tb	0,62	0,65	0,59	0,66	1,4	0,46	0,42	0,45	0,41	0,29	0,38	0,26	0,019
Dy	3,18	3,17	3,26	3,24	7,26	2,51	2,0	2,4	2,08	1,55	1,94	1,04	0,097
Ho	0,7	0,65	0,55	0,61	1,47	0,47	0,4	0,44	0,33	0,26	0,33	0,14	0,019
Er	1,59	1,74	1,36	1,52	3,99	1,12	1,07	1,12	1,03	0,7	1,06	0,33	0,046
Tm	0,24	0,24	0,21	0,22	0,64	0,2	0,13	0,17	0,14	0,11	0,16	0,064	0,015
Yb	1,67	1,63	1,61	1,43	4,16	1,26	1,01	1,2	0,85	0,7	0,84	0,47	0,091
Lu	0,19	0,26	0,17	0,21	0,57	0,18	0,14	0,15	0,15	0,12	0,15	0,054	0,006
ΣREE	115	130	162	162	286	118	112	118	142	110	110	197	14,7
Zr	117	99,2	132	132	213	165	154	159	110	125	141	241	21,2
Hf	3,61	3,24	3,28	3,3	5,48	3,99	3,42	3,61	2,88	3,09	3,71	5,97	0,88
Ta	0,33	0,41	0,44	0,47	0,92	0,49	0,35	0,9	0,14	0,21	0,91	0,05	0,05
Nb	5,68	6,46	8,32	8,44	16,5	9,19	6,53	9,46	4,13	4,73	8,61	2,05	0,25
Y	16,2	16,5	15,3	15,3	43,4	12,8	10,7	11,6	9,55	7,04	9,69	4,14	0,64
Cr	450	450	59,5	56,1	111	94,8	107	85,8	54,3	40,2	118	42	14,4
Ni	125	127	51,7	42	107	66,8	45,9	32,2	19,6	18,2	32,2	4,65	2,82
Co	44,5	48,6	35,5	36,7	25,5	17,0	15,9	11,8	15,5	10,1	9,83	4,36	1,00
Sc	38,3	46	18,2	17,8	17,1	8,58	9,42	7,76	10,9	7,29	6,24	1,94	0,10
V	217	206	159	177	119	92,7	88	71,9	82,5	58,8	76,8	26	4,47
Pb	8,38	7,75	17,1	13,7	5,64	5,75	6,78	4,24	16	17,50	4,28	32	29,2
Ga	13,9	13,4	17,7	18,6	23	19,2	19,8	17,5	17,1	15,6	17,8	13,8	13,2
mg#	70	69	57	55	59	52	56	49	51	50	53	35	35
Eu/Eu*	0,91	0,78	1,14	1,06	0,66	1,10	1,03	1,05	1,01	0,98	0,85	1,0	12
(La/Yb) <sub>N</sub>	8,2	9,9	11,9	14,5	6,4	11,6	16	14,4	25,6	24,8	19	75	40
Sr/Y	30	23	65	55	10	38,6	48	35	67,6	88	51	120	322
Nb/Ta	17	16	19	18	18	19	19	11	30	23	10	41	5

Примечание. По химическому составу породы соответствуют в обр. 672в, 672б – габброноритам; 672, 672а – габбро; 696 – габбродиоритам; 696а, 695, 696б – кварцевым диоритам; 346, 347а, 694 – тоналитам; 347, 673 – гранитам. Породы в образцах 694-696 катаклазированы и окварцованы.

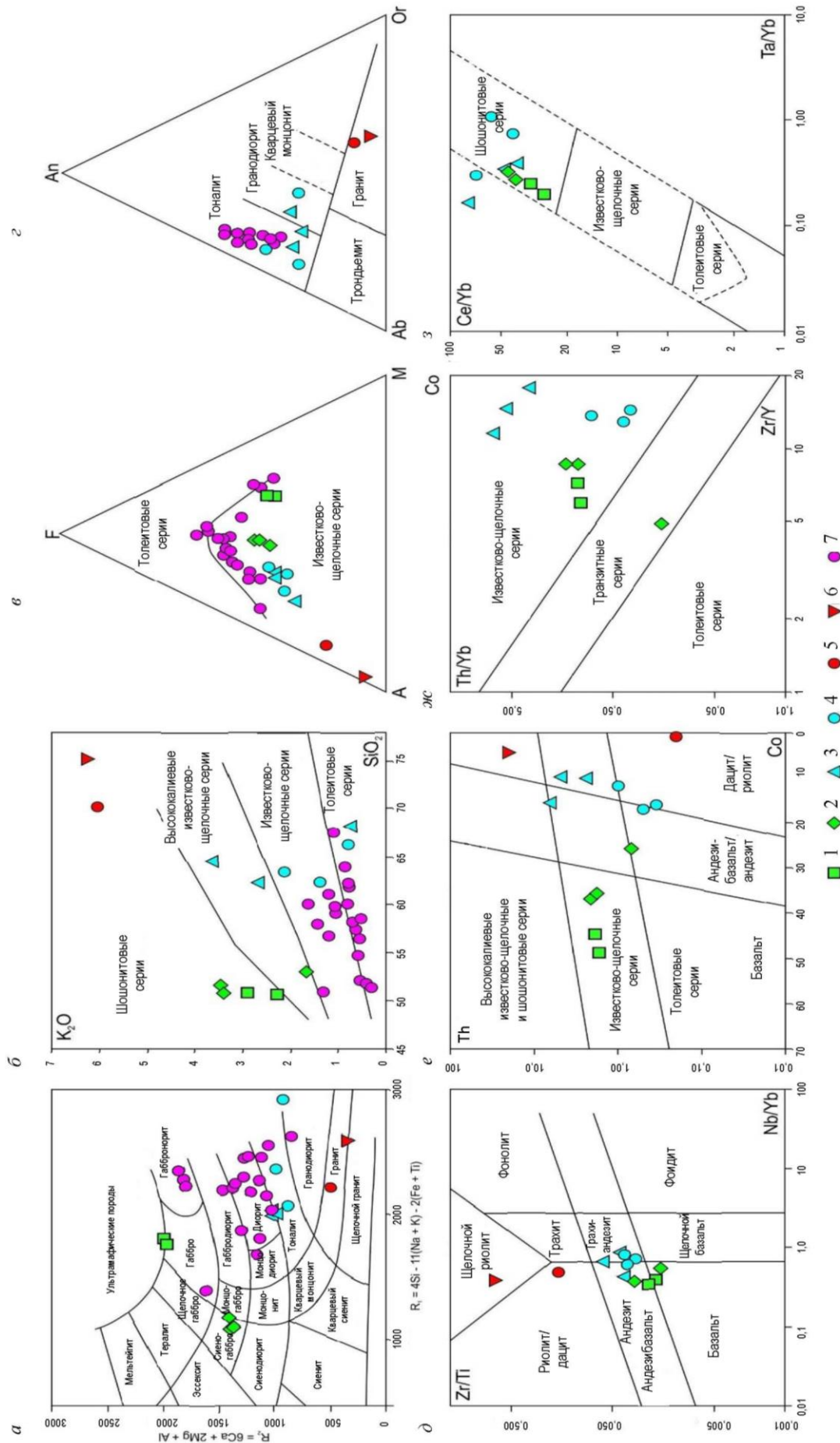


Рис. 2. Геохимические диаграммы для пород Салтахского массива по [21] (а); [22] (б); [18] (в); [20] (г); [17] (д); [24] (е); [20] (ж); [20] (з)  
 1 – меланократовые двуроксовые кристаллоосланцы; 2 – высокоглиноземистые двуроксовые кристаллоосланцы; 3 – клинопироксен-ортопироксеновые платиноиды; 4 – кварцеводiorитового состава, 4 – тоналитового и гранодиоритового состава; 5 – гнейсограниты; 6 – аляскитовые гнейсограниты; 7 – анализы предшественников из работ [2] и неопубликованных данных (А.И.Трухалев и др., 1972)



Меланократовые кристаллосланцы наиболее магнезиальные ( $mg\# = 69-70$ ), отмечаются высокие содержания Cr, Ni, V, на спайдерграммах (рис.3, а, б) проявлены положительные аномалии по Ba, Rb, Pb, отрицательные по Ta, Nb, Zr. Породы обогащены REE ( $\Sigma REE = 115-130$  ppm), проявлен слабый Eu-минимум ( $Eu/Eu^* = 0,78-0,91$ ), распределение REE фракционированное  $(La/Yb)_N = 8,2-25$ . В обогащенных плагиоклазом кристаллосланцах по сравнению с мафическими уменьшается величина  $mg\# = 55-57$ , характер спайдерграмм аналогичный, но установлено более высокое содержание Ba 2200 ppm. Появляется положительная аномалия Sr, в результате увеличивается величина отношения Sr/Y. Если в меланократовых кристаллосланцах она составляет 23-30, то в плагиокристаллосланцах возрастает до 55-65. Увеличивается содержание REE ( $\Sigma REE = 162$  ppm) в основном за счет легких лантаноидов, вследствие чего возрастает величина  $(La/Yb)_N = 11,9-14,5$  и проявлена положительная аномалия Eu ( $Eu/Eu^* = 1,06-1,14$ ). Катаклазированные и окварцованные кристаллосланцы (пр. 696) наиболее обогащены REE ( $\Sigma REE = 286$  ppm), проявлен Eu-минимум ( $Eu/Eu^* = 0,66$ ), спектр REE выпуклый в области LREE.

*Двупироксеновые плагиогнейсы*, петрохимически эквивалентные диоритам-кварцевым диоритам, по соотношению нормативных полевых шпатов размещаются в поле тоналитов (см. рис.2, з), в двух случаях – в поле гранодиоритов (пр. 346 и 347а,  $K_2O/Na_2O = 0,7-1,0$ ). В большинстве пород этой группы отмечаются положительные аномалии по Rb, Ba, Pb, отрицательные аномалии фиксируются для Ti, P, Nb, Ta, иногда по Th и U. Спайдерграммы REE асимметричные, распределение фракционированное в области L- и MREE и плоское для HREE, начиная с Ho  $(Ho/Yb)_N = 1,07-1,15$ . Eu-минимум проявлен слабо или отсутствует ( $Eu/Eu^* = 0,85-1,10$ ).

Породы с повышенным содержанием  $K_2O$  (пр. 346 и 347а) выделяются положительными аномалиями по Rb, Ba, Pb, Sr, наибольшей деплетированностью по Ta и Nb, высокими величинами отношений  $Sr/Y = 68-88$ ,  $Nb/Ta = 23-30$ ,  $(La/Yb)_N = 24,8-25,6$ . В катаклазированных разностях двупироксеновых гнейсов (пр. 694, 695) отмечаются низкие содержания K, Cs, Rb, Ba, но повышенные U и Th. Отношения  $Zr/Y = 5-17,8$  и  $La/Yb = 9-38$  существенно превышают индикаторные значения для разделения толеитовой и известково-щелочной серии ( $> 4,5$  и  $> 5,3$  соответственно) [24] и подтверждают принадлежность рассматриваемых пород к известково-щелочной серии (рис.2, ж).

*Гранитоиды* магнезиальные, щелочно-известковистые, плюмазитовые ( $ASI = 1,12-1,14$ ), с высокими содержаниями калия, как у шошонитов. Гнейсограниты (пр. 347) имеют спектры редких и редкоземельных элементов, подобные двупироксеновым гнейсам: проявлены положительные аномалии по Rb, Ba, Th, Pb, отрицательные по Ti, Ta, Nb, P. Отмечаются высокое отношение  $Sr/Y = 120$  и самое высокое –  $Nb/Ta = 41$ . Спектр REE подобен двупироксеновым гнейсам, Eu-минимум отсутствует ( $Eu/Eu^* = 1,0$ ), но распределение REE более фракционированное  $(La/Yb)_N = 75$ .

*Аляскитовые граниты* (пр. 673) характеризуются положительными аномалиями по Rb, U, Pb, Sr, Eu, имеют наиболее высокое отношение  $Sr/Y = 322$  и самое низкое отношение  $Nb/Ta = 5$ . Породы обеднены REE ( $\Sigma REE = 14,7$  ppm), распределение которых фракционированное  $(La/Yb)_N = 40$ , спектр REE в области Er-Lu выпуклый и резко проявлена положительная аномалия Eu ( $Eu/Eu^* = 12$ ).

**U-Pb возраст.** Определение возраста по циркону (табл.2) проведено в пяти пробах: двупироксеновых кристаллосланцах (пр. 672, 696), двупироксеновых плагиогнейсах (пр. 696а, 346), аляскитовых гнейсогранитах (пр. 673). Из пробы 672 был получен только метаморфический циркон с дискордантными значениями U-Pb возраста, верхнее пересечение линии дискордии по шести анализам дает возраст  $1991 \pm 23$  млн лет.

В *Орх-Срх кристаллосланцах* (пр. 696) метагаббродиоритового состава циркон представлен скругленными короткопризматическими зернами серого цвета длиной 50-100 мкм, коэффициент удлинения (КУ) 1-2 с отчетливо различимыми в катодоллюминесцентном изображении (рис.4, а, б) ядерными частями с секториальной и осцилляционной зональностью и оболочками двух типов: тонкими белыми, светло-серыми и более широкими – темно-серыми до черных. Ядра имеют среднее содержание Th 156 ppm, U 237 ppm, Th/U 0,65. Два зерна с аналитическими точками 1.1 и 6.1 характеризуются более высоким содержанием Y 1198-1593 ppm и  $\Sigma REE = 959-1345$  ppm (табл.3). На спектрах REE (рис.5, а) хорошо выражены положительные аномалии Ce ( $Ce/Ce^* = 8,38-33,4$ ) и отрицательные



Таблица 2

**Результаты U-Pb (SHRIMP II) анализов циркона**

Точка анализа	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , %	U, ppm	Th, ppm	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}^*$ , ppm	Возраст $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , млн лет	Возраст $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ , млн лет	D, %	(1) $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	$\pm$ , %	(1) $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm$ , %	(1) $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm$ , %	(1) $^{206}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	Rho
1.1	0,03	381	292	0,79	124	2071±17	2096±8	1	2,639	0,93	0,12982	0,44	6,783	1,0	0,3790	0,906
2.1	0,02	412	301	0,75	128	1984±16	2016±8	2	2,774	0,95	0,12410	0,45	6,167	1,0	0,3604	0,904
3.1	0,04	252	167	0,68	81,9	2066±17	2097±9	1	2,646	0,97	0,12993	0,53	6,769	1,0	0,3779	0,878
4.1	0,13	129	64	0,52	42,5	2093±19	2074±14	-1	2,606	1,10	0,12830	0,81	6,784	1,3	0,3836	0,799
5.1	0,01	183	92	0,52	59,0	2050±18	2077±11	1	2,670	1,00	0,12843	0,65	6,631	1,2	0,3745	0,841
5.2	0,10	367	80	0,22	108	1892±16	1964±9	4	2,930	0,95	0,12050	0,53	5,669	1,1	0,3412	0,874
6.1	0,03	245	170	0,72	79,3	2060±18	2066±10	0	2,656	1,00	0,12762	0,56	6,625	1,1	0,3765	0,874
6.2	0,04	584	188	0,33	179	1965±15	1973±7	0	2,806	0,91	0,12116	0,39	5,953	1,0	0,3563	0,921
7.1	0,12	119	70	0,61	39,4	2103±19	2085±14	-1	2,592	1,10	0,12900	0,81	6,864	1,4	0,3857	0,801
8.1	0,21	94	96	1,06	28,7	1959±19	1980±19	1	2,815	1,10	0,12160	1,00	5,955	1,6	0,3551	0,739
8.2	0,05	202	99	0,51	63,2	2000±18	2059±11	3	2,748	1,00	0,12719	0,63	6,380	1,2	0,3638	0,855
9.1	0,07	211	151	0,74	69,1	2081±18	2090±11	0	2,624	1,00	0,12940	0,61	6,799	1,2	0,3811	0,858

Орх-Срх кристаллогранулы (пр. 696)

Срх-Орх плаггиогнейсы (пр. 696а)

1.1	0,05	222	143	0,67	70,8	2035±17	2112±9	4	2,693	0,96	0,13102	0,53	6,707	1,1	0,3713	0,877
2.1	0,00	163	83	0,53	52,8	2063±18	2092±11	1	2,652	0,99	0,12958	0,60	6,737	1,2	0,3771	0,856
3.1	0,01	162	100	0,64	51,1	2020±17	2094±11	4	2,718	10,0	0,12974	0,61	6,583	1,2	0,3680	0,853
4.1	0,13	206	126	0,63	67,6	2086±18	2095±10	0	2,617	10,0	0,12977	0,57	6,835	1,2	0,3820	0,867
5.1	0,09	89	30	0,35	29,7	2118±20	2083±15	-2	2,570	1,10	0,12890	0,83	6,917	1,4	0,3891	0,795
6.1	0,08	139	64	0,47	45,5	2077±23	2101±12	1	2,630	1,30	0,13019	0,71	6,820	1,5	0,3801	0,876
7.1	0,01	212	123	0,60	67,6	2032±20	2104±9	4	2,698	1,10	0,13047	0,53	6,668	1,3	0,3706	0,905
8.1	0,07	364	27	0,08	112	1980±18	1981±8	0	2,780	1,10	0,12166	0,45	6,032	1,2	0,3596	0,921
8.2	0,08	82	40	0,50	27,0	2097±22	2099±17	0	2,600	1,20	0,13000	0,98	6,890	1,6	0,3845	0,775
9.1	0,27	17	19	1,13	5,39	1986±26	1979±36	0	2,770	1,50	0,12150	2,00	6,050	2,5	0,3608	0,601
9.2	0,00	144	63	0,45	46,8	2064±19	2072±12	0	2,649	1,10	0,12809	0,69	6,666	1,3	0,3774	0,839
10.1	0,03	539	97	0,19	162	1937±16	1988±8	3	2,853	0,93	0,12218	0,46	5,905	1,0	0,3505	0,897
10.2	0,10	208	102	0,51	67,5	2064±17	2104±10	2	2,649	0,97	0,13045	0,57	6,789	1,1	0,3775	0,864



Окончание табл.2

Точка анализа	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}, \%$	U, ppm	Th, ppm	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}^*$ , ppm	Возраст $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , млн лет	Возраст $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ , млн лет	D, %	(1) $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	$\pm, \%$	(1) $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm, \%$	(1) $^{207}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm, \%$	(1) $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm, \%$	Rho
Срх-Орх плагиогнейсы (пр. 346)																	
1.1	0,13	348	219	0,65	110	2018 $\pm$ 16	2040 $\pm$ 10	1	2,720	1,0	0,12583	0,59	6,378	1,1	0,3676	1,0	0,849
2.1	0,04	558	288	0,53	170	1958 $\pm$ 18	1945 $\pm$ 8	-1	2,818	1,1	0,11924	0,43	5,834	1,2	0,3548	1,1	0,929
3.1	0,06	362	151	0,43	114	2014 $\pm$ 16	2019 $\pm$ 9	0	2,726	0,9	0,12429	0,51	6,286	1,0	0,3668	0,9	0,870
4.1	0,03	326	136	0,43	105	2048 $\pm$ 16	2027 $\pm$ 9	-1	2,675	0,9	0,12487	0,50	6,437	1,0	0,3739	0,9	0,879
5.1	0,00	942	328	0,36	274	1879 $\pm$ 14	2023 $\pm$ 6	8	2,955	0,9	0,12461	0,36	5,814	0,9	0,3384	0,9	0,922
6.1	0,38	502	200	0,41	162	2052 $\pm$ 16	2033 $\pm$ 11	-1	2,668	0,9	0,12529	0,64	6,475	1,1	0,3748	0,9	0,811
7.1	0,06	482	315	0,68	153	2023 $\pm$ 15	2025 $\pm$ 9	0	2,712	0,9	0,12471	0,48	6,340	1,0	0,3687	0,9	0,877
8.1	0,04	361	160	0,46	115	2029 $\pm$ 16	2002 $\pm$ 9	-1	2,703	0,9	0,12313	0,50	6,281	1,0	0,3699	0,9	0,875
9.1	0,03	424	247	0,60	133	2006 $\pm$ 16	2031 $\pm$ 15	1	2,739	0,9	0,12510	0,83	6,298	1,2	0,3650	0,9	0,741
10.1	0,08	247	104	0,44	79,3	2043 $\pm$ 17	2025 $\pm$ 11	-1	2,682	1,0	0,12470	0,63	6,410	1,1	0,3728	1,0	0,832

Аляскиновые гнейсограниты (пр. 673)

1.1	0,52	171	134	0,81	49,5	1861 $\pm$ 8	1909 $\pm$ 27	3	2,985	0,52	0,11690	1,50	5,393	1,6	0,3347	0,5	0,323
2.1	0,00	401	146	0,38	123	1969 $\pm$ 6	1964 $\pm$ 10	0	2,799	0,37	0,12054	0,58	5,939	0,7	0,3573	0,4	0,533
3.1	0,00	98	89	0,94	30,2	1970 $\pm$ 11	1975 $\pm$ 21	0	2,797	0,63	0,12120	1,20	5,976	1,4	0,3575	0,6	0,467
4.1	0,00	72	94	1,35	22,2	1968 $\pm$ 12	1984 $\pm$ 24	1	2,801	0,72	0,12190	1,40	5,999	1,5	0,3570	0,7	0,470
5.1	0,19	131	119	0,94	39,7	1948 $\pm$ 9	1970 $\pm$ 22	1	2,834	0,56	0,12090	1,30	5,882	1,4	0,3527	0,6	0,407
6.1	1,17	109	48	0,46	32,1	1884 $\pm$ 15	1916 $\pm$ 69	2	2,938	0,92	0,11730	3,90	5,490	4,0	0,3395	0,9	0,231
7.1	0,06	583	201	0,36	175	1935 $\pm$ 5	1962 $\pm$ 10	1	2,856	0,32	0,12037	0,56	5,811	0,7	0,3501	0,3	0,498
8.1	0,00	85	121	1,48	25,9	1964 $\pm$ 12	1979 $\pm$ 23	1	2,808	0,69	0,12160	1,30	5,970	1,5	0,3561	0,7	0,469
9.1	0,00	77	84	1,12	23,4	1939 $\pm$ 12	1948 $\pm$ 24	0	2,849	0,72	0,11950	1,40	5,783	1,5	0,3510	0,7	0,467
10.1	0,25	152	155	1,05	46,8	1970 $\pm$ 9	1971 $\pm$ 24	0	2,796	0,54	0,12100	1,40	5,965	1,5	0,3575	0,5	0,370

Примечание. Pb<sub>c</sub> и Pb\* – общий и радиогенный свинец. Погрешность калибровки стандарта 0,35%. (1) – коррекция по  $^{204}\text{Pb}$ . D – дискордантность. Rho – коэффициент корреляции ошибок. Погрешности единичных анализов (отношений и возрастов) приводятся на уровне 1 $\sigma$ , погрешности вычисленных возрастов – на уровне 2 $\sigma$ .

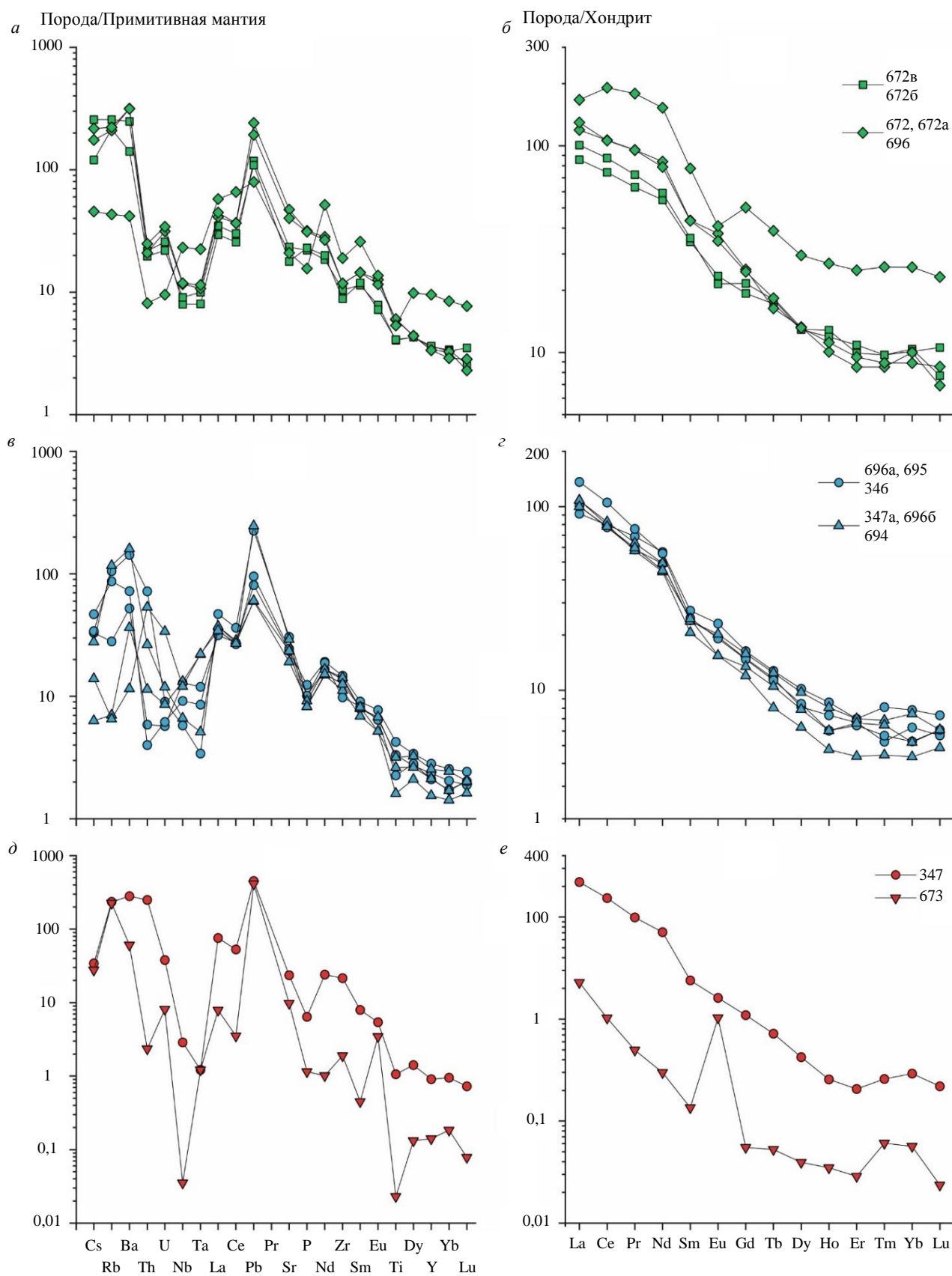


Рис.3. Мультиэлементные диаграммы для пород Салтахского массива: *а, б* – Орх-Срх кристаллосланцы; *в, г* – Срх-Орх плагиогнейсы; *д, е* – гнейсограниты.

Нормализация содержаний проведена на состав примитивной мантии и хондрита CI по [25]. Номера проб см. в табл.1



аномалии Eu ( $Eu/Eu^* = 0,38-0,80$ ). Характер распределения REE в целом соответствует спектру в цирконе магматического генезиса, который характеризуется крутым наклоном от La к Lu с положительной Ce- и отрицательной Eu-аномалиями. В области HREE спектры не выходят за пределы поля магматического циркона, тогда как по LREE циркон более обогащен относительно магматического типа (рис.5, а). По соотношению REE (рис.5, ж) весь циркон отклоняется от магматического типа и размещается в поле пористого циркона, при этом содержания U и Ca невысокие (рис.5, з).

Оболочки имеют более низкое отношение  $Th/U = 0,16-0,23$ , содержание Th 85,2-206 ppm, U 528-917 ppm, содержание P ниже – 108-136 ppm; слабее, чем в ядрах, проявлены аномалии Ce ( $Ce/Ce^* = 4,87-7,65$ ), присутствуют положительные аномалии Eu ( $Eu/Eu^* = 1,08-1,18$ ). Содержание REE в оболочках ниже, чем в ядрах ( $\Sigma REE = 164-378$  ppm), спектры распределения REE более сглаженные и с низким отношением  $(Sm/La)_N = 1,44-2,67$ . Метаморфический циркон с низким содержанием Th и Th/U отношением кристаллизуется вблизи солидуса одновременно с монацитом и алланитом – основными концентраторами Th [26]. Но здесь снижение отношения Th/U происходит из-за роста содержания U в цирконе, при этом понижается содержание P, Y и  $\Sigma REE$ , возможно, в связи с одновременной кристаллизацией циркона и апатита.

Положительная аномалия Ce указывает на окислительные условия при кристаллизации циркона. Редуцированность Ce-аномалии в оболочках циркона свидетельствует о понижении активности кислорода. Отрицательная аномалия Eu в ядрах циркона предполагает, что вместе с цирконом кристаллизовался плагиоклаз, в оболочках положительная аномалия Eu указывает на растворение плагиоклаза и обогащение европием среды кристаллизации циркона. Максимальные значения  $^{207}Pb/^{206}Pb$ -возраста в ядрах достигают  $2103 \pm 19$  млн лет, верхнее пересечение линии дискордии по семи измерениям дает возраст  $2086 \pm 8$  млн лет (см. рис.4, б). Серые в катодолюминесценции (CL) оболочки более высокоурановые и характеризуются средним содержанием Th 134 ppm, U 456 ppm, Th/U 0,28. Кластер измерений, выполненных по оболочкам, дает верхнее пересечение линии дискордии по трем измерениям  $1971 \pm 10$  млн лет и отражает время проявления наложенных процессов анатексиса. Тонкие белые оболочки не изучены из-за малой мощности.

*Срх-Орх плагиогнейсы* (пр. 696а), петрохимически эквивалентные кварцевым метадиоритам, содержат циркон, аналогичный пробе 696 (рис.4, в, з), причем здесь белые в CL оболочки более широкие и дают возможность оценить их возраст. Ядерные части зерен характеризуются средним содержанием, ppm: Th 134, U 317, Th/U 0,40, Y 624, Nb 25;  $\Sigma REE = 524$ . Увеличение содержания REE сопровождается уменьшением Eu-минимума, обычно величина  $Eu/Eu^* = 0,33-0,66$ , в точках 1.1 и 4.1, где  $\Sigma REE$  увеличивается до 564-598 ppm, аномалия Eu возрастает и становится положительной ( $Eu/Eu^* = 1,03-2,89$ ). Ядра циркона, как и в пробе 696, обогащены LREE (рис.5, б), часть из них обогащена Ca (рис.5, з). Линия дискордии, построенная по девяти измерениям в ядрах циркона, дает верхнее пересечение  $2100 \pm 7$  млн лет (рис.4, з), которое принимается как время кристаллизации циркона в магматическом протолите двупироксеновых плагиогнейсов.

Белая в CL оболочка с аналитической точкой 9.1 имеет возраст  $1986 \pm 26$  млн лет, характеризуется низкими содержаниями, ppm: Th 24, U 48, но отношение Th/U = 0,51 – подобно таковому магматическому циркону. Хорошо проявлены отрицательная аномалия Eu ( $Eu/Eu^* = 0,65$ ) и положительная аномалия Ce ( $Ce/Ce^* = 19,8$ ). В этой точке ниже, чем в ядрах, содержание REE (рис.5, в), уменьшается Eu-минимум ( $Eu/Eu^* = 0,65$ ). По сравнению с белой, более поздние темные в CL оболочки (точки 8.1 и 10.1) имеют повышенное содержание, ppm: Th 56-100, U 701-786 и низкое отношение Th/U 0,08-0,13, свойственное метаморфическому циркону. Характеризуются наиболее низким содержанием REE ( $\Sigma REE = 192-239$  ppm), Y 156-238 ppm, Ce/Ce\* 3,22-3,58, однако обогащены Eu ( $Eu/Eu^* = 1,54-2,92$ ), Li 9,72-11,36 ppm и Hf 15124 ppm. Линия дискордии по трем измерениям в метаморфических оболочках дает верхнее пересечение с возрастом  $1984 \pm 11$  млн лет, указывающее на время проявления метаморфизма.

*Срх-Орх плагиогнейсы* (пр. 346), петрохимически эквивалентные метатоналитам, содержат кристаллы серого циркона с желтым и розовым оттенком, полупрозрачные, субидiomорфные с хорошо выраженными тонкими зонами роста в оптическом изображении (рис.4, д, е). Длина кристаллов 100-220 мкм, KU = 2-4. В CL-изображении цирконы имеют темную окраску, зональность осцилляционная либо ее реликты.

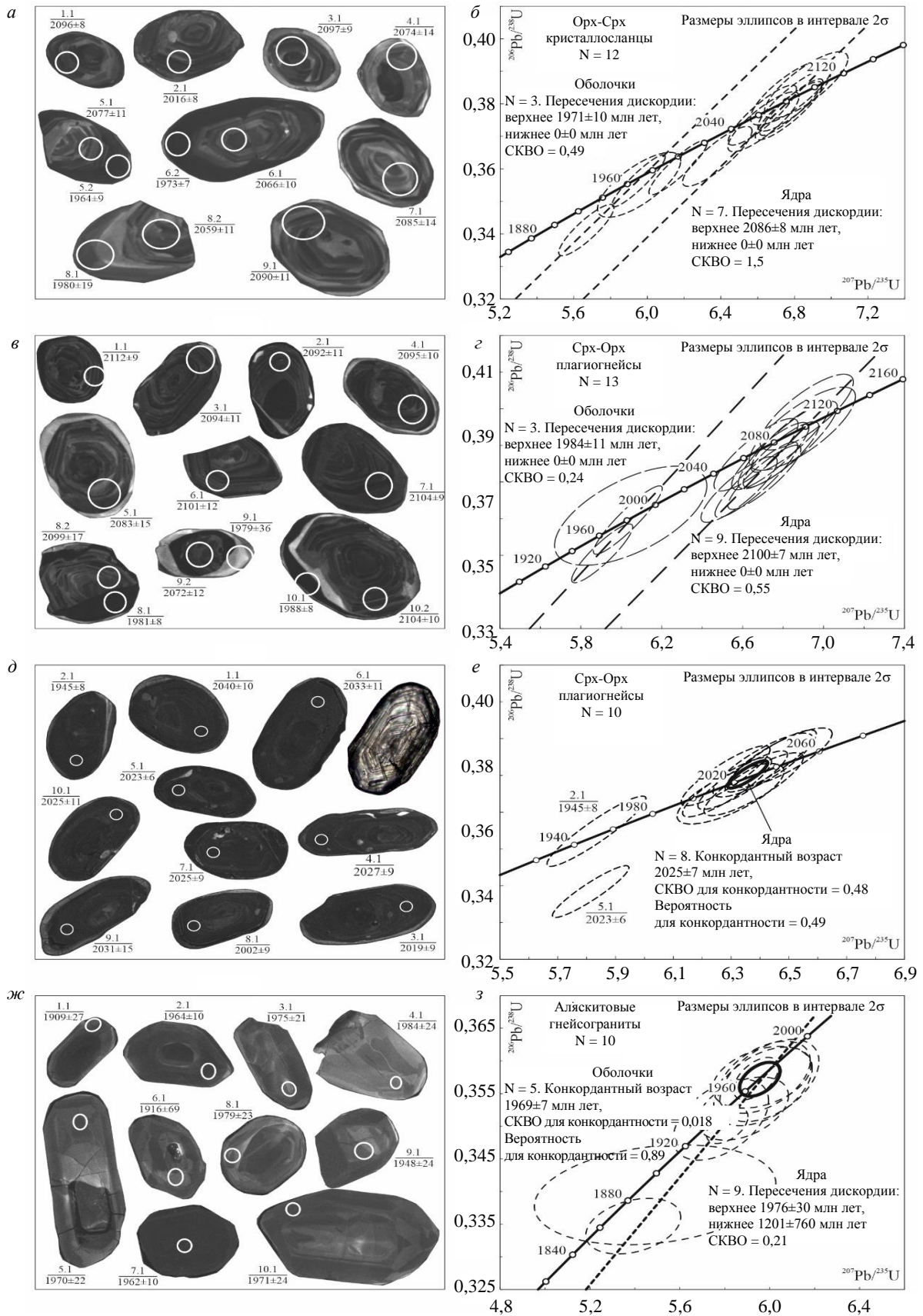


Рис.4. Катодолуминесцентные изображения и возраст циркона из Орх-Срх кристаллосланцев (пр. 696) (а, б); Срх-Орх плагиогнейсов (пр. 696а) (в, г); Срх-Орх плагиогнейсов (пр. 346) (д, е); аляскитовых гнейсогранитов (пр. 673) (ж, з).  
 Здесь и далее белыми окружностями обозначены аналитические кратеры, в числителе номер анализа, в знаменателе  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраст. Диаметр кратера составляет около 20 мкм



Таблица 3

## Содержание редких и редкоземельных элементов в цирконе, ppm

Компонент	Орх-Срх кристаллосланцы (пр. 696)										Срх-Орх плагиогнейсы (пр. 696а)									
	1.1	3.1	4.1	5.1	5.2	6.1	6.2	7.1	9.1		1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1	8.2	9.1
La	2,06	0,31	0,13	1,28	0,73	1,08	2,75	0,64	0,30		2,04	0,06	0,35	0,62	1,36	0,50	0,35	1,60	1,61	0,30
Ce	67,7	27,1	21,8	27,4	17,8	38,3	36,4	27,8	34,2		39,6	25,4	27,5	31,4	15,8	21,2	31,4	16,4	31,4	25,1
Pr	1,53	0,36	0,19	0,49	0,43	1,11	1,19	0,58	0,31		1,64	0,12	0,43	1,23	0,43	0,58	0,27	0,77	0,89	0,31
Nd	11,3	2,20	1,63	2,32	2,42	8,11	5,95	3,52	2,77		10,3	1,24	3,16	9,94	2,01	4,40	2,97	3,95	6,04	1,42
Sm	10,8	3,16	2,58	1,96	1,23	8,30	2,47	3,03	2,90		4,90	2,07	2,64	5,35	1,03	2,99	3,08	1,22	6,22	1,24
Eu	3,92	0,91	0,63	1,11	0,66	2,40	1,64	0,79	0,86		8,11	0,52	0,56	3,01	0,25	1,36	1,22	1,83	2,47	0,63
Gd	43,3	14,3	9,93	9,05	2,83	32,7	7,28	10,0	14,3		15,0	9,00	9,83	14,7	3,76	12,0	12,4	3,02	23,4	6,98
Dy	140	61,5	46,7	36,0	12,2	102	29,8	35,3	55,5		54,2	38,8	35,6	53,8	14,6	48,8	48,0	12,0	72,4	28,3
Er	299	149	110	86,7	29,4	216	70,6	82,9	125		125	91,6	86,6	120	37,6	123	119	35,0	157	63,8
Yb	651	370	267	205	80,4	467	185	184	284		285	218	199	273	97,6	291	262	97,0	325	138
Lu	115	69,5	47,0	37,2	15,9	81,9	34,7	34,0	51,0		52,8	42,2	36,0	50,4	18,2	57,2	47,2	19,4	57,1	24,9
Li	3,61	5,08	2,94	6,85	12,9	1,19	13,5	2,99	7,58		5,53	3,07	7,10	5,01	2,58	3,98	6,57	9,72	2,46	1,96
P	220	275	158	292	136	175	108	88,4	158		139	118	111	177	208	207	165	66,9	93,8	188
Ca	10,7	31,5	6,74	34,6	123	11,1	6,42	4,36	10,0		173	2,27	27,5	27,3	191	29,8	2,77	4,03	7,13	52,5
Ti	13,6	6,75	8,98	10,9	9,79	7,48	10,8	16,0	7,25		35,5	8,00	13,8	8,88	5,91	9,08	7,16	6,88	7,55	8,51
Sr	0,67	0,46	0,50	0,65	0,83	0,62	0,39	0,45	0,65		2,29	0,34	0,66	0,81	0,77	1,20	0,51	0,57	0,55	0,72
Y	1593	806	576	480	170	1198	402	444	710		711	506	521	679	203	650	621	156	859	315
Nb	83,4	60,9	50,0	61,6	46,9	29,9	34,9	35,7	36,4		29,3	36,4	22,3	20,4	24,1	12,4	20,6	12,4	27,5	30,1
Ba	1,46	1,10	2,15	2,58	3,60	1,98	2,06	2,49	2,21		10,2	1,72	2,73	1,47	1,14	1,83	1,71	1,29	1,03	3,18
Hf	13762	10718	10525	11602	9958	11246	12595	11482	10775		8544	11389	11819	11338	12507	12034	12266	15124	13708	13436
Th	418	171	65,7	153	85,2	217	206	85,0	354		154	104	137	161	34,6	85,3	306	56,2	95,4	24,3
U	708	384	192	392	528	418	917	200	523		300	271	289	345	133	264	488	701	375	48
Th/U	0,59	0,44	0,34	0,39	0,16	0,52	0,23	0,42	0,68		0,51	0,38	0,47	0,47	0,26	0,32	0,63	0,08	0,25	0,51
Eu/Eu*	0,55	0,41	0,38	0,80	1,08	0,44	1,18	0,44	0,40		2,89	0,37	0,33	1,03	0,39	0,69	0,60	2,92	0,62	0,65
Ce/Ce*	9,23	19,7	33,4	8,38	7,65	8,49	4,87	11,0	27,0		5,23	72,7	17,1	8,71	5,02	9,55	24,7	3,58	6,36	19,8
ΣREE	1345	699	507	408	164	959	378	383	571		598	429	401	564	193	563	528	192	684	291
ΣLREE	82,6	30,0	23,7	31,4	21,4	48,6	46,3	32,6	37,6		53,5	26,8	31,5	43,2	19,6	26,7	35,0	22,7	39,9	27,1
ΣHREE	1248	665	480	374	141	900	327	346	530		532	400	367	512	172	532	489	166	635	262
(Lu/La) <sub>N</sub>	538	2148	3450	281	209	734	122	509	1643		249	6551	989	781	129	1097	1316	116	343	804
(Lu/Gd) <sub>N</sub>	21,5	39,4	38,3	33,3	45,6	20,3	38,6	27,4	28,9		28,5	37,9	29,6	27,7	39,1	38,7	30,7	51,9	19,8	28,8
(Sm/La) <sub>N</sub>	8,41	16,2	31,5	2,46	2,67	12,4	1,44	7,55	15,5		3,85	53,5	12,1	13,8	1,21	9,53	14,3	1,21	6,19	6,65
T(Ti) <sub>2</sub> °C	771	710	734	751	741	718	750	786	715		869	724	772	733	699	735	714	711	719	729



Окончание табл.3

Компонент	Срх-Орх плагиогнейсы (пр. 696а)					Срх-Орх плагиогнейсы (пр. 346)									
	9.2	10.1	10.2	1.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1	9.1	10.1			
La	2,42	2,03	0,64	10,4	5,58	6,64	22,7	7,59	7,07	2,89	28,7	14,0			
Ce	35,6	15,5	37,4	88,4	56,9	65,4	106	80,7	49,1	38,9	301	87,1			
Pr	2,13	0,67	0,41	10,2	5,83	4,44	14,0	6,28	3,48	2,54	31,4	17,8			
Nd	14,6	3,15	3,13	76,1	43,7	30,8	65,8	46,8	23,9	16,5	198	130			
Sm	4,87	1,15	3,75	28,0	12,3	12,2	11,6	14,7	9,38	8,67	32,4	24,2			
Eu	1,52	1,05	1,14	5,23	2,67	1,82	4,07	3,47	2,62	1,45	16,6	7,00			
Gd	11,6	3,73	16,2	48,8	17,9	20,8	29,4	21,9	22,0	16,8	41,8	42,2			
Dy	35,6	17,0	75,4	85,9	40,6	39,3	82,2	33,2	54,7	31,3	40,7	55,9			
Er	96,1	45,3	205	169	79,8	88,3	200	71,1	128	78,5	115	109			
Yb	238	124	472	381	206	224	580	168	304	196	306	267			
Lu	43,9	24,6	93,1	69,5	40,9	41,6	126	32,9	55,3	33,8	51,4	54,0			
Li	4,14	11,4	2,61	2,55	9,32	6,12	27,5	9,51	2,98	5,28	6,07	9,78			
P	913	66,0	268	96	185	135	205	15	61	164	97	124			
Ca	1273	20,4	61,2	99	76	82	3558	240	96	122	220	577			
Ti	8,38	8,74	10,0	19,5	15,7	12,0	28,6	10,8	12,2	9,97	22,5	24,5			
Sr	3,46	0,63	0,65	1,80	1,09	1,33	123	5,01	3,43	2,37	7,17	2,90			
Y	476	236	1018	937	500	487	1 198	333	711	421	482	702			
Nb	33,8	18,6	25,1	100	63,1	54,9	35,8	56,2	48,8	42,0	81,0	64,9			
Ba	2,90	2,05	1,56	3,28	2,59	1,54	11,8	8,23	6,64	6,27	11,7	9,56			
Hf	12532	13032	11668	13227	15900	12755	19615	14366	11381	10908	12556	15979			
Th	86,4	100	176	284	225	186	494	262	265	149	312	189			
U	252	786	453	613	687	567	2 903	709	564	453	713	589			
Th/U	0,34	0,13	0,39	0,46	0,33	0,33	0,17	0,37	0,47	0,33	0,44	0,32			
Eu/Eu*	0,61	1,54	0,44	0,43	0,55	0,35	0,67	0,59	0,56	0,37	1,37	0,67			
Ce/Ce*	3,79	3,22	17,7	2,08	2,41	2,91	1,43	2,83	2,39	3,48	2,42	1,33			
ΣREE	487	239	909	972	512	535	1241	486	660	428	1162	809			
ΣLREE	54,7	21,4	41,5	185	112	107	208	141	84	61	558	249			
ΣHREE	425	215	862	754	385	414	1017	327	564	357	555	529			
(Lu/La) <sub>N</sub>	175	117	1408	64,4	70,6	60,3	53,2	41,8	75,3	113	17,2	37,1			
(Lu/Gd) <sub>N</sub>	30,5	53,3	46,4	11,5	18,5	16,2	34,6	12,2	20,4	16,3	9,90	10,4			
(Sm/La) <sub>N</sub>	3,22	0,91	9,42	4,31	3,52	2,93	0,82	3,09	2,12	4,81	1,81	2,76			
T(Ti), °C	728	731	743	805	785	759	845	750	761	743	820	829			

Примечание. Номера точек соответствуют показанным на рис.4; T(Ti); °C – температура кристаллизации циркона по [27].

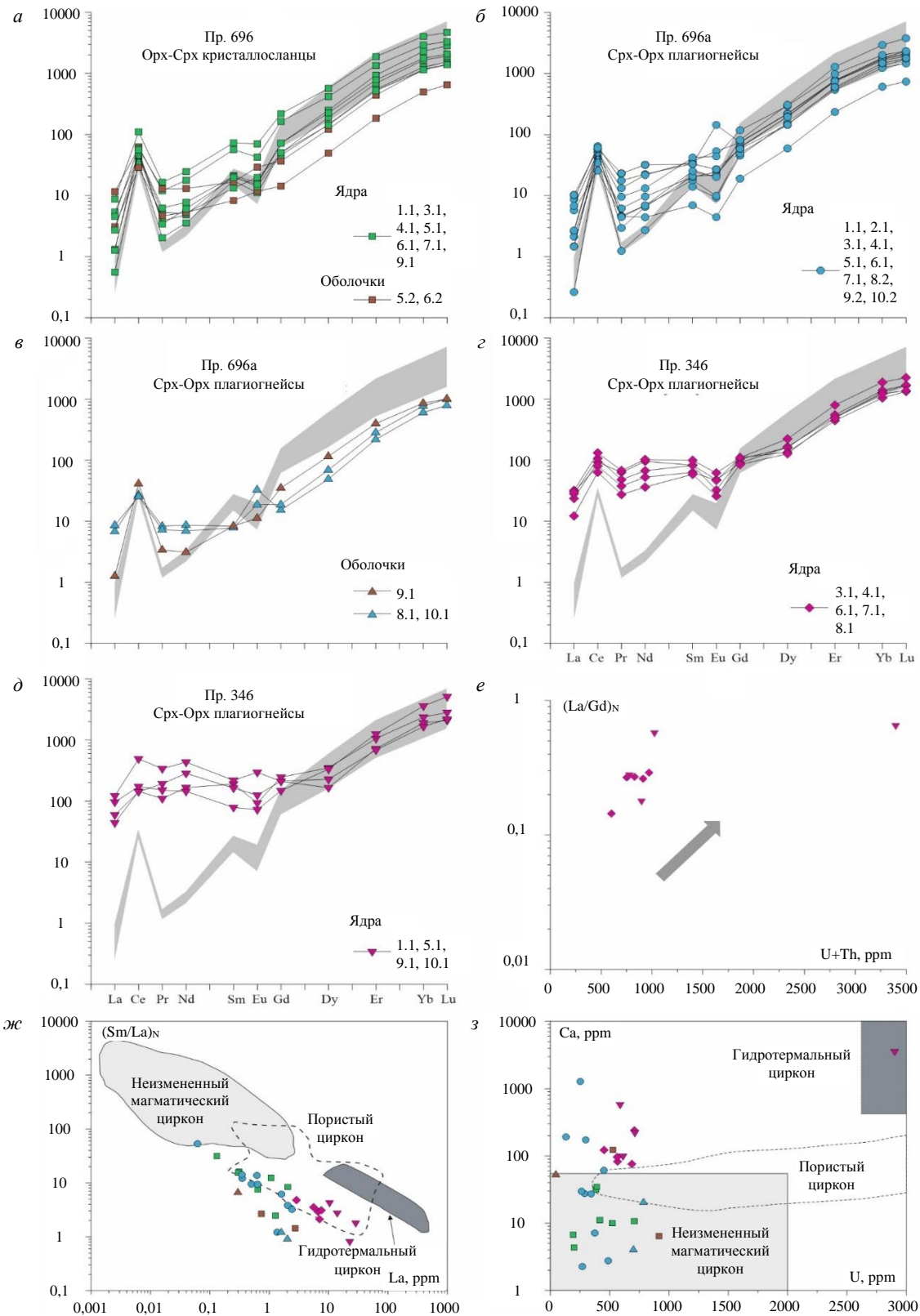


Рис.5. Геохимические диаграммы для циркона из пород Салтахского массива: *a-d* – диаграммы распределения REE в цирконе из пр. 696, 696а, 346. Нормализация содержаний на состав хондрита CI по [25]. Серое поле – состав магматического циркона по [28]. Номера спектров соответствуют номерам точек анализов на рис.4 и в табл.2; *e* – типизации циркона на диаграммах  $(La/Gd)_N-U+Th$  (по [29], стрелкой показан тренд концентрации LREE, вызванной повреждением кристаллической решетки вследствие радиоактивного излучения); *ж, з* – диаграммы  $(Sm/La)_N-La$  и  $Ca-U$  по [30]. Пористый циркон рассматривается как измененный магматический циркон, возникший посредством процессов растворения-перекристаллизации в присутствии водного флюида [31]



Содержание в цирконе, ppm: Th 149-494, U 453-713, Th/U 0,17-0,46. Отличительной особенностью является высокое содержание LREE (рис.5, з, е), спектры, наиболее обогащенные ( $\Sigma\text{LREE} = 185-558$  ppm), показаны на рис.5, д. По обогащенности LREE минерал размещается в поле пористого циркона (рис.5, ж), также фиксируется высокое содержание Ca (рис.5, з). Положительная аномалия Ce ( $\text{Ce}/\text{Ce}^* = 1,33-2,91$ ) и Eu-минимум ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,35-0,67$ ) проявлены слабо, положительная величина  $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1,37$  фиксируется в цирконе с точкой 9.1. Характерно высокое содержание Hf = 10908-19615 ppm.

Большинство фигуративных точек циркона образует компактное поле на линии конкордии, для восьми из них получен конкордантный возраст  $2025 \pm 7$  млн лет (см. рис.4, д, е). Исключениями являются зерно с анализом 5.1 с дискордантностью 8 % и зерно с анализом 2.1, для которого получен возраст  $1945 \pm 8$  млн лет. Дискордантное зерно с анализом 5.1 имеет аномально высокие содержания Ca, Sr, P, Y, REE, Th, U, Hf.

Для циркона из пробы 346 наблюдается невысокая величина отношения  $(\text{Lu}/\text{Gd})_N = 16,3-34,6$ , причем у зерен, наиболее обогащенных LREE (аналитические точки 1.1, 6.1, 9.1, 10.1), низкая величина  $(\text{Lu}/\text{Gd})_N = 9,9-12,2$  указывает на возможное присутствие граната в парагенезисе при кристаллизации циркона.

В аляскитовых гнейсогранитах (пр. 673) циркон представлен серыми прозрачными и полупрозрачными призматическими и округлыми идиоморфными и субидиоморфными кристаллами. Длина кристаллов 200-400 мкм, 1-2 КУ. В CL-изображении зерна циркона полигенные, иногда различаются ядра и оболочки. Многие зерна имеют грубую концентрическую и пятнистую зональность. Светлые в CL участки характеризуются низкими содержаниями Th 97 ppm, U 83 ppm и отношением Th/U 1,22. Краевые части зерен обычно черные в CL и более обогащены Th 258 ppm, U 134 ppm, имеют отношение Th/U = 0,67. Линия дискордии по 10 анализам дает верхнее пересечение с возрастом  $1969 \pm 7$  млн лет, которое совпадает с возрастом  $1971 \pm 10$  млн лет черных оболочек в пробе 696 и, видимо, отражает возраст анатексиса пород в Салтахской зоне и кристаллизации аляскитового анатектического расплава.

**Изотопные Sm-Nd и Rb-Sr системы** пород изучены в пяти образцах (табл.4). Для большинства пород характерен узкий диапазон отношений  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  (0,10-0,11), в целом немного ниже среднекоровой величины этого отношения (0,12). Все породы характеризуются положительными величинами  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$  от +1,9 до +4,1, точки которых располагаются незначительно ниже линии эволюции Nd в деплетированном мантийном источнике (рис.6, а), что указывает на очень короткую коровую предысторию источника магм. Только габброиды пробы 696 находятся в пределах мантийной последовательности эволюции пород (рис.6, б), остальные уклоняются в результате обогащения пород радиогенным стронцием. Аномальные изотопные характеристики Nd имеют кристаллосланцы в пробе 672в, что возможно связано с наложенными процессами.

Таблица 4

Изотопный состав Nd и Sr в породах Салтахского массива

Номер пробы	Возраст, млн лет	Sm, ppm	Nd, ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(T)$	$T_{(\text{Nd})\text{DM}}$ , млрд лет	Rb, ppm	Sr, ppm	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\epsilon_{\text{Sr}}(T)$
346	2025	3,94	24,9	0,0957	0,511397	2,1	2,26	65,9	727	0,2621	0,710767	12,0
672	2100	6,79	37,8	0,1085	0,511515	1,9	2,36	133	1116	0,3454	0,713067	8,37
672в	2100	4,49	18,5	0,1469	0,512868	18	—	148	526	0,8136	0,728116	21,0
696	2100	13,9	73,6	0,1144	0,511683	3,6	2,25	29,5	512	0,1667	0,707128	0,77
696а	2100	4,96	27,7	0,1082	0,511621	4,1	2,20	18,6	545	0,0986	0,706265	17,8

### Обсуждение результатов

Салтахский массив сложен двупироксеновыми кристаллосланцами и плагиогнейсами гранулитовой фации, по химическому составу которых реконструируется дифференцированная серия пород от габбро до тоналитов. Несмотря на гранулитовый метаморфизм в породах Салтахского массива фиксируются многие признаки, указывающие на принадлежность их к шошонитовому

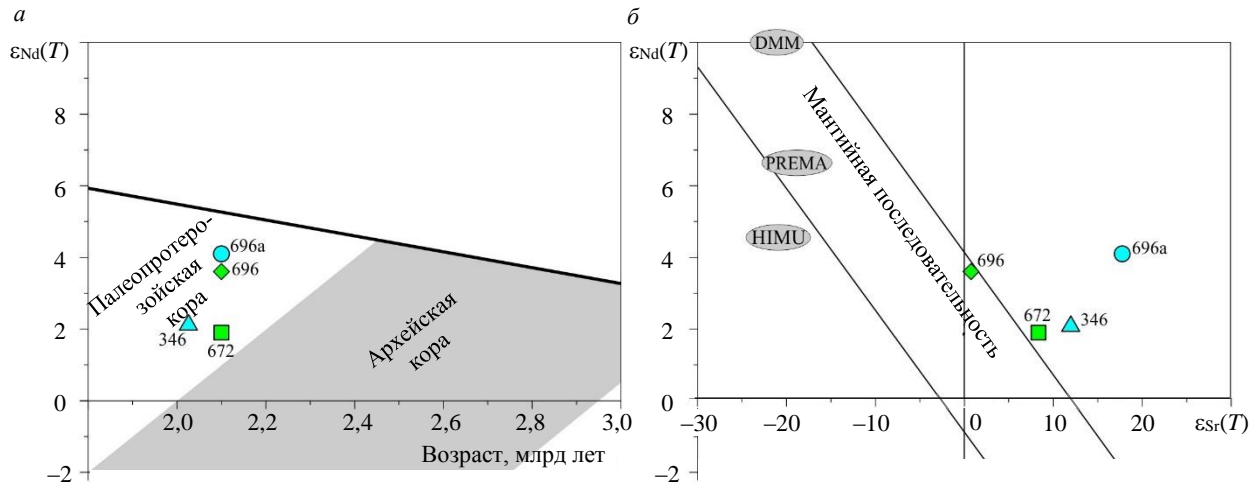


Рис.6. Диаграммы  $\epsilon_{Nd}(T)$  – возраст (а) и  $\epsilon_{Nd}(T)$  –  $\epsilon_{Sr}(T)$  (б) для пород Салтахского массива. Резервуары DMM, PREMA, HIMU приведены в соответствии с их современными изотопными параметрами по [33]. При расчете первичных изотопных отношений и величин  $\epsilon_{Nd}(T)$  и  $\epsilon_{Sr}(T)$  применялись значения для CHUR  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512638$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,1967$ ; UR  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7045$ ,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0,0827$

типу. Шошонитовые серии, согласно [32], кроме высокого  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 0,5$ , имеют нормативные гиперстен ± оливин, низкое содержание железа, высокое содержание LILE, высокое, но переменное содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (9-20 мас.%) и низкое содержание  $\text{TiO}_2$ . Особенностью шошонитов является обогащение не только щелочными и щелочноземельными элементами, но также P, Ce, Sm, тогда как содержание других несовместимых элементов Ta, Nb, Zr, Hf, Ti, Y, Yb остаются низкими [20]. Несмотря на недостаточно высокое преобладание K над Na в некоторых породах, именно повышенное содержание Ce и низкое Yb обеспечили размещение пород Салтахского массива в поле шошонитов (см. рис.2, 3).

Для Салтахского массива характерна высокая магнезиальность пород: в двупироксеновых кристаллосланцах  $\text{mg}\# = 55-70$ , в двупироксеновых плагиогнейсах 50-56. В протолитах основных гранулитов проявлено кумулятивное накопление плагиоклаза, в результате чего увеличивается содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Sr, Ba, REE и появляется положительная аномалия Eu. По геохимическим признакам ([34]:  $\text{MgO}/\text{FeO}_t < 1,39$ ;  $\text{TiO}_2 < 0,41$  мас.%;  $\text{Yb} < 1,36$  ppm; Sc 38-46 ppm;  $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,78-0,91$ ) протолиты меланокристаллосланцев относятся к некумулятивным породам, лейкокристаллосланцев ( $\text{Sc} < 33$  ppm;  $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1,06-1,14$ ) – к промежуточным между кумулятивными и некумулятивными габброидами.

В плагиогнейсах диоритового состава ниже содержание Yb 1,02-1,26 ppm, сильнее фракционированность REE  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 11-16$ . По мере роста кремнекислотности снижается содержание Y от 16,5 до 9,55 ppm и еще больше увеличивается отношение  $\text{Sr}/\text{Y} = 35-48$ . Повышенное отношение  $\text{Sr}/\text{Y} > 20$  объясняется высоким содержанием воды в расплаве, способствующей кристаллизации и фракционированию водной фенокристовой фазы (амфибола и/или биотита), подавляющей кристаллизацию плагиоклаза [35]. Наиболее отчетливо это проявлено в двупироксеновых гнейсах тоналитового состава (пр. 346, 347а),  $\text{Sr}/\text{Y} = 67,6-88$ . Тоналиты также более деплетированы HREE  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 24,8-25,6$ , вероятно в связи с фракционированием граната. Присутствие граната в рестите подтверждается содержанием редких элементов в цирконе с низкой величиной  $(\text{Lu}/\text{Gd})_N$  (циркон пр. 346,  $(\text{Lu}/\text{Gd})_N = 9,9-12,2$ ), указывающей на присутствие граната в парагенезисе при кристаллизации циркона. На фракционирование граната указывает рост в цирконе отношения  $(\text{Dy}/\text{Yb})_N$  [36]: от пород основного состава  $(\text{Dy}/\text{Yb})_N = 1,23-1,26$  до 1,43-1,58 в кислых разностях.

В целом геохимические особенности тоналитов указывают на глубинное образование расплава в равновесии с гранатсодержащей ассоциацией. В аналогичных условиях высокого давления в водной среде происходит фракционирование гранатсодержащих разностей пород, что приводит к образованию пород TTG-ассоциации в нижней части островодужной коры [37].



Обращают на себя внимание различия в геохимии калиевых гранитов (см. рис.3, *д*, *е*). Гнейсограниты (пр. 347) образуют полосы в тоналитах и по распределению REE отличаются от анатектических гнейсогранитов пр. 673 с возрастом  $1967 \pm 7$  млн лет и ближе к тоналитам пр. 346, 347а с возрастом  $2025 \pm 7$  млн лет. Спектры распределения редких и редкоземельных элементов конформны, незначительно выше содержание Rb, Ba, Th, Pb, Zr, LREE, но более проявлена деплетированность Ti, Ta, Nb, P, HREE. Возможно, граниты пр. 347 относятся к импульсу магматизма с возрастом  $2025 \pm 7$  млн лет.

*Возраст Салтахского массива.* Датирование монофракций циркона из метадiorитов в северной части массива показало U-Pb возраст 2100-2086 млн лет. Структура и геохимия ядер датированного циркона указывают на его магматический генезис. В пр. 696 максимальное значение возраста в ядрах достигает  $2103 \pm 19$  млн лет, а значение возраста  $2086 \pm 8$  млн лет получено по верхнему пересечению линии дискордии. Для глубокометаморфизованных пород снижение возраста по линии конкордии может объясняться потерями радиогенного свинца в связи с длительным нахождением пород в условиях гранулитовой фации метаморфизма [38]. Поэтому значение возраста около 2100 млн лет представляется наиболее достоверным и может приниматься как возраст кристаллизации габбродиоритов и диоритов массива.

Для циркона из метатоналитов (пр. 346) в юго-восточной части массива получен существенно меньший конкордантный возраст  $2025 \pm 7$  млн лет. В CL минерал имеет вид магматического циркона, однако его геохимия отличается от типовой для магматического циркона в результате обогащения LREE. Такое обогащение отмечалось для пористого циркона, который характеризуется микропористостью и гидротермально-индикативной геохимией, при этом морфологически не отличается от магматического циркона [31].

Основной особенностью «типичного» распределения REE для магматического циркона является рост содержания REE от La до Lu из-за увеличения в этом направлении совместимости REE с меньшими ионными радиусами в цирконе при  $La_N$  обычно  $> 10$ . Состав циркона (см. рис.5, *ж*) ближе всего к полю пористого циркона, однако на рис.5, *з* обогащенные LRRE анализы находятся в поле неопределенности. Причинами, вызывающими аномальную обогащенность LREE циркона, может быть также неравновесное распределение REE между породой и расплавом, дефекты/несовершенство кристаллической решетки циркона, радиационный распад U и Th, нарушающий кристаллическую решетку циркона, наложенные гидротермальные процессы [39-41].

Повышенное содержание LREE, связанное с присутствием выделений монацита или ортита вдоль трещин в цирконе, обычно сопровождается повышенным содержанием Th [42], однако содержания U и Th невысокие и в цирконе пробы 346 корреляция Th с LREE отсутствует (рис.5, *е*). В случае включений по трещинам можно было бы ожидать анализы как богатого, так и бедного LREE циркона, однако в пробе 346 весь проанализированный циркон обогащен LREE.

Повреждение кристаллической решетки циркона в результате радиоактивного распада U и Th облегчает обогащение его LREE под действием гидротермальных флюидов [39], которые вызывают катионный обмен в кристаллической решетке. Признаком такого обогащения является положительная корреляция между U+Th и ростом LRRE, выраженным в виде отношения  $(La/Gd)_N$  [29]. Такая зависимость отсутствует (рис.5, *е*), поэтому обогащение LREE не связано с радиоактивным облучением.

Влияние флюида фиксируется в цирконе с аналитическим кратером 5.1, где наряду с искажением U-Pb изотопной системы (дискордантность  $D = 8\%$ ) наблюдаются аномально высокие содержания в цирконе неформульных элементов [43]: Ca, Sr, P, Y, REE, Th, U, Hf. На рис.5, *з* это зерно попадает в поле гидротермального циркона. В остальных случаях дискорданность U-Pb системы низкая, содержания неформульных элементов мало отличаются от циркона с типовым магматическим профилем на других спайдерграммах, но обогащенность Ca циркона с высоким содержанием LREE фиксируется на рис.5, *з*.

По количественной оценке химических изменений циркона (индекс LREE-I по [44],  $LREE-I = (Dy/Nd) + (Dy/Sm)$ ), весь циркон измененный  $LREE-I = 1,5-8,3$  (для измененного циркона это значение должно быть  $< 10$ ).



Обогащение LREE с нарушением расчетных коэффициентов распределения циркон/расплав отмечалось в цирконе из санукитоидов, что связано с первично несовершенной структурой минерала, возникающей при кристаллизации циркона из расплава в высокотемпературных условиях при аномальном флюидном режиме [6, 30, 45]. Учитывая, что породы Салтахского плутона, как и санукитоиды [46-48], принадлежат или родственны шошонитовой серии, для тоналитов пробы 346 также можно предполагать высокотемпературные условия кристаллизации и аномальный флюидный режим, приводящий к обогащению циркона LREE. Причиной обогащения LREE может быть одновременная с цирконом кристаллизация роговой обманки и клинопироксена, извлекающих MREE и HREE из расплава и вызывая пересыщение расплава LREE [29].

Конкордантный U-Pb возраст пористого циркона  $2025 \pm 7$  млн лет мы не считаем омоложением в результате гидротермальных изменений. На это указывает ненарушенность U-Pb изотопной системы, большинство частных значений возраста конкордантные. Кроме того, близкие результаты изотопного датирования метамагматических пород получены в Хапчанском поясе в 170 км южнее Салтахского массива на Хапчанском участке, где конкордантный U-Pb возраст циркона из диоритового протолита двупироксеновых плагиокристаллосланцев составляет  $2095 \pm 10$  млн лет, тоналитового протолита двупироксеновых плагиогнейсов –  $2030 \pm 17$  млн лет. Исходя из этих соображений, Салтахский массив следует считать полихронным. В его составе присутствуют габбро и диориты с возрастом около 2100 млн лет и тоналиты с более молодым возрастом 2025 млн лет.

*Геодинамическая обстановка.* Известково-щелочной и шошонитовый магматизм является типоморфным для активных континентальных окраин. Шошонитовый магматизм в субдукционных орогенах обычно проявляется одновременно или вслед за известково-щелочным в процессе посторогенного растяжения [49, 50]. По экспериментальным данным фракционная кристаллизация известково-щелочной магмы под высоким давлением (10 кбар), приводящая к образованию шошонитов, может происходить в основании мощной коры в континентальных или в очень зрелых дугах [51]. Происхождение шошонитового магматизма связано с термальными событиями в мантии, обычно в связи с отрывом слэба или андерплейтингом, обусловленным внедрением в нижнюю часть коры базальтовой магмы в условиях растяжения [49]. Шошонитовые серии известны в обстановках континентальных, океанических, постколлизонных магматических дуг, а также во внутриплитных обстановках [19, 20].

Согласно предложенному алгоритму определения геодинамической обстановки для пород калиевой щелочности ([19], последовательность диаграмм на рис.7, а-з), породы Салтахского массива не являются внутриплитными магматическими образованиями (рис.7, а, б). На рис.7, в, г они относятся к калиевым магматическим образованиям (производным шошонитовой магмы) континентальных дуг, причем метагабброиды соответствуют породам постколлизонных дуг. Аналогичная геодинамическая обстановка реконструируется при использовании других малоподвижных элементов: Nb, La, Th, Yb (рис.7, д, е).

Составы пород Салтахского массива располагаются в поле щелочных дуг (рис.7, д). Положение габброидов в поле океанических островов на рис.7, е связано, по нашему мнению, с обеднением габброидов Th в процессе гранулитового метаморфизма. Тектонотипом щелочных дуг, согласно авторам диаграмм 7, д, е [34], являются Эолийская [52] и Апеннинско-Магрибская дуги современного Западного Средиземноморья [53], связанные с посторогенным растяжением земной коры.

По геохимии изученный циркон формировался в пределах континентальной коры и концентрируется в поле континентальных дуг (рис.7, ж). Поле точек вытянуто вверх, что интерпретируется как формирование магм из обогащенного мантийного источника или привнос корового материала в мантийный источник. На рис.7, з состав циркона локализуется в пределах мантийной последовательности пород, в основном по причине низкого содержания Yb в цирконе, что подтверждается для пород Салтахского плутона положительными величинами  $\epsilon_{Nd}(T)$  от +1,9 до +4,1.

Таким образом, геодинамическая обстановка формирования Салтахского массива, вероятно, соответствовала приконтинентальной магматической дуге, возможно испытывающей посторогенное растяжение. Шошонитовые серии обычно формируются в постколлизонных, внутридуговых и тыловодужных рифтах, когда обстановка сжатия сменяется на режим растяжения.

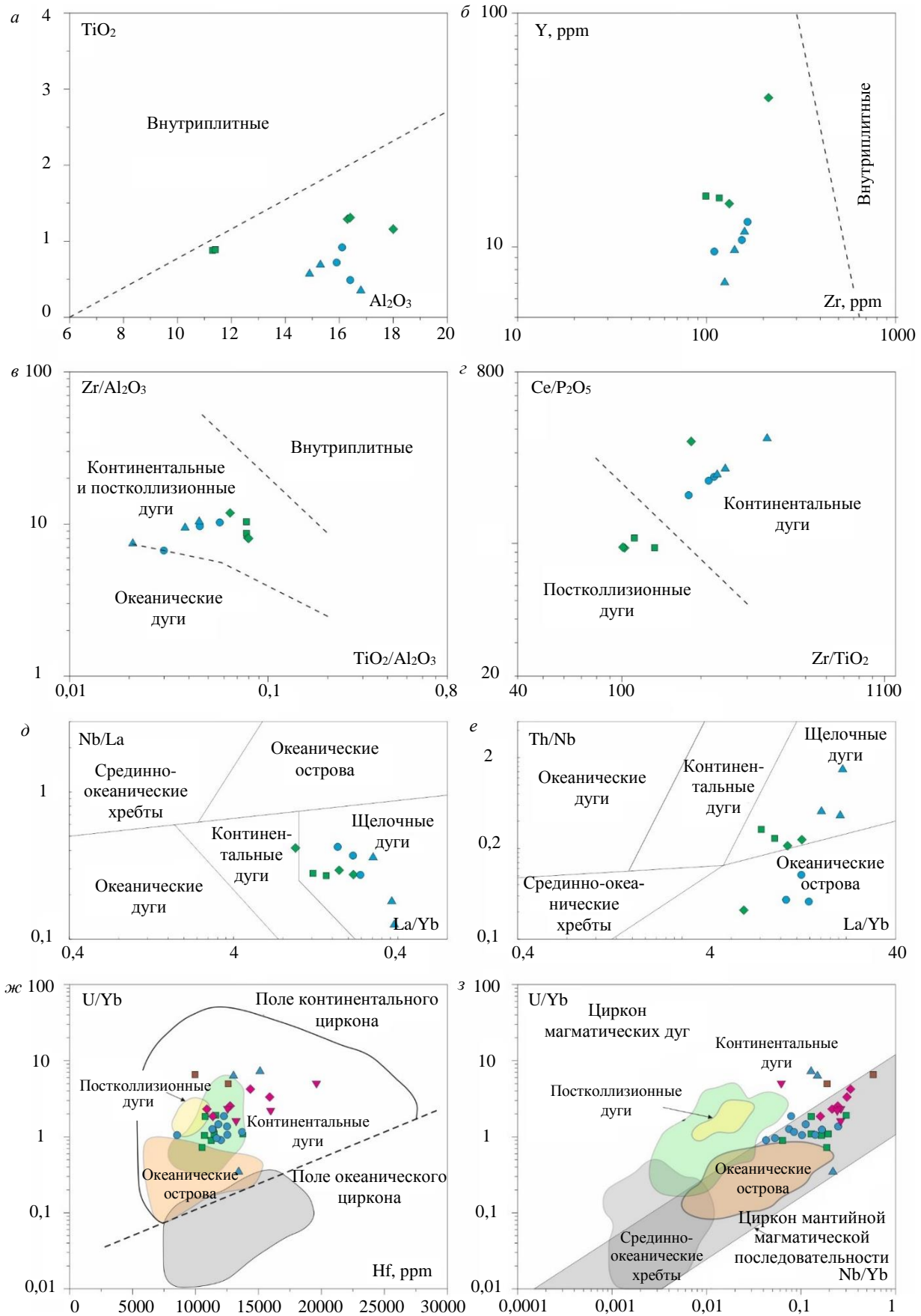


Рис.7. Диаграммы геодинамических обстановок формирования Салтахского массива: а-г – по [19]; д, е – по [34]; ж, з – диаграммы геодинамических обстановок [54] формирования пород Салтахского массива по составу циркона. Условные обозначения см. на рис.5



*Возраст метаморфизма и анатексиса.* По данным ранее проведенных исследований в Хапчанском поясе седиментогенные отложения были тотально метаморфизованы 1,97 млрд лет назад, а несколько позднее подверглись ареальному гранулитовому метаморфизму, пик которого приходится на возраст 1,91-1,92 млрд лет [55]. Результаты исследований в Билляхской тектонической зоне [1] позволили авторам прийти к заключению, что коллизия Далдынского и Хапчанского террейнов происходила в диапазоне между 1983±3 и 1971±4 млн лет. Результаты датирования в настоящей работе не позволяют количественно уточнить время коллизионного метаморфизма, но показывают специфику и определенную последовательность метаморфических процессов во время главного этапа метаморфизма.

В цирконе датированных проб метаморфические оболочки представлены двумя типами. Более ранний циркон оболочек (1986±26 млн лет) – белый в CL, сохранился слабо и обычно окружен более поздней каймой (1971±10 млн лет) почти черного в CL циркона. Для этих двух типов циркона наблюдаются контрастные геохимические характеристики отношений Th/U, Eu/Eu\*, Ce/Ce\*. По данным моделирования [26] основными факторами, влияющими на величину отношения Th/U супрасолидусного метаморфического циркона, являются концентрации Th и U в системе, а также разрушение и рост монацита или алланита, находящихся в равновесии с цирконом. Основная Th-фаза – монацит и алланит, растущие одновременно с собсолидусным цирконом, понижают содержание Th, в результате уменьшается отношение Th/U [26]. Циркон, выросший на ранних этапах около пика метаморфизма, будет иметь повышенные отношения Th/U (в нашем случае это белые оболочки Th/U = 0,51), тогда как циркон, выросший вблизи солидуса, – относительно низкие отношения Th/U (темные каймы Th/U = 0,08-0,13).

Белый в CL циркон имеет более высокое отношение Ce/Ce\* = 19,8 и более выраженную отрицательную аномалию Eu (Eu/Eu\* = 0,65), свидетельствующие об его образовании в области стабильности плагиоклаза в условиях высокой фугитивности кислорода [56].

Черный в CL циркон характеризуется положительной аномалией Eu (Eu/Eu\* = 1,54-2,92), но более слабой аномалией Ce (Ce/Ce\* = 3,22-3,58), что характерно для сильно восстановительной обстановки. Положительная аномалия Eu, кроме того, может объясняться разрушением плагиоклаза (замещение его гранатом и пироксеном), обогащающим Eu среду кристаллизации циркона. Следует отметить, что, как и темные оболочки циркона, анатектические аляскитовые гнейсограниты (пр. 673) отличаются резкой положительной породной аномалией Eu. Однако оба типа циркона имеют относительно высокие отношения (Lu/Gd)<sub>N</sub>: у белого циркона эта величина составляет 28,8 и еще более высокое отношение у черного циркона (Lu/Gd)<sub>N</sub> = 51,9-53,3, указывающее на ограниченное участие граната в метаморфическом парагенезисе. Возможно, это связано с характером протолита, представленного мафическими породами, в которых в условиях гранулитовой фации предпочтительно формировался пироксен, а не гранат.

С пиком метаморфизма, вероятно, связано формирование аляскитовых гнейсогранитов, образующих лейконому мигматитов, которые имеют высокое содержание K<sub>2</sub>O, большие величины отношений La/Yb, Sr/Y и положительную аномалию Eu (Eu/Eu\* = 12). Это дает основание предполагать, что происходило частичное плавление пород под действием калиевых флюидов с кумулятивным накоплением плагиоклаза в лейкосоте мигматитов в равновесии с гранат-гранулитовым реститом. Образование лейкогранитов, равновесных с гранатсодержащим реститом, возможно при температуре 680 °C и давлении 11 кбар в условиях избыточной обводненности [57]. Геохимические особенности аляскитовых гранитов свидетельствуют, что в плавлении участвовал плагиоклаз, в результате чего происходило обогащение расплава Al, Sr и Eu. Формирование аляскитовых гранитов связано с коллизионными процессами, а избыточно водный тип плавления характерен для коллизионных надвигов, когда относительно холодная обводненная пододвинутая плита высвобождает воду в более горячую верхнюю плиту [57]. Палеопротерозойские граниты аляскитового типа, связанные с обширными полями послонных мигматитов, входят в состав маганского аляскит-лейкогранит-мигматитового комплекса и пользуются повсеместным развитием в пределах Анабарского щита [55], что указывает на интенсивность аляскит-гранитового магматизма, вероятно связанного с коллизионными процессами. По результатам U-Pb датирования возрастной интервал формирования маганского комплекса – 1984-1952 млн лет [55]. В этом же диапазоне находится конкордантный возраст циркона из аляскитовых гнейсогранитов (пр. 673) 1967±7 млн лет.



## Выводы

Салтахский интрузивный массив габбро-диорит-тоналитового состава метаморфизован в гранулитовой фации и представлен двупироксеновыми кристаллосланцами и плагиогнейсами. По геохимическим данным он образовался в результате кристаллизации известково-щелочной и шшонитовой магмы в обстановке растяжения приконтинентальной магматической дуги. Изотопно-геохимические характеристики, включая положительные величины  $\epsilon_{Nd}(T)$  от +1,9 до +4,1 и фракционированные HREE, указывают на глубинное образование расплава в равновесии с гранатсодержащей ассоциацией. По данным U-Pb датирования циркона (SHRIMP II) породы массива внедрялись в диапазоне 2100-2025 млн лет из глубинного источника, который имел короткую коровую предысторию ( $T(Nd)DM = 2,20-2,26$  млрд лет). Метаинтрузивные породы Салтахского массива по возрасту близки к ранее изученным ортогранулитам Хапчанского пояса [58] и интерпретируются нами как часть метаморфизованного ювенильного палеопротерозойского надсубдукционного комплекса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Смедов А.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др. Возраст и продолжительность формирования билляхской зоны тектонического меланжа, Анабарский щит // Петрология. 2012. Т. 20. № 3. С. 315-330.
2. Суханов М.К., Рачков В.С. Салтахский массив Анабарского щита // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1986. № 12. С. 47-58.
3. Лутц Б.Г., Оксман В.С. Глубокоэродированные зоны разломов Анабарского щита. М.: Наука, 1990. 259 с.
4. Williams I.S. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe // Reviews in Economic Geology. 1998. Vol. 7. P. 1-35. DOI: [10.5382/Rev.07](https://doi.org/10.5382/Rev.07)
5. Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M. et al. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology // Chemical Geology. 2003. Vol. 200. Iss. 1-2. P. 155-170. DOI: [10.1016/S0009-2541\(03\)00165-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00165-7)
6. Федотова А.А., Бибикина Е.В., Симакин С.Г. Геохимия циркона (данные ионного микронзонда) как индикатор генезиса минерала при геохронологических исследованиях // Геохимия. 2008. № 9. С. 980-997.
7. Скублов С.Г., Левашова Е.В., Мамыкина М.Е. и др. Полифазный Белокурихинский массив гранитов, Горный Алтай: изотопно-геохимическое исследование циркона // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 552-575.
8. Levashova E.V., Mamkina M.E., Skublov S.G. et al. Geochemistry (TE, REE, Oxygen) of Zircon from Leucogranites of the Belokurikhinsky Massif, Gorny Altai, as Indicator of Formation Conditions // Geochemistry International. 2023. Vol. 61. № 13. P. 1323-1339. DOI: [10.1134/S001670292311006X](https://doi.org/10.1134/S001670292311006X)
9. Skublov S.G., Petrov D.A., Galankina O.L. et al. Th-Rich Zircon from a Pegmatite Vein Hosted in the Wiborg Rapakivi Granite Massif // Geosciences. 2023. Vol. 13. Iss. 12. P. 1-13. DOI: [10.3390/geosciences13120362](https://doi.org/10.3390/geosciences13120362)
10. Левашова Е.В., Скублов С.Г., Ойцева Т.А. и др. Изотопно-геохимические особенности циркона из постколлизийных гранитов: на примере рибекитовых гранитов Верхнее Эспе, Восточный Казахстан // Геохимия. 2022. Т. 67. № 1. С. 3-18. DOI: [10.31857/S0016752522010083](https://doi.org/10.31857/S0016752522010083)
11. Румянцев Н.А., Скублов С.Г., Ванштейн 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. 44-73. DOI: [10.31857/S0869605522010099](https://doi.org/10.31857/S0869605522010099)
12. Skublov S.G., Romyantseva N.A., Li Qiuli 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. N 1. P. 5-16. DOI: [10.1007/s12583-021-1422-2](https://doi.org/10.1007/s12583-021-1422-2)
13. Адамская Е.В., Бадинова В.П., Беляцкий Б.В. и др. Изотопная геология норильских месторождений. СПб: ВСЕГЕИ, 2017. 348 с.
14. Jacobsen S.B., Wasserburg G.J. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites, II // Earth and Planetary Science Letters. 1984. Vol. 67. Iss. 2. P. 137-150.
15. Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implications for crustal evolution // Earth and Planetary Science Letters. 1988. Vol. 87. Iss. 3. P. 249-265. DOI: [10.1016/0012-821X\(88\)90013-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90013-1)
16. Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // American Mineralogist. 2010. Vol. 95. № 1. P. 185-187. DOI: [10.2138/AM.2010.3371](https://doi.org/10.2138/AM.2010.3371)
17. Hastie A.R., Kerr A.C., Pearce J.A., Mitchell S.F. Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks using Immobile Trace Elements: Development of the Th-Co Discrimination Diagram // Journal of Petrology. 2007. Vol. 48. Iss. 12. P. 2341-2357. DOI: [10.1093/petrology/egm062](https://doi.org/10.1093/petrology/egm062)
18. O'Connor J.T. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios // U.S. Geological Survey. Professional Paper 525-B. 1965. P. 79-84.
19. Müller D., Rock N.M.S., Groves D.I. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: A pilot study // Mineralogy and Petrology. 1992. Vol. 46. Iss. 4. P. 259-289. DOI: [10.1007/BF01173568](https://doi.org/10.1007/BF01173568)
20. Pearce J.A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries // Andesites. Orogenic Andesites and Related Rocks. John Wiley & Sons, 1982. P. 525-548.
21. de la Roche H., Leterrier J., Grandclaude P., Marchal M. A classification of volcanic and plutonic rocks using R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>-diagram and major-element analyses – Its relationships with current nomenclature // Chemical Geology. 1980. Vol. 29. Iss. 1-4. P. 183-210. DOI: [10.1016/0009-2541\(80\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90020-0)



22. *Peccerillo A., Taylor S.R.* Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1976. Vol. 58. Iss. 1. P. 63-81. DOI: [10.1007/BF00384745](https://doi.org/10.1007/BF00384745)
23. *Irvine T.N., Baragar W.R.A.* A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks // Canadian Journal of Earth Sciences. 1971. Vol. 8. № 5. P. 523-548. DOI: [10.1139/e71-055](https://doi.org/10.1139/e71-055)
24. *Ross P.-S., Bédard J.H.* Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams // Canadian Journal of Earth Sciences. 2009. Vol. 46. № 11. P. 823-839. DOI: [10.1139/E09-054](https://doi.org/10.1139/E09-054)
25. *Sun S.-s., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society, London, Special Publications. 1989. Vol. 42. P. 313-345. DOI: [10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19](https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19)
26. *Yakymchuk C., Kirkland C.L., Clark C.* Th/U ratios in metamorphic zircon // Journal of Metamorphic Geology. 2018. Vol. 36. Iss. 6. P. 715-737. DOI: [10.1111/jmg.12307](https://doi.org/10.1111/jmg.12307)
27. *Watson E.B., Harrison T.M.* Zircon Thermometer Reveals Minimum Melting Conditions on Earliest Earth // Science. 2005. Vol. 308. Iss. 5723. P. 841-844. DOI: [10.1126/science.1110873](https://doi.org/10.1126/science.1110873)
28. *Hoskin P.W.O.* Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. Vol. 69. Iss. 3. P. 637-648. DOI: [10.1016/J.GCA.2004.07.006](https://doi.org/10.1016/J.GCA.2004.07.006)
29. *Whitehouse M.J., Kamber B.S.* On the overabundance of light rare earth elements in terrestrial zircons and its implication for Earth's earliest magmatic differentiation // Earth and Planetary Science Letters. 2002. Vol. 204. Iss. 3-4. P. 333-346. DOI: [10.1016/S0012-821X\(02\)01000-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01000-2)
30. *Bouvier A.-S., Ushikubo T., Kita N.T. et al.* Li isotopes and trace elements as a petrogenetic tracer in zircon: insights from Archean TTGs and sanukitoids // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2012. Vol. 163. Iss. 5. P. 745-768. DOI: [10.1007/s00410-011-0697-1](https://doi.org/10.1007/s00410-011-0697-1)
31. *Grimes C.B., John B.E., Cheadle M.J. et al.* On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2009. Vol. 158. Iss. 6. P. 757-783. DOI: [10.1007/s00410-009-0409-2](https://doi.org/10.1007/s00410-009-0409-2)
32. *Morrison G.W.* Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association // Lithos. 1980. Vol. 13. Iss. 1. P. 97-108. DOI: [10.1016/0024-4937\(80\)90067-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(80)90067-5)
33. *Zindler A., Hart S.* Chemical Geodynamics // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1986. Vol. 14. P. 493-571. DOI: [10.1146/annurev.ea.14.050186.002425](https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.002425)
34. *Hollocher K., Robinson P., Walsh E., Roberts D.* Geochemistry of Amphibolite-Facies Volcanics and Gabbros of the Støren Nappe in Extensions West and Southwest of Trondheim, Western Gneiss Region, Norway: A Key to Correlations and Paleotectonic Settings // American Journal of Science. 2012. Vol. 312. Iss. 4. P. 357-416. DOI: [10.2475/04.2012.01](https://doi.org/10.2475/04.2012.01)
35. *Richards J.P., Spell T., Rameh E. et al.* High Sr/Y Magmas Reflect Arc Maturity, High Magmatic Water Content, and Porphyry Cu ± Mo ± Au Potential: Examples from the Tethyan Arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan // Economic Geology. 2012. Vol. 107. № 2. P. 295-332. DOI: [10.2113/econgeo.107.2.295](https://doi.org/10.2113/econgeo.107.2.295)
36. *Ze Liu, Di-Cheng Zhu, Jagoutz O. et al.* Magmatic Evolution following Damp Tholeiitic and Wet Calc-alkaline Liquid Lines of Descent: an Eastern Pontides (NE Turkey) Example // Journal of Petrology. 2021. Vol. 62. Iss. 5. № ega088. DOI: [10.1093/petrology/egaa088](https://doi.org/10.1093/petrology/egaa088)
37. *Jagoutz O., Schmidt M.W., Enggist A. et al.* TTG-type plutonic rocks formed in a modern arc batholith by hydrous fractionation in the lower arc crust // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2013. Vol. 166. Iss. 4. P. 1099-1118. DOI: [10.1007/s00410-013-0911-4](https://doi.org/10.1007/s00410-013-0911-4)
38. *O'Brien T.M., Miller E.L.* Continuous zircon growth during long-lived granulite facies metamorphism: a microtextural, U–Pb, Lu–Hf and trace element study of Caledonian rocks from the Arctic // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2014. Vol. 168. Iss. 4. № 1071. DOI: [10.1007/s00410-014-1071-x](https://doi.org/10.1007/s00410-014-1071-x)
39. *Rayner N., Stern R.A., Carr S.D.* Grain-scale variations in trace element composition of fluid-altered zircon, Acasta Gneiss Complex, northwestern Canada // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2005. Vol. 148. Iss. 6. P. 721-734. DOI: [10.1007/s00410-004-0633-8](https://doi.org/10.1007/s00410-004-0633-8)
40. *Cavosie A.J., Valley J.W., Wilde S.A., E.I.M.F.* Correlated microanalysis of zircon: Trace element,  $\delta^{18}\text{O}$ , and U–Th–Pb isotopic constraints on the igneous origin of complex > 3900 Ma detrital grains // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2006. Vol. 70. Iss. 22. P. 5601-5616. DOI: [10.1016/j.gca.2006.08.011](https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.08.011)
41. *Shao-Bing Zhang, Yong-Fei Zheng, Zi-Fu Zhao.* Temperature effect over garnet effect on uptake of trace elements in zircon of TTG-like rocks // Chemical Geology. 2010. Vol. 274. Iss. 1-2. P. 108-125. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2010.04.002](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.04.002)
42. *Whitehouse M.J., Kamber B.S.* Assigning Dates to Thin Gneissic Veins in High-Grade Metamorphic Terranes: A Cautionary Tale from Akilia, Southwest Greenland // Journal of Petrology. 2005. Vol. 46. Iss. 2. P. 291-318. DOI: [10.1093/petrology/egh075](https://doi.org/10.1093/petrology/egh075)
43. *Pidgeon R.T., Nemchin A.A., Roberts M.P. et al.* The accumulation of non-formula elements in zircons during weathering: Ancient zircons from the Jack Hills, Western Australia // Chemical Geology. 2019. Vol. 530. № 119310. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2019.119310](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119310)
44. *Bell E.A., Boehnke P., Harrison T.M.* Recovering the primary geochemistry of Jack Hills zircons through quantitative estimates of chemical alteration // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2016. Vol. 191. P. 187-202. DOI: [10.1016/j.gca.2016.07.016](https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.07.016)
45. *Скублов С.Г., Лобач-Жученко С.Б., Гусева Н.С. и др.* Распределение редкоземельных и редких элементов в цирконах из миаскитовых лампроитов Панозерского комплекса Центральной Карелии // Геохимия. 2009. № 9. С. 958-971.
46. *Stevenson R., Henry P., Gariépy C.* Assimilation–fractional crystallization origin of Archean Sanukitoid Suites: Western Superior Province, Canada // Precambrian Research. 1999. Vol. 96. Iss. 1-2. P. 83-99. DOI: [10.1016/S0301-9268\(99\)00009-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(99)00009-1)
47. *Lobach-Zhuchenko S.B., Rollinson H.R., Chekulaev V.P. et al.* The Archean sanukitoid series of the Baltic Shield: geological setting, geochemical characteristics and implications for their origin // Lithos. 2005. Vol. 79. Iss. 1-2. P. 107-128. DOI: [10.1016/j.lithos.2004.04.052](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.052)
48. *Lobach-Zhuchenko S.B., Rollinson H., Chekulaev V.P. et al.* Petrology of a Late Archean, Highly Potassic, Sanukitoid Pluton from the Baltic Shield: Insights into Late Archean Mantle Metasomatism // Journal of Petrology. 2008. Vol. 49. Iss. 3. P. 393-420. DOI: [10.1093/petrology/egm084](https://doi.org/10.1093/petrology/egm084)



49. *Pe-Piper G., Piper D.J.W., Koukouvelas I. et al.* Postorogenic shoshonitic rocks and their origin by melting underplated basalts: The Miocene of Limnos, Greece // *GSA Bulletin*. 2009. Vol. 121. № 1-2. P. 39-54. DOI: [10.1130/B26317.1](https://doi.org/10.1130/B26317.1)
50. *Соловьев С.Г.* Металлогения шошонитового магматизма. В 2 томах. Т. 1. М.: Научный мир, 2014. 528 с.
51. *Meen J.K.* Formation of shoshonites from calcalkaline basalt magmas: geochemical and experimental constraints from the type locality // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1987. Vol. 97. Iss. 3. P. 333-351. DOI: [10.1007/BF00371997](https://doi.org/10.1007/BF00371997)
52. *de Astis G., Ventura G., Vilardo G.* Geodynamic significance of the Aeolian volcanism (Southern Tyrrhenian Sea, Italy) in light of structural, seismological, and geochemical data // *Tectonics*. 2003. Vol. 22. Iss. 4. № 1040. DOI: [10.1029/2003TC001506](https://doi.org/10.1029/2003TC001506)
53. *Carminati E., Lustrino M., Doglioni C.* Geodynamic evolution of the central and western Mediterranean: Tectonics vs. igneous petrology constraints // *Tectonophysics*. 2012. Vol. 579. P. 173-192. DOI: [10.1016/j.tecto.2012.01.026](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.026)
54. *Grimes C.B., Wooden J.L., Cheadle M.J., John B.E.* «Fingerprinting» tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2015. Vol. 170. Iss. 5-6. № 46. DOI: [10.1007/s00410-015-1199-3](https://doi.org/10.1007/s00410-015-1199-3)
55. *Гусев Н.И.* Анабарский щит Сибирского кратона. Вещественный состав, геохимия, геохронология. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 188 с.
56. *Trail D., Watson E.B., Tailby N.D.* Ce and Eu anomalies in zircon as proxies for the oxidation state of magmas // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012. Vol. 97. P. 70-87. DOI: [10.1016/j.gca.2012.08.032](https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.08.032)
57. *Frost C.D., Swapp S.M., Frost B.R. et al.* Leucogranites of the Teton Range, Wyoming: A record of Archean collisional orogeny // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2016. Vol. 185. P. 528-549. DOI: [10.1016/j.gca.2015.12.015](https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.12.015)
58. *Гусев Н.И., Сергеева Л.Ю., Скублов С.Г.* Свидетельства субдукции палеопротерозойской океанической коры в Хапчанском поясе Анабарского щита Сибирского кратона // *Петрология*. 2021. Т. 29. № 2. С. 115-135. DOI: [10.31857/S0869590321020047](https://doi.org/10.31857/S0869590321020047)

**Авторы:** Николай Иванович Гусев, начальник отдела, <https://orcid.org/0000-0002-3461-0961> (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург, Россия; Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия), Людмила Юрьевна Романова, канд. геол.-минерал. наук, ведущий инженер, [sergeeva.luda02@yandex.ru](mailto:sergeeva.luda02@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0005-2766-0097> (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург, Россия; Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Сравнительный анализ фракционирования изотопов азота и углерода при образовании алмаза на основе определения $\beta$ -факторов

Д.П.Крылов

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

**Как цитировать эту статью:** Крылов Д.П. Сравнительный анализ фракционирования изотопов азота и углерода при образовании алмаза на основе определения  $\beta$ -факторов // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16406. С. 40-50. [EDN SUBOCN](#)

### Аннотация

Приведены первые количественные оценки изотопного фракционирования азота при кристаллизации алмаза относительно азотсодержащих соединений флюида с использованием квантово-механических (DFT) расчетов по дефектной (с азотом замещения) решетке алмаза. При равновесном фракционировании изотопов  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  уменьшается в ряду соединений  $\text{NH}_4^+ > \text{N}_2 >$  (алмаз,  $\text{NH}_3$ )  $> \text{CH}_3\text{N} > \text{CN}^- > \text{NH}_2$ . При температуре 1100-1200 °С фракционирование между алмазом и азотсодержащими компонентами флюида оценивается как -2,23, -0,77, 0,01, 0,44, 1,31 и 2,85 % и существенно (более чем на 1 %) выше имеющихся оценок, ранее полученных на основе моделирования связи C-N в алмазе по аналогии с молекулами HCN или  $\text{CN}^-$ . В зависимости от преобладающих субстанций азота и углерода в минералообразующем флюиде образование алмаза может сопровождаться различными трендами изменения изотопного состава, что выражается как зональностью отдельных зерен алмаза, так и ковариациями изотопного состава  $\delta^{15}\text{N}$  vs  $\delta^{13}\text{C}$  при последовательной кристаллизации. В условиях доминирования  $\text{NH}_3$  изотопное фракционирование азота между алмазом и флюидом не превышает 0,1-0,2 % и изотопные сдвиги при температуре  $\approx 1100$  °С  $\Delta^{15}\text{N} \ll \Delta^{13}\text{C}$ . В бедных азотом восстановленных мантийных флюидах возможное присутствие компонентов с низким сродством к тяжелому изотопу при температуре образования алмаза (особенно  $\text{NH}_2$ ) обуславливает высокое изотопное фракционирование алмаз-флюид и повышенные отношения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$ . Окисленные флюиды с преобладанием  $\text{CO}_2$  или  $\text{CO}$  в сочетании с компонентом  $\text{N}_2$  характеризуются близкими к нулю отношениями  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  между алмазом и флюидом за счет преобладания фракционирования изотопов углерода по сравнению с изотопами азота, которые существенно меняются в зависимости от коэффициента распределения азота между алмазом и средой роста.

### Ключевые слова

алмаз; факторы изотопного фракционирования;  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ;  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$

### Финансирование

Работа выполнена в рамках темы НИР FMVW-2021-0003.

Поступила: 11.03.2024

Принята: 24.09.2024

Онлайн: 06.12.2024

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Условия роста и преобразования алмаза отображаются в его морфологических свойствах, спектроскопических особенностях, составе примесей [1-3] и включений [4, 5]. Один из важнейших индикаторов условий образования – изотопный состав углерода алмаза – характеризует как исходный субстрат (эклогиты, перидотиты, вебстериты с разной долей осадочной и мантийной компонент), так и минералообразующий флюид (окисленный, восстановленный, мантийный, поверхностный) [6]. Алмаз может представлять наиболее древние изолированные части мантии [7] и таким образом сохранять изотопные метки углерода начиная с ранних стадий формирования Земли. Помимо углерода для алмаза характерны значительные количества азота (до тысяч и даже десятков тысяч ppm в субдукционных микроалмазах), вхождение которого обусловлено минералообразующими флюидами [8]. Сочетание изотопных систем  $^{12}\text{C}$ - $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ - $^{15}\text{N}$  широко применяется не только для оценки условий формирования, но и характеристики циклов углерода и азота в глубинных условиях. Очень высокая устойчивость углерода и азота в алмазе [9] способствует сохранности



изотопных систем как в условиях формирования на больших (>110 км) глубинах, так и при подъеме к поверхности. Сочетание двух элементов в алмазе представляет уникальную возможность изучения мантии Земли до глубины около 800 км и возраста до 3,5 млрд лет [10]. Учитывая низкое в целом содержание азота в верхней мантии, изотопное отношение  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  алмаза могло бы являться чувствительным показателем смешения мантийного и осадочного резервуаров [11].

Наблюдаемые в алмазе значительные вариации изотопного состава можно объяснять как изотопной неоднородностью, в том числе смешением, исходного субстрата, так и фракционированием изотопов при кристаллизации. Для количественной характеристики процессов, относящихся к образованию алмаза, первостепенное значение имеет определение величины изотопного фракционирования между алмазом и средой, из которой он кристаллизуется. Факторы изотопного фракционирования углерода в зависимости от температуры определены для многих систем, относящихся к образованию алмаза, включая алмаз- $\text{CO}_2$ , алмаз- $\text{CaCO}_3$ , алмаз- $\text{CH}_4$  и ряд других [12-14]. В отличие от изотопов углерода, фракционирование изотопов азота для алмаза практически не изучено. Экспериментальных данных по распределению изотопов азота между алмазом и потенциальными азотсодержащими веществами в средах роста алмаза до сих пор нет. Известные вычисленные (теоретические) факторы фракционирования изотопов азота ограничиваются отдельными молекулами ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ ) в равновесии с произвольными молекулярными аналогами связи C-N алмаза, как HCN или  $\text{CN}^-$  [9]. В отсутствие более или менее надежных определений факторов фракционирования азота между алмазом и мантийным флюидом невозможно, например, разделить процессы смешения азота флюида разных источников, оценить эволюцию изотопного состава при различных механизмах взаимодействия флюида с образующимся алмазом и т.д.

Цель настоящей работы – дать первые количественные оценки равновесного изотопного фракционирования азота при кристаллизации алмаза относительно азотсодержащих соединений флюида с использованием квантово-механических (в рамках теории функционала плотности DFT) расчетов для дефектной (N-содержащей) решетки алмаза и N-содержащих молекул минералообразующего флюида. С целью сравнения расчеты проведены также для алмаза без азота (фракционирование изотопов углерода) и углеродсодержащих молекул флюида.

### Методика расчетов

Фактор изотопного фракционирования между фазами A и B,  $\alpha_{AB}$  ( $R_A/R_B$ , R – отношение атомных концентраций более тяжелого и легкого изотопов в данном соединении) при изотопном равновесии определяется выражением

$$1000 \ln \alpha_{AB} = 1000 \ln \beta_A - 1000 \ln \beta_B, \quad (1)$$

где величины  $\beta$  – приведенные отношения статистических сумм рассматриваемых изотопологов, или так называемые  $\beta$ -факторы – без учета ангармоничности рассчитываются из частот колебаний (фононных спектров) изотопологов в зависимости от температуры [15],

$$\beta = \prod_i \left( \frac{u_i^*}{u_i} \right) \left( \frac{e^{-u_i^*/2}}{e^{-u_i/2}} \right) \left( \frac{1 - e^{-u_i}}{1 - e^{-u_i^*}} \right),$$

или в логарифмической форме

$$\ln \beta = \sum_i \ln \frac{\sinh(0,5u_i)}{\sinh(0,5u_i^*)} - \sum_i \ln \frac{u_i}{u_i^*}, \quad (2)$$

$u$  – безразмерная частота,  $u = hv/kT$ ;  $v$  – частота колебаний гармонического осциллятора;  $T$  – температура, К;  $h$  и  $k$  – постоянные Планка и Больцмана; верхний индекс \* относится к более тяжелому изотопу; нижним индексом  $i$  пронумерованы независимые гармонические частоты колебаний соединения. Суммирование производится по всем колебательным состояниям ( $3N-6$  нелинейной молекулы,  $3N-5$  линейной молекулы,  $3N-3$  кристалла);  $N$  – число атомов соединения. Синус гиперболический  $\sinh(x) \equiv (\exp(x) - \exp(-x))/2$ .

Экспериментальные частоты колебаний известны в большинстве случаев только для наиболее распространенных изотопологов (или для их природных смесей) отдельных веществ. Поэтому для определения значений  $v$  приведенного выше соотношения используются методы вычислений

«из первых принципов» (*ab initio*) на основе положения ядер и электронных свойств элементов. В настоящей работе для определения частот колебаний изотопологов применен метод «замороженных фононов» теории функционала плотности, реализованный в программе CRYSTAL (актуальная версия CRYSTAL23 [16]) с использованием набора гауссовых полноэлектронных базисов 6-311G(d). Совокупности базисных функций углерода и азота приведены на сайте программы ([https://www.crystal.unito.it/Basis\\_Sets/](https://www.crystal.unito.it/Basis_Sets/)). Перед проведением расчетов фононных спектров, выполнена оптимизация параметров внешних орбиталей базисных функций и сравнение значений частот колебаний для кристаллической решетки чистого алмаза и алмаза с разным содержанием примесей азота, а также структурная оптимизация. Среди опробованных функционалов взаимодействия между атомами (в том числе, LDA, GGA, гибридных) минимальное расхождение с экспериментальными значениями вычисленных частот колебаний чистого алмаза получено для функционала WC1LYP. Порог сходимости по энергии для вычислений методом самосогласованного поля (SCF) выбран на уровне  $10^{-11}$  а.е.м. (Хартри) как при оптимизации структуры, так и при вычислении частот колебаний, а усечение рядов суммирования контролировалось параметрами программы CRYSTAL (TOLINTEG) со значениями (9; 9; 9; 9; 25).

Азот в алмазе находится в различных состояниях, в том числе на месте углерода (азот замещения), и присутствует в разных формах агрегации [17]. Агрегированные формы азота (А- и В-центры) обычно не связываются с исходным образованием дефектов, а считаются вторичными продуктами при долговременном, порядка миллиардов лет, нахождении (естественном отжиге) в условиях высоких температур. При этом агрегация ограничивается перемещением атомов в пределах отдельных зерен и не приводит к изменению общего изотопного баланса кристалла алмаза. В настоящей статье рассмотрены изотопные эффекты, связанные с первичным (при образовании алмаза) вхождением азота на место углерода с возникновением азота замещения (С-центры). Возможность нахождения атомов азота вне С-центра (дислокациях между узлами решетки и т.п.) не рассмотрена, как и вхождение азота в виде А-центра при кристаллизации [18]. Таким образом, атомы углерода при вычислениях замещались атомами азота и определялись энергетически наиболее выгодные конфигурации атомов в структуре алмаза с С-центрами, а затем фононные спектры изотопологов азота с последующим расчетом  $\beta$ -факторов азота замещения. Для адекватного отображения реальных концентраций азота использовался метод расширенных ячеек (суперъячеек) с количеством атомов углерода  $n = 16; 32; 54; 128$  (при замене одного атома углерода на атом азота в кубической решетке). Сходимость результатов достигается при  $n = 32-54$  (что соответствует 20000-30000 ppm и больше, чем максимальная концентрация азота в природных алмазах). Дальнейшее увеличение объема расширенных ячеек вызывает существенные затраты вычислительных ресурсов без какого-либо значимого изменения результатов, в том числе величин  $\beta$ -факторов.

Расчеты  $\beta$ -факторов для молекул, представляющих возможные компоненты флюида при образовании алмаза (к совокупности соединений  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{N}_2$  в работе добавлены  $\text{NH}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{N}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ), включали последовательность оптимизации координат ядер с дальнейшим определением колебательных уровней и вычислением величин  $\beta$ . При вычислениях частот колебаний молекулярных соединений использован гибридный функционал B3LYP, наборы базисных векторов качества TVZP в совокупности с дисперсионной поправкой D3 [19], что позволило минимизировать расхождение вычисленных и экспериментально определенных частот. Для еще более точного отображения экспериментальных спектров применен фактор шкалирования SF [20] с приведением рассчитанных частот основного изотополога к экспериментальным и соответствующим изменением частот более тяжелого изотопа.

Значения  $\beta$ -факторов оценивались по соотношению (2) для температур от 0 до 2500 °C с шагом 10 °C. Соответствующие зависимости аппроксимированы полиномами  $x = 10^6/T^2$  (K<sup>-2</sup>):  $1000 \ln \beta = \sum a_i x^i$ . Результаты для алмаза и молекул приведены в виде полиномов 5-й степени ( $\text{CO}_2$  и  $\text{NH}_2$ ,  $i = 6$ ) (табл.1). Ошибка аппроксимации во всех случаях не превышает 0,02 % при температурах выше 100 °C и 0,04 % при температурах выше 0 °C (коэффициент детерминации  $r^2 > 0,999$ ).

## Результаты

В табл.1 приведены полученные температурные зависимости для расчета  $\beta$ -факторов  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  алмаза. Оценки основаны на вычислениях по расширенной ячейке из 54 атомов. Дальнейшее увеличение объема ячейки (с соответствующим понижением концентрации азота в алмазе) и замещением



одного атома С => N не приводит к заметному изменению факторов изотопного фракционирования. Кроме того, в табл.1 представлены как вновь рассчитанные (NH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>N), так и ранее известные (N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) результаты для вероятных азотсодержащих компонентов мантийных флюидов, а также результаты определения углеродных β-факторов алмаза без примеси азота и β-факторов соединений флюида с углеродом. По представленным данным можно определить (см. соотношение (1)) факторы изотопного фракционирования азота ( $\alpha^{15/14}$ ) и углерода ( $\alpha^{13/12}$ ) между алмазом и возможными при кристаллизации компонентами флюидов. Далее факторы изотопного фракционирования представляются в виде общепринятых величин  $\Delta = 1000 \ln(\alpha)$ .

Таблица 1

Температурные зависимости  $1000 \ln\beta$  для расчета фракционирования изотопов азота и углерода между алмазом и флюидом

Вещество	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	Источник
$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$							
Алмаз	13,13525 +0,05589P	-0,454961 -0,00471P	0,023558 +0,00038P	-0,000965 -1,9619E <sup>-5</sup> P	1,92024E <sup>-5</sup> +4,3816E <sup>-7</sup> P	-	Данные автора
N <sub>2</sub>	15,27791	-2,088265	0,248047	-0,015932	0,0004036	-	[21]
NH <sub>3</sub>	13,91689	-2,437494	0,339134	-0,023827	0,0006369	-	[21]
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	18,40726	-3,003117	0,397865	-0,027115	0,0007104	-	[21]
Алмаз (CN <sup>-</sup> )	10,97264	-1,275805	0,138451	-0,008467	0,0002086	-	[21]
NH <sub>2</sub>	8,293659	-1,827601	0,351646	-0,038804	0,0021684	-4,751E <sup>-5</sup>	Данные автора
CH <sub>3</sub> N	12,69071	-1,384621	0,155546	-0,009723	0,0002388	-	Данные автора
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$							
Алмаз	20,931829 +0,10803P	-0,859144 -0,010389P	0,048253 +9,129E <sup>-4</sup> P	-0,0020401 -4,8886E <sup>-5</sup> P	4,09635E <sup>-5</sup> +1,115E <sup>-6</sup> P	-	Данные автора
Алмаз	21,649 0,10768P	-0,9790 -0,0097P	0,052834 0,00079P	-0,001879 -3,7385E <sup>-5</sup> P	0,30747E <sup>-4</sup> 7,6468E <sup>-7</sup> P	-	[22]
Алмаз	19,856	-0,4086	-	-	-	-	[23]
Алмаз	20,398968	-0,858690	0,050281	-0,002209	4,56732E <sup>-5</sup>	-	[24]
Алмаз	19,949068 +0,08177P	-0,622300 -0,00609P	0,014645 +0,00024P	-	-	-	[6]
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	24,74146	-1,08996	0,03178	-	-	-	Данные автора
CO <sub>2</sub>	31,32194	-3,969173	0,485570	-0,032037	0,0008268	-	Данные автора
CO <sub>2</sub>	30,48662	-4,092939	0,620806	-0,061011	0,0032451	-7,027E <sup>-5</sup>	[13]
CH <sub>4</sub>	20,23303	-2,915760	0,371371	-0,024974	0,0006513	-	[9]
CH <sub>4</sub>	18,81124	-1,818667	0,136254	-0,005159	0,0000743	-	[25]
CO	17,00663	-1,647067	0,122574	-0,004226	3,76328E <sup>-5</sup>	-	[26]
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	20,71712	-2,397034	0,275367	-0,017105	0,0004143	-	Данные автора
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	19,84650	-1,631380	0,115636	-0,004252	0,0000601	-	[25]
CH <sub>3</sub> N	22,33125	-2,555513	0,291656	-0,018280	0,0004487	-	Данные автора

*Примечания.* Результаты работ пересчитаны в виде полиномов от  $x$  [9, 21]; зависимость от  $P$ , ГПа оценена согласно [22, (9)]; определения найдены исходя из плотности состояний (DOS), полученных при исследовании неупругого рассеяния нейтронов [24]; данные DFT-расчетов при  $0 < P < 80$  ГПа [6]; экспериментальные данные [26]; температурный интервал:  $0 < T < 1000$  °C [23];  $300 < T < 1200$  °C [26];  $0 < T < 800$  °C [25]. Проверка – расчеты не проводились.

В интервале температуры 1000-1400 °C (вероятные условия образования алмаза в литосфере) факторы изотопного фракционирования, определенные по вычисленным значениям  $\beta$ , показаны на рис.1 в сравнении с ранее полученными результатами теоретических вычислений. Такие вычисления фракционирования изотопов азота в алмазе до сих пор основываются на  $\beta$ -факторах молекул, которые рассматриваются в качестве аналогов связей С-N в алмазе. В качестве аналога использовались молекулы HCN и CN<sup>-</sup> [9]. При 1127 °C  $\Delta^{15}\text{N}$  между молекулой HCN (алмазом) и флюидом составляет -2,3 (для NH<sub>3</sub>) и -1,1 ‰ (для N<sub>2</sub>). По результатам DFT-расчетов, изотопное фракционирование между

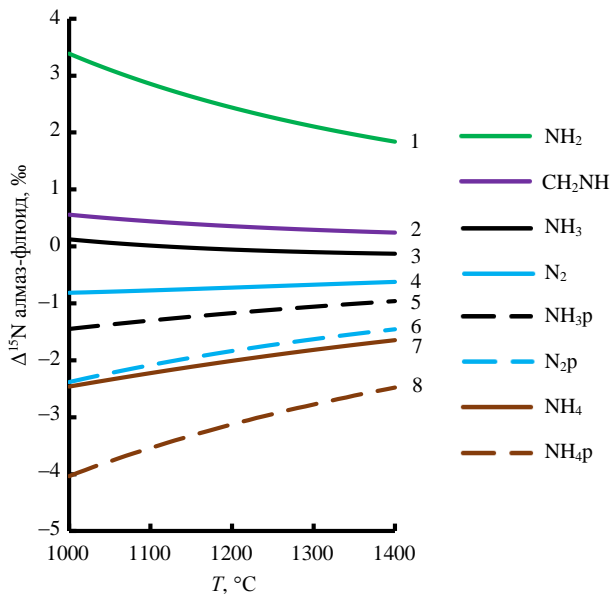


Рис. 1. Изотопное фракционирование азота между алмазом и флюидом

1-4, 7 – факторы изотопного фракционирования, определенные методом DFT; 5, 6, 8 – оценки изотопного фракционирования при моделировании связи CN алмаза молекулой CN<sup>-</sup>

алмазом и молекулой NH<sub>3</sub> практически отсутствует (-0,01 ‰ при 1127 °C), а между алмазом и N<sub>2</sub> при той же температуре -0,76 ‰. Отклонение результатов от -2,3 до -0,3 ‰. Уменьшение <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N устанавливается в ряду соединений NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > N<sub>2</sub> > (алмаз, NH<sub>3</sub>) > CH<sub>3</sub>N > CN<sup>-</sup> > NH<sub>2</sub>. При температуре 1100 °C фракционирование между алмазом и указанными выше N-содержащими компонентами флюида оценивается в -2,23, -0,77, 0,01, 0,44, 1,31 и 2,85 ‰ и существенно (более чем на 1 ‰) выше оценки на основе связи C-N в алмазе по аналогии с молекулой CN<sup>-</sup>.

Значительные расхождения при замене связей азота в алмазе на молекулярные обуславливаются существенно различной силой и характером связей, что проявляется, например, в параметрах колебательных спектров. Фракционирование изотопов с конденсированными фазами отличается от фракционирования с газами того же состава [27], поэтому азот в алмазе может концентрировать тяжелый изотоп больше, чем молекулы газа HCN или CN<sup>-</sup>.

Если в качестве модели фракционирования изотопов азота в алмазе принять молекулу CN<sup>-</sup>, то положительное значение Δ<sup>15</sup>N между алмазом и флюидом означает распространение в условиях верхней мантии таких N-содержащих соединений флюида, которые до сих пор не выявлены ни экспериментальными, ни теоретическими исследованиями. Таким образом, вычисленные β-факторы HCN и CN<sup>-</sup> молекул можно считать в лучшем случае лишь весьма грубыми приближениями для оценки изотопного фракционирования алмаза [9]. Для ряда соединений азота и углерода, которые могут быть специфичными для сублитосферной мантии, значения β-факторов уже известны (табл.1). Наши расчеты показывают, что азотные β-факторы NH<sub>2</sub> существенно меньше, чем у других рассматриваемых молекул, так что даже при температуре, превышающей литосферные значения, происходит заметное обогащение алмаза изотопом <sup>15</sup>N относительно равновесного флюида (около 2 ‰ при равновесном фракционировании алмаз-NH<sub>2</sub>, T = 1400 °C). Изотопное фракционирование углерода между алмазом и соединением C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> приблизительно соответствует фракционированию с CH<sub>4</sub> (отличаясь на ≈ 0,2 ‰, T = 1400 °C). Эти соединения можно рассматривать в качестве возможных компонентов флюида при сублитосферном образовании алмаза.

Считается, что изотопное фракционирование азота между алмазом и флюидом при мантийных условиях существенно превышает изотопное фракционирование углерода с большинством известных углеродсодержащих алмазообразующих флюидов [21]. Наши результаты демонстрируют, что при температуре 1200 °C азотные β-факторы алмаза понижены относительно молекул N<sub>2</sub> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup> на 0,8 и 1,0 ‰, однако выше, чем β-факторы CH<sub>3</sub>N и особенно NH<sub>2</sub> на 0,3 и 2,4 ‰. Фракционирование изотопов углерода между алмазом и молекулами флюида при этой же температуре увеличивается от отрицательных значений -3,5 (CO<sub>2</sub>), -1,8 (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) и -0,4 ‰ (CH<sub>3</sub>N) до положительных 1,1 ‰ (CH<sub>4</sub>).

### Эффект давления

Имеющиеся расчеты зависимости β-фактора от давления [22, 28] демонстрируют значимое (порядка 0, n ‰) увеличение β<sup>13</sup>C алмаза при T ≈ 1000-1200 °C и P > 10 ГПа. Методом DFT влияние давления можно определить по изменению β-факторов при вариации объема решетки (в рамках квазигармонического приближения – QHA), в том числе зависимости от объема V коэффициентов полиномов 1000 lnβ по x = 10<sup>6</sup>/T<sup>2</sup>. При уменьшении объема алмаза V/V<sub>0</sub> до 0,88 (что приблизительно соответствует давлению до 110 ГПа) полученные зависимости всех коэффициентов полинома линейные (r<sup>2</sup> > 0,99):



$$\begin{aligned} \Delta a_1 V / \Delta V \approx -24,701; \quad \Delta a_2 V / \Delta V \approx 2,08287; \quad \Delta a_3 V / \Delta V \approx -0,16878; \\ \Delta a_4 V / \Delta V \approx 0,00867; \quad \Delta a_5 V / \Delta V \approx -0,00019 \text{ (}^{15}\text{N} / ^{14}\text{N)}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta a_1 V / \Delta V \approx -47,795; \quad \Delta a_2 V / \Delta V \approx 4,5919; \quad \Delta a_3 V / \Delta V \approx -0,40351; \\ \Delta a_4 V / \Delta V \approx 0,021607; \quad \Delta a_5 V / \Delta V \approx -0,0004926 \text{ (}^{13}\text{C} / ^{12}\text{C)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, справедливо разложение

$$\Delta(a_i) \cong \frac{\Delta(a_i)}{\Delta V} \left\{ \left[ \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right) \Delta P \right] + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial^2 V}{\partial P^2} \right) \Delta P^2 \right] \right\} + \dots \quad (5)$$

Используя определение изотермического модуля объемной упругости  $K_T = -V \partial P / \partial V$  и ограничиваясь членами второго порядка, соотношение (5) можно представить в виде

$$\Delta(a_i) \cong \frac{\Delta(a_i)V}{\Delta V} \left\{ -\frac{1}{K} \Delta P + \frac{1}{2} \frac{1}{K^2} \left( \left( \frac{\partial K}{\partial P} \right) + 1 \right) \Delta P^2 \right\} + \dots$$

Для алмаза  $V_0 = 3,416 \text{ см}^3$ ;  $K = 442 \text{ ГПа}$ ,  $\partial K / \partial P = 3,61$  (наши результаты расчетов в рамках QНА, которые практически идентичны экспериментальным данным [29]:  $K = 445 \text{ ГПа}$  при  $\partial K / \partial P = 4$ ). В целом изменение коэффициентов  $a_i$  в зависимости от давления (табл.1) определяется выражением

$$\Delta a_i(P) \approx V(\Delta a_i) / \Delta V \left\{ -0,00226 \Delta P + 1,1799 \cdot 10^{-5} \Delta P^2 \right\}.$$

При  $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  углеродный  $\beta$ -фактор увеличивается на 0,6 (при  $P = 10 \text{ ГПа}$ ), азотный – на 0,33 %. При  $T = 1700 \text{ }^\circ\text{C}$  изменение углеродного  $\beta$ -фактора составляет 0,25 (10 ГПа), азотного – 0,14 %. Таким образом, зависимость  $\beta$ -факторов от давления для изотопов азота приблизительно в два раза ниже, чем углерода. Для контроля можно воспользоваться данными по изменению постоянной решетки алмаза при замещении изотопов углерода. В частности, при  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$   $(\partial \beta / \partial P)_T = 0,619 \text{ ГПа}^{-1}$  и вычисленная величина изменения коэффициента теплового расширения  $\alpha$  при изотопном замещении  $(\Delta \alpha) / \alpha = \Delta V / 3V = -(\partial \beta / \partial P)_T RT / (3V)$  составляет  $1,50 \text{E}^{-4}$ , что равно экспериментальному значению [23]. Полученные зависимости  $\beta^{13}\text{C}$  или  $\beta^{15}\text{N}$  алмаза от давления недостаточны для определения фракционирования изотопов между алмазом и флюидом, так как для флюидов высокой плотности оценка влияния  $P$  на  $\beta$ -факторы минералообразующих растворов все еще проблематична.

Рассмотренные  $\beta$ -факторы определяют величину фракционирования изотопов при образовании алмаза для объемных (валовых) свойств кристаллической решетки в условиях равновесия со средой роста. Величины  $\beta$  могут существенно (до нескольких промилле) понижаться в природных нанокристаллических алмазах (эффект размера). Например, на основе фононной плотности состояний (PDOS) по результатам неупругого рассеяния нейтронов и при разных размерах алмаза оценены изотопные сдвиги углеродных  $\beta$ -факторов  $10^3 \ln \beta_{\text{bulk}} - 10^3 \ln \beta_{\text{nano}}$  относительно валовых значений [24, рис.6]. Для наноалмазов изменение коэффициента  $\Delta a_1$  оценено по приблизительной оцифровке линий [24, рис.6], скорректированных на отклонение фононной DOS от параболического соотношения за счет поверхностных включений. Интерполяция значения  $\Delta a_1$  наноалмазов выражается линейной зависимостью от размера:  $\Delta a_1 \approx 1,7768 - 0,0092 \times \text{размер}$ , нм с коэффициентом детерминации  $r^2 \approx 0,99$ . Изменение  $1000 \ln \beta^{13}\text{C}$  наноалмазов при 5 нм  $\Delta a_1 - 1,799$ ; при 40 нм  $\Delta a_1 - 1,321$ ; при 170 нм  $\Delta a_1 - 0,227 \text{ }^\circ\text{‰}$ . При размере алмаза 5 нм сдвиги изотопных отношений за счет поверхностных эффектов могут достигать  $-1 \text{ }^\circ\text{‰}$ .

Возможна оценка поверхностных эффектов за счет преимущественного развития определенных граней роста алмаза и образования секториальной (в том числе изотопной) зональности [30]. Состав растущего кристалла является следствием конкуренции роста и диффузии у поверхности (например, GEM – модель ростового захвата [31]). Кристалл наследует состав поверхности роста при низкой диффузии у поверхности, что можно характеризовать числом Пекле:

$$Pe = r \cdot 0,5L/D,$$



где  $r$  – скорость роста, мм/с;  $L$  – толщина поверхностного слоя, нм;  $D$  – коэффициент диффузии рассматриваемого элемента (или изотопа). Грань роста представлена периодичной пластиной с количеством слоев  $LS$ . Внутренний слой определен структурой валового алмаза, внешние  $LS-1$  слоев реконструированы [32]. Параметры вычисления CRYSTAL и наборы базисных векторов те же, что и при вычислении по объемной (валовой) структуре. Изменение  $1000 \ln\beta$  относительно валовых значений  $\sum_i (a_i^0 - a_i) x^i$ ;  $a_i^0$  – приведенные в табл.1 значения.

Таблица 2

1000 lnβ граней роста алмаза						
Индекс грани*	LS	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$						
{111}	2	12,14579	-0,59010	0,03920	-0,00176	4,190E <sup>-5</sup>
	4	12,93791	-0,60624	0,04139	-0,00204	4,621E <sup>-5</sup>
{110}	2	10,99022	-0,52717	0,02365	-0,00097	1,948E <sup>-5</sup>
	4	12,70019	-0,69832	0,04544	-0,00304	3,966E <sup>-5</sup>
{100}	2	8,66005	-0,20426	0,01380	-0,00129	9,954E <sup>-7</sup>
	4	11,30632	-0,41044	0,02322	-0,00102	2,129E <sup>-5</sup>
	6	12,67306	-0,44731	0,02390	-0,00100	2,015E <sup>-5</sup>
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$						
{111}	2	19,98622	-1,11557	0,08240	-0,00415	9,234E <sup>-5</sup>
	4	20,50007	-1,17320	0,08803	-0,00447	9,997E <sup>-5</sup>
	6	20,82774	-1,18265	0,08748	-0,00432	9,623E <sup>-5</sup>
{110}	2	18,23049	-0,93891	0,05031	-0,00205	4,197E <sup>-5</sup>
	4	20,55262	-1,14874	0,08495	-0,00428	9,542E <sup>-5</sup>
{100}	2	14,19463	-0,44483	0,02006	-0,00074	1,364E <sup>-5</sup>
	4	18,91818	-0,81383	0,04992	-0,00227	4,770E <sup>-5</sup>
	6	20,02506	-0,85221	0,04975	-0,00216	4,402E <sup>-5</sup>

\* Индекс Миллера.

Ключевые параметры модели можно контролировать при экспериментальных наблюдениях, но в природных условиях они в большинстве случаев не определены [32]. Поскольку объемные β-факторы характеризуют рост при равновесии ( $Pe \ll 1$ ), то значения β-факторов для отдельных граней (табл.2) могут позволить оценить отклонение от идеальных условий.

**Сравнение с природным фракционированием  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$**

В условиях изотопного равновесия между средой роста (однородным флюидом) и поверхностью образующегося алмаза (по механизму Рэлея), могут возникать линейные зависимости между отношениями  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  и логарифмом концентрации азота  $\ln(N)$  которые отмечены в многочисленных работах [21, 33, 34]. Наблюдаемые ковариации как в пределах отдельных зерен алмаза, так и среди генетически связанных алмазов позволяют оценить «природное» изотопное фракционирование азота. Наклон линии регрессии между генетически связанными алмазами в координатах определяется равенством

$$\delta^{13}\text{C} \text{ vs } \delta^{15}\text{N} = \Delta^{13}\text{C}/(\Delta^{15}\text{N}K_N),$$

где  $K_N$  – коэффициент распределения азота между алмазом и флюидом;  $\Delta = 1000 \ln\alpha$ ,  $\alpha$  – факторы равновесного изотопного фракционирования углерода  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  или азота  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  между поверхностью алмаза и средой роста [21]:

$$\delta^{15}\text{N} - \delta^{15}\text{N}_0 = \Delta^{15} \ln f_N = \Delta^{15} K_N \ln f,$$

$f$  – доля израсходованного флюида;  $f_N$  – доля потребленных азотсодержащих соединений флюида.

Если  $f = f_C$  (доле потребленных при этом углеродсодержащих соединений флюида), то из приведенного соотношения следует



$$\delta^{13}\text{C} = (\delta^{15}\text{N} - \delta^{15}\text{N}_0) \Delta^{13} / (\Delta^{15} K_N)^* + \delta^{13}\text{C}_0,$$

где  $\delta^{13}\text{C}_0$  или  $\delta^{15}\text{N}$  – изотопный состав алмаза на начальной стадии роста. Величина  $K_N$  оценивается по зависимости  $\delta^{13}\text{C}$  от содержания азота в алмазе  $\ln(N)$ ,

$$\delta^{13}\text{C} = [(\ln(N) - \ln(N_0))] \Delta^{13} / (K_N - 1) + \delta^{13}\text{C}_0.$$

Применение приведенных выражений ограничивается флюидами с преобладанием углерод-содержащих соединений, но может быть обобщено и на флюиды смешанного состава. Например, приведены оценки фракционирования  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  между алмазом и средами роста в  $-4,0\text{‰}$  (при  $T = 1100\text{ °C}$  для флюида с преобладанием карбонат-иона  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\Delta^{13}\text{C} \approx -1,7\text{‰}$ ,  $K_N = 4,4$ , кимберлит Джерихо [33]). Валовые данные по изотопному составу углерода и азота в алмазах из лерцолитового ксенолита, представляющего литосферную мантию, использованы для оценки значения  $\Delta^{15}\text{N}$   $1,2\text{‰}$  ( $T = 1200\text{ °C}$ , обогащенный метаном флюид [35]). Данные по сверхглубинным алмазам Гвинеи с температурой кристаллизации около  $1725\text{ °C}$  применены для определения  $\Delta^{15}\text{N}$  между алмазом и флюидом ( $-4,5\text{‰}$ ) в условиях кристаллизации из флюида с преобладанием  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\Delta^{13}\text{C} = -0,9\text{‰}$  [36].

Факторы изотопного фракционирования азота алмаза  $\Delta^{15}\text{N}$ , оцененные по природным ковариациям  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ - $\ln(N)$ , зависят, помимо выбора величины  $\Delta^{13}\text{C}$ , от соотношения компонентов флюида и других параметров, в том числе от модели фракционирования и принятой температуры кристаллизации. Температуру кристаллизации оценивают по минеральным включениям в алмазе. Несмотря на многочисленные предположения и допущения, особенно при оценке величины  $K_N$ , в отсутствие других калибровок данный способ до сих пор являлся практически единственной возможностью оценки  $\Delta^{15}\text{N}$  между алмазом и флюидом.

Можно сопоставить результаты определения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  по ковариациям природных генетически связанных образцов с применением эмпирических зависимостей и факторов фракционирования, определенных в рамках настоящей работы. Из имеющегося массива данных [9, 37] выделяются 64 серии условно когенетичных алмазов, где наблюдается значимая корреляция  $\Delta^{15}\text{N}$  vs  $\Delta^{13}\text{C}$  (при доверительном интервале  $1\sigma$ ), по которым получено распределение отношения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  (рис.2, сплошная красная линия). При доверительном интервале  $2\sigma$  количество серий уменьшается (57 серий), однако существенных изменений в распределении не происходит (основной максимум  $\Delta^{15}/\Delta^{13}$  около 0 и локальные максимумы около 1 и 2). Представительность каждой серии оценива-

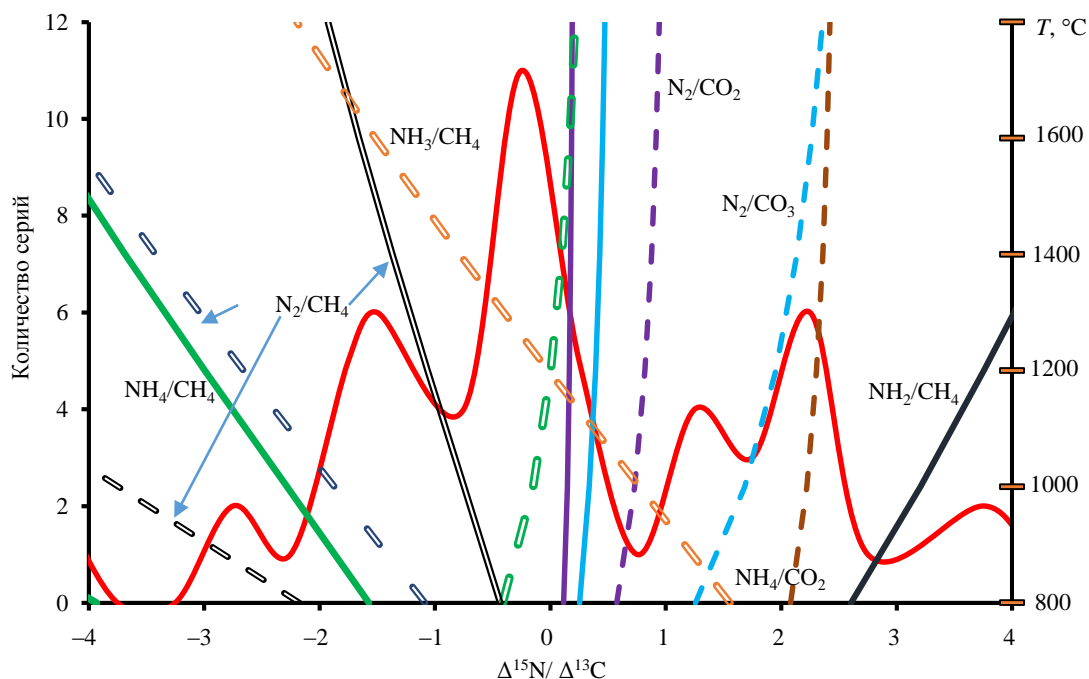


Рис.2. Частотное распределение значений отношения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  по сериям анализов природных алмазов



лась с помощью  $t$ -распределения Стьюдента. Линиями показаны теоретические (см. табл.1) значения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  между алмазом и флюидом разного состава, вычисленные при температуре 800-1800 °С. В числителе – состав соединения азота, в знаменателе – углерода. Сплошные линии – в предположении независимости фракционирования от  $K_N = 1$ , пунктирные  $K_N = 5$ , двойные пунктирные  $K_N = 2,5$ . Двойная пунктирная зеленая линия –  $\text{NH}_3/\text{CO}_2$ , сплошные сиреневая –  $\text{N}_2/\text{CO}_2$  и голубая –  $\text{N}_2/\text{CO}_3$ . При построении рисунка «эмпирические» факторы фракционирования, оцененные по природным соотношениям изотопов азота и углерода, не использованы. Большинство отношений  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  соответствуют значениям от  $-1,5$  до  $0,5$  (с максимумом около  $-0,3$ ). Близкие к нулю значения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  могут обуславливаться преобладанием  $\text{NH}_3$  в качестве азотсодержащей субстанции флюида при образовании алмаза ( $\Delta^{15}\text{N}$  близко к нулю) и/или доминированием углеродсодержащего компонента с относительно большим фракционированием  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  при образовании алмаза ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3$ ). Флюиды с преобладанием  $\text{CO}_2+\text{N}_2$  или  $\text{CO}_3+\text{N}_2$  характеризуются положительными отношениями  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$ . В условиях двухкомпонентного источника углерода максимум распределения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  может соответствовать изотопному обмену алмаза с  $\text{CO}_2$  или ионом карбоната в смеси с  $\text{CH}_4$  при доминировании  $\text{N}_2$  в качестве источника азота. Более высокие отношения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  (локальные максимумы отношения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C} \approx 1,5$  и  $2,3$ ) соответствуют кристаллизации алмаза из флюида с доминированием  $\text{NH}_4/\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2/\text{CO}_3$  или  $\text{NH}_2/\text{CH}_4$ . В качестве источника возможны соединения  $\text{C}_2\text{H}_6$  или  $\text{CH}_3\text{N}$ . Отрицательные  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  соответствуют сочетанию таких компонентов, как  $\text{NH}_4/\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2/\text{CH}_4$  или  $\text{NH}_3/\text{CH}_4$  (последнее при температуре выше 1250-1300 °С). Отметим, что с повышением температуры происходит сдвиг равновесных изотопных отношений  $^{15}\text{N}/^{13}\text{C}$ . Эмпирически оцененные величины отношения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  за пределами интервала от  $-4$  до  $+4$  могут свидетельствовать об экстремальных коэффициентах распределения азота между алмазом и средой роста или о присутствии каких-либо неучтенных компонентов флюида, обогащенных  $^{15}\text{N}$  или  $^{13}\text{C}$  относительно алмаза. В зависимости от соотношения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  в когенетической серии алмазов при кристаллизации по механизму Рэля может наблюдаться увеличение  $\delta^{15}\text{N}$ , уменьшение этого значения либо отсутствие какого-либо тренда.

### Заключение

Факторы изотопного фракционирования углерода относительно хорошо известны для многих систем, относящихся к образованию алмаза. Распределение изотопов азота между алмазом и минералообразующим флюидом изучено гораздо меньше и в основном базируется на эмпирически наблюдаемых трендах среди природных алмазов, обуславливая существенные неопределенности оценок и необходимость более строгих определений [11]. Достоверные значения факторов фракционирования изотопов азота должны быть предпосылкой выяснения причин наблюдаемой изотопной неоднородности алмаза, природы ковариаций значений  $\delta^{13}\text{C}-\delta^{15}\text{N}-\text{N}$ , вещественного состава флюидов и других условий образования алмаза. Сделана попытка охарактеризовать фракционирование изотопов азота «из первых принципов» на основе кристаллохимических свойств алмаза с азотом замещения и азотсодержащими молекулами флюида.

В частности, методом «замороженных фононов» теории функционала плотности с использованием полноэлектронных базисов определены совокупности  $\beta$ -факторов ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) алмаза в гармоническом и квазигармоническом приближениях при температурах от 0 до 2500 °С. Для достижения представительности при вычислениях применен метод расширенных ячеек (с увеличением объема в 8, 16, 27 раз). Определены значения некоторых  $\beta$ -факторов компонентов флюида (углеродных  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CH}_3\text{N}$  и азотных  $\text{CH}_3\text{N}$ ) для расчета фракционирования изотопов при образовании алмаза. Результаты *ab initio* вычислений существенно отличаются от ранее полученных теоретических результатов, основанных на представлении CN-связей алмаза молекулярными соединениями HCN или CN $^-$ . В условиях образования алмаза при уменьшении объема под давлением факторы изотопного фракционирования азота и углерода могут увеличиваться на десятки доли промилле. Давление влияет на изотопное фракционирование азота алмаза больше, чем на фракционирование изотопов углерода, что при экстремальных условиях (суперхолодная субдукция) может приводить к увеличению факторов фракционирования до существенных значений. Увеличение объема решетки алмаза за счет теплового расширения частично компенсирует эффект давления, поэтому сдвиги изотопных отношений в целом определяются величиной градиента  $\Delta P/\Delta T$ . При «стандартных» литосферных условиях образования алмаза (около 6 ГПа и 1100 °С) изотопные факторы фракционирования углерода и азота меняются незначительно.



В зависимости от преобладающих субстанций азота и углерода фракционирование изотопов при образовании алмаза может приводить к различной зональности изотопного состава в пределах отдельных зерен и вариациям в пределах когенетических серий. В большинстве случаев (максимум распределения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  на рис.2) фракционирование изотопов азота незначительно ( $\Delta^{15}\text{N} \ll \Delta^{13}\text{C}$ ), что согласуется с расчетами факторов фракционирования между алмазом и флюидом  $\text{NH}_3\text{-CO}_2$  или  $\text{N}_2\text{-CO}_2$ . Сдвиги отношения  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  в область отрицательных значений могут свидетельствовать о восстановительных условиях при высоких давлениях и «холодной» геотерме [38]. В бедных азотом восстановленных мантийных флюидах [39] важную роль играют амины ( $\text{NH}_2$ ) и метанимин ( $\text{CH}_3\text{N}$ ), доминирование которых может соответствовать появлению локальных максимумов в распределении значений  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$ . Окисленные флюиды с преобладанием  $\text{CO}_2$  или  $\text{CO}_3$  в сочетании с компонентом  $\text{N}_2$  характеризуются положительными отношениями  $\Delta^{15}\text{N}/\Delta^{13}\text{C}$  между алмазом и флюидом и существенно зависят от коэффициента распределения азота.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Vasilev E., Zedgenizov D., Zamyatin D. et al. Cathodoluminescence of Diamond: Features of Visualization // Crystals. 2021. Vol. 11. Iss. 12. № 1522. DOI: [10.3390/cryst11121522](https://doi.org/10.3390/cryst11121522)
2. Klepikov I.V., Vasilev E.A., Antonov A.V. Regeneration Growth as One of the Principal Stages of Diamond Crystallogeneses // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 3. № 327. DOI: [10.3390/min12030327](https://doi.org/10.3390/min12030327)
3. Губанов Н.В., Зедгенизов Д.А., Васильев Е.А., Наумов В.А. Новые данные о составе среды кристаллизации волокнистых алмазов из россыпей Западного Урала // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 645-656.
4. Zedgenizov D., Kagi H., Ohtani E. et al. Retrograde phases of former bridgmanite inclusions in superdeep diamonds // Lithos. 2020. Vol. 370-371. № 105659. DOI: [10.1016/j.lithos.2020.105659](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105659)
5. Пучков В.Н., Зедгенизов Д.А. Мантийная конвекция и алмазы // Литосфера. 2023. Т. 23. № 4. С. 476-490. DOI: [10.24930/1681-9004-2023-23-4-476-490](https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-476-490)
6. Liu J., Wang W., Yang H. et al. Carbon isotopic signatures of super-deep diamonds mediated by iron redox chemistry // Geochemical Perspectives Letters. 2019. Vol. 10. P. 51-55. DOI: [10.7185/geochemlet.1915](https://doi.org/10.7185/geochemlet.1915)
7. Cartigny P., Palot M., Thomassot E., Harris J.W. Diamond Formation: A Stable Isotope Perspective // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2014. Vol. 42. P. 699-732. DOI: [10.1146/annurev-earth-042711-105259](https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105259)
8. Cartigny P., Harris J.W., Javoy M. Diamond genesis, mantle fractionations and mantle nitrogen content: a study of  $\delta^{13}\text{C}$ -N concentrations in diamonds // Earth and Planetary Science Letters. 2001. Vol. 185. Iss. 1-2. P. 85-98. DOI: [10.1016/S0012-821X\(00\)00357-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00357-5)
9. Stachel T., Cartigny P., Chacko T., Pearson D.G. Carbon and Nitrogen in Mantle-Derived Diamonds // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. № 1. P. 809-875. DOI: [10.2138/rmg.2022.88.15](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.15)
10. Smit K.V., Timmerman S., Aulbach S. et al. Geochronology of Diamonds // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. № 1. P. 567-636. DOI: [10.2138/rmg.2022.88.11](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.11)
11. Cartigny P., Marty B. Nitrogen Isotopes and Mantle Geodynamics: The Emergence of Life and the Atmosphere–Crust–Mantle Connection // Elements. 2013. Vol. 9. № 5. P. 359-366. DOI: [10.2113/gselements.9.5.359](https://doi.org/10.2113/gselements.9.5.359)
12. Richet P., Bottinga Y., Javoy M. A Review of Hydrogen, Carbon, Nitrogen, Oxygen, Sulphur, and Chlorine Stable Isotope Fractionation Among Gaseous Molecules // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1977. Vol. 5. P. 65-110. DOI: [10.1146/annurev.ea.05.050177.000433](https://doi.org/10.1146/annurev.ea.05.050177.000433)
13. Polyakov V.B., Kharlashina N.N. The use of heat capacity data to calculate carbon isotope fractionation between graphite, diamond, and carbon dioxide: a new approach // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. Vol. 59. Iss. 12. P. 2561-2572. DOI: [10.1016/0016-7037\(95\)00150-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00150-6)
14. Horita J. Carbon isotope exchange in the system  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$  at elevated temperatures // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2001. Vol. 65. Iss. 12. P. 1907-1919. DOI: [10.1016/S0016-7037\(01\)00570-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00570-1)
15. Bigeleisen J., Mayer M.G. Calculation of Equilibrium Constants for Isotopic Exchange Reactions // The Journal of Chemical Physics. 1947. Vol. 15. № 5. P. 261-267. DOI: [10.1063/1.1746492](https://doi.org/10.1063/1.1746492)
16. Erba A., Desmarais J.K., Casassa S. et al. CRYSTAL23: A Program for Computational Solid State Physics and Chemistry // Journal of Chemical Theory and Computation. 2023. Vol. 19. Iss. 20. P. 6891-6932. DOI: [10.1021/acs.jctc.2c00958](https://doi.org/10.1021/acs.jctc.2c00958)
17. Yuting Zheng, Chengming Li, Jinlong Liu et al. Diamond with nitrogen: states, control, and applications // Functional Diamond. 2021. Vol. 1. № 1. P. 63-82. DOI: [10.1080/26941112.2021.1877021](https://doi.org/10.1080/26941112.2021.1877021)
18. Palyanov Y.N., Borzdov Y.M., Khokhryakov A.F. et al. Effect of Nitrogen Impurity on Diamond Crystal Growth Processes // Crystal Growth & Design. 2010. Vol. 10. Iss. 7. P. 3169-3175. DOI: [10.1021/cg100322p](https://doi.org/10.1021/cg100322p)
19. Grimme S., Hansen A., Brandenburg J.G., Bannwarth C. Dispersion-Corrected Mean-Field Electronic Structure Methods // Chemical Reviews. 2016. Vol. 116. Iss. 9. P. 5105-5154. DOI: [10.1021/acs.chemrev.5b00533](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00533)
20. Schauble E.A., Young E.D. Mass Dependence of Equilibrium Oxygen Isotope Fractionation in Carbonate, Nitrate, Oxide, Perchlorate, Phosphate, Silicate, and Sulfate Minerals // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2021. Vol. 86. № 1. P. 137-178. DOI: [10.2138/rmg.2021.86.04](https://doi.org/10.2138/rmg.2021.86.04)
21. Petts D.C., Chacko T., Stachel T. et al. A nitrogen isotope fractionation factor between diamond and its parental fluid derived from detailed SIMS analysis of a gem diamond and theoretical calculations // Chemical Geology. 2015. Vol. 410. P. 188-200. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2015.06.020](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.06.020)
22. Polyakov V.B., Kharlashina N.N., Shiryaev A.A. Thermodynamic properties of  $^{13}\text{C}$ -diamond // Diamond and Related Materials. 1997. Vol. 6. Iss. 1. P. 172-177. DOI: [10.1016/S0925-9635\(96\)00587-0](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(96)00587-0)



23. Bottinga Y. Carbon isotope fractionation between graphite, diamond and carbon dioxide // *Earth and Planetary Science Letters*. 1968. Vol. 5. P. 301-307. DOI: [10.1016/S0012-821X\(68\)80056-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(68)80056-1)
24. Shiryayev A.A., Polyakov V.B., Rols S. et al. Inelastic neutron scattering: a novel approach towards determination of equilibrium isotopic fractionation factors. Size effects on heat capacity and beta-factor of diamond // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2020. Vol. 22. Iss. 23. P. 13261-13270. DOI: [10.1039/d0cp02032j](https://doi.org/10.1039/d0cp02032j)
25. Polyakov V.B., Horita J. Equilibrium carbon isotope fractionation factors of hydrocarbons: Semi-empirical force-field method // *Chemical Geology*. 2021. Vol. 559. № 119948. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2020.119948](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119948)
26. Kueter N., Schmidt M.W., Lilley M.D., Bernasconi S.M. Experimental determination of equilibrium CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-CO carbon isotope fractionation factors (300-1200 °C) // *Earth and Planetary Science Letters*. 2019. Vol. 506. P. 64-75. DOI: [10.1016/j.epsl.2018.10.021](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.021)
27. Horita J., Wesolowski D.J. Liquid-vapor fractionation of oxygen and hydrogen isotopes of water from the freezing to the critical temperature // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1994. Vol. 58. Iss. 16. P. 3425-3437. DOI: [10.1016/0016-7037\(94\)90096-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90096-5)
28. Поляков В.Б., Харлашина Н.Н. Влияние давления на фракционирование изотопов // *Доклады Академии наук СССР*. 1989. Т. 306. № 2. С. 390-395.
29. Kunc K., Loa I., Syassen K. Equation of state and phonon frequency calculations of diamond at high pressures // *Physical Review B*. 2003. Vol. 68. Iss. 9. № 094107. DOI: [10.1103/PhysRevB.68.094107](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.68.094107)
30. Reutsky V.N., Kowalski P.M., Palyanov Y.N. et al. Experimental and Theoretical Evidence for Surface-Induced Carbon and Nitrogen Fractionation during Diamond Crystallization at High Temperatures and High Pressures // *Crystals*. 2017. Vol. 7. Iss. 7. № 190. DOI: [10.3390/cryst7070190](https://doi.org/10.3390/cryst7070190)
31. Watson E.B. A conceptual model for near-surface kinetic controls on the trace-element and stable isotope composition of abiogenic calcite crystals // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2004. Vol. 68. Iss. 7. P. 1473-1488. DOI: [10.1016/j.gca.2003.10.003](https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.10.003)
32. de la Pierre M., Bruno M., Manfredotti C. et al. The (100), (111) and (110) surfaces of diamond: an ab initio B3LYP study // *Molecular Physics*. 2014. Vol. 112. Iss. 7. P. 1030-1039. DOI: [10.1080/00268976.2013.829250](https://doi.org/10.1080/00268976.2013.829250)
33. Smart K.A., Chacko T., Stachel T. et al. Diamond growth from oxidized carbon sources beneath the Northern Slave Craton, Canada: A δ<sup>13</sup>C-N study of eclogite-hosted diamonds from the Jericho kimberlite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011. Vol. 75. Iss. 20. P. 6027-6047. DOI: [10.1016/j.gca.2011.07.028](https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.07.028)
34. Smit K.V., Stachel T., Luth R.W., Stern R.A. Evaluating mechanisms for eclogitic diamond growth: An example from Zimmi Neoproterozoic diamonds (West African craton) // *Chemical Geology*. 2019. Vol. 520. P. 21-32. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2019.04.014](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.04.014)
35. Thomassot E., Cartigny P., Harris J.W., Viljoen K.S. Methane-related diamond crystallization in the Earth's mantle: Stable isotope evidences from a single diamond-bearing xenolith // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. Vol. 257. Iss. 3-4. P. 362-371. DOI: [10.1016/j.epsl.2007.02.020](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.02.020)
36. Palot M., Pearson D.G., Stern R.A. et al. Isotopic constraints on the nature and circulation of deep mantle C-H-O-N fluids: Carbon and nitrogen systematics within ultra-deep diamonds from Kankan (Guinea) // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014. Vol. 139. P. 26-46. DOI: [10.1016/j.gca.2014.04.027](https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.04.027)
37. Curtolo A., Novella D., Logvinova A. et al. Petrology and geochemistry of Canadian diamonds: An up-to-date review // *Earth-Science Reviews*. 2023. Vol. 246. № 104588. DOI: [10.1016/j.earscirev.2023.104588](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104588)
38. Yuan Li, Keppler H. Nitrogen speciation in mantle and crustal fluids // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014. Vol. 129. P. 13-32. DOI: [10.1016/j.gca.2013.12.031](https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.12.031)
39. Сокол А.Г., Томиленко А.А., Бульбак Т.А. и др. Состав флюида восстановленной мантии по экспериментальным данным и результатам изучения флюидных включений в алмазах // *Геология и геофизика*. 2020. Т. 61. № 5-6. С. 810-825. DOI: [10.15372/GiG2020103](https://doi.org/10.15372/GiG2020103)

**Автор Дмитрий Павлович Крылов**, д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, d.p.krylov@ipgg.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6654-8659> (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

## Комбинированный метод переработки отработанного кислого травильного раствора производства изделий из титана

Н.А.Быковский<sup>1</sup>✉, Е.А.Кантор<sup>2</sup>, Н.С.Шулаев<sup>1</sup>, В.С.Фанаков<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт химических технологий и инжиниринга – филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, Стерлитамак, Республика Башкортостан, Россия<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

**Как цитировать эту статью:** Быковский Н.А., Кантор Е.А., Шулаев Н.С., Фанаков В.С. Комбинированный метод переработки отработанного кислого травильного раствора производства изделий из титана // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16446. С. 51-58. [EDN OVECLL](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.16446)

### Аннотация

Обладая высокой прочностью, небольшой плотностью и значительной химической стойкостью, титан нашел широкое применение в различных областях народного хозяйства – химическая индустрия, авиационная и ракетная техника, машиностроение, медицина и т.д. Изготовлению изделий из титана мешает достаточно прочная оксидная пленка, покрывающая его поверхность. Удаление оксидной пленки с поверхности титановых заготовок осуществляют травлением в растворах минеральных кислот различного состава. Образуется отработанный кислый травильный раствор (ОКТР), содержащий титановую соль и остаток непрореагировавших кислот. Практически все травильные растворы содержат HF и одну из сильных кислот. Это H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl или HNO<sub>3</sub>. Таким образом, в ОКТР входят ионы титана, фтора или хлора, или сульфата, или нитрата. ОКТР достаточно токсичен и перед сбросом в водоем подлежит многократному разбавлению или очистке. Большинство методов, применяемых для извлечения из ОКТР находящихся в нем примесей, приводит к снижению их содержания. В результате такой очистки происходит потеря веществ, содержащихся в ОКТР в значительном количестве и представляющих интерес для дальнейшего использования. В работе приведены экспериментальные результаты, полученные при комбинированной переработке ОКТР, содержащей фторид титана, фтористоводородную и хлористоводородную кислоты. На первой стадии ОКТР обрабатывается гидроксидом натрия. Образующийся в результате осадок гидроксида титана отфильтровывается. На второй стадии фильтрат, содержащий фторид и хлорид натрия, подвергается обработке в мембранном электролизере. При этом происходит не только извлечение солей натрия из фильтрата, но и получение гидроксида натрия и смеси фтористоводородной и хлористоводородной кислот. Гидроксид натрия можно применить для обработки ОКТР, а смесь кислот для травления титановых заготовок.

### Ключевые слова

травление титана; отработанный травильный раствор; электрохимическая переработка; мембранный электролизер; гидроксид титана; гидроксид натрия; хлористоводородная кислота; фтористоводородная кислота

Поступила: 10.04.2024

Принята: 03.06.2024

Онлайн: 19.07.2024

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Титан и его сплавы широко применяются при изготовлении самого различного оборудования, которое пользуется высоким спросом в связи с антикоррозионной стойкостью, хорошим сочетанием прочностных свойств, устойчивостью к действию температур, довольно низкой плотностью и сравнительно высокой металлоемкостью. Основными потребителями титана и его соединений являются самолето- и ракетостроение [1], химическая промышленность [2-4], металлургия [5], медицина [6, 7], производство катализаторов [8], лакокрасочная промышленность [9]. Как правило, изготовление изделий из титана сопровождается нагреванием, вследствие чего его поверхность покрывается достаточно прочной оксидной пленкой. Для обеспечения технологичности титановых заготовок, особенно при нанесении на его поверхность модифицирующих покрытий, необходимо с поверхности удалять оксидную пленку. Для выполнения этой операции используются различные методы [10-12].



Помимо механических, термических и других методов, широкое распространение нашли и термохимические методы [13-15]. Такие методы заключаются в обработке поверхности изделий минеральными кислотами при определенных температурах [16, 17]. В качестве кислот для растворения оксидных пленок на поверхности титана и его сплавов используют хлористоводородную, серную, азотную, фосфорную и др. кислоты в различных концентрациях и при различных температурах [16, 17]. В отличие от этих кислот фтористоводородная растворяет титан уже при комнатной температуре. С целью регулирования скорости растворения титана в раствор фтористоводородной кислоты вводят такие кислоты, как HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> [18]. Если присутствие серной кислоты незначительно увеличивает скорость процесса растворения титана, то с введением в раствор хлористоводородной она увеличивается почти в два раза, а применение азотной кислоты приводит к уменьшению скорости растворения\*.

В АО «Башкирская содовая компания» для травления поверхности титана в производстве окисно-рутений-титановых анодов используют хлористоводородную кислоту. Процесс травления осуществляют в 25-27 % HCl при температуре около 85 °С. Получающийся в этом случае отработанный кислый травильный раствор (ОКТР) содержит до 180 г/л хлорида титана и до 110 г/л хлористоводородной кислоты.

В Корпорации ВСМПО-АВИСМА для травления поверхности титана используют смесь водных растворов HF и HCl при комнатной температуре. Образующийся при этом ОКТР содержит около 22 г/л фторида титана, около 1,7 г/л фтористоводородной кислоты и около 6,2 г/л хлористоводородной кислоты. Этот раствор еще более токсичен, чем раствор, содержащий только хлорид титана и хлористоводородную кислоту, вследствие присутствия фторида аниона. Предельно допустимые концентрации компонентов ОКТР в водных объектах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляют для ионов, мг/л: фтора 1,5, хлора 350, сульфата 500, титана 0,1 (ГН 2.1.5.1315-03. Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования). Таким образом, при сбросе ОКТР в водоем необходимы значительные затраты на воду для его разбавления. Кроме того, в этом случае происходит потеря ценных компонентов, которые могут служить сырьем для получения товарной продукции. Известны способы утилизации и обезвреживания ОКТР с помощью ионного обмена [19-21], коагуляции и отстаивания [22-24], нейтрализации [25, 26]. Процесс нейтрализации ОКТР приводит к затратам щелочных реагентов, образованию таких токсичных твердых отходов, как CaF<sub>2</sub> и Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> 2-го класса опасности, а также к потере минеральных кислот [27-30].

В предыдущих работах авторов рассматривалась возможность переработки сточных вод, содержащих различные вещества с получением продуктов, которые можно использовать в производственном процессе [31-33]. В настоящей статье изложены результаты исследований по переработке ОКТР, содержащего фторид титана, фтористоводородную и хлористоводородную кислоты. Переработка ОКТР осуществлялась в два этапа. На первом этапе ОКТР обрабатывался гидроксидом натрия. Образующийся осадок гидроксида титана отфильтровывался и подвергался сушке. На втором этапе фильтрат, содержащий ионы фтора, хлора и натрия, подвергался переработке в мембранном электролизере. В результате электрохимической обработки фильтрата в электролизере генерировались гидроксид натрия и смесь фтористоводородной и хлористоводородной кислот.

### Методология

Экспериментальные исследования осуществлялись в две стадии. На первой стадии ОКТР обрабатывали кристаллическим гидроксидом натрия. Для этого к 100 мл ОКТР добавляли кристаллический NaOH. Образующийся осадок гидроксида титана отфильтровывали и сушили при температуре 200 °С до постоянной массы. По массе осадка определяли степень извлечения титана из ОКТР. Второй этап состоял в электрохимической обработке фильтрата, полученного после отделения гидроксида титана в электролизерах с ионообменными мембранами. Для исследований использовали два типа электролизеров – без протока и с протоком растворов через камеры.

\* Кислотные растворы, применяемые при химическом способе очистки поверхности полуфабрикатов из титановых сплавов. URL: <https://sv-barrisol.ru/polufabrikaty/102-kislotnye-rastvorvy-primenyaemye-pri-himicheskom-sposobe-ochistkipoverhnosti-polufabrikatov-iz-titanovyh-splavov.html> (дата обращения 09.04.2024).



Исследование распределения компонентов по камерам электролизера, определения выхода по току и удельных затрат электроэнергии на процесс переработки фильтрата осуществляли в четырехкамерном мембранном электролизере без протока растворов через камеры (рис. 1).

Камеры электролизера диаметром 6 см изготавливались из пластин оргстекла толщиной 2,5 см. Для разделения камер применяли мембраны, изготовленные ООО «Щекиноазот»: катионообменные мембраны марки МК-40, анионообменные мембраны марки МА-40. Рабочая поверхность каждой мембраны, разделяющей камеры, составляла 14,1 см<sup>2</sup>. Материал катода – пластина из нержавеющей стали, материал анода – титановая пластина, покрытая окисью рутения (ОРТА). В катодную камеру 1 электролизера загружали 0,1 н раствор гидроксида натрия. В камеру 2 загружали фильтрат, полученный после извлечения из ОКТР титана. В камеру 3 – 0,1 н раствор хлористоводородной кислоты. В анодную камеру 4 помещали 0,1 н раствор серной кислоты. Объем загружаемых во все камеры электролизера растворов равнялся 60 мл.

В процессе обработки фильтрата в электролизере (рис. 1) на катоде разлагается вода с образованием газообразного водорода и генерацией ионов гидроксила. На аноде происходит разложение воды с выделением газообразного кислорода и генерацией ионов водорода. Ионы натрия и водорода мигрируют к катоду, а ионы гидроксила, фтора и хлора – к аноду. Миграции ионов водорода препятствует анионообменная мембрана, а миграции ионов гидроксила, фтора и хлора – катионообменная мембрана. В результате в катодной камере 1 электролизера происходит накопление гидроксида натрия, а в камере 3 электролизера – смеси фтористоводородной и хлористоводородной кислот.

Для определения максимальных концентраций щелочи и смеси кислот, генерируемых в катодных и камере 3 электролизера, использовали мембранный электролизер с протоком растворов в камерах аппарата, схематично показанный на рис. 2. Электролизер состоял из четырех ячеек, разделенных электродными пластинами. Каждая ячейка разделена на четыре камеры, которые отделены друг от друга катионообменными и анионообменными мембранами. Рабочая поверхность каждой мембраны составляла 30 см<sup>2</sup>. Камеры в виде рамок изготавливались из поливинилхлоридной пластины толщиной 2 мм. Для предотвращения слипания мембран в каждую камеру помещали просечную сетку, растянутую из каландрированного винипласта. Вся конструкция стягивалась в единый пакет плитами из оргстекла.

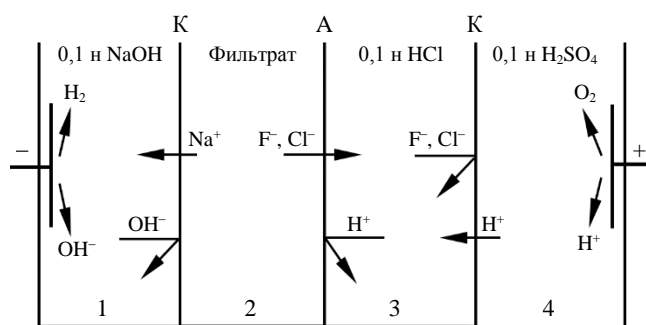


Рис. 1. Схема непроточного электролизера для переработки фильтрата, полученного после удаления титана из ОКТР

А – анионообменная; К – катионообменная мембраны

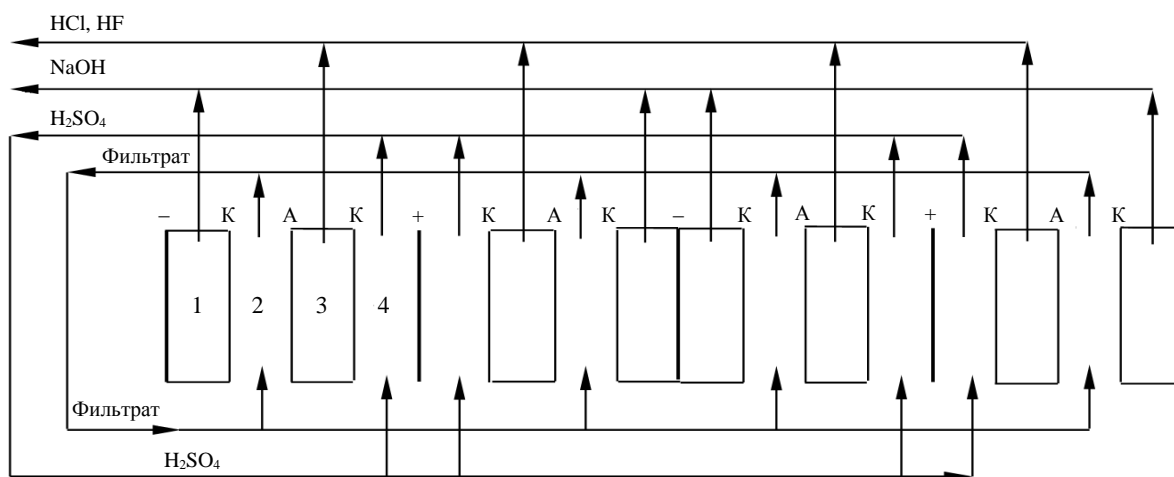


Рис. 2. Схема проточного электролизера для переработки фильтрата, полученного после удаления титана из ОКТР



Концентрации растворов, используемых в электролизере с проточными камерами (рис.2), аналогичны концентрациям растворов, применяемых в электролизере без их протока через камеры аппарата (см. рис.1). В камере 2 электролизера циркулировал фильтрат, в анодной камере – раствор серной кислоты. Катодная камера и камера 3 выполнены без протока растворов и предварительно заполнялись 0,1 н растворами гидроксида натрия и хлористоводородной кислоты соответственно. Растворы гидроксида натрия и смеси плавиковой и соляной кислот покидали соответствующие камеры по мере накопления.

Исследования проводили с модельным раствором, содержащим фторид титана, фтористоводородную и хлористоводородную кислоты. Исследуемый раствор получали растворением металлического титана в смеси фтористоводородной и хлористоводородной кислот. Для этого 10 г титана марки ВТ1-0 растворяли в 1 л смеси фтористоводородной и хлористоводородной кислот, содержащей 14,7 г/л HF и 6,2 г/л HCl. Состав полученного модельного ОКТР, рассчитанный на фторид титана – 22 г/л, 0,21 моль/л; фтористоводородную кислоту – 1,7 г/л, 0,085 моль/л; хлористоводородную кислоту – 6,2 г/л, 0,17 моль/л.

### Результаты и их обсуждение

Результаты опытов по извлечению титана из ОКТР его обработкой гидроксидом натрия представлены в табл.1. Обработка ОКТР гидроксидом натрия приводит к полному извлечению титана при достижении pH фильтрата, равном 7,6. Полученный после отделения осадка и промывки фильтрат содержал 0,92 моль/л фторида натрия и 0,17 моль/л хлорида натрия.

Таблица 1

Зависимость степени извлечения титана из ОКТР от массы NaOH и pH фильтрата

Масса NaOH, добавленная к 100 мл ОКТР, г	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2
pH	3,75	5,5	6,45	7,2	7,6	7,8	9,4	9,85	10,6	12,8
Степень извлечения, %	85,4	89,8	96,5	98,1	99,6	100	99,8	100	100	100

Для исследования распределения ионов натрия, фтора и хлора по камерам электролизера, определения выхода по току и удельных затрат электроэнергии на процесс использовали аппарат без протока растворов через камеры (см. рис.1). Масса компонентов в электролизере перед опытами, определенная расчетом, основанным на объеме используемых растворов и их концентрации, составляла: ионы натрия 0,138 г в камере 1 и 1,504 г в камере 2; ионы фтора 1,048 г в камере 2; ионы хлора 0,362 г в камере 2 и 0,213 г в камере 3. Плотность тока в процессе переработки фильтрата изменялась от 20 до 80 мА/см<sup>2</sup>. Количество пропущенного электричества во всех опытах оставалось постоянным и составляло 1,2 А·ч. Распределение ионов натрия, фтора и хлора приведено в табл.2.

Таблица 2

Распределение ионов натрия, фтора и хлора по камерам электролизера

Плотность тока, мА/см <sup>2</sup>	Масса, г						Нарушение материального баланса, рассчитанного по хлору, %
	Натрий		Фтор		Хлор		
	Камера 1	Камера 2	Камера 2	Камера 3	Камера 2	Камера 3	
20	0,955	0,687	0,606	0,422	0,233	0,312	5,2
40	0,929	0,713	0,593	0,455	0,228	0,311	6,3
60	0,987	0,655	0,590	0,458	0,237	0,324	3,8
80	0,967	0,675	0,602	0,446	0,235	0,329	5,7
	Средние значения						
	0,964	0,683	0,598	0,450	0,233	0,319	

В процессе электролиза ионы натрия мигрируют в камеру 1 электролизера. В этой камере происходит концентрирование ионов натрия с образованием гидроксида. В камерах 3 и 4 присутствие ионов натрия не обнаружено. Зависимости степени извлечения ионов натрия, фтора и хлора



из камеры 2 от мембранной плотности тока не наблюдается. Это позволило определить средние значения массы ионов в камерах электролизера и рассчитать погрешность в полученных результатах. Расчет относительной погрешности в соответствии с распределением Стьюдента для доверительной вероятности 95 % для всех компонент изменяется от 2 % для ионов фтора в камере 2 электролизера до 5,6 % для ионов натрия в той же камере. Средняя степень извлечения ионов натрия из камеры 2 составила 79,8 %. Ионы фтора и хлора мигрируют в камеру 3 электролизера и накапливаются в ней, образуя фтористоводородную и хлористоводородную кислоты. Присутствие для ионов фтора и хлора в камерах 1 и 4 не обнаружено. Средняя степень извлечения ионов фтора составила 36,4 % и ионов хлора – 35,6 %. Поскольку извлечение ионов натрия из фильтрата рассчитывали по увеличению концентрации гидроксида натрия в камере 1 электролизера, а извлечение фтора по увеличению концентрации фтористоводородной кислоты в камере 3, то рассчитать нарушение материального баланса по этим элементам не представляется возможным. В отличие от этого, содержание ионов хлора определялось во всех камерах аппарата, что позволило рассчитать нарушение материального баланса, составившего от 3,8 до 6,3 %.

В табл.3 приведены удельные затраты электрической энергии на процесс переработки фильтрата и выход по току. Представленные данные рассчитаны по результатам, полученным для извлечения натрия из фильтрата.

Таблица 3

Выход по току и удельные затраты электроэнергии процесса переработки фильтрата

Напряжение, В	Плотность тока, мА/см <sup>2</sup>	Выход по току, %	Затраты электроэнергии	
			Вт·ч/г	Вт·ч/моль
1,97	20	79,3	2,36	65,67
4,12	40	76,8	4,94	145,41
7,06	60	82,4	8,47	228,97
12,14	80	80,5	14,89	413,67

Выход по току (средняя величина 79,8 %) не зависит от плотности тока. Затраты электрической энергии на процесс извлечения из фильтрата ионов фторида и хлорида натрия определяются мембранной плотностью тока. Увеличение мембранной плотности тока сопровождается довольно резким возрастанием удельных затрат электроэнергии на процесс. Так, изменение плотности тока на 20 мА/см<sup>2</sup> в интервале 20-40 мА/см<sup>2</sup> сопровождается ростом энергозатрат на 79 Вт·ч/моль, а в интервале 60-80 мА/см<sup>2</sup> – увеличением энергозатрат на 185 Вт·ч/моль, т.е. в 2,3 раза.

Исследования по переработке фильтрата в непроточном четырехкамерном электролизере с катионообменными и анионообменными мембранами указывают на возможность получения растворов, содержащих гидроксид натрия и смесь фтористоводородной и хлористоводородной кислот. Для определения максимальной концентрации растворов гидроксида натрия и смеси фтористоводородной и хлористоводородной кислот поставлена серия опытов в электролизере с проточными камерами 2 и 4 (рис.2). Процесс обработки фильтрата проводили до тех пор, пока значения концентрации генерируемых в электролизере гидроксида натрия и смеси фтористоводородной и хлористоводородной кислот переставали изменяться. Объем растворов, циркулирующих в камерах 2 и 4 электролизера, составлял 2 л в каждой.

На рис.3 представлены изменения концентрации гидроксида натрия, фтористоводородной и хлористоводородной кислот во времени при различных плотностях тока. Интенсивность концентрирования щелочи и кислот определяется плотностью тока и максимальна в начальный момент времени. С течением времени обработки фильтрата скорость концентрирования уменьшается и затем перестает изменяться. Максимальная концентрация веществ, генерируемых в камерах 1 и 3 электролизера, достигнутая в опытах, определяется количеством воды, переносимой с соответствующими ионами через ионообменные мембраны, и увеличивается с ростом плотности тока. Значения максимально достигнутых концентраций гидроксида натрия, фтористоводородной и хлористоводородной кислот приведены в табл.4.

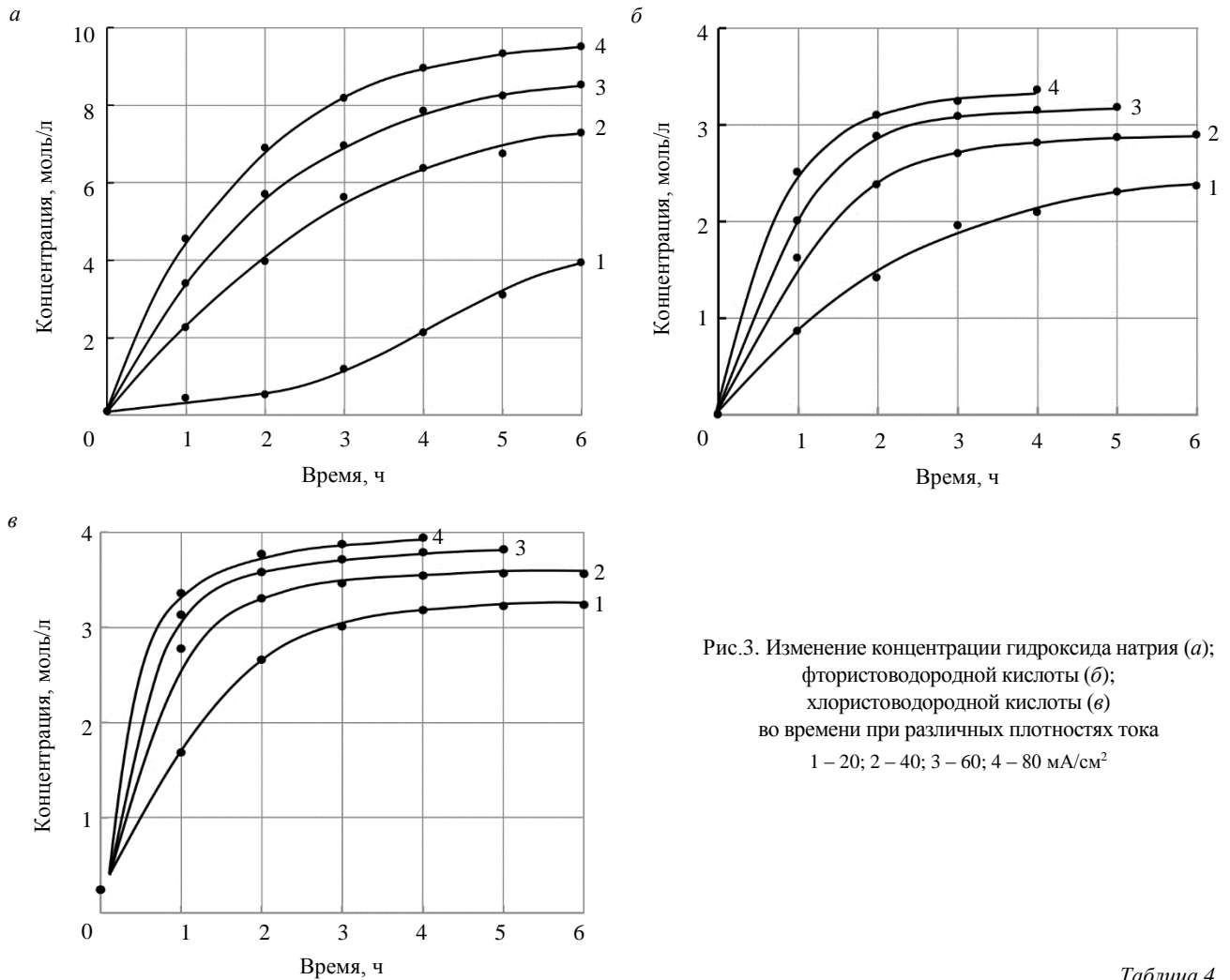


Рис.3. Изменение концентрации гидроксида натрия (а); фтористоводородной кислоты (б); хлористоводородной кислоты (в) во времени при различных плотностях тока 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60; 4 – 80 мА/см<sup>2</sup>

Таблица 4

Максимально достигнутые концентрации NaOH, HF и HCl

Плотность тока, мА/см <sup>2</sup>	Гидроксид натрия		Плавиковая кислота		Соляная кислота	
	г/л	моль/л	г/л	моль/л	г/л	моль/л
20	15,7	3,94	47,3	2,36	47,4	1,31
40	291,4	7,29	57,7	2,89	52,0	1,42
60	341,1	8,53	63,6	3,18	55,8	1,53
80	380,4	9,51	67,0	3,35	57,6	1,58

Изменение концентрации во времени гидроксида натрия, фтористоводородной и хлористоводородной кислот в камерах концентрирования электролизера определяется подвижностью ионов натрия, фтора и хлора, создающих электрический ток, конструктивными параметрами установки и описывается уравнением

$$\frac{dc}{dt} = (C_{\text{нас}} - C) \frac{jSt}{q}, \tag{1}$$

где  $C_{\text{нас}}$  – предельная концентрация указанных соединений;  $j$  – плотность тока;  $S$  – площадь ионообменной мембраны;  $q$  – параметр, зависящий от подвижности ионов и технологических режимов, определяемый экспериментально для каждого из указанных соединений.

Решение уравнения (1) имеет вид:

$$C(t) = C_{\text{нас}} \left( 1 - e^{-\frac{jSt}{q}} \right). \tag{2}$$



Из соотношения (2) следует, что изменение концентрации гидроксида натрия, фтористоводородной и хлористоводородной кислот в камерах концентрирования электролизера происходит по экспоненциальному закону, в зависимости от параметра  $q$ , что совпадает с экспериментальными кривыми (рис.3). Как следует из приведенных экспериментальных исследований, для гидроксида натрия  $C_{\text{нас}} = 380,4$  г/л,  $q \approx 4,06 \cdot 10^3$  Кл; хлористоводородной кислоты  $C_{\text{нас}} = 57,6$  г/л,  $q \approx 2,84 \cdot 10^3$  Кл; фтористоводородной кислоты  $C_{\text{нас}} = 67,0$  г/л,  $q \approx 2,44 \cdot 10^3$  Кл.

Приведенные соотношения можно использовать при проектировании процесса. Результаты, полученные при исследовании процесса переработки отработанного кислого травильного раствора титанового производства, содержащего ионы титана, фтора и хлора, позволили предложить примерную технологическую схему переработки (рис.4).

### Заключение

Представленные результаты, полученные при исследовании процесса переработки ОКТР, содержащего 22 г/л фторида титана, 1,7 г/л фтористоводородной кислоты и 6,2 г/л хлористоводородной кислоты без учета примесей в металлическом титане марки ВТ1-0, позволяют сделать следующие выводы.

ОКТР содержит значительные количества фторида титана, фтористоводородной и хлористоводородной кислот. Такой раствор обладает повышенной токсичностью и перед сбросом в водоем должен подвергаться очистке от примесей. Возможна переработка ОКТР с получением веществ, применяемых в производстве.

Обработка ОКТР гидроксидом натрия до pH раствора 7,6 позволяет полностью извлекать титан. После сушки и прокалки осадка окись титана может использоваться в лакокрасочной промышленности (титановые белила). Фильтрат после отделения гидроксида титана состоит из раствора фторида и хлорида натрия. Переработка этого фильтрата в четырехкамерном электролизере с катионообменными и анионообменными мембранами позволяет получать растворы гидроксида натрия и смеси фтористоводородной и хлористоводородной кислот. Гидроксид натрия допустимо использовать для обработки ОКТР с целью извлечения титана. Смесь фтористоводородной и хлористоводородной кислот после корректировки возможно применять для травления поверхности титановых заготовок.

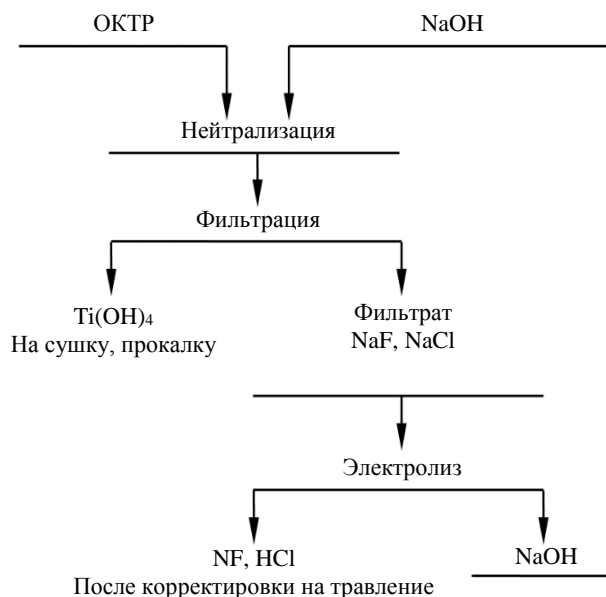


Рис.4. Технологическая схема переработки отработанного кислого травильного раствора

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лысенко М.П., Тлехусеж М.А. Титан и его применение в различных отраслях промышленности // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 4. Ч. 4. С. 64-67.
2. Дьяченко А.Н., Дьяченко Е.Н., Крайденко Р.И. Диоксид титана: рынок, производство, новые технологии // Лакокрасочные материалы и их применение. 2021. № 7-8. С. 41-50.
3. Петрова Т.А., Епишина А.Д. Антикоррозионная защита трубопроводного транспорта на горно-перерабатывающих предприятиях // Обогащение руд. 2023. № 6. С. 52-58. DOI: 10.17580/or.2023.06.09
4. Солдатов В.Г., Вавилин Я.А. Применение титана для раскисления стали // Уральский научный вестник. 2019. Т. 9. № 2. С. 17-21.
5. Zeynalov E.B., Huseynov E.R., Salmanova N.I., Abdurahmanova N.A. Nano-grade titanium dioxide on the nanocarbon carrier as catalyst in aerobic oxidation of alkyl aromatic hydrocarbons // Chemical Problems. 2020. № 3 (18). P. 351-360. DOI: 10.32737/2221-8688-2020-3-351-360
6. Трушин П.В. Применение мелкогранулированного никелида титана в хирургической практике // Медицинский вестник Северного Кавказа. 2019. Т. 14. № 3. С. 472-475 (in English). DOI: 10.14300/mnnc.2019.14114
7. Marin E., Lanzutti A. Biomedical Applications of Titanium Alloys: A Comprehensive Review // Materials. 2024. Vol. 17. Iss. 1. № 114. DOI: 10.3390/ma17010114
8. Lakshmanan V.L., Roy R., Halim M.A. Innovative Process for the Production of Titanium Dioxide // Innovative Process Development in Metallurgical Industry. Cham: Springer, 2016. P. 359-383. DOI: 10.1007/978-3-319-21599-0\_18



9. Sadeghi M.H., Esfahany M.N. Development of a Safe and Environmentally Friendly Sulfate Process for the Production of Titanium Oxide // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2022. Vol. 61. № 4. P. 1786-1796. DOI: [10.1021/acs.iecr.1c03364](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c03364)
10. de Formanoir C., Suard M., Dendievel R. et al. Improving the mechanical efficiency of electron beam melted titanium lattice structures by chemical etching // *Additive Manufacturing*. 2016. Vol. 11. P. 71-76. DOI: [10.1016/j.addma.2016.05.001](https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.001)
11. Liu Z., Tsai I.-L., Thompson G.E. et al. Chemical etching behaviour of titanium in bromine-methanol electrolyte // *Materials Chemistry and Physics*. 2015. Vol. 160. P. 329-336. DOI: [10.1016/j.matchemphys.2015.04.045](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.04.045)
12. Marin E., Diamanti M.V., Boffelli M. et al. Effect of etching on the composition and structure of anodic spark deposition films on titanium // *Materials & Design*. 2016. Vol. 108. P. 77-85. DOI: [10.1016/j.matdes.2016.06.088](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.088)
13. Черемисина О.В., Сергеев В.В., Федоров А.Т., Алферова Д.А. Разделение редкоземельных металлов и титана в процессе комплексной переработки апатитового концентрата // *Обогащение руд*. 2020. № 5. С. 30-34. DOI: [10.17580/or.2020.05.05](https://doi.org/10.17580/or.2020.05.05)
14. Денисова О.В., Карапетян К.Г. Углеродные материалы, поверхностно модифицированные ионами переходных металлов // *Цветные металлы*. 2023. № 8. С. 56-61. DOI: [10.17580/tsm.2023.08.10](https://doi.org/10.17580/tsm.2023.08.10)
15. Ковальская К.В., Горланов Е.С. Лигатуры Al – Ti – В: структурообразование в модифицированных сплавах // *Цветные металлы*. 2022. № 7. С. 57-64. DOI: [10.17580/tsm.2022.07.06](https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.06)
16. Тюлягин П.Е., Мурашова Н.М., Морозова Я.А., Насакина Е.О. Травление титана с помощью обратных микроэмульсий додецилсульфата натрия, содержащих неорганические кислоты // *Успехи в химии и химической технологии*. 2021. Т. 35. № 9 (244). С. 53-55.
17. Spitaels L., Rivière-Lorhèvre É., Díaz M.C. et al. Surface finishing of EBM parts by (electro-) chemical etching // *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 108. P. 112-117. DOI: [10.1016/j.procir.2022.03.023](https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.023)
18. Motasim M., Aydoğan S., Agacayak T. et al. The influence of sodium fluoride on the dissolution kinetics of metallic titanium in citric acid solution using the rotating disc method // *Hydrometallurgy*. 2024. Vol. 226. № 106297. DOI: [10.1016/j.hydromet.2024.106297](https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106297)
19. Черемисина О.В., Пономарева М.А., Молотилова А.Ю. и др. Сорбционная очистка вод кислотонакопителя от железа и титана на органических полимерных материалах // *Записки Горного института*. 2023. Т. 264. С. 971-980. DOI: [10.31897/PMI.2023.28](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.28)
20. Коломенский А.Б., Шахов С.В., Коломенский Б.А. Влияние газонасыщенных слоев и оксидных пленок на ударную вязкость титановых сплавов различных групп прочности // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2017. Т. 13. № 2. С. 132-139.
21. Штефан В.В., Смирнова А.Ю. Оксидирование титана в Zr, Mo-содержащих растворах // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2017. Т. 53. № 2. С. 197-203. DOI: [10.7868/S0044185617020243](https://doi.org/10.7868/S0044185617020243)
22. Любушкин Т.Г., Носова Т.И., Кузин Е.Н. Исследование влияния добавки соединений титана на процесс коагуляционной очистки сточных вод гальванического производства // *Успехи в химии и химической технологии*. 2021. Т. 35. № 12 (247). С. 108-110.
23. Bhattacharya S., Saha I., Mukhopadhyay A. et al. Role of nanotechnology in water treatment and purification: Potential applications and implications // *International Journal of Chemical Science and Technology*. 2013. Vol. 3. Iss. 3. P. 59-64.
24. Кузин Е.Н., Аверина Ю.М., Курбатов А.Ю., Чередниченко А.Г. Повышение эффективности очистки сточных вод гальванических производств с использованием титаносодержащих коагулянтов и мембранной очистки // *Экология и промышленность России*. 2024. Т. 28. № 3. С. 27-31. DOI: [10.18412/1816-0395-2024-3-27-31](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-3-27-31)
25. El Khalloufi M., Drevelle O., Soucy G. Titanium: An Overview of Resources and Production Methods // *Minerals*. 2021. Vol. 11. Iss. 12. № 1425. DOI: [10.3390/min11121425](https://doi.org/10.3390/min11121425)
26. Karshyga Z., Ultarokova A., Lakhova N. et al. Processing of Titanium-Magnesium Production Waste // *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23. Iss. 7. P. 215-225. DOI: [10.12911/22998993/150004](https://doi.org/10.12911/22998993/150004)
27. Патент № 2538900 РФ. Способ очистки сточных вод титано-магниевого производства / Н.Г.Осипенко, С.В.Кириянов, С.А.Рязанкин, В.В.Тетерин. Оpubл. 10.01.2015. Бюл. № 1.
28. Патент № 2786369 РФ. Способ обработки кислоты перед напылением титан-германий (Ti-Ge) / Т.А.Исмаилов, Б.А.Шангереева, А.Р.Шахмаева, Э.Казалиева. Оpubл. 20.12.2022. Бюл. № 35.
29. Патент № 2758704 РФ. Способ обработки тонких листов из титана / А.П.Орлов. Оpubл. 01.11.2021. Бюл. № 31.
30. Патент № 2522061 РФ. Способ изготовления анодов / Л.С.Иванова, В.В.Макшаков, С.В.Задорожный. Оpubл. 10.07.2014. Бюл. № 19.
31. Быковский Н.А., Винокуров Е.Г., Шулаев Н.С. Экспериментальный анализ эффективности электрохимического процесса переработки сточных вод производства бикарбоната натрия с получением гидроксида натрия // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2021. Т. 64. № 8. С. 139-145. DOI: [10.6060/ivkkt.20216408.6445](https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216408.6445)
32. Мешалкин В.П., Шулаев Н.С., Быковский Н.А., Аристов В.М. Физико-химические основы комбинированной энергоресурсоэффективной технологии переработки стоков производства кальцинированной соды // *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2020. Т. 494. № 1. С. 45-49. DOI: [10.31857/S268695352005009X](https://doi.org/10.31857/S268695352005009X)
33. Vukovskii N.A., Puchkova L.N., Fanakova N.N. et al. Recycling the Wastewater in the Production of Ethylenediamine // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019. Vol. 54. Iss. 11-12. P. 787-794. DOI: [10.1007/s10556-019-00551-7](https://doi.org/10.1007/s10556-019-00551-7)

**Авторы:** Николай Алексеевич Быковский, канд. техн. наук, доцент, nbikovsky@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9692-7203> (Институт химических технологий и инжиниринга – филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, Стерлитамак, Республика Башкортостан, Россия), Евгений Абрамович Кантор, д-р хим. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-9629-3324> (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия), Николай Сергеевич Шулаев, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-3595-6948> (Институт химических технологий и инжиниринга – филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, Стерлитамак, Республика Башкортостан, Россия), Вадим Станиславович Фанаков, ассистент, <https://orcid.org/0009-0007-4583-4593> (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Загрязнение ртутью речных отложений водораздела реки Сиухунь в Индонезии: вклад кустарной мелкомасштабной добычи золота

Вилли К. Нуграха<sup>1,2</sup>, Хуйхо Чон<sup>2</sup>, Фан Динь Куан<sup>2,3</sup>, Рэнди Новирса<sup>2,4</sup>, Томохиро Коморита<sup>2</sup>, Ясухиро Исибаси<sup>2</sup>, Дзюн Кобаяси<sup>2</sup>, Кодзи Аризоно<sup>2</sup>, Асеп Баю Дани Нандиянто<sup>5</sup>✉

<sup>1</sup> Исследовательский центр экологии и чистого производства, Национальное агентство исследований и инноваций, Южный Тангеранг, Индонезия

<sup>2</sup> Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония

<sup>3</sup> Вьетнамский национальный институт охраны труда и здоровья, Ханой, Вьетнам

<sup>4</sup> Университет Андалас, Западная Суматра, Индонезия

<sup>5</sup> Индонезийский педагогический университет, Бандун, Индонезия

**Как цитировать эту статью:** Вилли К. Нуграха, Хуйхо Чон, Фан Динь Куан, Рэнди Новирса, Томохиро Коморита, Ясухиро Исибаси, Дзюн Кобаяси, Кодзи Аризоно, Асеп Баю Дани Нандиянто. Загрязнение ртутью речных отложений водораздела реки Сиухунь в Индонезии: вклад кустарной мелкомасштабной добычи золота // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16339. С. 59-71. [EDN PJVEYI](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.16339.59-71)

### Аннотация

Кустарная мелкомасштабная добыча золота является крупнейшим искусственным источником загрязнения ртутью – распространенная проблема в настоящее время в мире. Исследование посвящено вкладу кустарной добычи золота в общий объем загрязнения ртутью индонезийского водораздела. Величина загрязнения ртутью измерена с использованием стабильных изотопов углерода и азота. Работа является первым аналитическим отчетом в Индонезии со времен начала публикаций об обнаружении тяжелых металлов в воде и отложениях рек. Ранее не уделялось внимание глубокому анализу загрязнения ртутью и его источникам. Определено, что кустарные и мелкомасштабные точки по добыче золота в верховьях рек являются основным источником ртути в отложениях водораздела р. Сиухунь. Наличие углерода  $\delta^{13}\text{C}$  и азота  $\delta^{15}\text{N}$  свидетельствует о загрязнении ртутью водораздела, которое идет из рек Сизимеут и Сиберанг. Результаты анализа образцов поверхностных отложений показали общую концентрацию ртути в отложениях, превышающую допустимую. Биологический эффект показал, что концентрация ртути в большинстве точек отбора проб превышает средние значения диапазона воздействия и предел вероятного воздействия. Значение коэффициента риска по ртути указывает на возможное влияние загрязнения ртутью на бентические организмы. В данном исследовании также обозначены ограничения, требующие дальнейшего изучения.

### Ключевые слова

кустарная мелкомасштабная добыча золота; ртуть; отложения; Сиухунь

### Финансирование

Данное исследование было профинансировано международной стипендией для аспирантов по исследованию ртутного загрязнения от правительства префектуры Кумамото, Япония.

Поступила: 02.11.2023

Принята: 24.09.2024

Онлайн: 11.02.2025

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Загрязнение металлами водораздела р. Сиухунь в последнее время привлекло повышенное внимание из-за урбанизации и индустриализации района [1, 2]. Сиухунь, самая большая река в провинции Бантен, Индонезия, используется для санитарных и ирригационных мероприятий. Водосборная площадь реки 1858 км<sup>2</sup>. Река протекает с юга на север, общая длина – 179 км (по данным Заключительного отчета по плану охраны окружающей среды и управления (Бантен, Индонезия, 2019) Агентства по охране окружающей среды и лесному хозяйству провинции Бантен).

Стремительное развитие района и индустриализация в последние десятилетия стали источником различного вида загрязнений р. Сиухунь через два притока: Сизимеут и Сиберанг [3]. В отчете, опубликованном Индонезийским центром экологического права в 2013 г. (Заключительный отчет: Усиление прав на информацию для людей и экологии. С. 1-57), приведена оценка общего



количества сточных вод, сброшенных в р. Сиухунь, которое составляет 43044,35 м<sup>3</sup>/день. Сброс ведется с различных производств, в том числе с производства бумаги, удобрений, пульпы, сжигания угля, гальванопокрытия, производства химикатов наряду с бытовыми отходами. Неочищенные воды сбрасываются в реку и вызывают снижение качества воды в реке, в результате чего концентрация тяжелых металлов в воде и речных отложениях превышает предельно допустимые концентрации, установленные стандартами и правилами. Поэтому с каждым годом растет недовольство местных жителей и напряженность в отношениях с органами местной власти.

Большинство проведенных исследований посвящены загрязнению тяжелыми металлами, однако до сих пор отсутствует информация о загрязнении данных вод ртутью. Самое большое предприятие кустарной мелкомасштабной добычи золота (КМДЗ) в Индонезии расположено в деревне Сизиту района Лебак в провинции Бантен, его нелегальная деятельность ведется в верховьях притоков р. Сиухунь [4]. Согласно отчету Института Блэксмит\*, в 2013 г. из 1000 т ртути, используемой при КМДЗ, 95 % участвовало в процессе амальгамации и впоследствии было выброшено в окружающую среду, что нанесло вред большому числу людей – 30000-500000 чел. Это привлекло многих исследователей, которые проанализировали эффект КМДЗ в этой местности. В некоторых исследованиях, выполненных в деревне Сизиту, отмечалось, что концентрация ртути в собранных образцах почвы, речных отложениях, человеческих волосах, крови и в рыбе, отобранных неподалеку от КМДЗ, превышала допустимые нормы [3, 5-7]. Хуже всего, что рыба, выловленная в пруде рядом с деревней, согласно некоторым отчетам, тоже содержала большое количество ртути. По информации [8] 70-90 % органической ртути в рыбе – это метилртуть (CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>) – самая токсичная из всех форм ртути [9]. Определено, что именно КМДЗ является источником загрязнения ртутью.

Загрязнение ртутью в этой местности не происходит постоянно [10]. Ртуть была найдена в определенных точках, где концентрируется добыча золота. Распределение ртути может значительно различаться в зависимости от интенсивности добычи, местной гидрологии и переноса речных осадков [11]. Понимание того, как ртуть переносится по течению реки (например, через отложения, толщу воды, биоту), требует большей плотности сети опробования, что в свою очередь позволит определить пути миграции ртути более точно. Можно предположить, что ртуть, попавшая в реку, растворяется в воде и осаждается в отложениях, что влечет за собой долговременные риски для окружающей среды и здоровья людей, живущих ниже по течению реки. Поэтому важно проводить мониторинг р. Сиухунь.

Речные отложения различаются по геохимическим параметрам, например по органике, распределению частиц, кислотности, минералогии, – всему, что влияет на мобильность и биодоступность ртути [12]. В данном исследовании осадочное органическое вещество (ОВ) и изотопы ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) использованы в качестве маркера загрязнения окружающей среды, идентифицирующего источник ртути в речных отложениях. Ртуть сильно коррелирует с органическим веществом, что влияет на ее распределение по взвешенным веществам в толще воды и секвестрацию в отложениях [12]. Таким образом, источник ртути может быть представлен на основе осадочного ОВ. Стабильные изотопы в ОВ озерных отложений часто используются для отслеживания источников органики ввиду слабой подверженности изотопного состава осадочного органического вещества влиянию постфотосинтетических и диагенетических процессов [13]. С помощью модели изотопного смешивания можно определить источник ртути в смеси.

Полевой поиск проведен во влажный сезон для отслеживания и оценки состава ОВ осадочных пород и загрязнения ртутью (THg) в результате КМДЗ на водосборе р. Сиухунь в Индонезии. Во время влажного сезона сильные дожди вызывают повышение уровня воды в реках, сток почвы, вынос речных отложений, что приводит к повышению переноса отложений дальше по течению реки. Оценка биологического воздействия и экологического риска ртути для бентических организмов в речных отложениях р. Сиухунь проведены на основе руководящих принципов качества осадков (SQGV). Впервые были исследованы ртутное загрязнение речных отложений р. Сиухунь. Это первый аналитический отчет в Индонезии, ранее большинство публикаций было посвящено

\* Mitigating Mercury Emission from Artisanal and Small Scale Gold Mining in Indonesia. Program Report, 2013. 39 p. URL: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/31242/MercE.pdf?sequence=1> (дата обращения 02.11.2023).

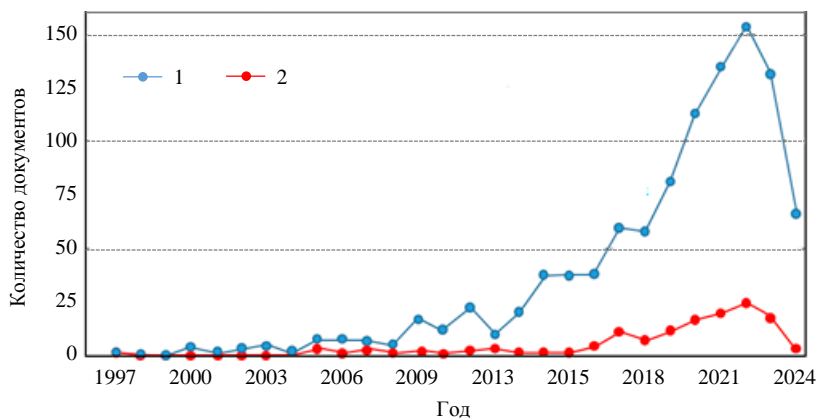


Рис.1. Библиографический анализ трендов в исследованиях по ключевым словам «кустарная мелкомасштабная добыча золота» (1) и «кустарная мелкомасштабная добыча золота в Индонезии» (2) [14]. Дата проведения – 25 июня 2024

только обнаружению тяжелых металлов в речной воде и отложениях, но глубокие исследования по изучению ртути не проводились. Библиографический анализ публикаций базы Scopus также показал, что только 136 публикаций в настоящее время посвящены КМДЗ в Индонезии (рис.1), что в несколько раз меньше публикаций про КМДЗ в общем (1024 документа). Это говорит о необходимости публикации отчетов о КМДЗ в Индонезии.

Факторы, подтверждающие новизну и важность исследования:

- оценка ртутного загрязнения двух очень важных для Индонезии рек Западной Явы – Сизимеута и Сиберанга и их притоков;
- подтверждение того, что источником ртути в реках может быть КМДЗ;
- оценка осадочного органического вещества на уровне отложений, которые были исследованы на основе ОВ в почвенном органическом веществе (ПОВ);
- использование стабильных изотопов углерода  $\delta^{13}\text{C}$  и азота  $\delta^{15}\text{N}$  для поиска источника ртути;
- оценка масштабов загрязнения речных отложений ртутью с помощью коэффициента риска;
- анализ и оценка потенциального влияния ртутного загрязнения на бентические организмы (биологические эффекты загрязнения).

## Методы

**Зона исследований.** Исследование выполнено в водоразделе р. Сиухунь провинции Бантен, Индонезия. Зона отбора проб располагается в следующих координатах:  $6^{\circ}1'28.423''\text{E} - 6^{\circ}34' 3.031''\text{E}$  и  $106^{\circ}10' 9.354''\text{S} - 106^{\circ} 9'53.67''\text{S}$  (рис.2, а). На рис.2, б карта увеличена. В 2019 г. Агентство окружающей среды и лесного хозяйства провинции Бантен опубликовало данные о том, что р. Сиухунь

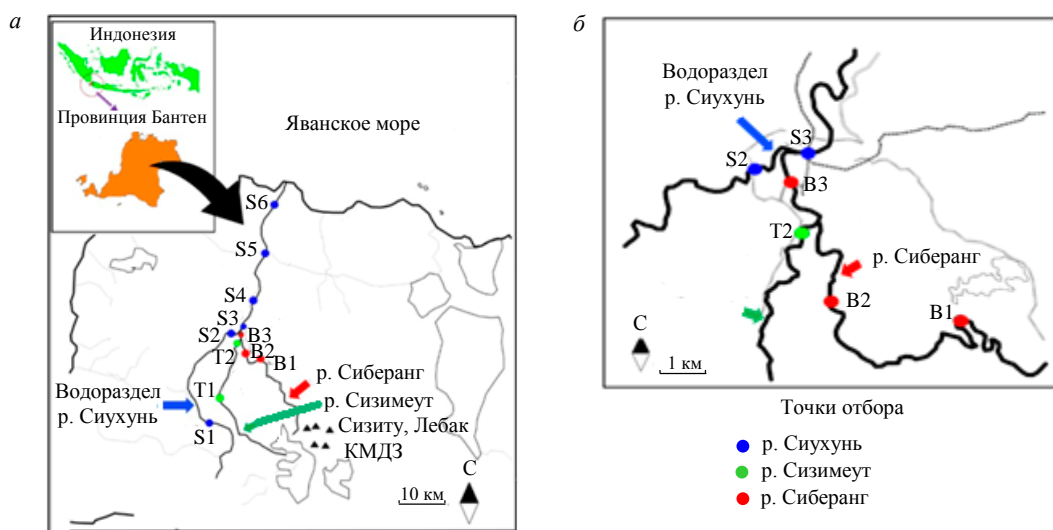


Рис.2. Места отбора проб речных отложений (а) и детализация участков отложений (б) по [15]



обладает двумя большими притоками: р. Сизимеут (458 км<sup>2</sup>) и р. Сибераанг (305 км<sup>2</sup>). Вода из этих двух рек используется для санитарных мероприятий и в сельском хозяйстве, поэтому данные исследования приобретают особую важность.

Эти притоки объединяются к югу от Рангкасбитунга, являющегося столицей провинции Бантен, и на севере впадают в Яванское море. Интересно, что верхние притоки берут свое начало в горах Каранг и Халимун [3], где жители верхней части водораздела р. Сиухунь занимаются фермерством и золотодобычей, например в районе Лебак [3, 16]. Местные жители извлекают золото с помощью ртути (амальгамация) в лесу, на реке и на своих участках.

*Отбор проб.* В январе 2021 г. (влажный сезон) пробы речных отложений (0-10 см) были взяты в 11 точках водораздела р. Сиухунь, включая два больших притока этой реки – Сизимеут и Сибераанг (рис.2, а). Шесть точек располагаются в главном русле от верхнего (S1), среднего (S2 и S3) и нижнего течения (S4, S5, S6). Две точки отбора проб вдоль р. Сизимеут – T1 и T2 и три – на р. Сибераанг (B1, B2, B3) (рис.2, б). Образцы отложений были собраны спустя один день после большого наводнения в водоразделе р. Сиухунь, которое могло изменить содержание ртути в отложениях [17].

Образцы были отобраны с помощью грейферного пробоотборника, трижды гомогенизировались, а затем сохранялись в прохладном боксе. В лаборатории пробы, доставленные для проведения анализа, просеивались через сито размером 150 мкм [18] и высушивались при комнатной температуре 20 °С. Высушенные образцы изучались с помощью прямого анализатора ртути.

Образцы поверхностных вод были отобраны с использованием горизонтального точечного анализатора, они исследовались согласно Индонезийскому национальному стандарту (SNI 6995:2021) для воды и сточных вод. Образцы поверхностных вод были пропущены через фильтры крупностью 0,45 мкм и собраны в полипропиленовую бутылку. Далее отфильтрованные образцы были подкислены с помощью азотной кислоты до pH < 2. Все бутылки сохранялись в контейнере со льдом в холодильной камере при температуре 4 °С до проведения анализа. Концентрация общей ртути в образце поверхностной воды была определена по методу холодного пара с использованием анализатора ртути.

*Химическое и пробоподготовительное разложение.* Для калибровки использовался высокоочищенный стандартный раствор ртути (1000 мг/л) производства Merck (Германия), Wako (Япония). Концентрация ртути в речных отложениях определена методом EPA 7473 с использованием термического сжигания совместно с атомно-абсорбционной спектроскопией (анализатор ртути MA 3000 NIS, Япония). Для определения характеристик отложений применялся элементный анализатор Thermo Fisher Scientific, ConFloIV, анализирующий общий органический углерод (TOC) и общий азот (TN).

Частичный органический фосфор (POP) определен путем вычитания суммы фракций неорганического фосфора из общего количества фосфора в отложениях после применения метода прокаливания [19]. Для изотопного анализа ( $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$ ) отобраны пробы поверхностных отложений. Образец отложений подкисляли в емкости с одноазотным раствором соляной кислоты на протяжении 24 ч для удаления карбонатов из матрицы отложений. Пробы промывались чистой водой и просушивались при температуре не менее 80 °С. Высушенные пробы перемалывались в мелкодисперсный порошок с использованием ступки и пестика.

Изотопный анализ выполнен с использованием элементного анализатора вкупе с масс-спектрометром изотопного отношения, согласно стандартам метода стабильных изотопов Pee Dee Belemnite для изотопов азота и углерода (Thermo Fisher Scientific, Flash 1112 Series, ConFloIV, DELTA Plus). Количество  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  сравнивалось с венскими стандартами Pee Dee Belemnite и азота воздуха [20]. Соотношения C:N, N:P и C:P определены на основе их молекулярных весов

$$\delta^{15}\text{N} = \left\{ \left( \frac{R_{\text{проба}}}{R_{\text{стандарт}}} \right) - 1 \right\} \cdot 1000;$$

$$\delta^{13}\text{C} = \left\{ \left( \frac{R_{\text{проба}}}{R_{\text{стандарт}}} \right) - 1 \right\} \cdot 1000,$$

где  $R$  – соотношения  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  или  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ .



**Контроль и обеспечение качества.** Для внутреннего контроля качества оценки достоверности данных использовался аттестованный стандартный образец (СО) морских отложений NMJ 7302-а (Япония), а количество реплик СО и проб исследовались в дублетах и трипликатах. Согласно аналитическим параметрам, точность метода составила 101,28 %, повторяемость метода – 3,68 % от RSD, а предел обнаружения (3SD от холостой пробы) составил 20 нг/кг. Это свидетельствует об эффективности метода для определения количества ртути в отложениях.

**Модель смешивания изотопов.** Все исследования выполнены с использованием свободно распространяемой программы R версии 4.0.2. Пропорциональный вклад каждого конечного члена (т.е. ПОВ каждого притока) в поверхностные отложения оценен с использованием байесовской модели смешивания, согласно цепи Маркова метода Монте-Карло [21]. Анализы выполнены с применением пакета R «simmr», который является обновленной версией «siar». В качестве приоритетного распределения для этого анализа использовалось распределение Дирихле – обобщение распределения Бета [22]. Коэффициент трофического обогащения установлен равным нулю с учетом нетрофических отношений между участниками анализа. Были запущены четыре цепи Маркова длиной 10000000 проб, и первые 100000 проб образцов были отброшены при прогонке. Прогреживание было скорректировано до 100 проб в зависимости от сходимости цепей. Полученные диагностические статистики Гельмана – Рубина были близки к 1 для всех оцениваемых параметров, что соответствовало правилам оценки сходимости (менее 1,1) [23].

**Биологические эффекты.** Согласно Руководству Австралийско-Новозеландского совета по окружающей среде и охране природы (ANZECC), для оценки биологического воздействия существует две рекомендуемых величины из руководящих принципов качества осадков (SQGV): низкие и средние значения эффективного диапазона (ЭДН и ЭДС соответственно), представляющие пороговый и вероятный уровни возникновения неблагоприятного эффекта, а также пороговый и вероятный уровень воздействия (ПУВ и ВУВ соответственно), отражающие высокую вероятность эффекта.

Для оценки уровня риска ртутного загрязнения отложений использован коэффициент риска как наиболее обоснованный метод оценки уровня загрязнения окружающей среды [24, 25]:

$$КР = \frac{ИКО}{ККО},$$

где ИКО – измеренная концентрация одного вещества в образце, мкг/кг; ККО – критерий качества отложений, нг/г.

Критерий качества отложений для ртути

$$ККО = K_p \cdot ККВ, \quad (1)$$

где  $K_p$  – коэффициент разделения ртути между твердой фазой и интерстициальной водой, л/кг; ККВ – критерий качества воды.

Величина  $K_p$  определяется по формуле

$$K_p = O_o(\text{Hg})/O_v(\text{Hg}),$$

где  $O_o(\text{Hg})$  – количество ртути в образце донных отложений каждого участка, мкг/кг;  $O_v(\text{Hg})$  – количество в образце воды каждого участка, мкг/кг.

В данном исследовании концентрация растворенной ртути варьировала от значения н.о. (не обнаружена) до 46 нг/л со средним значением 14,2 нг/л. Коэффициенты разделения ( $\log K_p$ ) ртути между твердыми частицами и водой в водосборе р. Сиухунь составили 0-5,21 со средним значением 4,28, среднее значение  $K_p$  – 19054 л/кг. ККВ получен на основе тканевого критерия (ТК) и коэффициента биоаккумуляции (КБА):

$$ККВ = \frac{ТК}{КБА}. \quad (2)$$

ТК получен на основе метода распределение видовой чувствительности. В данном исследовании значение ТК (НС5) равно 0,062 мг/кг на основе данных отчета [25]. Значение КБА составило



3023 л/кг, согласно данным [4]. В результате вычислений по формуле (2) ККВ ртути в р. Сиухунь достиг 20,5 нг/л. С учетом среднего значения  $K_p$  (19,054 л/кг), ККО по ртути составил 390,80 нг/г, согласно формуле (1). Оценка экологического риска по ртути: при  $KP > 1$  риск высок;  $0,1 < KP < 1,0$ , риск умеренный;  $KP \leq 0,1$ , экологический риск низкий [25].

### Результаты и обсуждение

*Распределение ртути в точках отробования.* В табл.1 представлены концентрации общей ртути в главном потоке р. Сиухунь в пределах 0,02-0,91 мг/кг сухого веса со средними значениями  $0,59 \pm 0,32$  мг/кг. Детальный анализ табл.1 представлен на рис.3. В районе средних потоков (S2 и S3), концентрация общей ртути относительно высока, особенно в потоке S3, что может быть вызвано взаимодействием с его притоками р. Сизимеут (T1 и T2), р. Сиберанг (B1-B3) и главным потоком р. Сиухунь (S1-S6), где перенос ртути чрезвычайно высок – 0,42-0,83 мг/кг. Это говорит о том, что высокий уровень загрязнения ртутью может быть вызван КМДЗ вверх по течению этих притоков, как показано на рис.2, а. В доказательство этого проведено исследование почвы рисового поля в 500 м от места КМДЗ в Сизиту района Лебак, которое является источником загрязнения ртутью притоков р. Сизимеут. Из отчета [6] известно, что вода для ирригационной системы получена из загрязненной ртутью воды после процесса амальгамации. Концентрация ртути в почве рисового поля ( $n = 3$ ) составляет  $45,86 \pm 2,37$  мг/кг сухого веса, это выше допустимого уровня, установленного Всемирной организацией здравоохранения (концентрация ртути в почве, используемой в сельском хозяйстве, должна составлять 0,05 мг/кг) [26].

Таблица 1

#### Характеристики отложений и концентрация общей ртути (сухой вес) в главном течении и притоках р. Сиухунь

Точки отробования	ТОС*, мкмоль/г	TN*, мкмоль/г	POP*, мкмоль/г	C/N	A/POP	У/POP	$\delta^{13}C^*$ , ‰	$\delta^{15}N^*$ , ‰	Содержание общей ртути**, мг/кг
Главное русло									
S1	174±30	20±2	1,0±0,9	8,8	18,2	138	-25,1	1,4	0,02±0,01
S2	800±33	81±3	3±1	9,9	27,3	232	-26,0	2,9	0,62±0,04
S3	1174±110	110±2	6±2	10,7	18,5	170	-25,9	3,1	0,65±0,05
S4	958±370	94±37	6,0±0,8	10,2	15,3	134	-25,8	2,5	0,91±0,04
S5	707±190	74±8	5,0±7	9,7	13,8	114	-25,7	2,6	0,86±0,06
S6	357±150	38±12	4,0±0,1	9,3	9,8	78,8	-25,5	2,7	0,46±0,04
Min	174	20,0	1,0	8,8	9,8	78,8	-26,0	1,4	0,02
Max	1174	110,0	6,0	10,7	27,3	232,0	-25,1	3,1	0,91
Средняя	695,0	69,5	4,2	9,8	17,1	144,5	-25,7	2,6	0,59
SD	372,9	34,2	1,9	0,7	5,9	52,4	0,3	0,6	0,32
Р. Сизимеут									
T1	192±10	16±1	3±0,1	11,6	5,9	58	-26,2	2,0	0,62±0,04
T2	405±30	45±5	3±0,2	9,1	14,6	113	-25,3	3,2	0,52±0,04
Min	192	16	3	9,1	5,9	58	-26,2	2,0	0,52
Max	405	45	3	11,6	14,6	113	-25,3	3,2	0,62
Средняя	298,5	30,5	3,0	10,4	10,2	85,5	-25,7	2,6	0,57
Р. Сиберанг									
B1	320±30	33±4	4±0,1	9,8	7,8	65,4	-25,7	3,5	0,77±0,04
B2	397±63	44±3	4±0,8	9,1	12,0	94,3	-25,2	3,1	0,83±0,09
B3	281±21	28±1	3±0,8	10,0	10,4	89,3	-26,1	2,4	0,42±0,05
Min	281	28	3,0	9,1	7,8	65,4	-26,1	2,4	0,42
Max	397	44	4,0	10,0	12,0	94,3	-25,2	3,5	0,83
Средняя	332,7	35,0	3,7	9,6	10,1	83,0	-25,7	2,0	0,67
SD	59,0	8,2	0,6	0,5	2,1	15,5	0,5	0,5	0,22

\* Количество проб ( $n = 3$ ); \*\* ( $n = 2$ ).

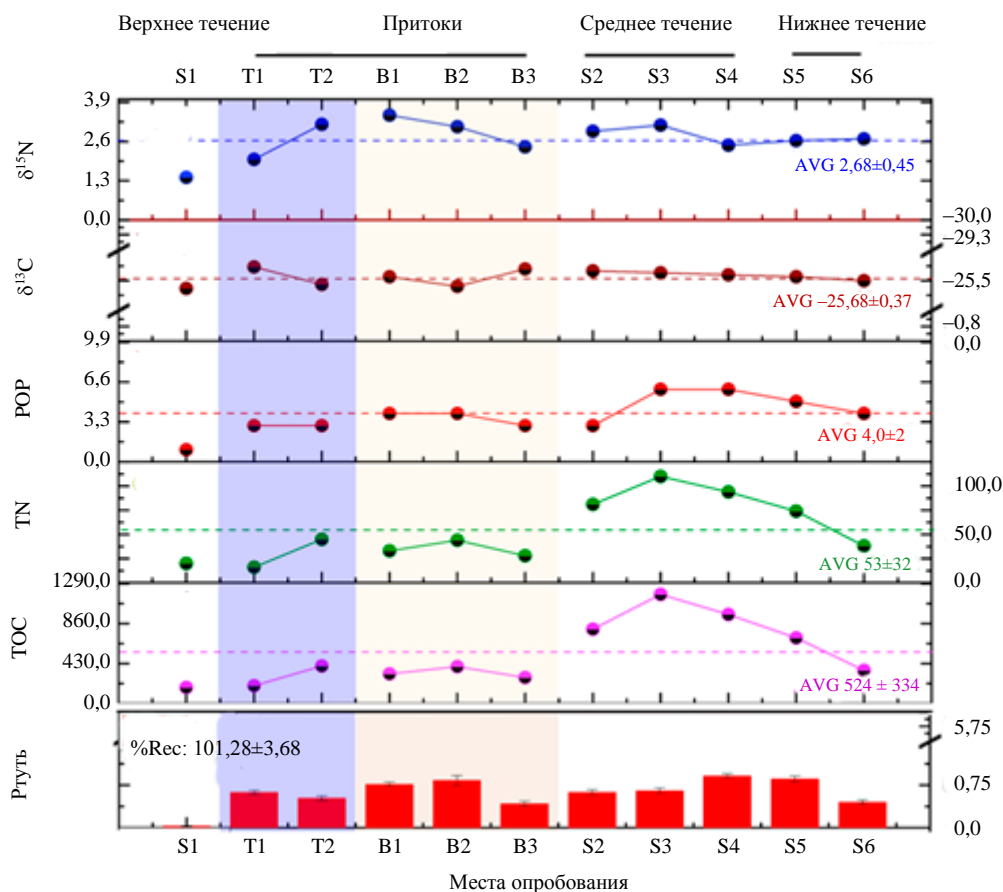


Рис.3. Распределения значений  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  (‰), органического вещества, концентрации общей ртути ( $\text{мкмоль}\cdot\text{г}^{-1}$ ) в каждом участке реки

Ртуть при попадании в почву может прочно связаться с ПОВ. Во время влажных сезонов зараженная почва, вымываясь, попадает в реку и накапливается в речных отложениях. Наиболее высокая концентрация ртути установлена в точках S4 (0,91 мг/кг) и S5 (0,84 мг/кг), расположенных ниже по течению р. Сиухунь. Высокая концентрация ртути в данных точках отбора может быть обусловлена тем, что это наиболее глубокие места р. Сиухунь, глубина их составляет 6,72 и 4,22 м соответственно. Большая глубина, в свою очередь, приводит к осаждению большего количества взвешенных частиц в период слабого стока.

Накопление ртути в главном русле и притоках представляло серьезную опасность, когда концентрация общей ртути превышала допустимые значения (0,15 мг/кг), установленную Временным руководством по качеству донных отложений Австралийско-Новозеландского совета по окружающей среде и охране природы (ANZECC ISQG) и Гонконгским временным руководством по качеству донных отложений (Hongkong ISQG), за исключением S1 (верхнее течение) [27]. Значения показателей качества осадков – уровень возникновения неблагоприятного эффекта (ЭДН – 0,15; ЭДС – 0,70 мг/кг), уровень воздействия (ПУВ – 0,13; ВУВ – 0,70 мг/кг). Информация о качестве донных отложений от правительства Индонезии в настоящее время недоступна. Таким образом, отложения в основном течении и притоках составляют высокий потенциальный экологический риск из-за загрязнения ртутью, особенно для водных организмов.

*Сравнение средних значений ртути по всему миру.* По сравнению с другими индонезийскими реками данные о р. Сиухунь ограничены. Результаты исследования рек в других странах, опубликованные ранее, представлены к сравнению в табл.2 [28-31]. Концентрация общей ртути в р. Сиухунь выше по сравнению с незагрязненными областями, такими как, например, болото Янгсури (Корея). Она примерно сопоставима с концентрацией в заливе Чиаджоу (Китай), но ниже, чем в других зонах загрязнения, включая залив Минамата (Япония) и р. Хунза (Пакистан). Содержание общей ртути в р. Сиухунь и ее притоках указывает на умеренное загрязнение ртутью.



Таблица 2

Сравнение концентраций общей ртути в поверхностных отложениях  
в бассейнах различных стран

Бассейн	Источник ртути	Содержание общей ртути, мг/кг	Ссылка на источник
Болото Янгсури, Корея	Болото	0,001-0,086	[28, 30]
Залив Минамата, Япония	Промышленность	0,1-3,34	[29, 31]
Залив Чиаджоу, Китай	Промышленность	0,12-0,58	[30, 32]
Р. Хунза, Пакистан	КМДЗ	0,22-6,40	[31, 33]
Р. Сиухунь, Индонезия	КМДЗ	0,02-0,91	Данное исследование

*Характеристики ОБ (ТОС, TN и POP) в отложениях.* Концентрации ТОС, TN и POP являются ключевыми параметрами при описании и определении количества органических веществ в отложениях [32]. Распределение ТОС, TN и POP в отложениях р. Сиухунь (S1-S6) примерно одинаковы. Их повышение зафиксировано на участке между верхним и средним течением, но они уменьшаются на участках ниже по течению (см. рис.3). Определенные концентрации: S3 (ТОС – 1174, TN – 110, POP – 6 мкмоль/г); S4 (ТОС – 958, TN – 94, POP – 5 мкмоль/г) и S5 (ТОС – 707, TN – 74, POP – 5 мкмоль/г); средние концентрации ТОС, TN и POP составили 695; 69,5; 4,17 мкмоль/г соответственно.

Высокие концентрации ТОС, TN и POP найдены в точке S3, причиной которых могут быть высокий уровень поступления ОБ с суши, а также влияние на состав ОБ в отложениях сильных дождей [33]. Средняя концентрация ТОС, TN и POP составила 298,5; 30,50; 3,00 мкмоль/г соответственно в р. Сизимеут и 332,67; 35,00; 3,67 мкмоль/г соответственно в р. Сиберанг. Различные концентрации ТОС, TN и POP в этих притоках указывают на различия в происхождении этих соединений в реках. В других отчетах, аналогичных данному исследованию [34], указывается, что концентрации ТОС, TN и POP в отложениях субводораздела р. Мянцзын значительно различаются.

*Корреляция между показателями содержания ртути, ТОС, TN и POP и их молярные соотношения.* Корреляционный анализ Пирсона проведен для показателей концентрации ртути, углерода, азота, фосфора, а также их молярных соотношений и изотопов (табл.3). Количество ТОС положительно коррелирует с TN, POP, отношениями углерода к азоту, азота к POP и углерода в POP, а также с изотопом  $\delta^{15}\text{N}$  и ртутью. Сильная корреляция обнаружена между количеством ТОС и TN в отложениях р. Сиухунь и ее притоков ( $r = 1,00$ ;  $P < 0,01$ ), что говорит о том, что большая часть TN связана с ТОС, который можно рассматривать как органический азот [35]. Более того, сильно коррелируют между собой ТОС и POP ( $r = 0,78$ ;  $P < 0,05$ ).

Таблица 3

Корреляционная матрица Пирсона для ртути,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ , ТОС, TN, POP  
и их молярного соотношения в р. Сиухунь и ее притоках

Элементы	ТОС	TN	POP	C/N	N/POP	C/POP	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
ТОС								
TN	1,0**							
POP	0,78**	0,77**						
C/N	0,27	0,20	0,35					
N/POP	0,57	0,60	-0,04	-0,21				
C/POP	0,66*	0,68*	0,07	-0,06	0,99**			
$\delta^{13}\text{C}$	-0,28	-0,22	-0,29	-0,87	0,06	-0,08		
$\delta^{15}\text{N}$	0,37	0,40	0,51	-0,05	0,03	0,06	-0,03	
Ртуть	0,51	0,52	0,79**	0,33	-0,14	-0,06	-0,30	0,61

\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ .



Результаты показывают, что типы ОВ должны быть сходными на всех участках опробования. Исходя из этого, можно предположить, что накопление ртути в отложениях может быть представлено ОВ. Результаты данного исследования согласуются с результатами проведенных ранее исследований [36], которые показали, что концентрация ртути сильно коррелирует с содержанием ТОС в заливе Бохай (Северный Китай) и р. Хайхэ в Тяньцзине, что вызвано термически лабильной фракцией ОВ, высвобождающейся в результате пиролиза при температуре 300 °С. Определено, что сильная корреляция между концентрациями ТОС, TN, POP и ртутью указывает на сильную корреляцию между адсорбцией ОВ и ртути в отложениях.

**Определение типа ОВ.** Органические вещества в отложениях основного потока р. Сиухунь и притоков проанализированы для определения источника ртути (см. табл.1). Молярное соотношение и соотношение стабильных изотопов органических углерода и азота использованы для определения происхождения и трансформации ОВ под влиянием антропогенного воздействия на местные и региональные экосистемы [32]. Анализ соотношения углерода к азоту вместе с изотопами  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  даст сведения об источниках ОВ и поможет определить их тип. Узкий диапазон (от  $-26,2$  до  $-25,1$  ‰) изотопа  $\delta^{13}\text{C}$  в отложениях р. Сиухунь и ее притоков объясняется преобладанием в этой зоне условий повышенной гидродинамической энергии [36].

Данное исследование выполнено во время влажного сезона, т.е. течение реки было сильным, и ожидалось, что распределение частиц ОВ будет значительно зависеть от течения. Поэтому сделано предположение, что во время влажного сезона ОВ из верхнего течения этих притоков могут быть перенесены в основное течение. Для определения типа ОВ выполнена оценка изотопов  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  (рис.4, а).

Результаты не позволили провести различие между типами ОВ на основе некоторых значений, полученных из фитопланктона и ОВ в почве. Однако, как и предполагалось, по соотношению углерода и азота со значениям  $\delta^{13}\text{C}$  среднее значение  $\delta^{13}\text{C}$  указывало на большое количество ОВ, полученного из почвы, что согласуется с почвенными свойствами ОВ (рис.4, б) [37]. Определено, что ОВ в отложениях р. Сиухунь и ее притоков не генерируется фитопланктоном, этот результат согласуется с данными другого источника [38].

**Модель смешивания стабильных изотопов.** Байесовская модель смешивания изотопов применялась для оценки пропорционального вклада каждого ОВ в отложения на каждом участке с использованием стабильного изотопа из трех источников: S1 – незагрязненный приток выше по течению от основного русла, T1 – загрязненный приток (р. Сизимеут), B1 + B2 – загрязненный приток (р. Сиберанг). В данном случае точки опробования B1 + B2 выступают как одна группа, поскольку эти участки имеют схожие изотопные и геологические характеристики.

В данном исследовании доля вклада  $n + 1$  различных источников может быть определена с помощью разных изотопных трассеров на основе сохранения массы стабильного изотопа. Исходя из графика  $\delta^{15}\text{N}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  (рис.5), ОВ, которые накапливаются в отложениях р. Сиухунь (смеси S4, S5 и S6), имели сходные характеристики с ОВ, которые были получены из смеси T2 и B3; эти точки находились относительно близко к источнику (T1, B1 + B2). В случае с точками S3 и B2, которые выходят за пределы треугольника, использован пакет «siar», основанный на симуляции полигонов смешивания Монте-Карло, чтобы применить предположение «точка в полигоне» к этим моделям [22].

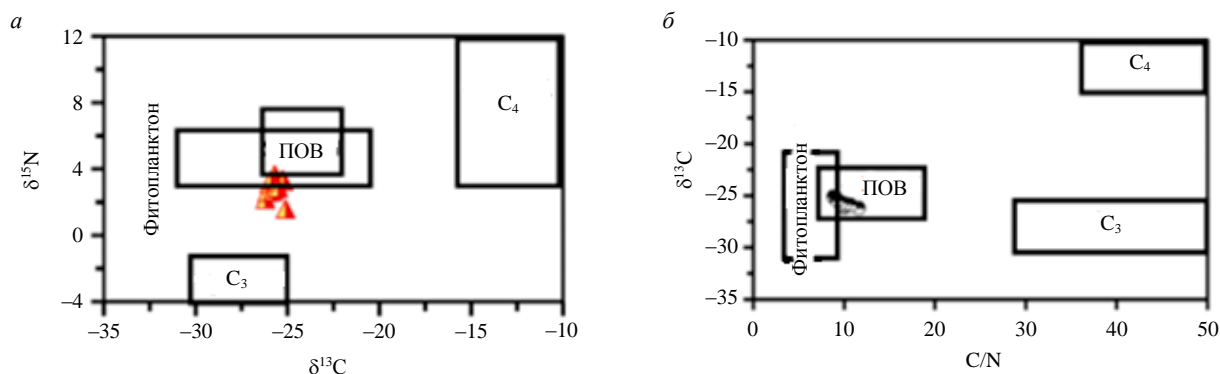


Рис.4. Зависимость изотопов  $\delta^{13}\text{C}$  от  $\delta^{15}\text{N}$  (а) и соотношение углерода к азоту в зависимости от  $\delta^{13}\text{C}$  (б)

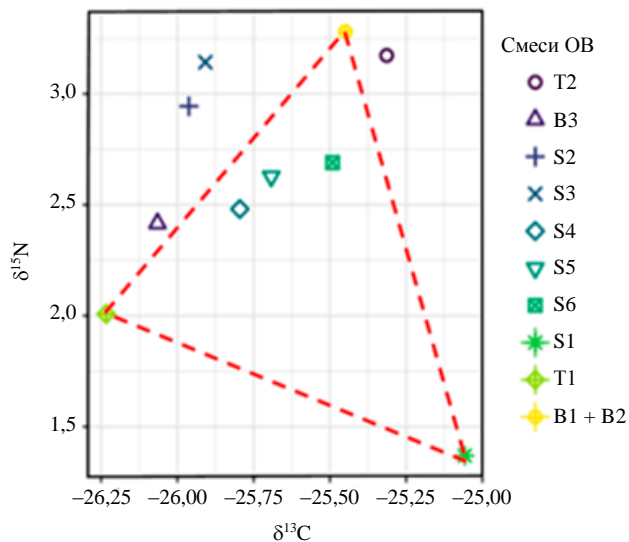


Рис.5. Байесовская модель смешивания изотопов

Полигоны смешивания (т.е. модель смешивания) представлены с использованием распределений предполагаемых источников ОБ. Рассчитывалась доля источников, имеющих ключевое влияние. Эта доля может быть представлена как частотная вероятность того, что предложенная модель смешивания дает возможность вычислить вклад источника в расчете изотопных сигнатур. Поскольку вычисление линейного влияния не проводилось, можно рассчитать вклад внешней части многоугольника.

Вклад почвенных ОБ (среднее из реки  $\pm$  SD) р. Сизимеут (Т1) обнаружен в большинстве отложений точек S3-S6, где самым высоким был вклад S4 ( $60,79 \pm 0,05$  %), затем S5 ( $49,32 \pm 0,07$  %), S3 ( $39,00 \pm 0,0$  %) и S6 ( $23,83 \pm 0,09$  %). ОБ р. Сиберанг появляются в отложениях нижних течений S3-S6 с наибольшим вкладом следующих точек:

S6 ( $47,51 \pm 0,01$  %), S5 ( $36,29 \pm 0,01$  %) и S4 ( $26,00 \pm 0,01$  %). Определено, что почвенные ОБ из р. Сиухунь и р. Сиберанг, которые загрязнены ртутью, внесли вклад в накопление ртути в отложениях зоны нижних течений р. Сиухунь из-за образования сильных ионных связей между ртутью и ПОВ, повлиявший на секвестрацию ртути в отложения [39]. Исходя из этого можно предположить, что ОБ отложений в нижнем течении поступают преимущественно из этих притоков.

**Биологический эффект.** Загрязненные ртутью речные отложения оказывают эффект на бентические организмы. Поэтому для экотоксикологической оценки концентрации ртути в отложениях использовались показатели ЭДН/ЭДС и ПУВ/ВУВ. В связи с тем, что значения ЭДН и ПУВ оказались ниже ожидаемых, чтобы оказать неблагоприятное воздействие на обитающие в отложениях организмы, биологический эффект оценивался по значениям ЭДС и ВУВ, указывающим на концентрацию химических веществ, выше которой возможно неблагоприятное воздействие в водной экосистеме [40]. Данные значения представляют собой надежный инструмент для оценки качества отложений и неблагоприятного биологического воздействия на эстуарные отложения [41].

По данным в табл.1, концентрации ртути во всех зонах опробования, за исключением S1, превысили показатели ЭДН и ПУВ. Некоторые зоны опробования показали чрезвычайно высокие концентрации ртути, превышающие значения ЭДС и ВУВ, установленные в нижних течениях S4 и S5, а также в притоках В1 и В2. Таким образом, эти зоны могут классифицироваться как потенциально токсичные для бентических организмов. Влияние от загрязнения отложений ртутью на водную экосистему вероятно вызван процессами ремобилизации и ресуспендирования [40].

Данные о токсичности ртути, включая аномальные и деформированные ткани водных организмов, в соответствии со значениями концентрации отсутствия наблюдаемого эффекта (НОЕС) и наименьшей концентрацией наблюдаемого эффекта (ЛОЕС), представлены в отчетах [26] для некоторых бентических организмов – моллюсков, ракообразных, водных насекомых и рыб. Деформация роста водных организмов была обнаружена у моллюсков (*Pyganodon grandis*, Hg = 0,686 мг/кг) и рыб (*Perca flavescens*, Hg = 0,125 мг/кг; *Sandae vitreus*, Hg = 0,25 мг/кг); отклонения в клеточной системе было обнаружено у рыб (*Liza aurata*; Hg = 0,1 мг/кг; *Bileophthalmus dussumieri*, Hg = 0,59 мг/кг); расстройства биохимии найдены у рыб (*Ameiurus males*, Hg = 0,59 мг/кг; *Brycon amazonicus*, Hg = 0,63 мг/кг), ракообразных (*Daphnia magna*, Hg = 0,859 мг/кг), водных насекомых (*Hexagenia sp.*, Hg = 0,166 мг/кг), эффект серности установлен у моллюсков (*Mytillus edulis*, Hg = 1,12 мг/кг), рыб (*Poecilia reticulata*, Hg = 0,2 мг/кг; *Onchorhynchus keta*, Hg = 0,8 мг/кг). В предыдущих исследованиях [3] был представлен коэффициент биоаккумуляции отдельных видов рыб – *Barbonymus gonionotus* и *Channa striata*, в р. Сиухунь он превысил 1000, что соответствует результатам опасной категории в случае употребления. Согласно другим исследованиям [7], концентрация ртути в прудах Сизиту варьируется от 0,1 до 1,3 мг/кг, что превышает допустимое количество для потребления человеком.



В данном исследовании экологический риск токсичности ртути на основе КР в 11 точках отбора проб речных отложений на р. Сиухунь показал, что значения КР в 10 точках, включая основное течение и притоки, превышают 1, в то время как КР в S1 менее 0,1. Значения КР по ртути в точках опробования – главного течения: S1 – 0,05; S2 – 1,59; S3 – 1,66; S4 – 2,33; S5 – 2,20; S6 – 1,18; притока (р. Сизимеут): T1 – 1,59; T2 – 1,33; притока (р. Сиберанг): B1 – 1,97; B2 – 2,12; B3 – 1,07.

Аналогичный результат был получен в отчете [25] по озеру Тайху, где почти весь диапазон значений КР в 31 точке опробования находился в пределах 0,10-1,00, а в двух точках был выше 1 – S12 (КР = 2,04) и S13 (КР = 2,18). Исходя из этого, экологический риск для озера Тайху оценивается как средний уровень.

Результаты данного исследования показали, что значения КР в р. Сиухунь довольно высоки по сравнению с озером Тайху, что свидетельствует о высоком уровне экологического риска по показателю ртути в речных отложениях. Это означает, что загрязнение ртутью потенциально влияет на бентические организмы, являющиеся звеньями пищевой цепи в большинстве места отбора проб, кроме S1. В будущем необходимо изучить виды рыб и бентических организмов в места отбора проб р. Сиухунь.

*Ограничения* данного исследования:

- Реки Индонезии находятся в ведении местных органов власти. Для отбора проб из этих рек частные лица или организации должны получить специальное разрешение местных органов власти.
- Местные власти отвечают за мониторинг и надзор за реками и определяют точки отбора проб; частные лица или организации должны придерживаться установленных местными властями процедур.
- Затрудненный доступ к рекам, которые окружены густыми лесами. Вынужденное следование процедуре, установленной местными властями, что может ограничить временное и пространственное представление собранных данных.
- Для надежного выявления пространственных закономерностей и корреляций с другими геохимическими характеристиками обычно требуется больший набор данных (не менее 30 образцов), тем самым обеспечивается статистическая значимость и уменьшается влияние выбросов.
- Малое количество проб (11 проб) недостаточно точно отражает геохимическое разнообразие и не учитывает влияние экологических факторов, таких как растительный покров, землепользование и деятельность человека. Также не учитываются временные колебания уровней ртути, связанные с сезонными изменениями, такими как изменение скорости течения воды, осадки и эрозия. Таким образом, в исследовании не обеспечен достаточный географический охват, и существует риск упустить значительные вариации ртутного загрязнения в пределах речной системы. Поэтому необходимо провести дополнительные исследования с достаточным географическим охватом для получения комплексного результата.
- Кроме КМДЗ необходимо учитывать и другие потенциальные источники загрязнения ртутью, так как промышленные сбросы, атмосферные осадки и историческое загрязнение. Понимание относительного вклада этих источников требует комплексной стратегии отбора проб.

### **Заключение**

Средняя концентрация общей ртути в отложениях р. Сиухунь колеблется в пределах 0,02-0,91 мг/кг сухого веса. Концентрация ртути в отложениях на поверхности превышала нормальное предельное значение во всех местах отбора проб, кроме S1 (согласно руководству по качеству отложений ANZECC). Данное исследование имеет важное значение, поскольку в нем впервые представлено описание загрязнения ртутью основного течения р. Сиухунь провинции Бантен в результате незаконной КМДЗ.

Это исследование подтвердило наличие загрязнения ртутью в водоразделе р. Сиухунь, где средняя общая концентрация ртути в поверхностных отложениях колеблется в пределах 0,02-0,91 мг/кг сухой массы и (на основании рекомендаций по качеству отложений) превышает нормальное предельное значение во всех местах отбора проб, за исключением S1. Байесовская модель смешивания с использованием изотопов показывает, что доля распределения ПОВ в главном течении р. Сиухунь составляет 23,8-60,8 % от доли в р. Сизимеут и 26,0-47,51 % от р. Сиберанг. Результаты корреляционного анализа Пирсона – анализа отношений углерода к азоту и  $\delta^{13}\text{C}$  – показали, что ПОВ в отложениях состоят из ПОВ, где концентрации общей ртути, углерода, азота и фосфора



сильно коррелируют между собой. Это свидетельствует о том, что приток вносит свой вклад в загрязнение ртутью основного течения р. Сиухунь из-за незаконной КМДЗ, которую ведут выше по течению притоков, что действует как точечные источники.

Биологические эффекты, оцененные с помощью ЭДС и ВУВ, показали, что концентрация ртути превышала нормальное предельное значение с умеренным уровнем коэффициента риска, что подтверждают высокую вероятность воздействия повышенного содержания ртути в отложениях в р. Сиухунь на жителей. Данное исследование имеет важное значение, поскольку в нем рассмотрена проблема загрязнения окружающей среды ртутью и представлены предложения по экологическому управлению ртутным загрязнением и восстановлению речных отложений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Mulyaningsih Th.R., Alfian, Sutisna.* Distribution of heavy metals in sediments of the Ciujung watersheds Banten // *Journal of Nuclear Reactor Technology.* 2012. Vol. 14. № 3. P. 157-169 (in Indonesian).
2. *Akbari T., Pangesti F.S.P.* Water Quality Index of Cisadane River and Ciujung River // *Advances in Social Science, Education and Humanities Research: Proceedings of the 1st International Multidisciplinary Conference on Education, Technology, and Engineering,* 5-6 November 2019, Serang Banten, Indonesia. Atlantis Press, 2019. Vol. 410. P. 131-134. DOI: [10.2991/assehr.k.200303.032](https://doi.org/10.2991/assehr.k.200303.032)
3. *Prilia D., Qginawati K., Ariesyady H.D.* Analysis of Mercury in Water and Sediment Distribution and Its Bioaccumulation Potential in Fish in the Small Scale Gold Mining Area (Case Study: Ciberang River, Lebak, Banten) // *Journal of Water Sustainability.* 2013. Vol. 3. Iss. 2. P. 107-116. DOI: [10.11912/jws.3.2.107-116](https://doi.org/10.11912/jws.3.2.107-116)
4. *Libassi M.* Indonesia: Adaptation and Differentiation in Informal Gold Mining // *Global Gold Production Touching Ground.* Cham, 2020. P. 321-338. DOI: [10.1007/978-3-030-38486-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38486-9_17)
5. *Getriana A., Achmadi U.F., Leometa C.H.* Behavioral Mercury Exposure of People in Artisanal and Small-Scale Gold Mining Site Area at Lebaksitu Village, 2017 // *Indian Journal of Public Health Research & Development.* 2018. Vol. 9. № 6. P. 432-438. DOI: [10.5958/0976-5506.2018.00593.4](https://doi.org/10.5958/0976-5506.2018.00593.4)
6. *Novirsa R., Dinh Q.P., Jeong H. et al.* The dietary intake of mercury from rice and human health risk in artisanal small-scale gold mining area, Indonesia // *Fundamental Toxicological Sciences.* 2020. Vol. 7. Iss. 5. P. 215-225. DOI: [10.2131/fts.7.215](https://doi.org/10.2131/fts.7.215)
7. *Bose-O'Reilly S., Schierl R., Nowak D. et al.* A preliminary study on health effects in villagers exposed to mercury in a small-scale artisanal gold mining area in Indonesia // *Environmental research.* 2016. Vol. 149. P. 274-281. DOI: [10.1016/j.envres.2016.04.007](https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.04.007)
8. *Hong Y.-S., Kim Y.-M., Lee K.-E.* Methylmercury Exposure and Health Effects // *Journal of Preventive Medicine and Public Health.* 2012. Vol. 45. Iss. 6. P. 353-363. DOI: [10.3961/jpmph.2012.45.6.353](https://doi.org/10.3961/jpmph.2012.45.6.353)
9. *Kim T.-H., Cho M.-J., Lee Y. et al.* Methylmercury Determination in Fish by Direct Mercury Analyzer // *Journal of AOAC INTERNATIONAL.* 2020. Vol. 103. Iss. 1. P. 244-249. DOI: [10.5740/jaoacint.18-0254](https://doi.org/10.5740/jaoacint.18-0254)
10. *Gutiérrez-Mosquera H., Marrugo-Negrete J., Díez S. et al.* Distribution of chemical forms of mercury in sediments from abandoned ponds created during former gold mining operations in Colombia // *Chemosphere.* 2020. Vol. 258. № 127319. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.127319](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127319)
11. *Palacios-Torres Y., Caballero-Gallardo K., Olivero-Verbel J.* Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region, Colombia // *Chemosphere.* 2018. Vol. 193. P. 421-430. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2017.10.160](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.160)
12. *Chakraborty P., Sarkar A., Vudamala K. et al.* Organic matter – A key factor in controlling mercury distribution in estuarine sediment // *Marine Chemistry.* 2015. Vol. 173. P. 302-309. DOI: [10.1016/j.marchem.2014.10.005](https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.10.005)
13. *Ankit Y., Muneer W., Gaye B. et al.* Apportioning sedimentary organic matter sources and its degradation state: Inferences based on aliphatic hydrocarbons, amino acids and  $\delta^{15}\text{N}$  // *Environmental Research.* 2022. Vol. 205. № 112409. DOI: [10.1016/j.envres.2021.112409](https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112409)
14. *Al Husaeni D.F., Nandiyanto A.B.D.* Bibliometric Using Vosviewer with Publish or Perish (using Google Scholar data): From Step-by-step Processing for Users to the Practical Examples in the Analysis of Digital Learning Articles in Pre and Post Covid-19 Pandemic // *ASEAN Journal of Science and Engineering.* 2022. Vol. 2. № 1. P. 19-46. DOI: [10.17509/ajse.v2i1.37368](https://doi.org/10.17509/ajse.v2i1.37368)
15. *Willy Cahya Nugraha, Yasuhiro Ishibashi, Koji Arizono.* Assessment of heavy metal distribution and contamination in the sediment of the Ciujung Watershed, Banten Province, Indonesia // *Journal of Material Cycles and Waste Management.* 2023. Vol. 25. P. 2619-2631. DOI: [10.1007/s10163-023-01661-4](https://doi.org/10.1007/s10163-023-01661-4)
16. *Haq A., Achmadi U.F., Mallongi A.* Environmental Health Risk Assessment Due to Exposure to Mercury in Artisanal and Small-Scale Gold Mining Area of Lebak District // *Global Journal of Health Science.* 2018. Vol. 10. № 3. P. 125-131. DOI: [10.5539/gjhs.v10n3p125](https://doi.org/10.5539/gjhs.v10n3p125)
17. *Ali M.M., Ali M.L., Islam Md. S., Rahman Md. Z.* Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management.* 2016. Vol. 5. P. 27-35. DOI: [10.1016/j.enmm.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.002)
18. *Haiyan Li, Anbang Shi, Xiaoran Zhang.* Particle size distribution and characteristics of heavy metals in road-deposited sediments from Beijing Olympic Park // *Journal of Environmental Sciences.* 2015. Vol. 32. P. 228-237. DOI: [10.1016/j.jes.2014.11.014](https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.11.014)
19. *Rippey B., Campbell J., McElarney Y. et al.* Timescale of reduction of long-term phosphorus release from sediment in lakes // *Water Research.* Vol. 200. № 117283. DOI: [10.1016/j.watres.2021.117283](https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117283)
20. *Berke M.A.* Reconstructing Terrestrial Paleoenvironments Using Sedimentary Organic Biomarkers // *Methods in Paleocology.* Springer, 2018. P. 121-149. DOI: [10.1007/978-3-319-94265-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94265-0_8)
21. *Mihailescu M.-D.* Bayesian analysis on mixture models, for understanding the process of myosin binding to the thin filament: A thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy. Essex: University of Essex, 2021. 180 p.
22. *Torres-Martínez J.A., Mora A., Knappett P.S.K. et al.* Tracking nitrate and sulfate sources in groundwater of an urbanized valley using a multi-tracer approach combined with a Bayesian isotope mixing model // *Water Research.* 2020. Vol. 182. № 115962. DOI: [10.1016/j.watres.2020.115962](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115962)
23. *Stock B.C., Jackson A.L., Ward E.J. et al.* Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models // *PeerJ.* 2018. Vol. 6. № e5096. DOI: [10.7717/peerj.5096](https://doi.org/10.7717/peerj.5096)



24. Meng Du, Dongbin Wei, Zhuowei Tan et al. Predicted no-effect concentrations for mercury species and ecological risk assessment for mercury pollution in aquatic environment // Journal of Environmental Sciences. 2015. Vol. 28. P. 74-80. DOI: [10.1016/j.jes.2014.06.042](https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.06.042)
25. Hailei Su, Di Shi, Jiwei Yang et al. Distribution Characteristics and Risk Assessment of Mercury in Sediments From Taihu Lake // Frontiers in Environmental Science. 2021. Vol. 9. № 695470. DOI: [10.3389/fenvs.2021.695470](https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.695470)
26. Novirsa R., Quang P.D., Jeong H. et al. The evaluation of mercury contamination in upland rice paddy field around artisanal small-scale gold mining area, Lebaksitu, Indonesia // Journal of Environment and Safety. 2019. Vol. 10. № 2. P. 119-125. DOI: [10.11162/daikankyo.E19RP0103](https://doi.org/10.11162/daikankyo.E19RP0103)
27. Karaouzas I., Kapetanaki N., Mentzafou A. et al. Heavy metal contamination status in Greek surface waters: A review with application and evaluation of pollution indices // Chemosphere. 2021. Vol. 263. № 128192. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.128192](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128192)
28. Chun Liu, Dong Wang, FeiFei Dong et al. Modeling organic matter sources of sediment fluxes in eroding landscapes: Review, key challenges, and new perspectives // Geoderma. 2021. Vol. 383. № 11470. DOI: [10.1016/j.geoderma.2020.114704](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114704)
29. Balogh S.J., Tsui M.T.-K., Blum J.D. et al. Tracking the Fate of Mercury in the Fish and Bottom Sediments of Minamata Bay, Japan, Using Stable Mercury Isotopes // Environmental Science & Technology. 2015. Vol. 49. Iss. 9. P. 5399-5406. DOI: [10.1021/acs.est.5b00631](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00631)
30. Yichen Lin, Fanping Meng, Yongxiang Du, Yuhan Tan. Distribution, speciation, and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Jiaozhou Bay, China // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2016. Vol. 22. Iss. 5. P. 1253-1267. DOI: [10.1080/10807039.2016.1159503](https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1159503)
31. Riaz A., Khan S., Muhammad S., Shah M.T. Mercury Contamination in Water and Sediments and the Associated Health Risk: A Case Study of Artisanal Gold-mining // Mine Water and the Environment. 2019. Vol. 38. Iss. 4. P. 847-854. DOI: [10.1007/s10230-019-00613-5](https://doi.org/10.1007/s10230-019-00613-5)
32. de la Lanza Espino G., Soto L.A. C:N:P Molar Ratios, Sources and <sup>14</sup>C Dating of Surficial Sediments from the NW Slope of Cuba // PLoS One. 2015. Vol. 10. № 6. № e0125562. DOI: [10.1371/journal.pone.0125562](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125562)
33. Kobayashi S., Fujiwara T. Influences of Terrestrial Inputs of Organic Matter on Coastal Water and Bottom Sediments in the Seto Inland Sea, Japan // Journal of Water and Environment Technology. 2018. Vol. 16. № 3. P. 138-148. DOI: [10.2965/jwet.17-035](https://doi.org/10.2965/jwet.17-035)
34. Hongmeng Ye, Hao Yang, Nian Han et al. Risk Assessment Based on Nitrogen and Phosphorus Forms in Watershed Sediments: A Case Study of the Upper Reaches of the Minjiang Watershed // Sustainability. 2019. Vol. 11. Iss. 20. № 5565. DOI: [10.3390/su11205565](https://doi.org/10.3390/su11205565)
35. Chakraborty P., Sarkar A., Vudamala K. et al. Organic matter – A key factor in controlling mercury distribution in estuarine sediment // Marine Chemistry. 2015. Vol. 173. P. 302-309. DOI: [10.1016/j.marchem.2014.10.005](https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.10.005)
36. Conghui Sun, Qi Wei, Lixia Ma et al. Trace metal pollution and carbon and nitrogen isotope tracing through the Yongdingxin River estuary in Bohai Bay, Northern China // Marine Pollution Bulletin. 2017. Vol. 115. Iss. 1-2. P. 451-458. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2016.10.066](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.066)
37. Bakshi M., Ghosh S., Chakraborty D. et al. Assessment of potentially toxic metal (PTM) pollution in mangrove habitats using biochemical markers: A case study on *Avicennia officinalis* L. in and around Sundarban, India // Marine Pollution Bulletin. 2018. Vol. 133. P. 157-172. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2018.05.030](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.030)
38. van Hardenbroek M., Chakraborty A., Davies K.L. et al. The stable isotope composition of organic and inorganic fossils in lake sediment records: Current understanding, challenges, and future directions // Quaternary Science Reviews. 2018. Vol. 196. P. 154-176. DOI: [10.1016/j.quascirev.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.08.003)
39. Beckers F., Rinklebe J. Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2017. Vol. 47. Iss. 9. P. 693-794. DOI: [10.1080/10643389.2017.1326277](https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1326277)
40. Meng Chuan Ong, Hui-Juan Pan, Shazili N.A.M. et al. Heavy Metals Concentration in Sediments of South Brittany Waters, France: An Ecological Risk Assessment Approach // Open Journal of Marine Science. 2021. Vol. 11. № 1. P. 55-68. DOI: [10.4236/ojms.2021.111004](https://doi.org/10.4236/ojms.2021.111004)
41. Hyeryeong Jeong, Jin Young Choi, Jihyun Lee et al. Heavy metal pollution by road-deposited sediments and its contribution to total suspended solids in rainfall runoff from intensive industrial areas // Environmental Pollution. 2020. Vol. 265. Part A. № 115028. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.115028](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115028)

**Авторы:** Вилли К. Нуграха, д-р философии, научный сотрудник, докторант, <https://orcid.org/0000-0003-1542-6701> (Исследовательский центр экологии и чистого производства, Национальное агентство исследований и инноваций, Южный Тангеранг, Индонезия; Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония), Хуйхо Чон, д-р философии, докторант, <https://orcid.org/0000-0003-1987-1386> (Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония), Фан Динь Куан, д-р философии, докторант, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4553-5581> (Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония; Вьетнамский национальный институт охраны труда и здоровья, Ханой, Вьетнам), Рэнди Новирса, д-р философии, докторант, преподаватель, <https://orcid.org/0000-0003-0477-1067> (Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония; Университет Андалас, Западная Суматра, Индонезия), Томохиро Коморита, доцент, преподаватель, <https://orcid.org/0000-0002-9469-5602> (Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония), Ясухиро Исбаси, профессор, заведующий кафедрой охраны окружающей среды и симбиотических систем, <https://orcid.org/0000-0002-2610-0849> (Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония), Дзюн Кобаяси, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-0493-6386> (Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония), Кодзи Аризоно, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-9148-9176> (Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония), Асеп Баю Дани Нандиянто, профессор, преподаватель, [nandiyanto@upi.edu](mailto:nandiyanto@upi.edu), <https://orcid.org/0000-0002-9753-1267> (Индонезийский педагогический университет, Бандун, Индонезия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Обоснование безопасной эксплуатации закрытого угольного склада по газовому фактору

С.Г.Гендлер, А.Ю.Степанцова✉, М.М.Попов

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

**Как цитировать эту статью:** Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Попов М.М. Обоснование безопасной эксплуатации закрытого угольного склада по газовому фактору // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16519. С. 72-82. [EDN SJJDWE](#)

### Аннотация

Ежегодное увеличение добычи угля и спроса на него приводят к необходимости организации мест временного хранения (складов) для размещения угольного сырья перед отправкой потребителю. При открытом способе складирования угля процесс пыления от погрузо-разгрузочных операций и с поверхности штабеля негативно влияет на здоровье рабочих склада и состояние прилегающих к складу территорий. Альтернативным открытому складированию является размещение угольного сырья в закрытых помещениях. Одной из главных опасностей при таком складировании угля может быть выделение в воздушную среду остаточного метана, содержащегося в угольных отдельностях, после процессов дегазации во время добычи и извлечение на поверхность, а также транспортировки до места временного хранения. В статье выполнен анализ изменения метаноносности угля в процессе добычи, транспортирования и при непосредственном размещении на закрытых складах. Рассмотрены физико-химические основы массообмена при взаимодействии газонасыщенной угольной массы с воздухом. Показано, что интенсивность метановыделения зависит от природной газоносности угольного пласта, параметров массопереноса между углем и воздухом, а также температуры окружающей среды. Для оценки динамики газообмена угольной массы с атмосферным воздухом предложен приближенный подход, основанный на использовании двух взаимосвязанных итераций, определяющих как формирование концентрационных полей метана в воздушном пространстве насыпного объема, так и величины метановыделения с поверхности штабеля к наружному воздуху. Отмечено, что безопасность эксплуатации закрытых угольных складов по газовому фактору может быть реализована с помощью искусственной вентиляции, обеспечивающей объемную концентрацию метана в воздушной среде менее 1 %. Величина расхода, достаточная для достижения отмеченной концентрации метана, получена в результате компьютерного моделирования процесса формирования полей концентраций метана в воздушной среде при теоретически вычисленном выделении метана с поверхности штабеля.

### Ключевые слова

каменный уголь; угольная пыль; угольный склад; метан; остаточная метаноносность; транспортировка каменных углей; десорбция метана; эффективный коэффициент диффузии

Поступила: 17.06.2024

Принята: 17.07.2024

Онлайн: 03.10.2024

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Угольная отрасль – одна из ключевых в российской промышленности, включает добычу, переработку, производство, транспортировку и сбыт угля. Российская Федерация занимает второе место в мире по запасам угольного сырья, большая часть из которого находится в Сибири и на Дальнем Востоке [1-3]. Добыча угля по итогам 2023 г. составила 438 млн т, в том числе 213 млн т угля было отправлено на экспорт в Китай, страны БРИКС и др. [4, 5].

Рост добычи угля и повышенный коммерческий интерес к его приобретению приводят к необходимости организации временного складирования угля в портовых терминалах и на складских площадках для последующей отправки потребителю [6-8].

На сегодняшний день наиболее распространенным способом временного складирования угля является размещение его на открытых площадках [9-11]. Как показывает анализ, при таком способе хранения, во-первых, снижается качество угольного сырья, а во-вторых, возникает аэротехногенная нагрузка на окружающую среду и на рабочий персонал из-за пылевыведений [12-14]. Причиной высокого пыления угольных штабелей является ветровой поток, величина которого достигает в некоторых регионах 20 м/с. Расчет выбросов угольной пыли в атмосферу



от эксплуатации открытых складов проведен по Отраслевой методике\*. Зависимость запыленности атмосферного воздуха от скорости ветра представлена на рис.1.

Анализ полученных данных показывает, что при невысокой скорости ветра (1-5 м/с) вынос угольной пыли с поверхности штабеля и рассеивание угольной пыли будут происходить преимущественно в складской зоне и прилегающей территории предприятия, подвергая негативному воздействию обслуживающий персонал. С увеличением ветрового потока пыление от штабеля интенсифицируется, но рассеивание и оседание угольной пыли будет происходить уже преимущественно за промышленной территорией, провоцируя аэротехногенное воздействие на окружающую среду.

Альтернативным решением экологической проблемы и предотвращением снижения качества угольного сырья является использование для временного хранения угля закрытых складов [15-17]. Скорость движения воздуха при таком способе размещения определяется лишь параметрами естественной или вынужденной вентиляции и будет гораздо ниже, чем скорость ветрового потока, что обуславливает минимальный срыв пыли с поверхности угольного штабеля. При очевидных экологических преимуществах размещения угля в закрытых помещениях в случае высокой остаточной газоносности угля выделение метана из угольных отдельностей может привести к образованию взрывоопасных концентраций в воздушной среде склада [18]. Во избежание подобных случаев максимальное содержание метана в воздухе закрытого склада ограничено действующими нормативными документами (1 % объема) [19].

Выполненный анализ показал, что многие угольные месторождения России характеризуются высокой природной газоносностью, что подтверждается данными таблицы, в которой приведены значения природной метаноносности некоторых угольных пластов Кузбасса [20-22].

#### Метаноносность некоторых угольных месторождений Кузбасского угольного бассейна

Месторождение	Минимальная природная метаноносность, м <sup>3</sup> /т	Максимальная природная метаноносность, м <sup>3</sup> /т
Алардинское	0,10	44,7
Байдаевское	0	30,3
Березово-Бирюлинское	2,0	36,7
Егозово-Красноярское	0,3	13,5
Кедровско-Крохалевское	0,01	17,6
Киселевское	0	35
Ленинское	0	25
Ольжерасское	1	31
Распадское	1	22
Соколовское	2	17,1
Шелканское	1	23,5
Чертинское	0	35

Снижение газоносности (метаноносности) относительно начального значения проходит в несколько этапов: извлечение отбитого угля на поверхность, погрузка в вагоны, транспортировка по

\* Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля. Пермь: МНИИЭКО ТЭК, 2003. 115 с.

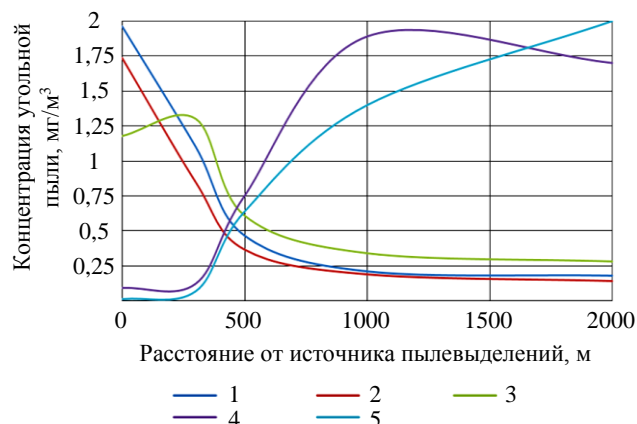


Рис.1. Зависимость рассеивания угольной пыли от расстояния от источника пыления при различных скоростях движения воздуха

1 – 1 м/с; 2 – 3 м/с; 3 – 5 м/с; 4 – 10 м/с; 5 – 20 м/с



железной дороге, разгрузка на склад. На каждой из стадий процессы дегазации угольной массы зависят от таких параметров, как петрографический состав угля, зольность, средний размер угольного куска, температура окружающей среды и др. [23-25].

Таким образом, целью работы является исследование влияния остаточной газоносности угольного сырья на безопасные условия эксплуатации закрытых угольных складов и, при необходимости, выбор режима проветривания, обеспечивающего нормализацию газового режима.

### Методы

Метан в угольных пластах находится в связанном сорбированном состоянии. В процессе разрушения угольного массива часть метана, находящаяся в порах и трещинах пласта, выходит в пространство шахты моментально, а другая часть газа продолжает десорбировать, но с меньшей скоростью. Интенсивность газовой выделений из угля будет зависеть от нескольких факторов: температуры окружающей среды, параметров массопереноса, начальной газоносности угля и др. [26-28].

После добычи и извлечения на поверхность угольная продукция на разных стадиях транспортировки до момента поступления потребителю складывается в штабеля различной формы, представляющие собой насыпные объемы, содержащие угольные отдельности, окруженные воздушным пространством. К штабелям могут быть отнесены насыпи угля перед погрузкой в вагоны, объемы угля, заполняющие насыпи, а также насыпи, образованные в местах его временного хранения (портовые терминалы, складские помещения на ТЭЦ, химических и металлургических заводах и т.п.) [19, 29, 30].

В тех случаях, когда в процессе перемещения угольной массы от места добычи до конечного пункта дегазация метана, первоначально содержащегося в угле, произошла лишь частично, угольная масса будет иметь некоторую остаточную газоносность.

Процесс дегазации при складировании угольной массы в штабеля осуществляется следующим образом. В начальный период сразу после образования штабеля концентрация метана в воздухе, заполняющем межкусковые пустоты, имеет нулевое значение. С течением времени воздушные пустоты начинают заполняться метаном, поступающим с поверхности каждой угольной отдельности, и концентрация метана в воздушных пустотах непрерывно растет, достигая некоторого асимптотического значения. Если поверхность угольного штабеля омывается воздухом, то одновременно с увеличением концентрации метана в глубине штабеля происходит отток метана с поверхности, в зонах, прилегающих к поверхности штабеля, образуются зоны со сниженной относительно областей, на которые влияние газообмена с поверхности еще не распространилось, концентраций метана.

Может оказаться, что поток метана с поверхности штабеля вначале растет до некоторой величины, а затем монотонно падает.

Для оценки динамики газообмена угольной массы с атмосферным воздухом на всех стадиях ее складирования в штабелях или в железнодорожных вагонах предложен приближенный подход, основанный на использовании двух взаимосвязанных итераций, определяющих как формирование концентрационных полей метана в воздушном пространстве насыпного объема, так и величины метановыделения с поверхности штабеля к наружному воздуху.

Первая итерация выполняется при допущении, что выделение метана в единицу объема угольной массы, где поверхность угольных отдельностей равна  $F_{\text{ед.об}}$ , происходит при условии изоляции этого объема, в котором угольные отдельности и пустоты, заполненные воздухом, занимают соответственно объемы  $1 - m$  и  $m$ , от наружного воздуха, омывающего его поверхность. Поток метана  $j$  с поверхности каждой угольной отдельности вычисляется при допущении, что она может быть представлена в форме шара радиусом  $r_0$ , а поток метана с его поверхности определяется эффективным коэффициентом диффузии  $D_{\text{eff}}$ , величина которого установлена на основе экспериментальных исследований (рис.2) для углей Кузнецкого угольного бассейна марок Г и Ж [31].

Из графика на рис.2 следует, что значение эффективного коэффициента диффузии увеличивается с повышением температуры окружающей среды.



Дифференциальное уравнение диффузии метана в каждой угольной отдельности может быть представлено в виде:

$$\frac{\partial C}{\partial Fo^{угля}} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial R^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial R}; \quad (1)$$

$$C(R, 0) = C_0;$$

$$\partial C = C(R; Fo^{угля});$$

$$C(1, \tau) = C_\tau;$$

$$\frac{\partial C(0, Fo^{угля})}{\partial R} = 0,$$

где  $C$  – концентрация метана в угольной отдельности,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $Fo^{угля}$  – диффузионное число Фурье для угольных отдельностей,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $Fo^{угля} = D_{eff} \tau / r_0^2$ ;  $\tau$  – время,  $\text{с}$ ;  $C_0$  – начальная концентрация метана в угольной массе,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $R$  – безразмерный радиус,  $R = r/r_0$ ;  $r_0$  – средний радиус угольных отдельностей, слагающий насыпной объем,  $\text{м}$ ;  $C_\tau$  – концентрация метана в воздушном пространстве штабеля,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Решение уравнения (1), представленное в общем виде даже при  $C_\tau = \text{const}$ , имеет сложный вид, что затрудняет его дальнейшее использование для вычисления динамики концентрации метана в воздушных пустотах. Поэтому для определения  $C(R, Fo^{угля})$  использовано асимптотическое представление общего решения при фактических значениях диффузионного числа Фурье, составляющего для рассматриваемых условий

$$Fo^{угля} = \frac{(10^{-10} - 10^{-11})(1,5-4) \cdot 10^6}{0,05^2} = 0,1-0,2. \quad (2)$$

Тогда величина диффузионного потока при этих величинах числа Фурье с высокой точностью может быть представлена в виде:

$$j(Fo^{угля}) = D_{eff} / r_0 \left( -1 + \frac{1}{\sqrt{\pi Fo^{угля}}} \right) (C_0 - C_\tau). \quad (3)$$

В случае изменения  $C_\tau$  по произвольному закону поток устанавливается на основе теоремы Дюамеля:

$$j(Fo^{угля}) = -\frac{D_{eff}}{r_0} \frac{\partial}{\partial Fo^{угля}} \int_0^{Fo^{угля}} \left( -1 + \frac{1}{\sqrt{\pi \xi}} \right) [C_0 - C_\tau(Fo^{угля} - \xi)] d\xi. \quad (4)$$

Изменения концентрации метана в единице объема воздушного пространства насыпного объема может быть описано уравнением:

$$m \frac{dC(Fo^{угля})}{dFo^{угля}} = (1-m) F_{ед.об} j(Fo^{угля}). \quad (5)$$

Начальные условия  $C(Fo^{угля})|_{Fo^{угля}=0} = 0$ .

Решение уравнения (5), выполненное с помощью преобразования Лапласа, относительно концентрации метана в воздушном пространстве может быть представлено в виде:

$$C_\tau(Fo^{угля}) = C_0 f(Z), \quad (6)$$

где  $f(Z)$  – табулированная функция,

Эффективный коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$

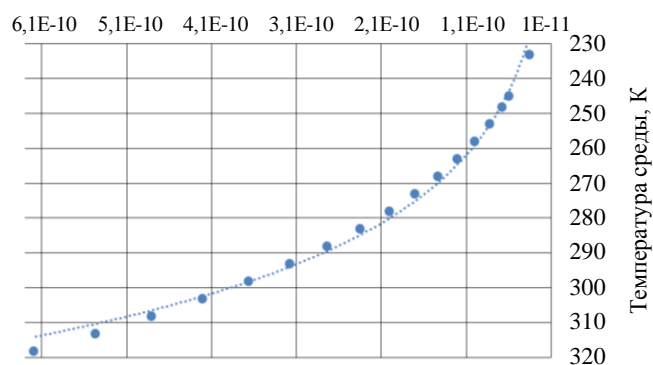


Рис.2. Зависимость изменения эффективного коэффициента диффузии от температуры окружающей среды.

Корреляционное соотношение  $\sqrt{0,993}$



$$f(Z) = 1 - \exp(k^2 Fo_{\text{угля}}) \operatorname{erfc}(k\sqrt{Fo_{\text{угля}}});$$

$$\operatorname{erfc}(k\sqrt{Fo_{\text{угля}}}) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{k\sqrt{Fo_{\text{угля}}}} \exp(-\xi^2) d\xi;$$

$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{k\sqrt{Fo_{\text{угля}}}} \exp(-\xi^2) d\xi$  – интеграл вероятности при  $k = \frac{r_0}{m} F_{\text{ед.об}} (1-m)$ ;  $F_{\text{ед.об}}$  – суммарная поверхность кусков угля в единице насыпного объема угольной массы,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $m$  – относительный объем, занимаемый воздухом в единице насыпного объема угольной массы, доли ед.

Начальная концентрация метана в угольной массе связана с газоносностью (метаноносностью) следующим соотношением:

$$C_0 = \rho_{\text{мет}} \rho_{\text{угля}} X_{\text{мет}}, \quad (7)$$

где  $\rho_{\text{мет}}$  – плотность метана,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{угля}}$  – плотность угля,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  $X_{\text{мет}}$  – начальная газоносность угля,  $\text{м}^3/\text{т}$ .

Одним из путей вычисления средней концентрации метана в воздушном пространстве насыпного объема  $\overline{C_{\tau}(Fo_{\text{угля}})}$  за время хранения или транспортировки  $Fo_{\text{угля}}$  является интегрирование выражения (6) с последующим усреднением по времени  $Fo_{\text{угля}}$ . При этом выражение для вычисления  $\overline{C_{\tau}(Fo_{\text{угля}})}$  получается достаточно громоздким, что делает его малоприменимым для дальнейших оценок.

Другой путь вычисления  $\overline{C_{\tau}(Fo_{\text{угля}})}$  состоит в использовании балансового уравнения, в основе которого лежит вычисление суммарного потока метана, поступающего в воздушное пространство насыпного объема из угольных отдельностей за время  $Fo_{\text{угля}}$  при условии постоянства средней концентрации метана и с последующим расчетом приращения средней концентрации метана в воздушном пространстве относительно начальной величины, равной нулевому значению. Зависимость может быть представлена в виде:

$$\overline{C_{\tau}(Fo_{\text{угля}})} = \frac{C_0 k \left[ 2 \left( \frac{Fo_{\text{угля}}}{\pi} \right)^{0,5} - Fo_{\text{угля}} \right]}{1 + 0,5k \left[ 2 \left( \frac{Fo_{\text{угля}}}{\pi} \right)^{0,5} - Fo_{\text{угля}} \right]}. \quad (8)$$

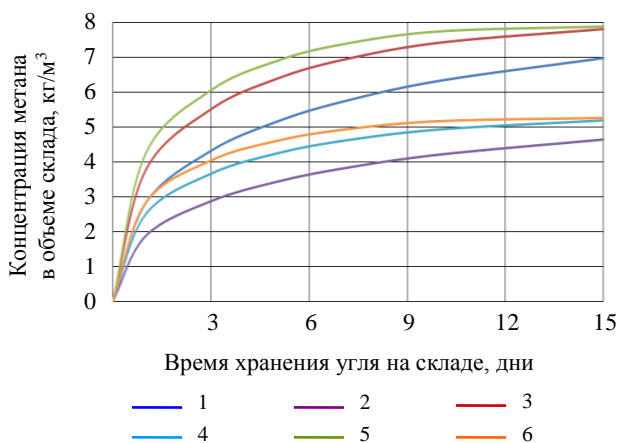


Рис.3. Зависимость изменения концентрации метана в воздушном пространстве насыпного объема с течением времени

1 – остаточная метаноносность после транспортировки  $15 \text{ м}^3/\text{т}$  ( $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 2 –  $15 \text{ м}^3/\text{т}$  ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 3 –  $15 \text{ м}^3/\text{т}$  ( $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 4 –  $10 \text{ м}^3/\text{т}$  ( $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 5 –  $10 \text{ м}^3/\text{т}$  ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 6 –  $10 \text{ м}^3/\text{т}$  ( $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Расчеты  $\overline{C_{\tau}(Fo_{\text{угля}})}$  при различных коэффициентах диффузии приведены на рис.3.

Согласно расчетам, средняя концентрация метана резко возрастает уже после одного дня хранения. Рост концентрации особенно заметен для высоких температур окружающей среды, так как с увеличением температуры повышается значение эффективного коэффициента диффузии [32, 33]. Например, при остаточной метаноносности после транспортировки  $10 \text{ м}^3/\text{т}$  и длительности хранения сырья на складе 15 дней концентрация метана в объеме склада ориентировочно составит  $8 \text{ кг}/\text{м}^3$  в летний период и  $7 \text{ кг}/\text{м}^3$  в зимний период.

Вторая итерация позволяет установить метановыделения с поверхности насыпного объема в омывающий эту поверхность воздух на каждый



момент времени  $\tau$ . Для определения метановыделения с поверхности насыпного объема следует, прежде всего, выбрать его геометрическую форму. Для насыпного объема, находящегося в вагоне, предлагается использовать геометрическую модель полуограниченного пространства, а для насыпного объема в виде штабеля, размещенного в закрытом складе, геометрическую модель неограниченного цилиндра с эквивалентным радиусом  $R_{\text{пов.шт}}$ .

Принято допущение, что поток метана с поверхности насыпного объема в воздушную среду за время  $\tau$  определяется величиной результирующего эффективного коэффициента диффузии  $D_{\text{eff}}^{\text{рез}}$ , вычисляемого по методике, аналогичной предложенной в работе [34]. В основе этой методики лежит допущение о возможности рассмотрения угольной массы в качестве двух бинарных смесей, одна из которых состоит из угольных отдельностей, окруженных пустотами, содержащими воздух  $D_{\text{eff}1}$ , а другая, наоборот, из пустот с воздухом, которые окружены угольными отдельностями  $D_{\text{eff}2}$ . Эффективный коэффициент диффузии рассчитывается по формулам:

$$D_{\text{eff}1} = D_{\text{eff}}^{\text{возд}} \left[ 1 + v_{\text{угля}} \frac{\left( 1 - \frac{D_{\text{eff}}^{\text{возд}}}{D_{\text{eff}}^{\text{угля}}} \right)}{1 - \sqrt[3]{v_{\text{угля}} \left( 1 - \frac{D_{\text{eff}}^{\text{возд}}}{D_{\text{eff}}^{\text{угля}}} \right)}} \right]; \quad (9)$$

$$D_{\text{eff}2} = D_{\text{eff}}^{\text{угля}} \left[ 1 + v_{\text{возд}} \frac{\left( 1 - \frac{D_{\text{eff}}^{\text{угля}}}{D_{\text{eff}}^{\text{возд}}} \right)}{1 - \sqrt[3]{v_{\text{возд}} \left( 1 - \frac{D_{\text{eff}}^{\text{угля}}}{D_{\text{eff}}^{\text{возд}}} \right)}} \right], \quad (10)$$

где  $D_{\text{eff}}^{\text{угля}}$  – эффективный коэффициент диффузии метана в угле согласно графику на рис.2, м<sup>2</sup>/с;  $D_{\text{eff}}^{\text{возд}}$  – эффективный коэффициент диффузии метана в воздухе,  $D_{\text{eff}}^{\text{возд}} = 2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с [35-37];  $v_{\text{угля}}$  – относительный объем угольных отдельностей,  $v_{\text{угля}} = 1 - m$ ;  $v_{\text{возд}}$  – относительный объем воздушного пространства, соответствующий пористости насыпного объема,  $v_{\text{возд}} = m$ .

Результирующий эффективный коэффициент диффузии метана с учетом зависимостей (9) и (10) будет вычисляться следующим образом:

$$D_{\text{eff}}^{\text{рез}} = 0,2D_{\text{eff}1} + 0,8D_{\text{eff}2}. \quad (11)$$

Зависимости для вычисления метановыделений (потока метана) с поверхности вагона и с поверхности штабеля имеют вид:

$$J_{\text{ваг}} = \sqrt{\frac{D_{\text{eff}}^{\text{рез}}}{\pi\tau}} \left[ C(\text{Fo}_{\text{угля}}) - C_{\text{возд}} \right]; \quad (12)$$

$$J_{\text{штаб}} = \frac{D_{\text{eff}}^{\text{рез}}}{R_{\text{пов.шт}}} \left( -0,5 + \frac{1}{(\pi\text{Fo}_{\text{штаб}})^{0,5}} \right) \left[ C_{\tau}(\text{Fo}_{\text{угля}}) - C_{\text{возд}} \right], \quad (13)$$

где  $\text{Fo}_{\text{штаб}}$  – диффузионное число Фурье для штабеля угля;  $C_{\text{возд}}$  – концентрация метана в воздухе, кг/м<sup>3</sup>.

На основе зависимости (12) несложно вычислить суммарное количество метана, поступившее в воздух, из насыпного объема угля, находящегося в вагоне. Для этого вначале находится суммарное

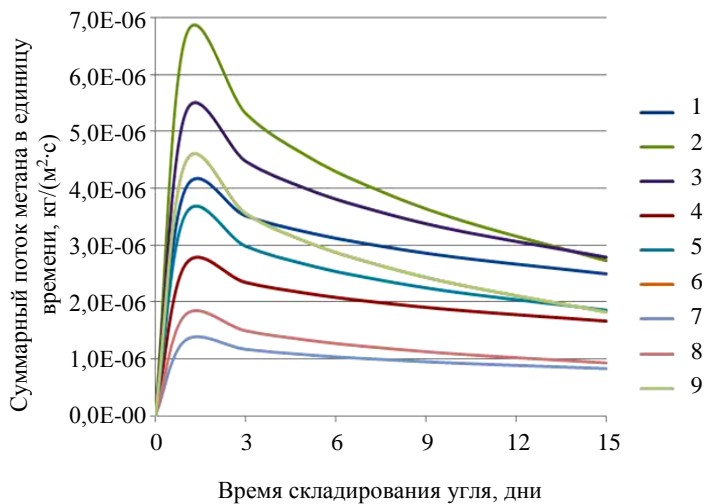


Рис.4. Зависимость потока метана с открытой поверхности угольного штабеля от времени его хранения

1 – 15 м³/т (–20 °С); 2 – 15 м³/т (+10 °С); 3 – 15 м³/т (0 °С); 4 – 10 м³/т (–20 °С); 5 – 10 м³/т (0 °С); 6 – 10 м³/т (+10 °С); 7 – 5 м³/т (–20 °С); 8 – 5 м³/т (+10 °С); 9 – 5 м³/т (0 °С)

той поверхности угольного штабеля от времени его хранения (рис.4). Величина начальной концентрации метана в угольном штабеле  $C_0$  вычислялась с учетом остаточной метаноносности, рассчитанной по формуле (14).

Изменение концентрации метана в воздушном пространстве закрытого склада в предположении плоскопараллельного характера движения воздуха вдоль поверхности штабеля определяется выражением:

$$C_{пр} = C_{штаб} (1 - e^{-J_{штаб} PL}), \quad (15)$$

где  $C_{пр}$  – предельно допустимая концентрация метана,  $C_{пр} = 1 \%$ ;  $P$  – периметр боковой поверхности штабеля, м²;  $L$  – длина штабеля, м.

На основании расчетов по формуле (15) с учетом зависимости (13) для различной остаточной метаноносности угля перед загрузкой в склад расход воздуха будет изменяться от 5 до 27 м³/с в зимний период (средняя температура окружающей среды –20 °С) и от 11 до 45 м³/с в летний период (средняя температура окружающей среды +20 °С). Максимальное значение расхода воздуха соответствует максимальному значению потока метана.

*Математическое моделирование аэродинамики потока метана в объеме закрытого склада.* Для проверки правомерности использования плоскопараллельной схемы движения воздуха в помещении угольного склада и установления распределения концентраций метана по длине склада осуществлено математическое моделирование процесса переноса газовой фазы с учетом аэродинамики воздушного потока, в который с поверхности штабеля поступает метан. Для этого был использован программный пакет Flow Vision. В качестве исходных данных принята реальная геометрия склада и размещенного в нем штабеля угля (высота 23 м, ширина по основанию 65 м и протяженность 600 м). В математической модели было учтено влияние на аэродинамику воздушного потока находящейся в складе погрузо-разгрузочной техники (портальный реclaimer).

Вычисления выполнялись для остаточной метаноносности угля перед загрузкой на склад, равной 15 м³/т и при температуре окружающей среды +20 °С. Для этих условий средний поток метана с поверхности угольного штабеля составил  $6 \cdot 10^{-6}$  кг/(м²·с).

Для вентиляции склада выбрана схема проветривания с подачей свежего воздуха через проемы, расположенные на боковых поверхностях в торцах помещения, и отводом загрязненного воздуха через трубу в центре склада (рис.5).

количество метана, поступившее в воздух, омывающий открытую поверхность угля, а затем определяется остаточная газоносность (метаноносность) угольной массы за время транспортировки  $\tau_{трансп}$ :

$$X_{трансп} = X_0 - \frac{J_{пов} F_{пов}^{ваг}}{\rho_{мет} P_{ваг}}, \quad (14)$$

где  $F_{пов}^{ваг}$  – площадь открытой поверхности вагона, м²;  $P_{ваг}$  – грузоподъемность вагона, т.

Результаты вычислений показали, что в зависимости от температуры окружающей среды и времени транспортирования остаточная метаноносность угольной массы, загружаемой в склад, может составлять от 14 до 7 м³/т.

На основе формулы (9) построен график зависимости потока метана с откры-



Ввиду симметрии закрытого склада относительно вертикальных плоскостей, проходящих перпендикулярно (в центральном сечении склада) и параллельно (по длине склада перпендикулярно его основанию) горизонтальной оси, расчетная область была разделена на четыре равные части (рис.5). Все вычисления выполнялись для одной из этих частей.

Моделирование процесса переноса газовой примеси осуществлялось в течение 16 ч до момента стабилизации концентрации метана. Для установления закономерностей распределения концентрации метана по объему склада были выбраны точки 0-10, расположенные через каждые 30 м от воздуховыводящей трубы по направлению к воздухоподающим проемам (рис.6).

С учетом турбулентного характера течения воздушных масс, а также влияния погрузо-разгрузочной техники на траекторию их движения, распределение концентраций метана по объему закрытого склада будет выглядеть следующим образом. Концентрация метана принимает максимальное значение 0,00547-0,99 % по объему (красный цвет) у воздуховыводящей трубы (рис.6). Это объясняется постепенным накоплением метана при вращательном движении воздушных масс над поверхностью угля, выделяющей метан.

Изменения концентрации метана от времени в различных точках пространства закрытого склада показаны на рис.7. В соответствии с рис.7 рост концентрации метана до 0,99 % происходит до ее выхода на квазистационарные значения в течение ~45000 с, что соответствует 12,5 ч хранения угля на складе.

Таким образом, с учетом влияния сложной аэродинамики потока расход воздуха, обеспечивающий разбавление концентрации метана до пороговых значений, согласно расчетам равен  $48 \text{ м}^3/\text{с}$ .

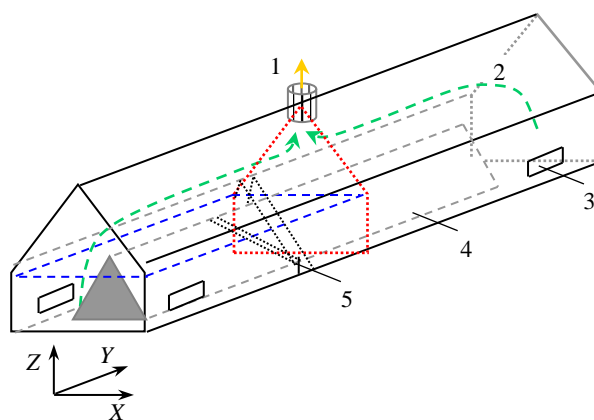


Рис.5. Схема закрытого угольного склада

1 – воздуховыводящая труба; 2 – поток воздуха; 3 – проем для поступления воздуха; 4 – угольный штабель; 5 – порталный реклаймер

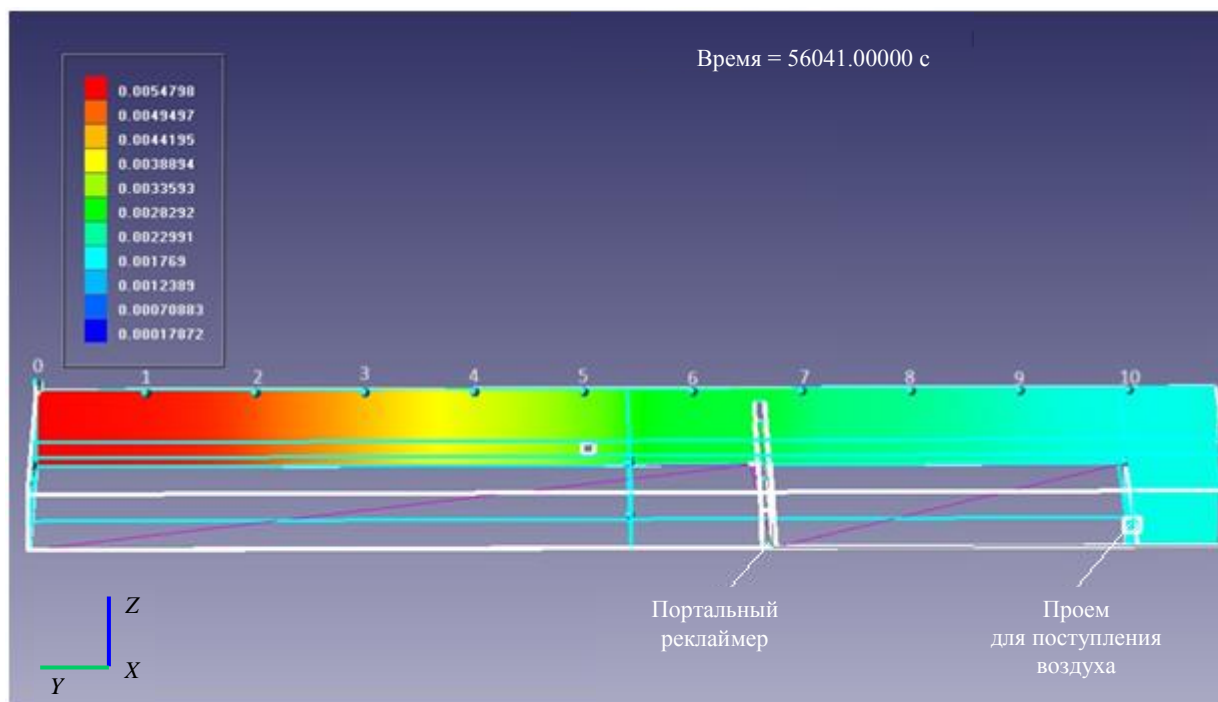


Рис.6. Массовые доли метана и расположение точек замера

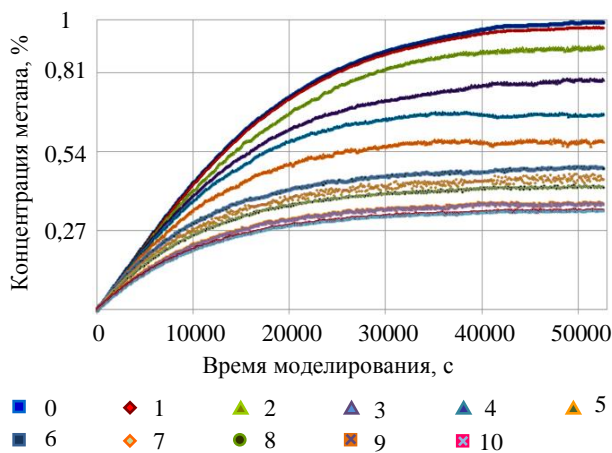


Рис. 7. Зависимость изменения концентрации метана от времени в различных точках (0-10) пространства закрытого склада

временном хранении сырья ввиду ограниченности объема, заполняемого газом (шахта, вагон, складское помещение). В этой связи проблемы обеспечения безопасной эксплуатации закрытых складов будут связаны с выделяющимся газом метаном.

С целью предотвращения взрывоопасных ситуаций необходимо иметь информацию о величинах остаточной метаноносности угольной массы на каждом этапе:

- после добычи угля, его извлечения на поверхность и временного складирования перед погрузкой в вагоны;
- в период транспортировки перед размещением угля в закрытых складах;
- при непосредственном хранении угольного сырья.

Несмотря на то, что остаточная газоносность угольной массы после каждой стадии перегрузки и транспортировки снижается, ее величина может достигать значений, при которых эксплуатация закрытого угольного склада становится небезопасной в связи с возможностью превышения концентрации метана в воздухе предельно допустимого значения, принимаемого равным 1 % по объему.

Безопасность эксплуатации закрытого угольного склада по метановому фактору будет зависеть не только от величины остаточной метаноносности, но также и от температуры окружающей среды, которая напрямую влияет на скорость выхода метана из угольных отдельностей – чем выше температура, тем интенсивнее протекает процесс метановыделения.

Снижение метаноносности в летний период (средняя температура среды +20 °С) оказывается выше, чем ее уменьшение зимой (средняя температура среды –20 °С), почти в два раза. Таким образом, накопление концентрации метана в объеме закрытого склада летом будет происходить быстрее, что требует для этого периода более интенсивной вентиляции.

Результаты аналитических расчетов требуемого расхода воздуха не учитывают сложную аэродинамику потока воздуха в отличие от математического моделирования. Удовлетворительное совпадение полученных данных подтверждает правомерность использованных при разработке математической модели допущений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Корнев А.В., Спицын А.А., Займенцева Л.А., Зубко М.В. Исследование физико-химических свойств гидрогеля как средства пылевзрывозащиты и снижения запыленности в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 180-198. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_180
2. Overland I., Loginova J. The Russian coal industry in an uncertain world: Finally pivoting to Asia? // Energy Research & Social Science. 2023. Vol. 102. № 103150. DOI: 10.1016/j.erss.2023.103150
3. Коришонов Г.И., Сафина А.М., Каримов А.М. Исследование и анализ источников выделения респираторной фракции пыли на угольных разрезах // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 10. С. 65-70. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-10-65-70
4. Новак А. ТЭК России сегодня и завтра: итоги и задачи // Энергетическая политика. 2024. № 1 (192). С. 6-13. DOI: 10.46920/2409-5516\_2024\_1192\_6



5. Magomet R.D., Rodionov V.A., Soloviov V.B. Methodological Approach to Issue of Researching Dust-Explosion Protection of Mine Workings of Coal Mines // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10. Iss. 2. P. 1154-1161.
6. Руш Е.А., Власова Н.В. Перспективные мероприятия, направленные на экологическую защиту при работе с углем на производственных участках терминально-складского комплекса // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2 (78). С. 20-32. DOI: [10.26731/1813-9108.2023.2\(78\).20-32](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.2(78).20-32)
7. Головина Е.И., Гребнева А.В. Управление ресурсами подземных вод на трансграничных территориях (на примере Российской Федерации и Эстонской Республики) // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 788-800. DOI: [10.31897/PMI.2021.6.2](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.2)
8. May Chan Myae Zaw, Alpatova P.N. Ambiguity in the Russian terminology of the energy industry // XLinguae. 2023. Vol. 16. Iss. 1. P. 60-69. DOI: [10.18355/XL.2023.16.01.05](https://doi.org/10.18355/XL.2023.16.01.05)
9. Мазуренко О.И., Русинов И.А. Анализ современного состояния и перспектив развития морских угольных терминалов портов России // Транспортное дело России. 2020. № 4. С. 154-159.
10. Коршунов Г.И., Каримов А.М., Магомедов Г.С., Тюлькин С.А. Снижение аэротехногенного воздействия респираторной фракции пыли на персонал карьера при проведении массовых взрывов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 7. С. 132-144. DOI: [10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_7\\_0\\_132](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_132)
11. Смирняков В.В., Родионов В.А., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 71-81. DOI: [10.31897/PMI.2022.12](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12)
12. Васина Д., Рапопорт И., Тесленко И. Решение экологических проблем открытых угольных терминалов Владивостока // International Journal of Professional Science. 2021. № 6. С. 27-36.
13. Khokhlov S., Abiev Z., Makkoev V. The Choice of Optical Flame Detectors for Automatic Explosion Containment Systems Based on the Results of Explosion Radiation Analysis of Methane- and Dust-Air Mixtures // Applied Science. 2022. Vol. 12. Iss. 3. № 1515. DOI: [10.3390/app12031515](https://doi.org/10.3390/app12031515)
14. Кривопишина М.Е., Костенко Н.И. Рациональное оснащение терминала морского порта для экспортного угля // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2021. Т. 1. С. 86-90.
15. Qing-Wei Li, Yang Xiao, Cai-Ping Wang et al. Thermokinetic characteristics of coal spontaneous combustion based on thermogravimetric analysis // Fuel. 2019. Vol. 250. P. 235-244. DOI: [10.1016/j.fuel.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.003)
16. Afanasev P.I., Makhmudov K.F. Assessment of the Parameters of a Shock Wave on the Wall of an Explosion Cavity with the Refraction of a Detonation Wave of Emulsion Explosives // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 9. № 3976. DOI: [10.3390/app11093976](https://doi.org/10.3390/app11093976)
17. Jinling Guo, Junlian Gao, Kejia Yan, Bo Zhang. Unintended mitigation benefits of China's coal de-capacity policies on methane emissions // Energy Policy. 2023. Vol. 181. № 113718. DOI: [10.1016/j.enpol.2023.113718](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113718)
18. Гридина Е.Б., Ковишов С.В., Антоненко Т.И., Мирошниченко А.К. Разработка пожарно-технических мероприятий по профилактике и ликвидации очагов самовозгораний бурого угля // Науковий Вісник Національного Гірничого університету. 2021. № 6. С. 96-101 (in English). DOI: [10.33271/NVNGU/2020-6/096](https://doi.org/10.33271/NVNGU/2020-6/096)
19. Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Можжанов Д.Б. Изменение газоносности углей при транспортировке до места временного хранения // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2024. Т. 8. № 2. С. 188-198 (in English). DOI: [10.33408/2519-237X.2024.8-2.188](https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-2.188)
20. Vasilenko T., Kirillov A., Islamov A. et al. Permeability of a coal seam with respect to fractal features of pore space of fossil coals // Fuel. 2022. Vol. 329. № 125113. DOI: [10.1016/j.fuel.2022.125113](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125113)
21. Ли Х.У., Мащенко И.Д., Белавенцев Л.П., Шлапаков П.А. О петрографическом методе определения сорбционной способности углей // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2012. № 1. С. 31-44.
22. Smirnyakov V.V., Smirnyakova V.V., Pekarchuk D.S., Orlov F.A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10. Iss. 2. P. 1917-1929.
23. Kongar-Syuryun C., Klyuev R., Golik V. et al. Principles of Sustainable Development of Georesources as a Way to Reduce Urban Vulnerability // Urban Science. 2024. Vol. 8. Iss. 2. № 44. DOI: [10.3390/urbansci8020044](https://doi.org/10.3390/urbansci8020044)
24. Dwivedi K.K., Chatterjee P.K., Karmakar M.K., Pramanick A.K. Pyrolysis characteristics and kinetics of Indian low rank coal using thermogravimetric analysis // International Journal of Coal Science & Technology. 2019. Vol. 6. Iss. 1. P. 102-112. DOI: [10.1007/s40789-019-0236-7](https://doi.org/10.1007/s40789-019-0236-7)
25. Литвинова Т.Е., Царева А.А., Полторацкая М.Е., Рудко В.А. Механизм и термодинамика процесса сорбции этилового спирта на активированном нефтяном коксе // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 625-636.
26. Alpatova P.N., May Chan Myae Zaw The exponential semantic reflection of Russian energy industry terms in scientific articles // Research Journal in Advanced Humanities. 2024. Vol. 5. Iss. 2. P. 29-40. DOI: [10.58256/d498dh32](https://doi.org/10.58256/d498dh32)
27. Мустафин М.Г. Моделирование геомеханического состояния массива горных пород при добыче метана из угольных пластов // Записки Горного института. 2015. Т. 216. С. 57-61.
28. Сикарев С.Н., Адамов Е.И., Смирнов С.Г. и др. Математическая модель поведения воздушных потоков на территории открытых угольных складов // Научные проблемы водного транспорта. 2020. № 62. С. 20-26. DOI: [10.37890/jwt.vi62.37](https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.37)
29. Гончаров Е.В., Цирель С.В. Геодинамические методы оценки распределения метана в каменноугольных месторождениях и мероприятия по интенсификации метанопритоков при скважинных методах дегазации // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 803-808. DOI: [10.18454/PMI.2016.6.803](https://doi.org/10.18454/PMI.2016.6.803)
30. Safiullin R., Arias Z.P. Comprehensive Assessment of the Effectiveness of Passenger Transportation Processes using Intelligent Technologies // Open Transportation Journal. 2024. Vol. 18. № E26671212320514. DOI: [10.2174/0126671212320514240611100437](https://doi.org/10.2174/0126671212320514240611100437)
31. Гендлер С.Г., Василенко Т.А., Степанцова А.Ю. Экспериментальные исследования параметров массопереноса в каменных углях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 135-148. DOI: [10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_135](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_135)



32. Смирнов В.Г., Манаков А.Ю., Дырдин В.В. Энергия активации процесса разложения и образования гидратов метана в порах природного угля // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 3 (103). С. 24-28.
33. Гайдаров Б.А. Обзор основных характеристик экспериментальных методов измерения коэффициента диффузии метана угольных пластов // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2022. № 4 (91). С. 24-31. DOI: [10.33580/2541-9684-2022-91-4-24-31](#)
34. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей газов и их композиций. М.: Мир, 1968. 459 с.
35. Стариков Г.П., Юрченко В.М., Мельник Т.Н. и др. Активация диффузии метана в угле под воздействием изменяющихся механических и термодинамических параметров пласта // Физика и техника высоких давлений. 2019. № 3. С. 122-130.
36. Naoran Song, Baiquan Lin, Zheng Zhong, Ting Liu. Experimental study on methane diffusion kinetics in three typical metamorphic coals // Fuel. 2022. Vol. 311. № 122601. DOI: [10.1016/j.fuel.2021.122601](#)
37. Шапошник В.А. Энергии активации ионообменных процессов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22. № 5. С. 622-629. DOI: [10.17308/sorpchrom.2022.22/10683](#)

**Авторы:** Семен Григорьевич Гендлер, *д-р техн. наук, заведующий кафедрой*, <https://orcid.org/0000-0002-7721-7246> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Анастасия Юрьевна Степанцова, *аспирант*, [s215060@stud.spmi.ru](mailto:s215060@stud.spmi.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5027-4742> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Михаил Михайлович Попов, *канд. техн. наук, доцент*, <https://orcid.org/0000-0002-6857-7215> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Определение потенциала удароопасности горных пород Норильского промышленного района

А.П.Господариков<sup>1</sup>, М.А.Зацепин<sup>1</sup>✉, А.П.Киркин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия

**Как цитировать эту статью:** Господариков А.П., Зацепин М.А., Киркин А.П. Определение потенциала удароопасности горных пород Норильского промышленного района // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16498. С. 83-90. [EDN UOHOQP](#)

### Аннотация

Увеличение глубины разработки месторождений полезных ископаемых приводит к ухудшению горно-геологических условий. Значительный рост уровня напряжений в массиве горных пород способствует возможному проявлению горного давления в динамической форме. Возникающая при этом задача оценки удароопасности горных пород тесно связана с задачей получения более точных результатов испытаний образцов на сжатие в жестких или сервогидравлических испытательных прессах с использованием графиков их полного деформирования. Такой подход требует специального дорогостоящего оборудования, значительных временных ресурсов и достаточного количества кернового материала. Поэтому важен подход, позволяющий оценить склонность горных пород к хрупкому разрушению достаточно простыми методами исследований, не приводящими к потере качества и достоверности полученных результатов. Представлены результаты лабораторных испытаний горных пород Норильского промышленного района по определению пределов прочности на растяжение и сжатие. В качестве методик испытаний применялись как отечественные, так и зарубежные стандарты определения значения коэффициента хрупкости. Потенциал удароопасности горных пород определялся по критерию Кайзера. Установлено, что испытанные литологические типы (богатые сульфидные руды, роговики, вкрапленные руды и породные габбро-долериты), кроме ангидритов, обладают низким потенциалом удароопасности.

### Ключевые слова

потенциал удароопасности; горный удар; горные породы; критерий Кайзера; коэффициент хрупкости; одноосное сжатие и растяжение; сервогидравлический испытательный пресс

Поступила: 17.05.2024 Принята: 28.01.2025 Онлайн: 27.03.2025 Опубликовано: 25.04.2025

### Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых на больших глубинах, как правило, приводит к осложнению геомеханической обстановки [1-3] в виде повышенного горного давления, а также увеличения риска проявления его в динамической форме [4-6]. Например, в настоящее время глубина разработки рудников Талнаха на некоторых участках достигает более 1000 м при известной критической глубине удароопасности 700 м [7-9]. При таких больших глубинах, а следовательно, и высоких значениях напряжений, для массива горных пород характерно разрушение его краевой части, проявляющееся потенциально в хрупкой форме с высвобождением упругой энергии, т.е. в виде горного удара [10-12].

Согласно разработанным методическим рекомендациям, необходимо выявлять участки массива горных пород, где возможность возникновения горных ударов наиболее вероятна, т.е. производить оценку склонности горных пород к хрупкому разрушению [13-15]. Одним из наиболее точных способов оценки склонности горных пород к хрупкому разрушению является отношение модуля упругости  $E$  к модулю спада  $M$  материала. При соотношении  $(E/M) > 1$  исследуемый образец принимается неудароопасным, а в случае  $(E/M) \leq 1$  – удароопасным. Подобная оценка тесно связана с необходимостью испытания образцов на сжатие с получением графиков полного



деформирования. Такой подход можно реализовать либо на жестких, либо на сервогидравлических испытательных прессах с учетом роста скорости поперечных деформаций [16-18]. Для проведения подобных испытаний требуется специализированное оборудование, широкий временной диапазон как на сами испытания, так и на логистику и качественный керновый материал в достаточном количестве.

Достаточно упрощенным методом оценки склонности пород к хрупкому разрушению является метод Я.А.Бича [19, 20], заключающийся в сравнении значений упругих и полных деформаций. В этом случае коэффициент удароопасности определяется по формуле

$$k_y = \frac{\varepsilon_{\text{упр}}}{\varepsilon_{\text{полн}}},$$

где  $\varepsilon_{\text{упр}}$  – деформации в зоне упругости;  $\varepsilon_{\text{полн}}$  – полные деформации (до разрушения).

Горная порода считается удароопасной при значениях  $k_y > 0,7$ . Согласно методическим рекомендациям\*, допускается при определении корреляции между величиной  $E/M$  и коэффициентом удароопасности  $k_y$  проводить число испытаний для шестого и последующих образцов при допредельных нагрузках [21, 22].

В связи с большим объемом испытаний достаточно перспективной выглядит возможность применения известного критерия Кайзера [23], заключающегося в определении величины потенциала удароопасности горных пород [24]. При применении данного критерия необходимыми являются лишь результаты определения пределов прочности пород на сжатие и растяжение. Таким образом, в этом случае склонность горных пород к хрупкому разрушению определяется достаточно простым способом, что позволяет оперативно получить оценку удароопасности исследуемых горных пород [25-27].

### Методика исследований

В рамках исследования горных ударов на рудниках Канады выявлено, что удароопасность горных пород достаточно точно можно оценить по показателю потенциала удароопасности горных пород [23]. Такой показатель учитывает такие параметры, как предел прочности на одноосное сжатие UCS и отношение предела прочности пород на сжатие к пределу прочности на растяжение UCS/UTS, определяемое как коэффициент хрупкости [28].

Известно, что предел прочности пород на сжатие характеризуется энергией, накопленной в породном массиве к моменту его разрушения, большему пределу прочности пород соответствуют большие величины потенциальной энергии упругих деформаций и кинетической энергии, приводящие к динамическим разрушениям массива в виде выброса горной массы и разлету отдельных кусков. Еще одним важным показателем склонности горных пород к скалыванию в результате отрыва тонких пластин является коэффициент хрупкости, определяемый как отношение предела прочности при сжатии к пределу прочности при растяжении исследуемых образцов горной породы (кернового материала) [29].

В рамках определения удароопасности месторождений, расположенных на территории РФ, данный подход был успешно применен для руд и пород месторождений Хибинского массива и Новоширокинского месторождения полиметаллических руд, расположенного в Забайкальском крае [30-32].

При ведении подземных горных работ на больших глубинах в породах, обладающих потенциалом удароопасности, возможны горные удары, а в случае его отсутствия вероятность проявления горного давления в динамической форме близка к нулю [27, 28].

Отметим, что после получения результатов испытаний определения пределов прочности горных пород на сжатие и растяжение возможно за счет увеличения масштаба выполненных работ получение более достоверных и статистически значимых результатов исследования. Для этой цели были использованы результаты лабораторных испытаний, выполненных с 2018 по 2023 гг., определения физико-механических свойств рудного и породного массивов двух месторождений Норильского промышленного района.

\*Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам. Утверждены Приказом № 216 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.05.2013.



Для оценки потенциала удароопасности рассмотрены некоторые типы руд и горных пород Норильского промышленного района (табл. 1). Выбор руд и пород обусловлен тем, что первые четыре литологических типа согласно федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности (ФНИП) для рудников Талнаха отнесены к породам, склонным к хрупкому разрушению. Отметим, что на месторождениях Талнаха ангидриты к удароопасным породам не относят [33, 34].

Для оценки потенциала удароопасности пород и руд использовались данные, полученные в результате испытаний на одноосное сжатие и растяжение. Проводилось сопоставление результатов по ГОСТ и ASTM (ISRM). Пробоподготовка и испытания выполнялись в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии» и ГОСТ 21153.3-85 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении». Определение пределов прочности регламентировано стандартами ASTM D7012-14. Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures и ISRM Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials [35, 36].

В рамках проводимых испытаний по методикам, регламентированным ГОСТ, образцы на сжатие имели отношение высоты к диаметру 2:1, а для растяжения – 1:1. Для испытаний по зарубежным стандартам отношение высоты к диаметру образцов на сжатие составляло 2:1 и 2,5:1, а образцов на растяжение – 0,5:1. Для первой пробы производилась серия испытаний, включавшая по шесть образцов на сжатие, шесть образцов на растяжение по ГОСТ, четыре образца на растяжение по ASTM. Полученные результаты испытаний усреднялись.

### Результаты лабораторных испытаний

В результате экспериментальных исследований были определены прочностные свойства пяти литологических типов руд и пород Норильского промышленного района. Полученные результаты, связанные с определением потенциала удароопасности пород и руд, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Распределение уровня потенциала удароопасности пород и руд Норильского промышленного района

Показатель	Богатые руды		Роговики		Вкрапленные руды		Породные габбро-долериты		Ангидриты	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Всего проб	51		96		140		144		47	29
Неудароопасные, %	80,4	68,6	54,2	76,0	60,0	70,0	57,6	61,8	0,0	0,0
Низкий потенциал, %	15,7	27,5	40,6	23,0	33,6	27,1	36,1	34,0	0,0	0,0
Средний потенциал, %	3,9	3,9	5,2	1,0	6,4	2,9	5,6	4,2	0,0	0,0
Высокий потенциал, %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0
Очень высокий потенциал, %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0

Примечание. Методика I – ГОСТ, методика II – ASTM.

Графическое распределение проб приведено на рис. 1.

Согласно полученным результатам, пробы всех литологических типов, за исключением ангидритов, обладают низким уровнем потенциала удароопасности [37, 38]. При этом соотношение неудароопасных проб составило от 54 до 80 % в зависимости от типа литологии и методики проведения испытаний. Эти процентные соотношения вполне достаточны для отнесения данных литологических типов к удароопасным, так как согласно методическим рекомендациям минимальное количество удароопасных пород должно составлять не менее 10 %. Наилучшее совпадение результатов для различных методик наблюдается при испытании породных габбро-долеритов. Так, в случае богатых руд количество проб, обладающих потенциалом удароопасности, было больше на 12 % при испытаниях по зарубежным методикам, чем по отечественным. Для вкрапленных руд и роговиков наибольший процент удароопасных проб был получен при испытаниях по отечественным методикам. Однако, несмотря на некоторые расхождения в полученных пропорциях, значительных различий не наблюдалось [39, 40].

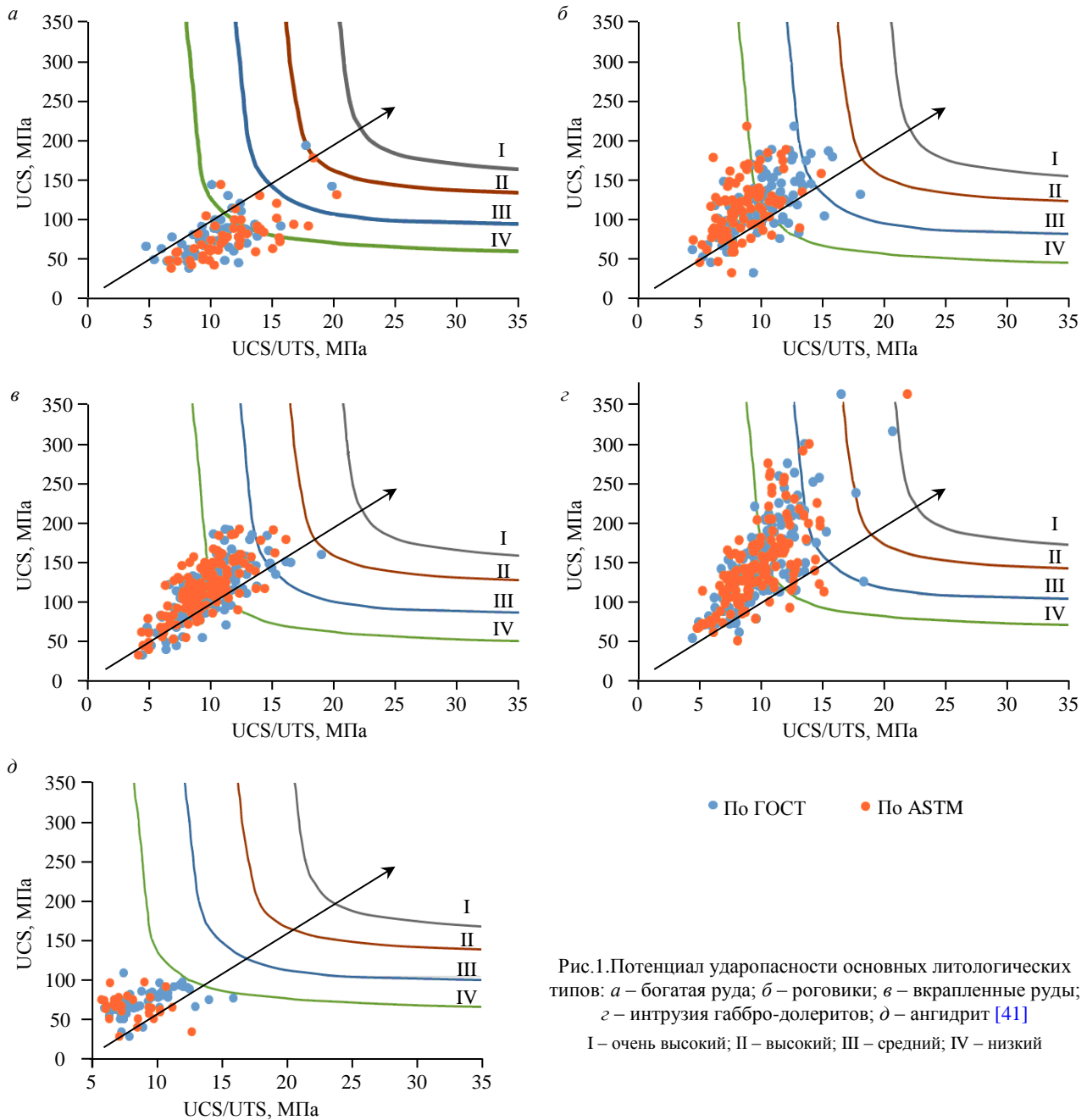


Рис.1. Потенциал удароопасности основных литологических типов: а – богатая руда; б – роговики; в – вкрапленные руды; г – интрузия габбро-долеритов; д – ангидрит [41]  
 I – очень высокий; II – высокий; III – средний; IV – низкий

Как и предполагалось, ангидриты неудароопасные и, согласно полученным результатам, не обладают потенциалом удароопасности.

Удароопасность роговиков и габбро-долеритов обуславливается преимущественно их высокой прочностью на сжатие, которая может достигать 300 МПа в образце, тогда как для богатых руд характерно более высокое значение коэффициента хрупкости (табл.2), чем для других пород, что говорит о склонности таких пород к скалыванию тонкими пластинами в результате их отрыва (отжима).

Таблица 2

Среднее значение коэффициента хрупкости исследуемых литологических типов

Методика	Богатая руда	Роговики	Вкрапленные руды	Породные габбро-долериты
ГОСТ	10,57/13,73*	9,85/11,98	9,63/11,93	9,29/11,59
ASTM	11,73/14,81	8,49/10,93	8,95/11,53	9,10/11,63

\* Все пробы/удароопасные пробы.



Рис.2. Примеры отслоения руды в приконтурном массиве под действием высокого уровня напряжений

Такая характерная особенность (высокое значение коэффициента хрупкости) проявляется в богатых рудах и в массиве горных пород. Так, при разработке месторождений полезных ископаемых на глубоких горизонтах приконтурная часть рудного массива отжимается, образуя характерные отслоения (рис.2), а для других геологических разностей обычно такого эффекта не возникает [42].

Средний коэффициент хрупкости ангидритов в табл.2 не представлен, он составил 8,75, предел прочности на сжатие не превысил 105 МПа.

Такой же вывод о меньшем коэффициенте хрупкости у наиболее прочных пород был сделан в работе [30] при исследовании потенциала удароопасности горных пород на апатит-нефелиновых месторождениях. Наглядно это представлено на рис.3, где отражено распределение литологических типов на диаграмме по средним значениям коэффициентов хрупкости и пределов прочности на сжатие (в данной выборке не учитывались пробы без потенциала удароопасности).

Таким образом, согласно полученным результатам исследований горных пород, можно определить, что, несмотря на разный характер возможного проявления удароопасности, всем рассмотренным породам, за исключением ангидритов, присвоен низкий уровень удароопасности.

Выполненные лабораторные исследования по оценке удароопасности богатых руд Норильского промышленного района с помощью испытаний образцов на сжатие в режиме контроля роста скорости поперечных деформаций [19] показали, что они являются удароопасными. Это подтверждает возможность применения критерия Кайзера для оценки потенциала удароопасности в рассмотренных условиях.

### Заключение

- В результате испытаний по отечественным и зарубежным методикам определены прочностные свойства различных пород и руд Норильского промышленного района и рассчитаны значения их коэффициентов хрупкости.

- При помощи критерия Кайзера установлено, что количество неудароопасных проб варьировалось от 54 до 80 % в зависимости от типа литологии и методики испытаний, что подтверждает склонность к динамическому разрушению

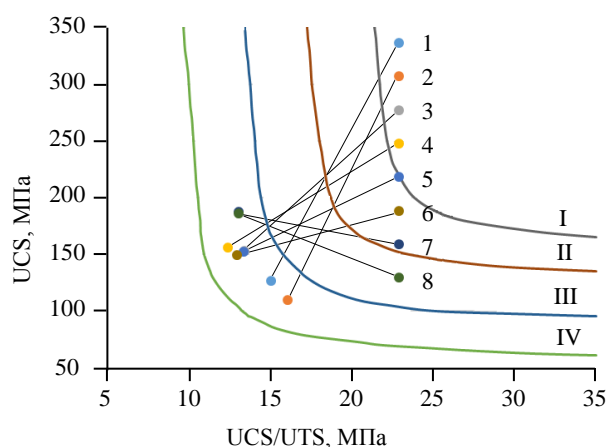


Рис.3. Усредненные показатели удароопасности исследуемых литологических типов: богатая руда (1 – ГОСТ, 2 – ASTM); роговики (3 – ГОСТ, 4 – ASTM); вкрапленные руды (5 – ГОСТ, 6 – ASTM); породные габбро-долериты (7 – ГОСТ, 8 – ASTM)

I-IV – см. рис.1



пород Норильского промышленного района. Наибольший процент удароопасных проб, полученный при испытании роговиков, согласно отечественным методикам составил практически половину от испытанных проб. Наилучшее совпадение между используемыми методиками наблюдалось при испытании породных габбро-долеритов. Полученные результаты исследований отразили достаточно качественную сходимости между отечественными и зарубежными методиками.

- Отмечено, что богатые руды обладают наименьшей прочностью на сжатие, чем остальные удароопасные типы пород, но при этом имеют наибольший коэффициент хрупкости, что говорит о склонности их к скалыванию в виде тонких пластин. Последний факт подтверждается и результатами натурных исследований в горных выработках, где при наличии уровня высоких напряжений происходит отжим рудных пластин от приконтурной части массива горных пород.

- Определено, что исследованные литологические типы, за исключением ангидритов, обладают низким потенциалом удароопасности. Потенциал удароопасности ангидритов отсутствует, т.е. они не являются удароопасными.

- Для оценки удароопасности богатых руд Норильского промышленного района по критерию Кайзера было проведено широкое сравнение с результатами испытаний образцов на сжатие в режиме контроля роста скорости поперечных деформаций. Сравнение подтвердило, что богатая руда является удароопасной.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А. и др. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 61-70. DOI: [10.31897/PMI.2022.2](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.2)
2. Hongpu Kang, Pengfei Jiang, Yongzheng Wu, Fuqiang Gao. A combined «ground support-rock modification-distressing» strategy for 1000-m deep roadways in extreme squeezing ground condition // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 142. № 104746. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2021.104746](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104746)
3. Jian Zhou, Chao Chen, Kun Du et al. A new hybrid model of information entropy and unascertained measurement with different membership functions for evaluating distressability in burst-prone underground mines // Engineering with Computers. 2022. Vol. 38. Iss. 1 Suppl. P. 381-399. DOI: [10.1007/s00366-020-01151-3](https://doi.org/10.1007/s00366-020-01151-3)
4. Konicek P., Schreiber. Rockburst prevention via distress blasting of competent roof rocks in hard coal longwall mining // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. № 3. P. 235-242. DOI: [10.17159/2411-9717/2018/v118n3a6](https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n3a6)
5. Тюпин В.Н. Оценка критической глубины месторождений по условию удароопасности // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 167-171. DOI: [10.31897/PMI.2019.2.167](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.2.167)
6. Сидоров Д.В., Потапчук М.И., Сидляр А.В., Курсакин Г.А. Оценка удароопасности при освоении глубоких горизонтов Николаевского месторождения // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 392-398. DOI: [10.31897/PMI.2019.4.392](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.392)
7. Плешко М.С., Давыдов А.А., Сильченко Ю.А., Каледин О.С. Эффективные решения по креплению сверхглубокого ствола СКС-1 рудника «Скалистый» в сложных геомеханических условиях // Горный журнал. 2020. № 6. С. 57-62. DOI: [10.17580/gzh.2020.06.08](https://doi.org/10.17580/gzh.2020.06.08)
8. Сергушин М.П., Алборов А.Э., Андреев А.А., Буслова М.А. Оценка напряжений впереди фронта очистных работ при увеличении ширины зоны разгрузки в условиях Октябрьского и Талнахского месторождений // Горный журнал. 2020. № 6. С. 38-41. DOI: [10.17580/gzh.2020.06.06](https://doi.org/10.17580/gzh.2020.06.06)
9. Баландин В.В., Леонов В.Л., Куранов А.Д., Багаутдинов И.И. Опыт применения обобщенного критерия Хука – Брауна к определению типов и параметров крепей в условиях Октябрьского месторождения медно-никелевых руд // Горный журнал. 2019. № 11. С. 14-18. DOI: [10.17580/gzh.2019.11.01](https://doi.org/10.17580/gzh.2019.11.01)
10. Закалинский В.М., Мингазов Р.Я., Шитовский И.Е. Влияние горно-технологических факторов на буровзрывные работы при разработке месторождений на большой глубине // Проблемы недропользования. 2022. № 2 (33). С. 46-54. DOI: [10.25635/2313-1586.2022.02.046](https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.02.046)
11. Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Кузнецов В.В., Бабенко Т.А. Исследование процессов селективной дезинтеграции медно-никелевых руд Заполярного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12. С. 73-87. DOI: [10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_12\\_0\\_73](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_12_0_73)
12. Александрова Т.Н., Чантурия А.В., Кузнецов В.В. Минералого-технологические особенности и закономерности селективного разрушения железистых кварцитов Михайловского месторождения // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 517-526. DOI: [10.31897/PMI.2022.58](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.58)
13. Першин Г.Д., Пиеничная Е.Г., Мажитов А.М. Энергетические критерии квазихрупкого разрушения горных пород в технологических процессах их добычи и первичной переработки // Горная промышленность. 2022. № 2. С. 84-89. DOI: [10.30686/1609-9192-2022-2-84-89](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-84-89)
14. Корчак П.А., Карасев М.А. Геомеханическое обоснование формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок рудников АО «Апатит» // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 1 (55). С. 67-80. DOI: [10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80](https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80)



15. Соннов М.А., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Шпилев С.В. Применение численного и блочного геомеханического моделирования для определения параметров крепления камерных выработок большого сечения // Горная промышленность. 2021. № 2. С. 127-131. DOI: [10.30686/1609-9192-2021-2-127-131](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-2-127-131)
16. Ulusay R., Hudson J.A. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. International Society for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods, 2007. 628 p.
17. 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.
18. Морозов К.В., Демёхин Д.Н., Бахтин Е.В. Многокомпонентные датчики деформаций для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 80-97. DOI: [10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_62\\_0\\_80](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_80)
19. Господариков А.П., Трофимов А.В., Киркин А.П. Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 539-548. DOI: [10.31897/PMI.2022.87](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.87)
20. Бич Я.А., Мельков А.Д., Дьяконов Ю.Я. Предотвращение горных ударов при разработке антрацитовых пластов. М.: Недра, 1993. 159 с.
21. Subrahmanyam D.S. Evaluation of Hydraulic Fracturing and Overcoring Methods to Determine and Compare the In Situ Stress Parameters in Porous Rock Mass // Geotechnical and Geological Engineering. 2019. Vol. 37. Iss. 6. P. 4777-4787. DOI: [10.1007/s10706-019-00937-7](https://doi.org/10.1007/s10706-019-00937-7)
22. Krietsch H., Gischig V., Evans K. et al. Stress Measurements for an In Situ Stimulation Experiment in Crystalline Rock: Integration of Induced Seismicity, Stress Relief and Hydraulic Methods // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019. Vol. 52. Iss. 2. P. 517-542. DOI: [10.1007/s00603-018-1597-8](https://doi.org/10.1007/s00603-018-1597-8)
23. Ming Cai, Kaiser P.K. Rockburst Support. Reference Book. In 2 volumes. Vol. 1: Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. Sudbury: Laurentian University, 2018. 284 p.
24. Айнбиндер И.И., Овчаренко О.В. Исследования потенциальной удароопасности массива горных пород на проектируемых глубинах отработки месторождения «Валунистое» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6. С. 35-45. DOI: [10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_6\\_0\\_35](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_35)
25. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A. et al. Selective Disintegration Justification Based on the Mineralogical and Technological Features of the Polymetallic Ores // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 8. № 851. DOI: [10.3390/min11080851](https://doi.org/10.3390/min11080851)
26. Winn K. Multi-approach Geological Strength Index (GSI) Determination for Stratified Sedimentary Rock Masses in Singapore // Geotechnical and Geological Engineering. 2020. Vol. 38. Iss. 2. P. 2351-2358. DOI: [10.1007/s10706-019-01149-9](https://doi.org/10.1007/s10706-019-01149-9)
27. Самсонов А.А. Оценка состояния массива горных пород удароопасного месторождения «Олений ручей» по результатам измерений напряжений // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 1(11). С. 62-67. DOI: [10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.1.62-67](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.1.62-67)
28. Závacký M., Štefaňák J. Strains of rock during uniaxial compression test // The Civil Engineering Journal. 2019. Vol. 28. № 3. P. 398-403. DOI: [10.14311/CEJ.2019.03.0032](https://doi.org/10.14311/CEJ.2019.03.0032)
29. Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А. Геомеханическая модель рудника. Часть 2. Использование // Горный журнал. 2020. № 2. С. 35-44. DOI: [10.17580/gzh.2020.02.04](https://doi.org/10.17580/gzh.2020.02.04)
30. Кузнецов Н.Н., Кондрашов Л.Ю. Оценка потенциала удароопасности горных пород месторождений Хибинского массива по критерию Кайзера // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26. № 2. С. 170-179. DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-2-170-179](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-170-179)
31. Еременко А.А., Шапошник Ю.Н., Филиппов В.Н., Конурич А.И. Развитие научных основ безопасной и эффективной геотехнологии при освоении удароопасных месторождений Западной Сибири и Крайнего Севера // Горный журнал. 2019. № 10. С. 33-39. DOI: [10.17580/gzh.2019.10.03](https://doi.org/10.17580/gzh.2019.10.03)
32. Bertuzzi R. Revisiting rock classification to estimate rock mass properties // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 494-510. DOI: [10.1016/j.jrmge.2018.08.011](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.011)
33. Марысюк В.П., Шиленко С.Ю., Трофимов А.В., Кузьмин С.В. Оценка рисков строительства капитального рудоспуска в сложных горно-геологических условиях на основе комплексных геотехнических исследований // Горный журнал. 2020. № 1. С. 62-66. DOI: [10.17580/gzh.2020.01.12](https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.12)
34. Марысюк В.П., Шиленко С.Ю., Андреев А.А., Шабаров А.Н. Методика расчета межскважинных целиков для формирования защищенных зон в условиях удароопасных месторождений Талнаха // Горный журнал. 2023. № 1. С. 106-112. DOI: [10.17580/gzh.2023.01.18](https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.18)
35. Saadatmand Hashemi A., Katsabanis P. Tunnel face preconditioning using destress blasting in deep underground excavations // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 117. № 104126. DOI: [10.1016/j.tust.2021.104126](https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104126)
36. Козырев А.А., Кузнецов Н.Н., Федотова Ю.В., Шоков А.Н. Определение степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний при одноосном сжатии // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 41-50. DOI: [10.21440/0536-1028-2019-6-41-50](https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-6-41-50)
37. Ковалевский В.Н., Мысин А.В. Особенности функционирования трубчатых эластичных зарядов, применяемых при добыче блочного камня // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 1. С. 20-34. DOI: [10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_1\\_0\\_20](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_20)
38. Зубов В.П., Тхан Ван Зуи, Федоров А.С. Технология подземной разработки мощных пластов угля с низкими прочностными характеристиками // Уголь. 2023. № 5. С. 41-49. DOI: [10.18796/0041-5790-2023-5-41-49](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-41-49)
39. Verbilo P., Karasev M., Belyakov N., Iovlev G. 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)
40. Vennes I., Mitri H., Chinnasane D.R., Yao M. Effect of Stress Anisotropy on the Efficiency of Large-Scale Destress Blasting // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021. Vol. 54. Iss. 1. P. 31-46. DOI: [10.1007/s00603-020-02252-7](https://doi.org/10.1007/s00603-020-02252-7)



41. Киркин А.П. Управление удароопасностью массива сплошных сульфидных руд буровзрывным способом в условиях сложного напряженного состояния: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. 22 с.
42. Маринин М.А., Карасев М.А., Поспехов Г.Б. и др. Инженерно-геологическое обоснование параметров кучного выщелачивания золота из бедных песчано-глинистых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9. С. 22-37 (in English). [DOI: 10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_9\\_0\\_22](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_22)

**Авторы:** Александр Петрович Господариков, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0003-1018-6841> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Михаил Александрович Зацепин, канд. физ.-мат. наук, доцент, [zatsepin\\_ma@pers.spmi.ru](mailto:zatsepin_ma@pers.spmi.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6304-8349> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Александр Павлович Киркин, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4830-8042> (ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия),

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Влияние механической и тепловой обработки на характеристики сапонитсодержащего материала

Т.Н.Орехова<sup>1</sup>, М.Н.Сивальнева<sup>1</sup>✉, М.А.Фролова<sup>2</sup>, В.В.Строкова<sup>1</sup>, Д.О.Бондаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия

<sup>2</sup> Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В.Ломоносова, Архангельск, Россия

**Как цитировать эту статью:** Орехова Т.Н., Сивальнева М.Н., Фролова М.А., Строкова В.В., Бондаренко Д.О. Влияние механической и тепловой обработки на характеристики сапонитсодержащего материала // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16487. С. 91-99. [EDN VZGFOR](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.16487)

### Аннотация

Решение задач современного строительного материаловедения сводится к получению высококачественных материалов, расширению и поиску рациональной сырьевой базы, которые могут быть осуществлены за счет использования различных отходов производств. В настоящей работе рассматривается возможность применения отхода горноперерабатывающей промышленности – сапонитсодержащего материала (ССМ), получаемого при обогащении кимберлитовых руд месторождения алмазов им. М.В.Ломоносова, в качестве активной минеральной добавки для цементных вяжущих и бетонов. Исследовалось влияние механической и температурной обработки на ряд свойств материала, отобранного из хвостохранилища и находящегося в исходном состоянии. Изучение активности поверхности образцов ССМ заключалось в определении сорбционной емкости, кислотно-основных центров и их распределения. Определен рост активности поверхности частиц материала в результате механоактивационного воздействия и ее снижение при температурной обработке. Эти эффекты связаны с фазовыми перестройками и структурными изменениями песчано-глинистой породы, что подтвердилось в ходе проведения термического анализа. Температурное воздействие не имеет выраженного влияния на микроструктуру, отмечается «сглаженность» частиц и формирование консолидированной поверхности структурных элементов сапонитсодержащего материала.

### Ключевые слова

сапонитсодержащий материал; отходы обогащения руд; поверхностная активность; механоактивация; обжиг

### Финансирование

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

Поступила: 08.05.2024

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 12.12.2024

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Строительное материаловедение в современных условиях ориентировано на производство высококачественных материалов при достижении эффективных технико-экономических показателей. Поиск рациональных решений позволяет расширить сырьевую базу, что может быть осуществлено применением вторичных продуктов различных производств и отходов промышленности.

Отходы техногенного происхождения, в частности горнопромышленной отрасли, относятся к важному источнику сырьевых ресурсов промышленности строительных материалов (ПСМ). Около 40 млрд т таких отходов, из них не менее 30 % вскрышных пород и хвостов обогащения, практически все металлургические и топливные шлаки, являются потенциальным сырьем для отрасли ПСМ [1]. Объемы отходов ежегодно увеличиваются, складываются и занимают огромные площади. Горнопромышленные отходы могут обоснованно считаться резервным запасом сырьевой базы Российской Федерации, равноценно соответствовать открытию новых месторождений. Несмотря на огромный ресурсный потенциал как источника сырья и возможность снижения прессинга на экологию, в нашей стране они не нашли должной степени применения, используются нерационально и в малых количествах.



В зарубежных странах уровень вовлечения отходов в хозяйственный оборот гораздо выше и имеет определенный опыт применения. Многие развитые страны ориентируют политику на энерго- и ресурсосбережение, активно реализуя практику утилизации техногенных отходов и разработки новых технологических решений за счет повторного использования в различных производствах. К примеру, лидерами по переработке отходов являются США и Япония, доля отходов в общем сырьевом балансе этих государств составляет около 26 %, у большинства экономически развитых стран этот показатель колеблется в пределах 16-20 %, в СССР он составлял 15 %, в современной России – около 10 % [1, 2]. Вторичное применение ресурсов набирает обороты и в других странах [3-6] (Канада, Великобритания, ЮАР, Испания, Индия и др.)<sup>\*</sup>.

Представителями научной школы САФУ им. М.В.Ломоносова совместно с АО «Севералмаз» и учеными БГТУ им. В.Г.Шухова активно ведутся исследования одного из видов отходов горно-перерабатывающей промышленности – сапонитсодержащего материала (ССМ), который является вторичным продуктом обогащения кимберлитовых руд месторождения алмазов им. М.В.Ломоносова обогатительной фабрики АО «Севералмаз» (Архангельская обл.), на предмет его использования при производстве строительных материалов [7]. Уже разработаны технологии применения ССМ при изготовлении керамической плитки, минераловатных материалов, магнезиальных и композиционных вяжущих [8-11]. В работе предлагается расширение спектра областей применения ССМ в промышленности строительных материалов, как самой крупнотоннажной по потребляемому сырью и производимой продукции, за счет разработки активной минеральной добавки для цементных вяжущих и бетонов.

Специфика состава и свойств ССМ предопределила достаточно широкий спектр областей его использования, помимо ПСМ. Так, данный вторичный продукт применяется как основа бурового раствора [12], как сорбент для очистки промышленных стоков [13], для гидроизоляции при обустройстве полигонов хранения твердых бытовых отходов, радиоактивных могильников и для фильтрации сточных вод, а также в медицине и курортном деле [14]. Особое место сапонит занимает в сельском хозяйстве в качестве минеральной добавки к кормам и удобрениям, наполнителя и гранулянта, используется для детоксикации грунтов, сорбции гербицидов и пестицидов, вносимых в почву, тяжелых металлов и др. [14].

Сапонитсодержащий материал представляет собой песчано-глинистую породу в обводненном состоянии (с влажностью не менее 60 %) и имеет:

- минералогический состав – основной компонент сапонит (60-70 %), оставшаяся масса породы – кварц, монтмориллонит, палыгорскит, флогопит, клинохлор, тальк, доломит;
- химический состав – основные оксиды  $\text{SiO}_2$  (53 %),  $\text{MgO}$  (17 %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (10 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (9 %),  $\text{CaO}$  (4 %) [8].

Процесс обогащения глинизированной породы требует большого расхода воды. Нахождение сырья в суспендированном состоянии затрудняет его дальнейшее применение в строительной отрасли, сложности при выделении твердой фракции не позволяют использовать воду в качестве оборотной из-за низкой степени очистки [12, 13, 15-17]. В связи с этим требуется подбор способа и параметров обработки исходного сырья, позволяющих рационально и эффективно применять ССМ в промышленности строительных материалов.

Известно, что механоактивация оказывает влияние не только на характеристики дисперсности исходного сырья, но и на свойства его поверхности [18-21], повышая активность для последующего взаимодействия компонентов материала [22, 23].

Ввиду принадлежности ССМ к глинистым минералам следует рассматривать влияние температурной обработки. Использование обожженных глин как минеральных добавок в цементных системах имеет достаточно большую историю [24-27]. Данный компонент характеризуется повышенной активностью, которая обусловлена протеканием процессов, вызванных температурным воздействием и связанных с формированием первичных продуктов дегидратации и разрушением глинистых минералов, что приводит к перестройке кристаллической решетки. Отмечается, что основные глинистые минералы (каолинит, монтмориллонит, иллит, бентонит и др.) переходят в

<sup>\*</sup> Cement Statistics and Information. URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cement-statistics-and-information> (дата обращения 08.05.2024).



активную форму именно при температуре  $200\pm 600$  °С [25, 26, 28, 29]. При обращении к сапонит-содержащему материалу, выделенному из суспензии оборотной воды, установлено, что модификационные превращения прекращаются при температуре 900 °С, воздействие которой приводит к изменению ряда свойств – росту истинной плотности, снижению удельной поверхности, пористости и водопоглощения [8, 30].

Строение сапонита, выступающего основным минералом отхода обогащения кимберлитовых руд, представлено трехслойной структурой с разбухающей кристаллической решеткой, которая позволяет сорбировать влагу. Сапонит имеет достаточно слабые связи между слоями, которые образованы силами Ван-дер-Ваальса. В результате этого процесс измельчения сырья может сопровождаться модификацией полученного порошка. Механическое воздействие способствует трансформации кристаллической решетки материала [22] с последующим переходом в двухслойную структуру серпентина [25]. Сам по себе серпентин также может являться эффективным компонентом строительных материалов [31, 32]. Дальнейшая высокотемпературная обработка приводит к модификации серпентина в форстерит [30]. Таким образом, выстраивается цепочка преобразований минералов в результате механической и тепловой обработки (рис.1). Первоначально механическое измельчение сапонитсодержащего сырья интенсифицирует стадии процесса химических превращений, а увеличение длительности работы помольного агрегата позволяет повысить количественный выход серпентина и, как следствие, форстерита.

Для установления характера влияния технологии выделения ССМ на его свойства необходимо исследовать влияние механического и температурного воздействия на исходную суспензию, отобранную из хвостохранилища, до введения различных флокулянтов и иных веществ.

### Методы

В работе рассмотрена потенциальная возможность применения сапонитсодержащего материала в качестве минеральной добавки для бетонов. Исследовалась суспензия в исходном (т.е. обводненная порода песчано-глинистого состава), а также механоактивированном высушенном и обожженном состояниях.

ССМ был высушен до постоянной массы в сушильном шкафу с терморегулятором при температуре 70 °С. Далее был проведен помол сухим способом до высокодисперсного состояния в лабораторной шаровой мельнице с уралитовыми мелющими телами, чтобы исключить вероятность намола (обычно бывает в металлических мельницах). Удельная поверхность измерялась прибором ПСХ-11М(СП), в котором используется общепринятый в мировой практике метод газопроницаемости Козени – Кармана.

Температурная обработка осуществлялась в муфельной печи при 700 °С, выбор температурного режима согласован с известными данными.

Исследовалась реакционная активность [33-35] сапонитсодержащего сырья на основе:

- сорбционной емкости, определяемой по методу Запорожца путем изменения концентрации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в насыщенном растворе за счет поглощения частицами ССМ извести. Определение количества  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в растворе осуществлялось титрованием раствором соляной кислоты концентрацией 0,05 н. Количество поглощенного гидроксида кальция (1 мг на 1 г исследуемого вещества) из известкового раствора оценивалось разностью начальной и конечной концентраций. При этом измерения проводились через заданные промежутки времени (1; 3; 6; 24 и 30 ч с момента введения навески исследуемого материала в известковый раствор), выбранные согласно требуемой точности измерения и специфике образцов;

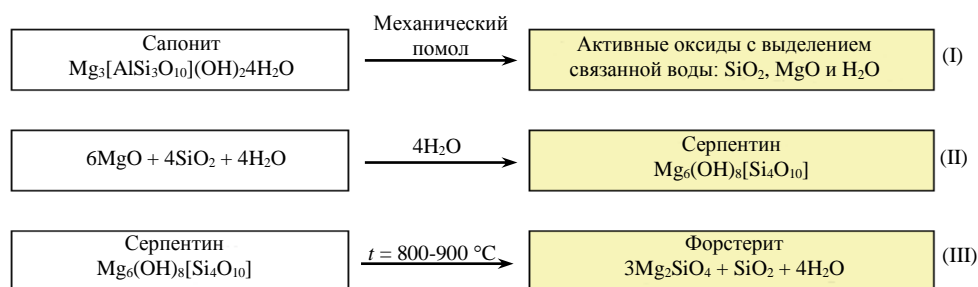


Рис.1. Схемы преобразований минералов [30]



• кислотно-основных свойств, позволяющих оценивать изменение поверхностных характеристик за счет использования индикаторного метода распределения центров адсорбции (РЦА) и теории Бренстеда – Лоури и Льюиса. Суть метода заключается в том, что различные кислотные и основные центры на поверхности твердого тела избирательно адсорбируют молекулы индикаторов. Изучение поверхностных свойств твердого вещества подразумевает определение концентрации активных центров  $q_{pKa}$ , эквивалентной количеству адсорбированного индикатора кислотной силы  $pKa$ . Полученные результаты позволяют регулировать и прогнозировать механизм протекающих физико-химических процессов на поверхности твердого тела.

При определении активности производились три параллельных измерения отобранных проб, погрешность между полученными значениями составляла 2-3 %.

С помощью прибора синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter фирмы NETZSCH, позволяющего сочетать методы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ), был исследован образец исходного ССМ, высушенный до постоянной массы, в температурном диапазоне 25-1200 °С. Метод основан на регистрации разницы тепловых потоков, идущих от испытуемого и эталонного образцов. Тепловой поток измеряется как разница температур в двух точках измерительной системы в определенный момент времени. Измерения потоков теплоты и массы проведены при полностью идентичных условиях.

Микроструктура ССМ изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Mira 3 FesSem (Tescan). Съемка происходила в режиме высокого вакуумного разряжения.

### Обсуждение результатов

Для высушенного исходного ССМ, содержащего глинистый и песчаный компоненты, определена удельная поверхность – 165 м<sup>2</sup>/кг, оптимальная для данного типа оборудования (шаровая мельница). Время помола при этом составило 40 мин. Более длительный помол не является эффективным, поскольку не происходит существенного роста удельной поверхности, но значительно увеличивается энергопотребление.

Для определения сорбционной емкости образцов после механоактивационного воздействия исследована активность и динамика поглощения извести Ca(OH)<sub>2</sub> из раствора навеской материала. С целью детализации результата изучены образцы ССМ на всех этапах помола – после 10, 20, 30 и 40 мин.

На основании полученных результатов можно заключить, что с повышением удельной поверхности растет объем поглощенной из раствора извести (Ca(OH)<sub>2</sub>). Активность для образцов, измельченных в течение 40 мин, составляет 69,2 мг/г, что на 6 % выше, чем для измельченного при 10 мин, и на 39 % выше, чем для ССМ в высушенном состоянии (без помола – 0 мин). Положительная динамика вызвана механоактивационным воздействием, которое является доступным и эффективным способом повышения активности минеральных дисперсных материалов [23, 34].

В связи с явным положительным влиянием механоактивации на величину сорбционной емкости обжигу подвергались образцы контрольного состава (исходный образец, без помола) и измельченного в течение 40 мин после обжига.

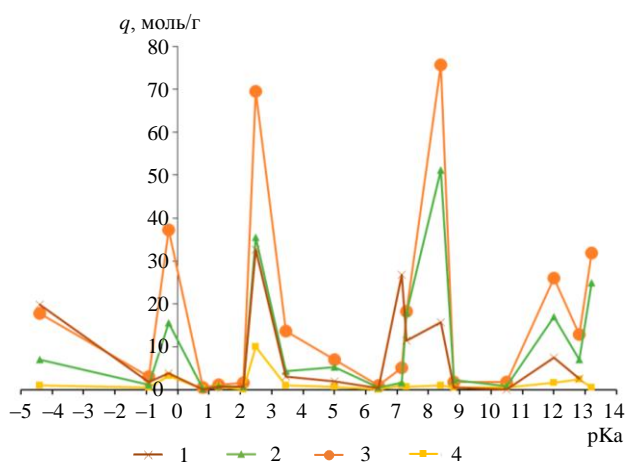


Рис.2. Распределение центров адсорбции на поверхности ССМ после механического и теплового воздействия  
1 – без помола; 2 – помол 10 мин;  
3 – помол 40 мин; 4 – помол 40 мин + обжиг

Температурная обработка способствует снижению активности материала на 5,7 %, по сравнению с материалом после 40 мин помола, что вызвано взаимодействием компонентов при обжиге, протеканием процессов разрушения кристаллической решетки глинистой фракции.

Для анализа кислотно-основных свойств поверхности изучались образцы ССМ, высушенные и отобранные на разных стадиях помола: контрольный – без помола, в начальной точке помола – помол 10 мин, конечной – помол 40 мин, а также проба после механоактивации в течение 40 мин и обжига при 700 °С (рис.2).

На всем диапазоне шкалы  $pKa$  наиболее высокой концентрацией активных центров обладает поверхность пробы ССМ после 40 мин помола.



Отмечается их преобладание в области брэнстедовских центров: для кислот Брэнстеда ( $pK_a = 2,5$ ) – 70 ммоль/г, для оснований ( $pK_a = 8,4$ ) – 75 ммоль/г. Образец после 10 мин помола характеризуется снижением активности на 32 % ( $pK_a = 8,4$ ). Данное обстоятельство имеет логичное объяснение. Механоактивация в течение 10 мин недостаточна для достижения высокой дисперсности и высококоразвитой поверхности, как при 40 мин, когда достигается оптимальная удельная поверхность и более длительное измельчение не требуется. Механоактивированный и обожженный образец ССМ имеет минимальное количество активных центров во всех областях. Указанная корреляция значений сохраняется и при расчете общего количества центров адсорбции (табл. 1).

Таблица 1

Количество центров адсорбции различной природы на поверхности частиц ССМ

Образец ССМ	Количество центров адсорбции, ммоль/г, $\pm 2$			
	Основания по Льюису	Кислоты по Брэнстеду	Основания по Брэнстеду	Общее количество
Без помола	25,5	39,7	64,9	130,1
Помол 40 мин	58,3	94,6	141,9	294,8
Помол 40 мин + обжиг	4,9	13,0	7,8	25,6
Помол 10 мин	23,7	47,5	98,2	169,5

Таким образом, отмечены рост активности поверхности частиц ССМ в результате механоактивационного воздействия и ее снижение при температурной обработке, связанное с фазовыми перестройками и структурными изменениями песчано-глинистой породы.

Проведено исследование реакционной активности сапонитсодержащего сырья в исходном и предварительно обработанном состоянии (помол, обжиг). Для развернутой оценки результатов представлено сравнение данных показателей с традиционными компонентами природного и техногенного происхождения, используемыми в настоящее время в качестве минеральных пуццолановых добавок (табл.2): природного кремнеземсодержащего сырья – кварцевого песка, гранита, опоки, перлита; техногенного сырья – золы Назаровской ТЭС (Красноярская обл.) и Троицкой ГРЭС (Челябинская обл.).

Следует отметить, что кислотно-основные свойства представлены избирательно, только в области кислотных центров Брэнстеда, преимущественно определяющих рост активности.

Согласно данным табл.2 исследуемые образцы ССМ имеют достаточно высокие показатели активности, сопоставимые с результатами по активности для природных и техногенных материалов, применяемых в качестве пуццолановых добавок.

Таблица 2

Сравнение показателей реакционной активности традиционных и исследуемых компонентов минеральных пуццолановых добавок

Сырьевые компоненты	Способ обработки	Концентрация кислотных центров Брэнстеда, ммоль/г	Сорбционная емкость, мг/г	Источник
Песок	Сухой помол	33,5	33,5	[36]
Гранит		36,3	27,9	
Опока		22,3	53,1	
Перлит		35,3	30,2	
Зола Назаровской ТЭС	–	4,4	1,0	[37]
Зола Троицкой ГРЭС	–	45,4	3,0	
ССМ	–	39,7	49,5	Данные автора
	Сухой помол (40 мин)	94,6	69,2	
	Сухой помол (40 мин) + обжиг	13,0	65,1	
	Сухой помол (10 мин)	47,5	65,2	

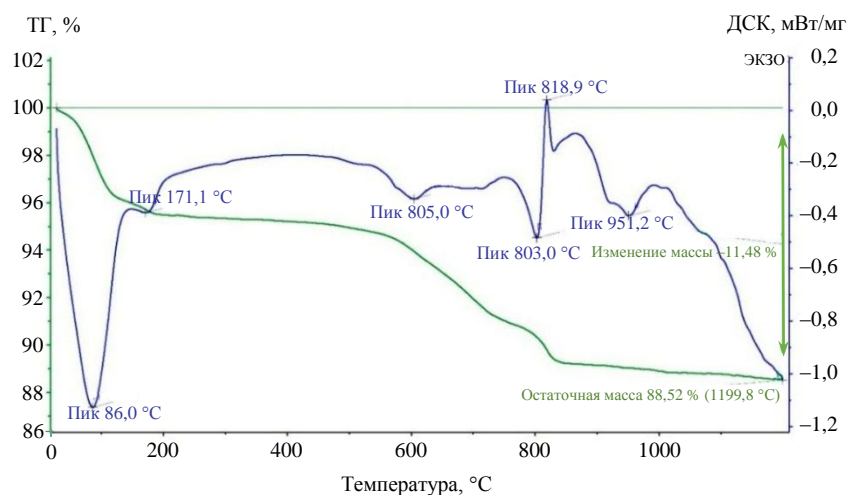


Рис.3. Термограмма образца ССМ

Термические методы анализа основаны на протекании различных химических превращений в материалах при их нагревании, которые обычно сопровождаются изменением массы. При проведении данного вида исследований образец исходного ССМ высушивался до постоянной массы и испытывался в температурном интервале 25-1200 °С.

На полученной термограмме (рис.3) отмечается наличие термических эффектов. Протекание эндотермических процессов приходится на пики, минимумы которых соответствуют температурам 86; 171; 605; 803; 819 и 951 °С.

Наличие первого пика (86 °С), представляющего эндотермический тепловой эффект, связано с удалением адсорбционно-связанной воды. Именно с этим фактом связан выбор температурного значения сушки образцов сапонитовой суспензии – 70 °С, обусловленный возможностью минимизации структурных изменений и сохранения исходных параметров и характеристик материала. Второй пик (171 °С) также характеризуется эндоэффектом и соответствует удалению межплоскостной/межпакетной воды.

Отмечен небольшой эндотермический пик при 575 °С (на термограмме он не обозначен), который связан с переходом низкотемпературного  $\alpha$ -кварца  $\text{SiO}_2$  в высокотемпературный  $\beta$ -кварц.

Пики 605 и 803 °С, а также пики незначительного размера, приходящиеся на температуру около 700 °С (не обозначены на рис.3) – это эндотермические эффекты, соответствующие дегидроксиляции серпентина, который в виде различных модификаций входит в состав сапонитсодержащего материала [30]. Его формирование может быть вызвано образованием активной формы оксидов магния и кремния в водной дисперсионной среде. Наиболее ярко выраженный пик экзотермического теплового эффекта соответствует 819 °С, связан с образованием высокотемпературного форстерита из серпентина (данный пик также означает, что дегидратация серпентина закончилась). Полученные результаты подтверждаются ранее выполненными исследованиями [8, 30]. По окончании нагрева происходит постепенное спекание частиц сапонитсодержащего материала.

При термогравиметрическом анализе фиксируется кривая потери массы в зависимости от температурных изменений. Общая потеря массы образца –11,48 %. На диапазоне температур 200-600 °С отмечается участок плато, который демонстрирует достаточную устойчивость и отсутствие химических превращений. Резкое падение на гравиметрической кривой свидетельствует о химическом разложении материала.

Изучение микроструктуры вещества – один из информативных методов исследований, позволяющий выявить структурные особенности объекта, определить размерные параметры отдельных элементов, форму и морфологию поверхности частиц, наблюдать взаимодействие компонентов системы, образование новых структур, дефектности и др. Применительно к сырьевым компонентам для производства строительных материалов данные исследования в комплексе с физико-химическими методами анализа вещества позволяют дать прогнозную оценку эффективности использования тех или иных компонентов в составе полиминеральных полидисперсных сырьевых смесей, а также объяснить результаты, полученные аналитическим путем.

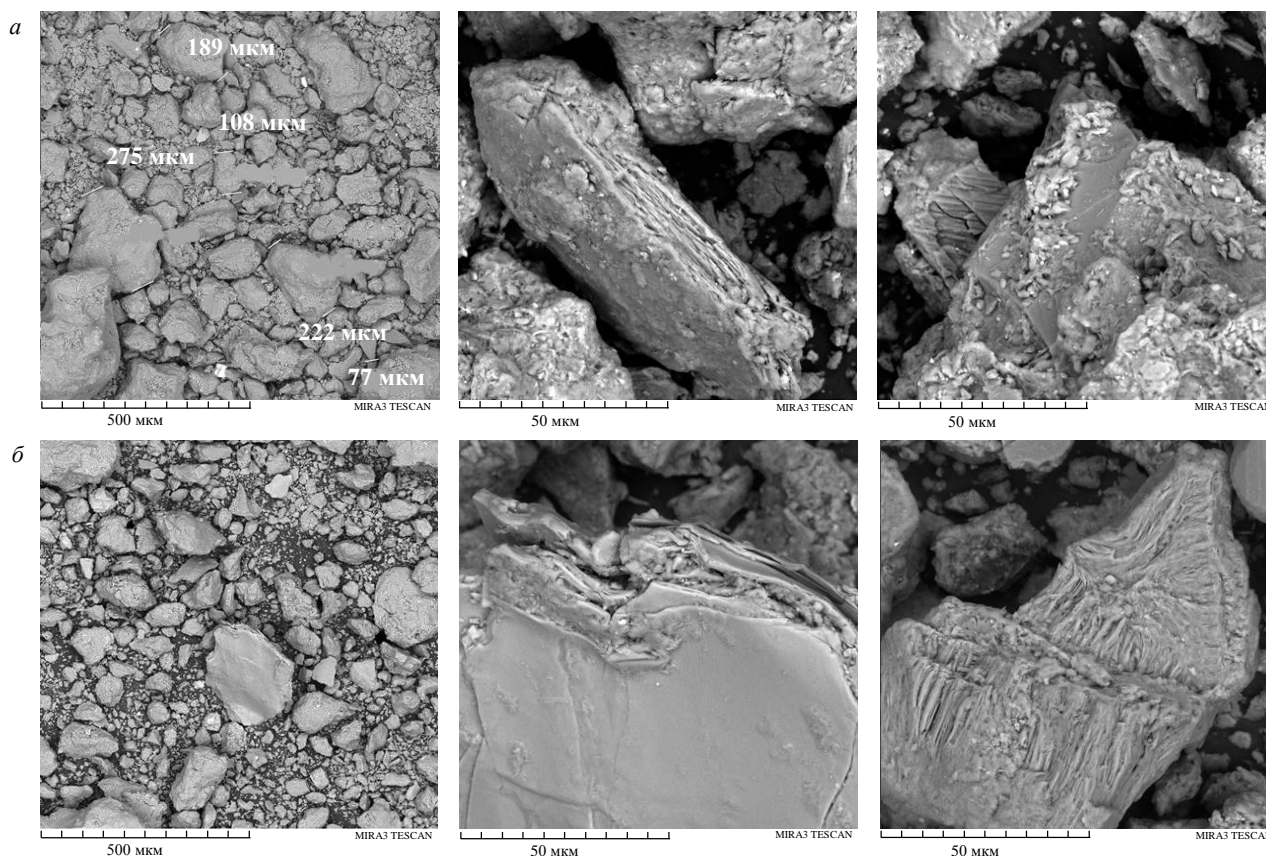


Рис.4. Микроструктура ССМ:

*a* – механоактивированного; *б* – механоактивированного и термообработанного

Изучение микроструктуры осуществлялось на аналогичных образцах высушенного ССМ после механической и тепловой обработки. Из анализа снимков следует, что основная масса образца механоактивированного ССМ сложена полидисперсными частицами песчаной и глинистой составляющих (рис.4, *a*). Наиболее крупными выступают частицы кварца, имеющие размер до 300 мкм. Морфология частиц угловатая, с раковистым изломом, характерным для кварца. Минеральные зерна кварца обладают различной степенью окатанности. Наблюдается «наливание» на частицы кварца глинистых агрегатов. Глинистые частицы хорошо идентифицируются по характерной пластинчатой форме и слоистой структуре. Слои глинистых минералов сформированы преимущественно тонкими листообразными структурами, плотно прилегающими друг к другу.

Общий характер микроструктуры образцов ССМ после температурного воздействия сохраняется и обеспечивается наличием полидисперсной системы зернистых частиц кварца и глинистых агрегатов пластинчатой формы (рис.4, *б*). Отличие от образцов до термообработки состоит в приобретении материалом некоторой консолидированной поверхности частиц ССМ.

На основе проведенного микроскопического анализа образцов ССМ в виде механоактивированного и обожженного дисперсного порошка определено, что основная масса материала сложена зернами кварца с угловатым изломом и пластинчатыми частицами глинистых минералов с различной слоистостью.

### Заключение

В статье рассмотрена возможность применения сапонитсодержащего материала, являющегося отходом обогащения кимберлитовых руд при добыче алмазов на месторождении им. М.В.Ломоносова, в качестве активной минеральной добавки для цементных вяжущих и бетонов. С этой целью оценивалось влияние механической и температурной обработки на ряд свойств материала, отобранного из хвостохранилища и находящегося в исходном состоянии.

Изучение активности поверхности образцов ССМ сводилось к определению сорбционной емкости, кислотно-основных центров, их распределения и позволило определить рост активности



поверхности частиц материала в результате механоактивационного воздействия и ее снижение при температурной обработке, что связано с фазовыми перестройками и структурными изменениями песчано-глинистой породы.

В результате термического метода анализа выявлены эндотермические тепловые эффекты, связанные с удалением адсорбционно-связанной и межплоскостной воды, переходом низкотемпературного  $\alpha$ -кварца  $\text{SiO}_2$  в высокотемпературный  $\beta$ -кварц, дегидроксилизацией серпентина и последующим образованием высокотемпературного форстерита.

Микроскопический анализ указывает на преобладание основной массы материала из зерен кварца и пластинчатых частиц глинистых минералов с различной слоистостью. Температурное воздействие не имеет выраженного влияния, отмечается некоторая «сглаженность» и консолидация (спекание) поверхности структурных элементов сапонитсодержащего материала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ларичкина Ф.Д., Кныша В.А. Рациональное использование вторичных минеральных ресурсов в условиях экологизации и внедрения наилучших доступных технологий. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2019. 252 с.
2. Винслав Ю.Б., Лисов С.В., Лунькин А.Н. К эффективному управлению развитием минерально-сырьевого комплекса России: проблемы недропользования // Российский экономический журнал. 2017. № 3. С. 37-60.
3. Marrochino E., Zanelli C., Guarini G., Dondi M. Recycling mining and construction wastes as temper in clay bricks // Applied Clay Science. 2021. Vol. 209. № 106152. DOI: [10.1016/j.clay.2021.106152](https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106152)
4. Vo T.L., Nash W., Del Galdo M. et al. Coal mining wastes valorization as raw geomaterials in construction: A review with new perspectives // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 336. № 130213. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.130213](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130213)
5. Benahsina A., El Haloui Y., Taha Y. et al. Substitution of natural clay by Moroccan solid mining wastes to manufacture fired bricks // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 58. Part 4. P. 1324-1330. DOI: [10.1016/j.matpr.2022.02.211](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.211)
6. Dod R.D., Dhodare S.S., Bhandari J. et al. Extraction of sand from the complex matrix of coal mining dump waste: A sustainable approach in Indian context // Cleaner Materials. 2024. Vol. 12. № 100243. DOI: [10.1016/j.clema.2024.100243](https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100243)
7. Pashkevich M.A., Alekseenko A.V. Reutilization Prospects of Diamond Clay Tailings at the Lomonosov Mine, Northwestern Russia // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 6. № 517. DOI: [10.3390/min10060517](https://doi.org/10.3390/min10060517)
8. Малыгина М.А., Айзеницадт А.М., Дроздюк Т.А. и др. Структурная модификация сапонитсодержащего материала при его механическом диспергировании // Строительные материалы. 2022. № 9. С. 32-38. DOI: [10.31659/0585-430X-2022-806-9-32-38](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-32-38)
9. Buravchuk N.I., Guryanova O.V., Parinov I.A. Use of technogenic raw materials in ceramic technology // Open Ceramics. 2024. Vol. 18. № 100578. DOI: [10.1016/j.oceram.2024.100578](https://doi.org/10.1016/j.oceram.2024.100578)
10. Migunthanna J., Rajeev P., Sanjayan J. Waste Clay Bricks as a Geopolymer Binder for Pavement Construction // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 11. № 6456. DOI: [10.3390/su14116456](https://doi.org/10.3390/su14116456)
11. Juenger M.C.G., Winnefeld F., Provis J.L., Ideker J.H. Advances in alternative cementitious binders // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. Iss. 12. P. 1232-1243. DOI: [10.1016/j.cemconres.2010.11.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012)
12. Зубкова О.С., Панкратьева К.А. Комплексная переработка сапонитовых руд Ломоносовского месторождения алмазов // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35. № 8 (243). С. 129-130.
13. Зубкова О.С., Пягай И.Н., Панкратьева К.А., Торопчина М.А. Разработка состава и исследование свойств сорбента на основе сапонита // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 21-29. DOI: [10.31897/PMI.2023.1](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.1)
14. Косарева Е.Н., Кабачкова Н.В., Романов Е.М., Шабанова Е.Н. Применение сапонитсодержащих материалов в качестве минерального удобрения при выращивании картофеля // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2018. № 28 (33). С. 11-20.
15. Облицов А.Ю. Некоторые аспекты утилизации высокоглинистых отходов обогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 7. С. 390-392.
16. Алексеев А.И., Зубкова О.С., Полянский А.С. Усовершенствование технологии обогащения сапонитовой руды в процессе добычи алмазов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2020. № 1 (205). С. 74-80. DOI: [10.17213/1560-3644-2020-1-74-80](https://doi.org/10.17213/1560-3644-2020-1-74-80)
17. Jones T.R., Poitras J., Paterson D., Southam G. Historical diamond mine waste reveals carbon sequestration resource in kimberlite residue // Chemical Geology. 2023. Vol. 617. № 121270. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2022.121270](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.121270)
18. Stroganov V., Sagadeev E., Ibragimov R., Potapova L. Mechanical activation effect on the biostability of modified cement compositions // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 246. № 118506. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.118506](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118506)
19. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete – A review // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Iss. 11. P. 2060-2071. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014)
20. Sadique M., Al-Nageim H., Atherton W. et al. Mechano-chemical activation of high-Ca fly ash by cement free blending and gypsum aided grinding // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 43. P. 480-489. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2013.02.050](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.050)
21. Sharmin S., Sarker P.K., Biswas W. et al. Characterization of waste clay brick powder and its effect on the mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 412. № 134848. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.134848](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134848)
22. Айзеницадт А.М., Строкова В.В., Нелюбова В.В. и др. Физико-химические трансформации сапонитсодержащего материала при его активации измельчением // Физика и химия обработки материалов. 2024. № 1. С. 53-64. DOI: [10.30791/0015-3214-2024-1-53-64](https://doi.org/10.30791/0015-3214-2024-1-53-64)
23. Алфимова Н.И., Калатози В.В., Карацупа С.В. и др. Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г.Шухова. 2016. № 6. С. 85-89.



24. *Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L.* The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Iss. 1. P. 113-122. DOI: [10.1016/j.cemconres.2010.09.013](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.013)
25. *Sabir B.B., Wild S., Bai J.* Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review // *Cement and Concrete Composites*. 2001. Vol. 23. Iss. 6. P. 441-454. DOI: [10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
26. *Балыков А.С., Низина Т.А., Володин В.В., Коровкин Д.И.* Прочность цементного камня с минеральными добавками на основе обожженной глины и карбонатных пород // *Эксперт: теория и практика*. 2020. № 4 (7). С. 26-30. DOI: [10.24411/2686-7818-2020-10031](https://doi.org/10.24411/2686-7818-2020-10031)
27. *Володин В.В., Балыков А.С., Низина Т.А. и др.* Активность смешанного цементного вяжущего с добавками термоактивированных глин // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК): сборник материалов Национальной молодежной научно-технической конференции, 22-24 апреля 2020, Иваново, Россия. 2020. № 1. С. 779-782.
28. *van Jaarsveld J.G.S., van Deventer J.S.J., Lukey G.C.* The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers // *Chemical Engineering Journal*. 2002. Vol. 89. Iss. 1-3. P. 63-73. DOI: [10.1016/S1385-8947\(02\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00025-6)
29. *Gerasimov A.M., Eremina O.V.* Application microwave radiation for directional changes of layered silicates properties // *Eurasian Mining*. 2021. № 1. P. 55-60. DOI: [10.17580/em.2021.01.11](https://doi.org/10.17580/em.2021.01.11)
30. *Drozdyuk T., Frolova M., Ayzenshtadt A. et al.* Preliminary Study on the Mechanical Activation and High-Temperature Treatment of Saponite-Containing Tailings Generated during Kimberlite Ore Dressing // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 10. № 4957. DOI: [10.3390/app12104957](https://doi.org/10.3390/app12104957)
31. *Jain A., Agrawal V., Gupta R.* Using serpentine in concrete: A literature review // *Materials Today: Proceedings*. 2023. 5 p. DOI: [10.1016/j.matpr.2023.03.138](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.138)
32. *Зинчук Н.Н.* Особенности серпентинизации кимберлитовых пород // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2017. № 3. С. 66-74.
33. *Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M. et al.* Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements – A step towards sustainable building material and waste utilization // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 178. P. 22-33. DOI: [10.1016/j.jclepro.2017.12.270](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.270)
34. *Ядыкина В.В., Траутвайн А.И.* Влияние активности наполнителей из техногенного кремнеземсодержащего сырья на прочность цементных систем // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 5. С. 174-179.
35. *Скворцова Л.Н., Чухломина Л.Н., Минакова Т.С., Шерстобоева М.В.* Исследование кислотно-основных и сорбционных свойств поверхности металлокерамических композитов // *Журнал прикладной химии*. 2017. Т. 90. Вып. 8. С. 1014-1019.
36. *Нелюбова В.В., Строкова В.В., Данилов В.Е., Айзенишадт А.М.* Комплексная оценка активности кремнеземсодержащего сырья как показателя эффективности механоактивации // *Обогащение руд*. 2022. № 2. С. 17-25. DOI: [10.17580/or.2022.02.03](https://doi.org/10.17580/or.2022.02.03)
37. *Марков А.Ю., Строкова В.В., Маркова И.Ю.* Оценка свойств топливных зол как компонентов композиционных материалов // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 77-83. DOI: [10.31659/0585-430X-2019-769-4-77-83](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-77-83)

**Авторы:** Татьяна Николаевна Орехова, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-8284-9811> (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия), Мариана Николаевна Сивальнева, канд. техн. наук, доцент, 549041@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4957-9207> (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия), Мария Аркадьевна Фролова, канд. хим. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4079-5066> (Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В.Ломоносова, Архангельск, Россия), Валерия Валерьевна Строкова, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0001-6895-4511> (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия), Диана Олеговна Бондаренко, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-9708-2791> (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

## Лабораторные исследования особенностей гидравлического разрыва пересекающихся скважин в неоднородном поле напряжений

А.В.Патутин ✉, А.А.Скулкин, Л.А.Рыбалкин, А.Н.Дробчик

Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия

**Как цитировать эту статью:** Патутин А.В., Скулкин А.А., Рыбалкин Л.А., Дробчик А.Н. Лабораторные исследования особенностей гидравлического разрыва пересекающихся скважин в неоднородном поле напряжений // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16319. С. 100-109. [EDN JFQTE](https://doi.org/10.26907/2411-3336.2025.16319.100-109)

### Аннотация

Рассмотрены особенности распространения трещины гидроразрыва в пересекающихся скважинах, созданных в блоках полиметилметакрилата в неоднородном поле напряжений. В качестве рабочего флюида использовался водный раствор глицерина и пластилин. Согласно линейной механике разрушения, наличие концентратора напряжений в месте пересечения скважин способствует началу процесса трещинообразования в этой области, а дальнейшее распространение трещины происходит в плоскости, содержащей их оси. Актуальность работы обусловлена поиском новых подходов и разработкой технологических решений по эффективному созданию продольной трещины в массиве горных пород в неблагоприятном для ее развития поле напряжений. Приведена схема работы лабораторного стенда, а также общий вид герметизирующих устройств, используемых для изолирования заданного интервала при выполнении испытаний. Получены зависимости давления глицерина от времени закачки и определена величина давления разрыва в блоках. Исследована форма трещин, образовавшихся при подаче в систему скважин пластилина. По результатам физического моделирования установлено, что в скважинах происходит преимущественно формирование продольного разрыва, при этом величина поля горизонтальных сжимающих напряжений в большей степени влияет на отклонение траектории продольного разрыва от вертикальной плоскости, содержащей оси скважин, чем увеличение угла между ними. Измерены углы наклона плоскости продольного разрыва при его выходе на боковую грань блока.

### Ключевые слова

трещина гидроразрыва; искусственный блок; напряженное состояние; лабораторный эксперимент

### Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФН и Правительства Новосибирской обл. в рамках научного проекта № 22-27-20061.

Поступила: 02.10.2023

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 20.03.2025

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Возникновение и развитие гидравлического разрыва пласта (ГРП) тесно связано с повышением нефтеотдачи добывающих скважин [1-4]. Относительная простота лежащей в основе данного способа идеи привела к его широкому распространению. Окончательная форма трещины гидроразрыва в горной породе в значительной степени зависит от направления действия сжимающих напряжений и их значений [5, 6]. При выполнении операции ГРП на больших глубинах, характерных для многих нефтегазовых месторождений, возможная ориентация образующихся трещин ограничена влиянием максимального вертикального напряжения. В таких условиях почти всегда наблюдается формирование продольного разрыва в вертикальной скважине, либо радиальной поперечной трещины в горизонтальном стволе.

Реализация метода ГРП в шахтах осложнена некоторыми особенностями. Сложнопредсказуемость траекторий создаваемых трещин обусловлена высокими горизонтальными напряжениями [7, 8] и влиянием близкорасположенных горных выработок и пластовых скважин на напряженно-деформированное состояние массива. При этом спектр решаемых задач может быть достаточно разнообразен,



например, интенсификация предварительной дегазации угольных пластов [9-12], управляемая посадка труднообрушаемой кровли [13-16], защита подземных выработок от напорной фильтрации [17], измерение действующих напряжений [18-21]. Интересны методические и технические решения для интенсификации добычи тяжелых нефтей методом гидроразрыва на Ярегском месторождении, которое разрабатывается термошахтным способом [22].

Повышение эффективности шахтной модификации метода тесно связано с установлением особенностей распространения трещины ГРП в неоднородном поле напряжений в лабораторных условиях. Большинство используемых для этих целей установок разработаны для исследования трещинообразования в керне с приложением к нему осевого и всестороннего сжатия [23-25]. Такая постановка эксперимента не полностью соответствует пластовым условиям и не позволяет рассматривать характерные для горного дела задачи.

С целью получения достоверных результатов физического моделирования гидроразрыва все большее распространение получают лабораторные установки с независимым трехосным нагружением кубического образца [26, 27]. Такой образец должен быть достаточно большим (длина ребра 150-200 мм и более) для исключения влияния краевых эффектов на распространение трещины и возможного размещения в нем моделей горной выработки или нескольких скважин.

Существующий опыт работ показывает, что управлять траекторией разрыва можно несколькими способами. Например, использовать различные технические средства для нарезки иницирующих щелей на стенках скважины [28], выполнять направленную нагрузку или разгрузку в целевом интервале [29, 30], предварительно создавать дополнительные трещины для изменения локального поля напряжений [31], изменять свойства рабочего агента [32] и параметры его закачки [33, 34]. Также к факторам, влияющим на траекторию растущей трещины, относятся нарезка на стенках обсадной колонны перфорации сложной геометрии, определенное расположение нескольких скважин различной направленности, а также наличие в них дополнительных ответвлений.

Одним из перспективных способов создания продольных трещин является проведение гидроразрыва в пересекающихся скважинах. Предполагается, что рост трещины будет происходить в плоскости, содержащей их оси. Подобный подход использовался при разработке технологии направленного ГРП, отличительной особенностью которой является создание нескольких радиальных скважин малого диаметра из вертикальной и дальнейшая подача рабочей жидкости под давлением в сформированную систему [35]. Показано, что трещина с большой вероятностью формируется в плоскости, образованной радиальными скважинами вне зависимости от действующих в массиве напряжений. Дополнительно исследовалось влияние взаимного расположения радиальных скважин на траекторию трещины [36]. Результаты экспериментов показывают, что увеличение угла между осью скважины и направлением максимального напряжения повышают давление разрыва.

Схожее решение применялось при гидравлическом разрыве угольного пласта в шахтных условиях, при этом получена высокая сходимости результатов математического моделирования и экспериментальных измерений [37]. Установлено, что использование разработанной технологии снижает давление гидроразрыва угольного пласта и позволяет контролировать направление начального роста трещин.

Целью данной работы является исследование возможностей формирования продольной трещины гидроразрыва между пересекающимися скважинами в неблагоприятном для ее развития поле напряжений. В эксперименте такое поле создавалось за счет приложения максимального действующего напряжения перпендикулярно плоскости, содержащей оси скважин.

### Методология исследований

Лабораторный стенд для исследования процесса ГРП в кубических блоках разработан и смонтирован на основе гидравлического пресса ПГ-100. Сжатие образца в горизонтальной плоскости по двум ортогональным направлениям осуществляется с помощью четырех попарно действующих домкратов ДН10П10 грузоподъемностью 10 тс, установленных в силовой раме. Аналогичный домкрат закреплен в верхней части стенда и обеспечивает нагрузку по вертикальной оси. Благодаря разделному подключению домкратов к насосу высокого давления в стенде реализована возможность независимого трехосного нагружения образца. Более подробно конструкция лабораторного стенда описана в статьях [38, 39], схема работы показана на рис. 1, а.

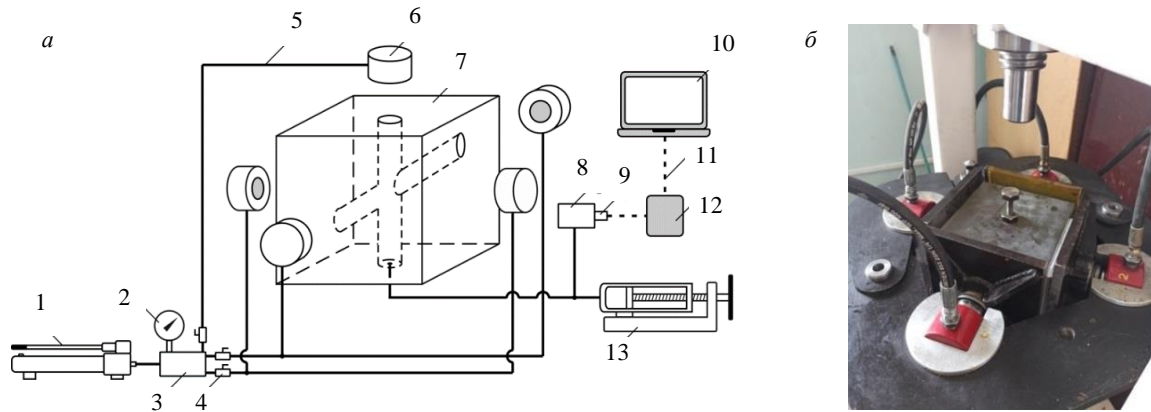


Рис.1. Схема работы лабораторного стенда (а) и блок оргстекла, подготовленный для разрыва пластилином в испытательной камере (б)

1 – насос ручной; 2 – манометр; 3, 8 – коллекторы; 4 – кран запорный; 5 – трубопроводы высоконапорные; 6 – гидравлический домкрат; 7 – образец с пересекающимися скважинами; 9 – датчик давления; 10 – портативный компьютер; 11 – канал связи; 12 – регистратор давления; 13 – пресс-расходомер механический

В ходе выполнения экспериментов сбор и регистрация данных осуществлялась с помощью датчика давления МИДА-ПИ-51П, соединенного кабелем с регистратором давления. В регистраторе используется 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), что позволяет выполнять передачу сигнала в портативный компьютер по каналу Bluetooth для дальнейшей обработки и визуализации программными средствами [40].

Физическое моделирование гидроразрыва выполнялось в искусственных блоках, изготовленных из полиметилметакрилата (оргстекло) с длиной ребра 180 мм. Выбор материала для экспериментов обусловлен двумя факторами. Во-первых, это оптическая прозрачность, позволяющая достаточно точно контролировать рост трещины без использования дополнительных технических средств. Во-вторых, при распространении трещины в оргстекле происходит в основном хрупкое разрушение материала без значительной пластической составляющей, что позволяет исключить ее воздействие на итоговую траекторию разрыва и сосредоточить внимание только на влиянии сжимающих нагрузок и угла между пересекающимися скважинами. Совокупность этих особенностей, а также схожесть механических свойств оргстекла (предел прочности на сжатие около 70 МПа) и пород горного массива привело к его широкому использованию при моделировании гидроразрыва в лабораторных условиях [41-43].

В каждом блоке создавались две модельные скважины диаметром 14 мм, которые пересекались в его центре. Одна из скважин была вертикальной, а другая образовывала с ней угол  $\gamma$ , равный 30 или 60 град. Забой наклонной скважины не достигал границ блока, а ее устье перекрывалось с помощью герметизатора, оснащенного двумя уплотнительными кольцами (рис.2, а) [44].



Рис.2. Герметизатор для изолирования наклонной скважины (а) и двухпакерное устройство (б)



Лабораторные эксперименты проводились для двух вариантов рабочего флюида: водный раствор дистиллированного глицерина (ГОСТ 6824-96), подкрашенный колером, и пластилин. В первом случае вертикальная скважина была сквозной, а интервал разрыва изолировали с помощью специального двухпакерного устройства (рис.2, б). Глицерин подавался с помощью механического пресс-расходомера. Во втором случае расстояние от забоя вертикальной скважины до поверхности блока составляло около 20 мм. Пластилин задавливали путем закручивания винта по резьбе, нарезанной на стенках вертикальной скважины (см. рис.1, б). Расположение и форма скважин в блоке в зависимости от используемого рабочего флюида, а также направления действия сжимающих напряжений приведены на рис.3 [44].

В соответствии с основной целью лабораторных исследований в качестве максимального действующего напряжения в экспериментах было выбрано  $S_{xx}$ . Превышение именно этого напряжения над остальными влияет на скорость разворота и выход формируемой продольной трещины из заданной скважины плоскости. Особенности распространения разрывов в подобной постановке исследовались численно [45], а также в ходе физического моделирования на образцах пескобетона [46]. В табл.1 указаны углы  $\gamma$  для всех изготовленных блоков, условия нагружения в процессе физического моделирования, а также используемый для разрыва рабочий флюид [44].

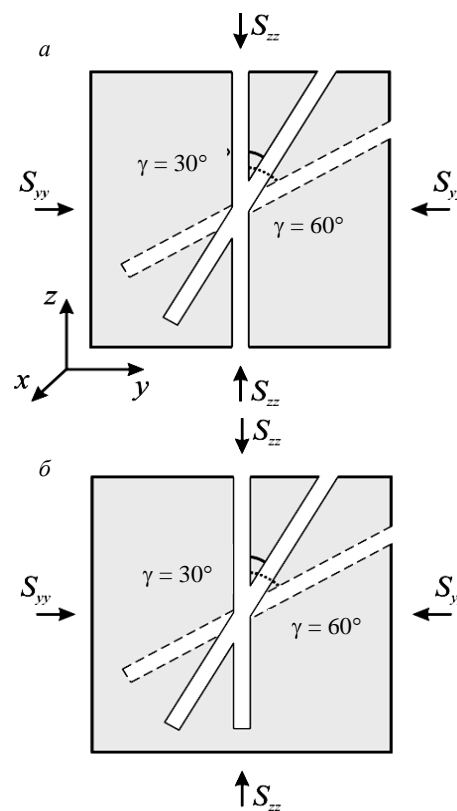


Рис.3. Расположение и форма скважин в блоке при разрыве глицерином (а) и пластилином (б) в поле сжимающих напряжений

Таблица 1

Основные характеристики блоков и параметры экспериментов

Номер блока	Угол $\gamma$ , град	Условия нагружения, МПа			Рабочий флюид
		$S_{xx}$	$S_{zz}$	$S_{yy}$	
1	30	1,3	1,0	1,0	Глицерин
2	60	1,3	1,0	1,0	Глицерин
3	30	1,3	0	1,0	Пластилин
4	60	1,3	0	1,0	Пластилин
5	30	1,5	0	1,0	Пластилин
6	60	1,5	0	1,0	Пластилин

### Полученные результаты и обсуждение

В ходе разрыва блока 1 в скважинах произошло формирование двух независимых трещин и их частичное соединение вблизи концентратора напряжений (рис.4, а, б). Итоговый разрыв заметно отклонился от плоскости, содержащей оси скважин, наблюдался выход глицерина на нижней грани блока. Давление разрыва в эксперименте  $P_b = 11,9$  МПа, а остаточное давление в конце наблюдений 0,6 МПа.

Разрыв в блоке 2 произошел при достаточно высоком давлении – 33,5-37,2 МПа (остаточное давление – 0,81 МПа), что почти в три раза больше, чем зафиксировано для блока 1. Такое значительное расхождение можно объяснить различным состоянием стенок скважины, а также структурными особенностями конкретных блоков. При этом в блоке 2 образовалась достаточно четкая продольная трещина, соединяющая обе скважины, так как для такого высокого значения давления  $P_b$  различия между горизонтальными напряжениями  $S_{xx}$  и  $S_{yy}$  практически отсутствуют (рис.4, в, г). Отклонение плоскости трещины от вертикали составило 10 град, визуально наблюдался выход трещины на боковую и нижнюю грани блока [44].

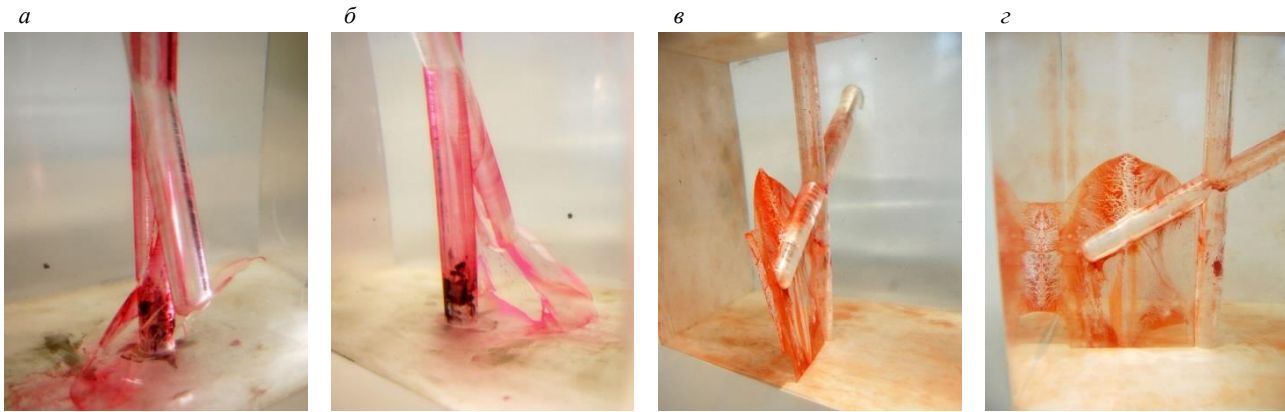


Рис.4. Фотографии трещин, образовавшихся при закачке глицерина в блоке 1 (а, б) и блоке 2 (в, г)

Графики давления закачки глицерина для описанных случаев приведены на рис.5. Скорость подачи глицерина поддерживалась постоянной и составляла около 10 мл/мин.

По характеру изменения давления в блоке 1 можно сделать вывод, что перед формированием трещины произошло деформирование и поддавливание пакеров со стороны камеры нагрузки, вызвавшее незначительную разгерметизацию изолированного пакерами интервала (рис.5, а). В блоке 2 после достижения максимального давления 37,2 МПа также наблюдалась утечка рабочей жидкости из интервала разрыва через пакеры. После того как утечка прекратилась, дальнейший рост давления глицерина за счет его закачки пресс-расходомером привел к формированию трещины при 33,5 МПа (рис.5, б). Более низкое значение давления может быть связано с произошедшими в окрестности скважины необратимыми микроразрушениями материала [47].

В серии испытаний с использованием в качестве рабочего флюида пластилина его подача в вертикальную скважину происходила при  $S_{zz} = 0$ . Пластилин помещался и плотно упаковывался в пересекающиеся скважины, затем в наклонную скважину устанавливали герметизатор, а металлический винт закручивали по нарезанной ранее на стенках вертикальной скважины резьбе. Это создавало необходимую для разрушения оргстекла нагрузку с постепенным поступлением пластилина в формирующуюся систему трещин. Давление разрыва при этом не регистрировалось.

При выполнении экспериментов в блоках 3 и 4 соотношение между действующими сжимающими напряжениями составляло  $S_{xx} = 1,3S_{yy}$ . В ходе подачи пластилина трещинообразование началось в обеих скважинах, а затем растущие трещины соединялись в единый продольный разрыв (рис.б). Отметим сложную геометрию образующихся трещин, искривление их крыльев и закручивание вокруг скважин, причем в случае  $\gamma = 60^\circ$  эти эффекты проявлялись сильнее. Создание разветвленных систем разрывов из одной скважины с повышением вязкости рабочего флюида подтверждалось результатами лабораторных исследований [48].

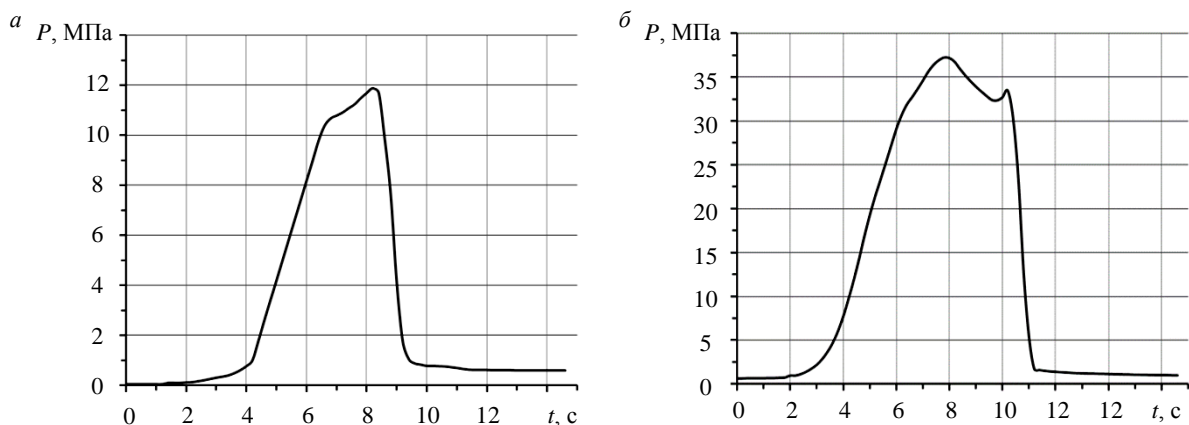


Рис.5. Графики давления закачки глицерина в зависимости от времени закачки  $t$  для блока 1 (а) и блока 2 (б)

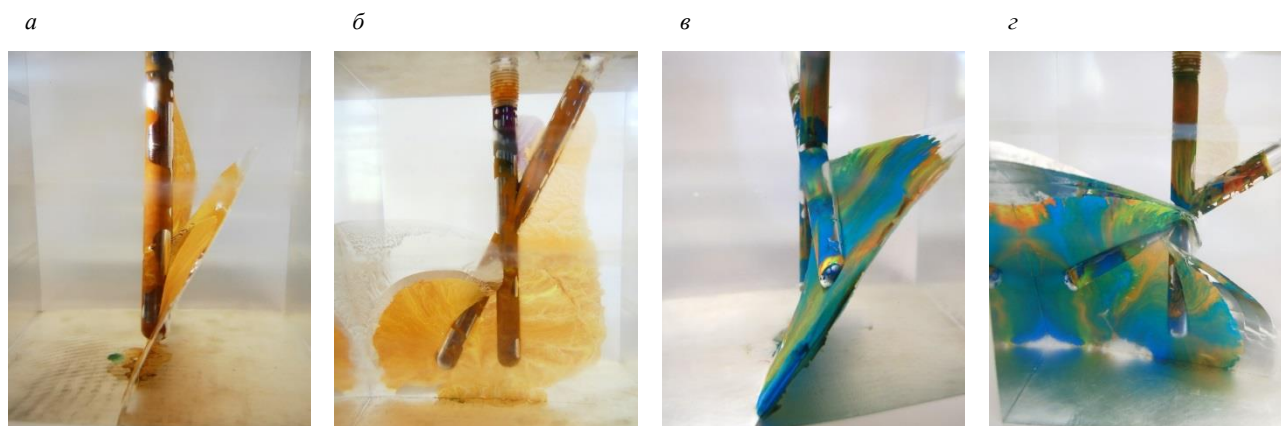


Рис.6. Фотографии трещин, образовавшихся при подаче пластилина в блоке 3 (а, б) и блоке 4 (в, з)

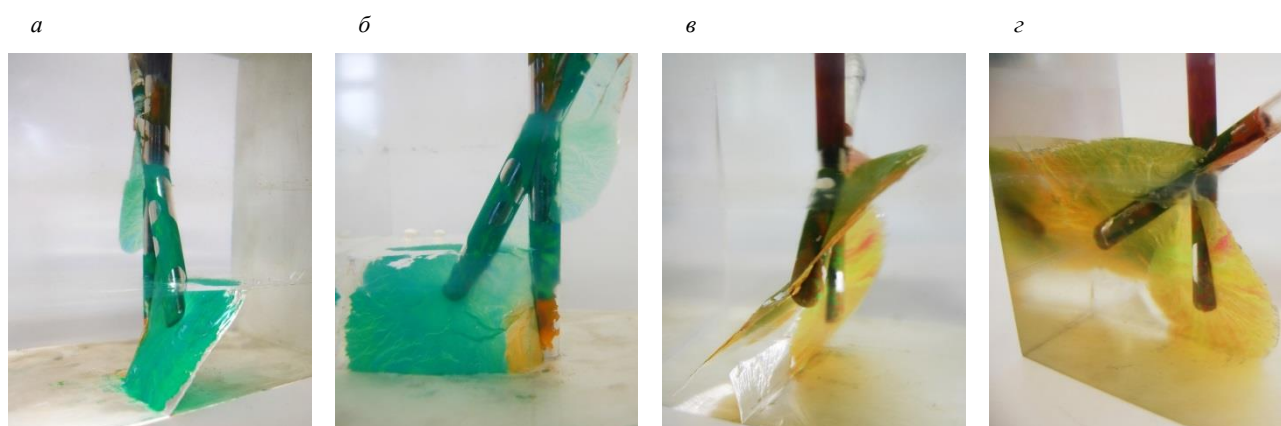


Рис.7. Фотографии трещин, образовавшихся при подаче пластилина в блоке 5 (а, б) и блоке 6 (в, з)

По условиям испытаний в блоках 5 и 6 максимальное сжимающее напряжение  $S_{xx}$  в полтора раза превышало  $S_{yy}$ . При этом отмечалось схожее с предыдущим экспериментом развитие трещин (рис.7). В блоке 5 вследствие его неоднородности и дальнейшего расслоения вклинившимся пластилином в горизонтальной плоскости произошла остановка вертикального роста трещины. Подобные результаты наблюдалось ранее в различных лабораторных экспериментах по изучению взаимного влияния создаваемых и существующих трещин в условиях сжимающих напряжений [49-51]. Наиболее сложные условия для создания единого продольного разрыва были созданы в блоке 6 при  $\gamma = 60^\circ$ . В этом случае произошло неполное соединение скважин разрывом, в том числе за счет поворота плоскости трещины, растущей в наклонной скважине (рис.7, в).

Для оценки влияния условий эксперимента на итоговую форму образовавшихся трещин для блоков 3-6 был измерен угол наклона плоскости продольного разрыва при его выходе на боковую грань блока. Для удобства обозначим  $\alpha$  данный угол, отсчитываемый от вертикали (табл.2).

Таблица 2

Значение угла  $\alpha$  для блоков 3-6

Номер блока	Условия нагружения, МПа		Угол $\gamma$ , град	Угол $\alpha$ , град
	$S_{xx}$	$S_{yy}$		
3	1,3	1,0	30	29
4	1,3	1,0	60	36
5	1,5	1,0	30	44
6	1,5	1,0	60	48



Полученные результаты показывают, что близкорасположенные скважины ( $\gamma = 30^\circ$ ) лучше стабилизируют плоскость разрыва в условиях заданного неравномерного поля напряжений: отклонение от вертикальной плоскости, содержащей оси скважин, составило  $29$  и  $44^\circ$  при  $S_{xx} = 1,3$  и  $1,5$  МПа соответственно. Анализ углов  $\alpha$ , полученных при разрыве блоков 4 и 5, обнаружил следующие особенности. Несмотря на относительно большое расстояние между стенками скважин вдали от области концентратора в блоке 4 ( $\gamma = 60^\circ$ ) и ограниченные возможности такой схемы для удержания разрыва в заданной плоскости, угол  $\alpha$  оказался меньше, чем для блока 5 ( $\gamma = 30^\circ$ ). Это означает, что параметры поля сжимающих напряжений сильнее влияют на отклонение траектории продольного разрыва от вертикальной плоскости, содержащей оси скважин, чем увеличение угла  $\gamma$ . Полученные ранее результаты показывают, что в случае равнокомпонентного поля напряжений распространение разрыва вследствие вдавливания пластичных веществ чаще всего происходит в плоскости скважин, либо вдоль изначально задаваемого направления [52].

Установленные в данной работе особенности развития трещин могут быть использованы на практике при проектировании работ ГРП, выполняемых из горных выработок. Прилагаемые в ходе лабораторных испытаний нагрузки на кубический образец были ограничены техническими возможностями стенда и эквивалентны литостатическому давлению горных пород на глубине около  $200$  м, что соответствует многим месторождениям полезных ископаемых, обрабатываемых шахтным способом. К ним, например, можно отнести Ярегское месторождение высоковязкой нефти, месторождения урана Стрельцовского рудного поля, полиметаллическое месторождение Хандиза\* (Узбекистан), Межегейское, Карагайлинское угольные месторождения и др. [53-56].

Используемые в экспериментах соотношения между максимальными и минимальными сжимающими напряжениями ( $1,3-1,5$ ) наблюдаются на многих обрабатываемых пластах и залежах. В работе [57] обобщены результаты исследований природных напряжений в верхней части разреза отечественных и зарубежных месторождений. Отмечается широкая распространенность превышения горизонтальных напряжений над вертикальными как в изверженных, так и в осадочных метаморфизованных породах, в отдельных случаях в  $10$  раз. Схожие результаты приводятся и в публикациях [56, 58], описывающих распределение действующих напряжений в угольных шахтах Китая.

Успех шахтной реализации исследуемого в данной статье подхода зависит от возможности формирования в массиве концентратора напряжений за счет пересечения скважин. В условиях подземных выработок это может быть реализовано путем установки ориентированного клин-отклонителя в заданном месте горизонтальной пластовой скважины и дальнейшей зарезки из нее бокового ствола [59]. Создаваемая таким образом У-образная система скважины и бокового ствола будет обладать необходимой для решения имеющейся задачи направленностью. Затем с помощью пакера осуществляют герметизацию участка скважины вместе с боковым стволом и выполняют закачку рабочего флюида. Повышение вязкости флюида возможно за счет использования специальных химических добавок, либо применения двухкомпонентных смол с заранее подобранным временем полимеризации [60].

### Заключение

Формирование трещин заданной направленности при реализации метода гидравлического разрыва пласта является важным условием для повышения эффективности разработки месторождений полезных ископаемых. Создание продольных трещин в шахтных условиях позволяет успешно решать специфические задачи горного дела. Основной целью проведенных лабораторных исследований являлось изучение возможностей формирования продольного разрыва в системе пересекающихся скважин, когда направление действия максимального сжимающего напряжения было перпендикулярно плоскости, содержащей их оси.

В ходе испытаний установлено, что трещины чаще всего образуются независимо в вертикальной и наклонной скважинах, при дальнейшем росте объединяются и удерживаются скважинами как единый разрыв, в том числе благодаря области вблизи концентратора. В наиболее неблагоприятных

\* О деятельности шахты «Хандиза». URL: <https://agmk.uz/ru/news/xondiza-koni-polimetallar-ombori> (дата обращения 21.07.2024).



условиях ( $S_{xx} = 1,5S_{yy}$ ,  $\gamma = 60^\circ$ ) при подаче пластилина наблюдалось неполное соединение скважин, в том числе за счет поворота плоскости трещины, растущей в наклонной скважине. Стоит отметить сложную геометрию образовавшихся трещин, искривление их крыльев и закручивание вокруг скважин, причем в случае  $\gamma = 60^\circ$  эти эффекты проявляются сильнее.

По результатам физического моделирования определено, что параметры поля горизонтальных сжимающих напряжений в большей степени влияют на отклонение траектории продольного разрыва от вертикальной плоскости, содержащей оси скважин, чем увеличение угла между ними. Измерение угла наклона плоскости продольного разрыва при его выходе на боковую грань блока показало, что близкорасположенные скважины ( $\gamma = 30^\circ$ ) лучше стабилизируют плоскость разрыва в условиях заданного неравномерного поля напряжений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Koplos J., Tuccillo M.E., Ranalli B.* Hydraulic fracturing overview: How, where, and its role in oil and gas // Journal AWWA. 2014. Vol. 106. Iss. 11. P. 38-46. DOI: [10.5942/jawwa.2014.106.0153](https://doi.org/10.5942/jawwa.2014.106.0153)
2. *Bin Chen, Barboza B.R., Yanan Sun et al.* A Review of Hydraulic Fracturing Simulation // Archives of Computational Methods in Engineering. 2022. Vol. 29. Iss. 4. P. 2113-2170. DOI: [10.1007/s11831-021-09653-z](https://doi.org/10.1007/s11831-021-09653-z)
3. *Филиппов Е.В., Захаров Л.А., Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н.* Воспроизведение пластового давления методами машинного обучения и исследование его влияния на процесс образования трещин при гидравлическом разрыве пласта // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 924-932. DOI: [10.31897/PMI.2022.103](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.103)
4. *Босиков И.И., Ключев Р.В., Майер А.В.* Комплексная оценка эффективности технологии гидравлического разрыва пласта для проведения скважин при добыче углеводородов // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 1018-1025. DOI: [10.31897/PMI.2022.98](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.98)
5. *Bakhshi E., Golsanami N., Lianjun Chen.* Numerical Modeling and Lattice Method for Characterizing Hydraulic Fracture Propagation: A Review of the Numerical, Experimental, and Field Studies // Archives of Computational Methods in Engineering. 2021. Vol. 28. Iss. 5. P. 3329-3360. DOI: [10.1007/s11831-020-09501-6](https://doi.org/10.1007/s11831-020-09501-6)
6. *Dutler N., Valley B., Gischig V. et al.* Hydraulic fracture propagation in a heterogeneous stress field in a crystalline rock mass // Solid Earth. 2019. Vol. 10. Iss. 6. P. 1877-1904. DOI: [10.5194/se-10-1877-2019](https://doi.org/10.5194/se-10-1877-2019)
7. *Kang H., Zhang X., Si L. et al.* In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China // Engineering Geology. 2010. Vol. 116. Iss. 3-4. P. 333-345. DOI: [10.1016/j.enggeo.2010.09.015](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.09.015)
8. *Ловчиков А.В.* Различие в опасности горных ударов на рудниках и угольных шахтах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2017. Т. 4. № 2. С. 105-111.
9. *Qian Li, Yiyu Lu, Zhaolong Ge et al.* A New Tree-Type Fracturing Method for Stimulating Coal Seam Gas Reservoirs // Energies. 2017. Vol. 10. Iss. 9. № 1388. DOI: [10.3390/en10091388](https://doi.org/10.3390/en10091388)
10. *Yubing Liu, Zuxun Zhang, Bozhi Deng, Minghui Li.* Liquid carbon dioxide fracturing application and its effect on gas drainage in low permeability coal seams of underground coal mine // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2023. Vol. 45. Iss. 3. P. 6534-6546. DOI: [10.1080/15567036.2019.1675809](https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1675809)
11. *Slastunov S., Kolikov K., Batugin A. et al.* Improvement of Intensive In-Seam Gas Drainage Technology at Kirova Mine in Kuznetsk Coal Basin // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 3. № 1047. DOI: [10.3390/en15031047](https://doi.org/10.3390/en15031047)
12. *Klishin V.I., Opruk G.Y., Tatsienko A.L.* Technology and means of a coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 53. № 012019. DOI: [10.1088/1755-1315/53/1/012019](https://doi.org/10.1088/1755-1315/53/1/012019)
13. *Леконцев Ю.М., Сажин П.В.* Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 5. С. 137-142.
14. *Jiangwei Liu, Changyou Liu, Qiangling Yao, Guangyao Si.* The position of hydraulic fracturing to initiate vertical fractures in hard hanging roof for stress relief // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020. Vol. 132. № 104328. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2020.104328](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104328)
15. *Wenli Zhai, Fulian He, Liang Li et al.* Roof cutting mechanism and surrounding rock control of small pillar along-gob roadway driving in super high coal seam // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2023. Vol. 82. Iss. 4. № 151. DOI: [10.1007/s10064-023-03189-1](https://doi.org/10.1007/s10064-023-03189-1)
16. *Yongxin Sun, Yukai Fu, Tao Wang.* Field application of directional hydraulic fracturing technology for controlling thick hard roof: a case study // Arabian Journal of Geosciences. 2021. Vol. 14. Iss. 6. № 438. DOI: [10.1007/s12517-021-06790-4](https://doi.org/10.1007/s12517-021-06790-4)
17. *Shilova T.V., Rybalkin L.A.* Study of polymer compositions for formation of impermeable inclusions in rock mass // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 991. № 012008. DOI: [10.1088/1755-1315/991/1/012008](https://doi.org/10.1088/1755-1315/991/1/012008)
18. *Сердюков С.В., Курленя М.В., Патутин А.В.* К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 6. С. 6-14.
19. *Oldenburg C.M., Dobson P.F., Yuxin Wu et al.* Hydraulic fracturing experiments at 1500 m depth in a deep mine: Highlights from the KISMET project // 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 13-15 February 2017, Stanford, CA, USA. Stanford Geothermal Program, 2017. № SGP-TR-212.
20. *Rubtsova E.V., Skulkin A.A.* Hydraulic fracturing stress measurement in underground salt rock mines at Upper Kama Deposit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 134. № 012049. DOI: [10.1088/1755-1315/134/1/012049](https://doi.org/10.1088/1755-1315/134/1/012049)



21. Qiang Xu, Qiangling Yao, Changhao Shan, Chuangkai Zheng. A New Hydraulic Fracturing Instrument to Measure In Situ Stress and Its Application in Chahasu Coal Mine // *Geotechnical Testing Journal*. 2022. Vol. 45. Iss. 5. P. 901-914. DOI: [10.1520/GTJ20210207](https://doi.org/10.1520/GTJ20210207)
22. Сердюков С.В., Курленя М.В. Применение локального гидроразрыва для интенсификации термогравитационного дренирования пласта // XII Международные научный конгресс и выставка «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016»: Материалы Международной научной конференции «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью», 18-22 апреля 2016, Новосибирск, Россия. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2016. Т. 2. С. 8-13.
23. Yunzhong Jia, Zhaohui Lu, Qiquan Xiong et al. Laboratory characterization of cyclic hydraulic fracturing for deep shale application in Southwest China // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021. Vol. 148. № 104945. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2021.104945](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104945)
24. Li Zhuang, Kwang Yeom Kim, Melvin Diaz, Sun Yeom. Evaluation of water saturation effect on mechanical properties and hydraulic fracturing behavior of granite // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020. Vol. 130. № 104321. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2020.104321](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104321)
25. Bobrova M., Stanchits S., Shevtsova A. et al. Laboratory Investigation of Hydraulic Fracture Behavior of Unconventional Reservoir Rocks // *Geosciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 7. № 292. DOI: [10.3390/geosciences11070292](https://doi.org/10.3390/geosciences11070292)
26. Deb P., Düber S., Guarnieri Calò Carducci C., Clauser C. Laboratory-scale hydraulic fracturing dataset for benchmarking of enhanced geothermal system simulation tools // *Scientific Data*. 2020. Vol. 7. № 220. DOI: [10.1038/s41597-020-0564-x](https://doi.org/10.1038/s41597-020-0564-x)
27. Patutin A.V., Serdyukov S.V. Laboratory stands for hydraulic fracturing simulation in a nonuniform stress field // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 991. № 012035. DOI: [10.1088/1755-1315/991/1/012035](https://doi.org/10.1088/1755-1315/991/1/012035)
28. Feiteng Zhang, Xiangyu Wang, Jianbiao Bai et al. Fixed-length roof cutting with vertical hydraulic fracture based on the stress shadow effect: A case study // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022. Vol. 32. Iss. 2. P. 295-308. DOI: [10.1016/j.ijmst.2021.09.007](https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.09.007)
29. Pavlov V.A., Serdyukov S.V., Martynyuk P.A., Patutin A.V. Optimisation of borehole-jack fracturing technique for in situ stress measurement // *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 13. Iss. 5. P. 451-457. DOI: [10.1080/19386362.2017.1363347](https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1363347)
30. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Моделирование геомеханических процессов в окрестности нефтяных и газовых скважин. М.: Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, 2018. 528 с.
31. Shaohua Gai, Zhihong Nie, Xinbin Yi et al. Study on the Interference Law of Staged Fracturing Crack Propagation in Horizontal Wells of Tight Reservoirs // *ACS Omega*. 2020. Vol. 5. Iss. 18. P. 10327-10338. DOI: [10.1021/acsomega.9b04423](https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04423)
32. Kalam S., Afagwu C., Al Jaber J. et al. A review on non-aqueous fracturing techniques in unconventional reservoirs // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021. Vol. 95. № 104223. DOI: [10.1016/j.jngse.2021.104223](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104223)
33. Jiangzhan Chen, Xibing Li, Han Cao, Linqi Huang. Experimental investigation of the influence of pulsating hydraulic fracturing on pre-existing fractures propagation in coal // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 189. № 107040. DOI: [10.1016/j.petrol.2020.107040](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107040)
34. Wenfeng Li, Frash L.P., Carey J.W. et al. Injection Parameters That Promote Branching of Hydraulic Cracks // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. Iss. 12. № e2021GL093321. DOI: [10.1029/2021GL093321](https://doi.org/10.1029/2021GL093321)
35. Tiankui Guo, Zhenhua Rui, Zhanqing Qu, Ning Qi. Experimental study of directional propagation of hydraulic fracture guided by multi-radial slim holes // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. Vol. 166. P. 592-601. DOI: [10.1016/j.petrol.2018.03.102](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.102)
36. Zhaoquan Guo, Shouceng Tian, Qingling Liu et al. Experimental investigation on the breakdown pressure and fracture propagation of radial borehole fracturing // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 208. Part A. № 109169. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.109169](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109169)
37. Shaojie Zuo, Zhaolong Ge, Kai Deng et al. Fracture initiation pressure and failure modes of tree-type hydraulic fracturing in gas-bearing coal seams // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 77. № 103260. DOI: [10.1016/j.jngse.2020.103260](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103260)
38. Рубцова Е.В. Стенд трехосного независимого нагружения для физического моделирования процесса измерительного гидроразрыва // XI Международные научный конгресс и выставка «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015»: Материалы Международной научной конференции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология», 13-25 апреля 2015, Новосибирск, Россия. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2015. Т. 3. С. 211-215.
39. Рубцова Е.В., Скулкин А.А. О физическом моделировании процесса измерительного гидроразрыва в модельных образцах при их неравнокомпонентном нагружении // *Проблемы недропользования*. 2017. № 2 (13). С. 42-46. DOI: [10.18454/2313-1586.2017.02.042](https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.02.042)
40. Качальский В.Г., Леонтьев А.В., Рубцова Е.В. Портативный регистратор давления в составе комплекса «Гидроразрыв» для экспериментального определения напряжений в массиве горных пород // XV Международный научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: Материалы Международной научной конференции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология», 24-26 апреля 2019, Новосибирск, Россия. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2019. Т. 2. № 4. С. 38-44. DOI: [10.33764/2618-981X-2019-2-4-38-44](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-4-38-44)
41. Quan Gan, Elsworth D., Alpern J.S. et al. Breakdown pressures due to infiltration and exclusion in finite length boreholes // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015. Vol. 127. P. 329-337. DOI: [10.1016/j.petrol.2015.01.011](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.01.011)
42. Khadraoui S., Hachemi M., Allal A. et al. Numerical and experimental investigation of hydraulic fracture using the synthesized PMMA // *Polymer Bulletin*. 2021. Vol. 78. Iss. 7. P. 3803-3820. DOI: [10.1007/s00289-020-03300-6](https://doi.org/10.1007/s00289-020-03300-6)
43. Mouli-Castillo J., Kendrick J.E., Lightbody A. et al. Cyclical hydraulic pressure pulses reduce breakdown pressure and initiate staged fracture growth in PMMA // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2024. Vol. 10. Iss. 1. № 65. DOI: [10.1007/s40948-024-00739-z](https://doi.org/10.1007/s40948-024-00739-z)



44. Патутин А.В., Скулкин А.А. Гидравлический разрыв пересекающихся скважин в неоднородном поле напряжений: лабораторные исследования // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: Тезисы докладов Международной конференции, 11-14 сентября 2023, Томск, Россия. Томск: Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2023. С. 176-177.
45. Азаров А.В., Патутин А.В., Сердюков С.В. О форме трещин гидроразрыва в окрестности сопряжения скважины с боковым стволом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 5. С. 49-62. DOI: [10.15372/FTPRPI20220505](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220505)
46. Патутин А.В., Скулкин А.А., Прасолова В.С. Физическое моделирование гидроразрыва скважины с боковым стволом в искусственных блоках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 2. С. 12-20. DOI: [10.15372/FTPRPI20230202](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230202)
47. Jing-Nan Dong, Guang-Jie Yuan, Xiang-Yang Wang et al. Experimental study of multi-timescale crack blunting in hydraulic fracture // Petroleum Science. 2021. Vol. 18. Iss. 1. P. 234-244. DOI: [10.1007/s12182-020-00479-1](https://doi.org/10.1007/s12182-020-00479-1)
48. Панов А.В., Колыхалов И.В. Численное и экспериментальное моделирование развития продольных трещин множественного гидроразрыва вязким флюидом // XVII Международный научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: Материалы Международной научной конференции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология», 19-21 мая 2021, Новосибирск, Россия. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2021. Т. 2. № 4. С. 41-51. DOI: [10.33764/2618-981X-2021-2-4-41-51](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-4-41-51)
49. Zi-Xiao Xie, Xiao-Guang Wu, Teng-Da Long et al. Visualization of hydraulic fracture interacting with pre-existing fracture // Petroleum Science. 2023. Vol. 20. Iss. 6. P. 3723-3735. DOI: [10.1016/j.petsci.2023.07.014](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.07.014)
50. Leontiev A., Rubtsova E. Analysis of Crack Formation in Model Specimens During Hydraulic Fracturing in Holes // Trigger Effects in Geosystems. Springer, 2019. P. 247-256. DOI: [10.1007/978-3-030-31970-0\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_27)
51. Qiao Lu, El-Fayoumi A., Adachi J. et al. Laboratory demonstration of the impact of weak interfaces and layered rock properties on hydraulic fracture containment and height growth // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2023. Vol. 9. Iss. 1. № 113. DOI: [10.1007/s40948-023-00649-6](https://doi.org/10.1007/s40948-023-00649-6)
52. Кю Н.Г. Создание сопряженных ориентированных трещин флюидоразрывом породного массива с использованием скважин в качестве направляющих его фронта // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 5. С. 115-124. DOI: [10.15372/FTPRPI20200513](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200513)
53. Коноплев Ю.П., Демченко А.Г., Демченко А.А. Нефтяная шахта – технология, позволяющая обеспечить половину добычи нефти в XXI в. на открытых и отработанных месторождениях России // Недропользование XXI век. 2020. № 1 (83). С. 46-55.
54. Лизункин М.В., Бейдин А.В. Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород Стрельцовского рудного поля // Геомеханика в горном деле: Доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 4-5 июня 2014, Екатеринбург, Россия. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2014. С. 30-38.
55. Белов С.В. Горногеологические и горнотехнические условия разработки углей на участке «Поле шахты Карагайлинская» // Междисциплинарные подходы в биологии, медицине и науках о Земле: теоретические и прикладные аспекты: Материалы симпозиума XVIII (L) Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Образование, наука, инновации: вклад молодых исследователей», приуроченной к 50-летию КемГУ, 24-29 апреля 2023, Кемерово, Россия. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2023. Вып. 24. С. 118-120.
56. Kang H., Zhang X., Si L. et al. In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China // Engineering Geology. 2010. Vol. 116. Iss. 3-4. P. 333-345. DOI: [10.1016/j.enggeo.2010.09.015](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.09.015)
57. Козырев А.А. Современные результаты экспериментального изучения природных напряжений в верхней части земной коры и проблемы горного давления // Геомеханика в горном деле: Доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 4-5 июня 2014, Екатеринбург, Россия. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2014. С. 39-53.
58. Peng Li, Meifeng Cai, Qifeng Guo et al. Current stress field and its relationship to tectonism in a coal mining district, central China, for underground coal energy exploration // Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 5313-5328. DOI: [10.1016/j.egyr.2022.04.008](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.008)
59. Патент № 2730688 РФ. Способ направленного гидроразрыва угольного пласта / С.В.Сердюков, А.В.Патутин, А.В.Азаров, Л.А.Рыбалкин, Т.В.Шилова. Опубл. 25.08.2020. Бюл. № 24.
60. Langbauer C., Tehrani F.F., Mastobaev B. A holistic review on hydraulic fracturing stimulation laboratory experiments and their transition to enhanced geothermal system field research and operations // Liquid and Gaseous Energy Resources. 2021. Vol. 1. Iss. 1. P. 30-63. DOI: [10.21595/Ager.2021.22043](https://doi.org/10.21595/Ager.2021.22043)

**Авторы:** Андрей Владимирович Патутин, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [andrey.patutin@gmail.com](mailto:andrey.patutin@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3240-7134> (Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия), Александр Александрович Скулкин, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0005-7733-7482> (Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия), Леонид Алексеевич Рыбалкин, канд. техн. наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2648-1909> (Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия), Андрей Николаевич Дробчик, инженер-исследователь, <https://orcid.org/0009-0002-7567-6497> (Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Анализ трансформации напряженного состояния горных пород вблизи горизонтальной скважины при проведении кислотной обработки на основе метода численного моделирования

С.Н.Попов<sup>1</sup>, С.Е.Чернышов<sup>2</sup>✉, Ванг Ксяюпу<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>3</sup> Китайский нефтяной университет, Циндао, Китай

**Как цитировать эту статью:** Попов С.Н., Чернышов С.Е., Ванг Ксяюпу. Анализ трансформации напряженного состояния горных пород вблизи горизонтальной скважины при проведении кислотной обработки на основе метода численного моделирования // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16413. С. 110-118. [EDN VOBTXU](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.16413)

### Аннотация

Приведен обзор оценки и моделирования напряженного состояния горных пород в околоствольной зоне горизонтальных скважин при проведении кислотного воздействия на пласт с целью повышения эффективности разработки месторождений нефти и газа. Разработана численная конечно-элементная модель околоствольной зоны продуктивного пласта вскрытого горизонтальным участком ствола скважины на примере одного из нефтяных месторождений Пермского края. Определено распределение физико-механических свойств терригенного коллектора вблизи скважины с учетом трансформации под воздействием глинокислотного реагента для различного периода времени его закачки. Выполнено многовариантное численное моделирование и определено распределение горизонтальных и вертикальных напряжений в околоствольной зоне с учетом различной величины депрессии на пласт и изменения упруго-прочностных свойств в зависимости от области проникновения глинокислоты. Установлено, что изменение модуля упругости и коэффициента Пуассона под воздействием кислоты приводит к уменьшению напряжений в околоствольной зоне. Анализ поля распределения напряжений на основе критерия Кулона – Мора показал, что минимальный коэффициент запаса прочности породы даже после воздействия глинокислоты составляет 1,5, таким образом, в рассматриваемых условиях моделирования горизонтальной скважины порода-коллектор остается устойчивой и зон разрушения породы не возникает.

### Ключевые слова

горизонтальная скважина; упруго-прочностные свойства; околоствольная зона; численная модель; метод конечных элементов; напряженное состояние; коэффициент запаса прочности; кислотная обработка; устойчивость стенок ствола скважины

### Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания «Исследование свойств нефтегазовых пластовых систем при физическом, геомеханическом и физико-химическом воздействии на трудноизвлекаемые запасы углеводородов для повышения эффективности их освоения» (FMME 2025-0010).

Поступила: 20.03.2024

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 27.02.2025

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Кислотная обработка пласта является одним из наиболее часто применяемых методов для интенсификации притока углеводородов в скважину, а также очистки околоствольной зоны от компонентов, применяемых при бурении технологических жидкостей [1-3]. Несмотря на высокую эффективность данного метода, он имеет и недостатки – под воздействием кислотных реагентов происходит растворение не только кольматирующих околоствольную зону веществ, но и минералов скелета породы. С одной стороны, такой эффект проявляется в увеличении проницаемости, с другой – химическое взаимодействие породы и кислоты должно привести к ухудшению упруго-



прочностных свойств продуктивных пластов. Если при кислотной обработке карбонатного коллектора воздействие кислотой обычно приводит к появлению «червоточин» [4-6] и не должно существенно повлиять на устойчивость ствола скважины, то для терригенного пласта вследствие растворения межзернового цемента породы будет происходить существенное снижение модуля Юнга и пределов прочности породы-коллектора [7, 8].

При изучении кислотного воздействия на образцах керна часто исследуют влияние данного реагента на проницаемость, а также определяют количество поровых объемов для прорыва кислоты и число Дамкохлера [4, 6, 9]. В то же время весьма слабо изучено влияние кислотных составов на физико-механические свойства пород-коллекторов. В некоторых работах зарубежных специалистов [9-11] изучалось влияние кислотной обработки на динамические модуль Юнга и коэффициент Пуассона, однако исследовались только карбонатные коллекторы и фильтрация небольшого количества порового объема кислотного состава – до его «прорыва» с противоположного торца образцов. Вместе с тем, как показано в публикациях [12-14] на основе исследований образцов керна, в породе-коллекторе могут изменяться фильтрационно-емкостные свойства не только под воздействием физико-химически активных жидкостей, но и изменяющихся эффективных напряжений. В таком случае проявление сопряженных механических и химических эффектов будет еще более интенсивно трансформировать природные свойства горных пород-коллекторов (пористость, проницаемость, физико-механические свойства и др.) и влиять на напряженно-деформированное состояние пласта, устойчивость скважин и их продуктивность (приемистость).

При моделировании кислотного воздействия на пласт обычно исследуется геометрия образующихся червоточин и их влияние на проницаемость [15-17], а также возможные химические реакции взаимодействия реагента с минералами породы [18], однако влияние таких эффектов на напряженно-деформированное состояние околоскважинной зоны и разрушение пород изучено весьма слабо.

Одним из наиболее эффективных методов разработки залежей нефти и газа является применение горизонтальных скважин [19-21], так как в таком случае увеличивается площадь вскрытия продуктивной толщи. Особенно эффективно применение скважин с горизонтальным стволом в низкопроницаемых коллекторах. Такой тип скважин наиболее эффективно применяют при разработке низкопроницаемых пластов [21-24], при этом создают многостадийные трещины гидроразрыва, в том числе используя в виде жидкости гидроразрыва кислотные реагенты [23-25]. Несмотря на то, что эффективность производства ГРП напрямую связана с достоверным определением упруго-прочностных свойств и напряженного состояния пласта, данная проблема практически не исследовалась с точки зрения совместных геомеханических и химических эффектов.

Проблемы устойчивости скважин весьма актуальны в связи с тем, что стенки скважин могут обрушиться в процессе бурения и эксплуатации, что может привести к возникновению аварийной ситуации при разработке месторождений нефти и газа, особенно для горизонтальных [26], глубоких и сверхглубоких скважин [27]. Для решения подобного класса задач в настоящее время повсеместно применяют методы 1D геомеханического моделирования [28-30]. Однако такой подход имеет свои недостатки: расчет напряжений обычно производится только на стенке скважины, поэтому нельзя определить их распределение на удалении от стенки; не учитывается конструкция скважины (колонна, цементный камень); не возможен расчет напряженного состояния вблизи перфорационных каналов, либо перфорационные отверстия учитываются в идеальном случае в виде цилиндрических поверхностей [31].

В данной статье на основе применения численного метода конечных элементов рассмотрено, каким образом изменение упруго-прочностных свойств при кислотной обработке влияет на трансформацию напряжений в околоскважинной зоне и устойчивость открытого ствола горизонтальной скважины, вскрывшей терригенный коллектор. Численное моделирование осуществлялось на примере скважины, пробуренной на территории одного из нефтяных месторождений юга Пермского края. В качестве реагента рассматривалась глинокислота, которая достаточно часто применяется для такого типа коллектора, прежде всего из-за способности растворять глинистые частицы [32, 33].

### Методология

В публикациях [7, 8] приведены результаты лабораторных экспериментов, в рамках которых изучалось воздействие различного числа поровых объемов кислотного реагента на упруго-прочностные свойства образцов керна, отобранных из терригенного коллектора. Образцы керна имели

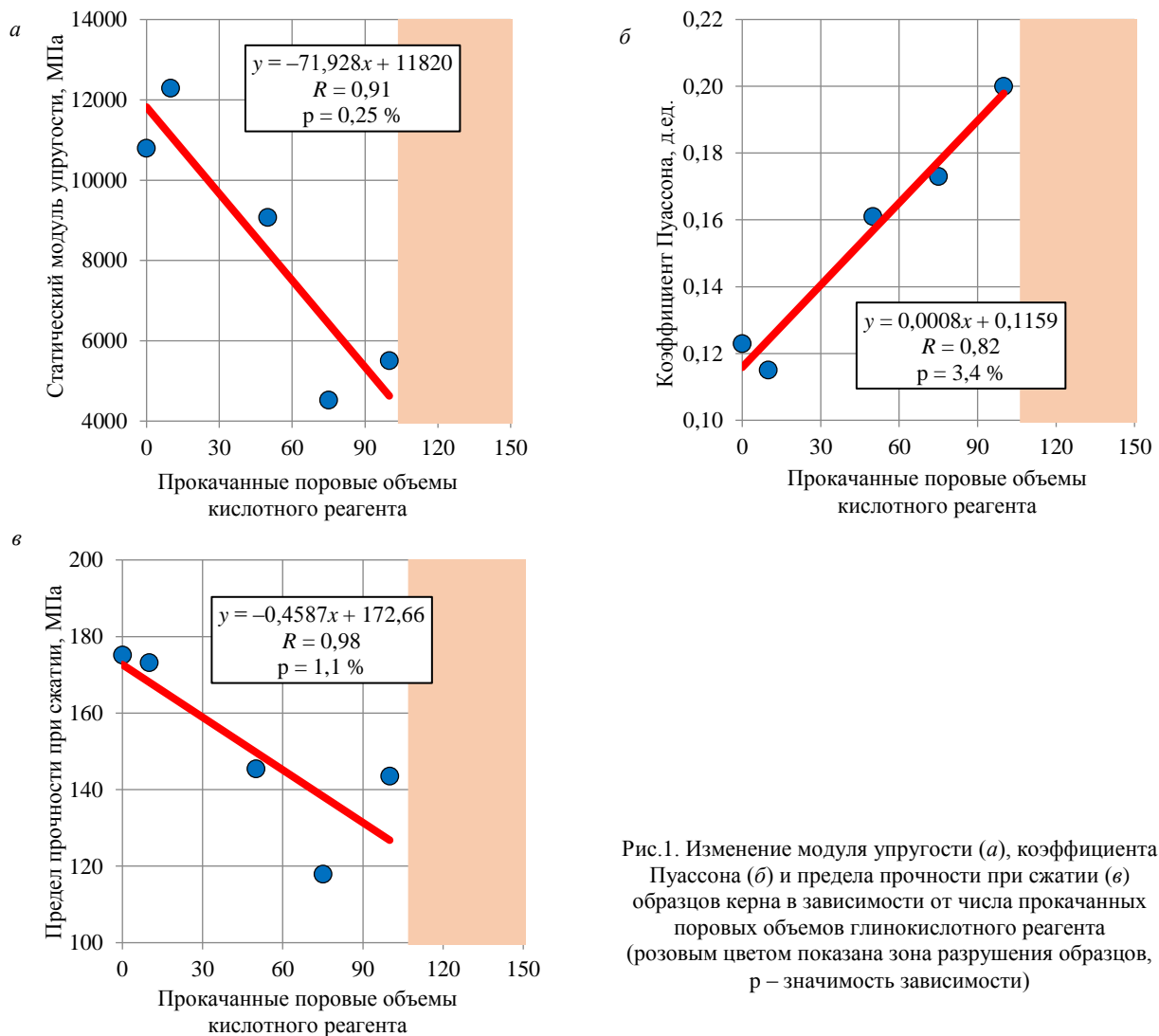


Рис.1. Изменение модуля упругости (а), коэффициента Пуассона (б) и предела прочности при сжатии (в) образцов керна в зависимости от числа прокачанных поровых объемов глинокислотного реагента (розовым цветом показана зона разрушения образцов, p – значимость зависимости)

длину 6 см и диаметр 3 см. В качестве реагента использовалась глинокислота, в состав которой входило 12 % соляной кислоты (HCl) и 3 % плавиковой кислоты (HF). В процессе экспериментов в образцах создавалась остаточная водонасыщенность, а нефтенасыщенность моделировалась с помощью керосина. В начале эксперимента в образцы нагнетали керосин, затем фильтровали различный поровый объем кислотного реагента и выдерживали образцы под его воздействием в течение 4 ч и в конце эксперимента снова нагнетали керосин. В результате исследований было установлено, что кислотная обработка пласта приводит к уменьшению модуля Юнга и предела прочности при сжатии и к увеличению коэффициента Пуассона (рис.1).

Как видно из рис.1, кислотная обработка приводила к уменьшению модуля упругости почти в три раза, предел прочности при сжатии снижался на 18 %, для коэффициента Пуассона наблюдалось увеличение примерно в два раза. При увеличении числа поровых объемов свыше 100 происходило разрушение образцов после фильтрации кислоты, на рис.1 область на графике выше 100 поровых объемов выделена розовым цветом. Приведена значимость зависимости, значение которой составляет менее 5 %, что говорит о применимости использованных соотношений, об этом же свидетельствуют достаточно высокие коэффициенты их корреляций. Зависимости на рис.1 использованы для численного расчета напряженного состояния горизонтальной скважины в условиях проведения кислотной обработки пласта.

Численное моделирование осуществлялось в программном комплексе конечно-элементного моделирования ANSYS [34-36]. В данном программном продукте реализован численный расчет дифференциальных уравнений, описывающий пороупругое поведение твердого тела:



$$\begin{cases} \nabla \cdot \sigma + f = 0 \text{ или } \nabla \cdot (\sigma' - \alpha p I) + f = 0, \\ \alpha \dot{\varepsilon}_v + \frac{1}{K_m} \dot{p} + \nabla \cdot q = S, \end{cases}$$

где  $\sigma$  – тензор напряжений;  $\cdot$  – оператор производной;  $\nabla \cdot$  – оператор дивергенции;  $\sigma'$  – тензор эффективных напряжений;  $\alpha$  – коэффициент Био;  $p$  – поровое давление;  $I$  – единичный тензор второго порядка;  $f$  – вектор сил;  $\varepsilon_v$  – объемные деформации скелета породы;  $K_m$  – модуль Био;  $q$  – вектор потока флюида;  $S$  – источник потока.

Также применяются соотношения для взаимосвязи напряжений и деформаций:

$$\sigma' = D \varepsilon^e,$$

где  $\varepsilon^e$  – тензор деформаций;  $D$  – матрица упругих констант.

Для описания потока флюида в пористой среде использовался закон Дарси:

$$q = -k \nabla p / \mu,$$

где  $k$  – тензор проницаемости второго порядка;  $\nabla$  – градиент-оператор;  $\mu$  – вязкость жидкости.

Для расчета поля напряжений в ANSYS создавалась конечно-элементная схема с использованием пороупругого конечного элемента *cpt212*, включающая участок пласта толщиной 20 м и скважину с открытым стволом радиусом 0,108 м (рис.2). Скважина располагалась в центре пласта на глубине 10 м от его кровли. Из-за симметрии рассматривалась только половина выбранного сечения околоскважинной зоны.

Основные физические характеристики модели для условий рассматриваемого терригенного коллектора одного из нефтяных месторождений юга Пермского края: модуль упругости породы без кислотного воздействия – 11,8 ГПа; коэффициент Пуассона породы без кислотного воздействия – 0,116 д.ед.; коэффициент Био – 0,85 д.ед.; угол внутреннего трения породы – 30 град; глубина пласта – 1500 м; вертикальное напряжение – 33 МПа; горизонтальное напряжение – 15,8 МПа; пластовое давление – 15,5 МПа; депрессия на пласт – 1; 5; 10 МПа. Вертикальное и горизонтальное напряжения рассчитывались для средней глубины залегания пласта 1500 м. В связи с тем, что величина коэффициента Био в экспериментах не определялась, он был взят постоянным, равным 0,85.

В численной модели принимались следующие граничные условия:

- на нижней границе закреплялись перемещения по направлению нормали к поверхности (нулевые перемещения по вертикальной оси);
- к верхней границе прикладывалось вертикальное напряжение, рассчитанное на основе глубины залегания пласта и средней плотности пород вышележащей толщи, равной 2200 кг/м<sup>3</sup>;
- к правой боковой поверхности прикладывалось горизонтальное напряжение, определенное на основе вертикального напряжения и величины коэффициента Пуассона породы;



Рис.2. Конечно-элементная схема, используемая для расчета напряженного состояния горизонтальной скважины в условиях проведения глинокислотной обработки пласта

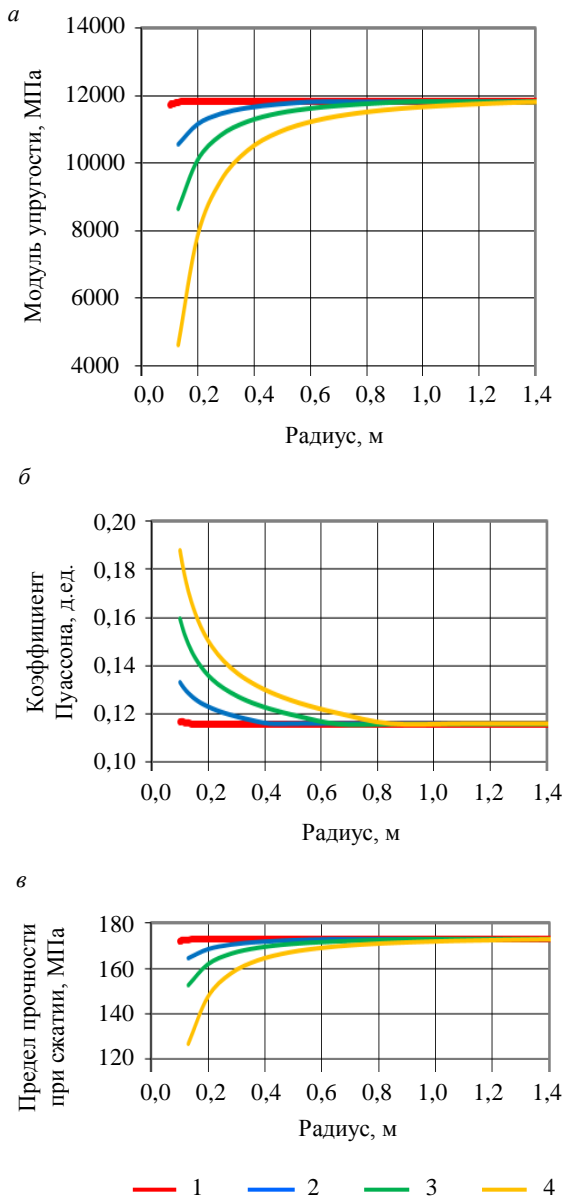


Рис.3. Изменение модуля упругости (а), коэффициента Пуассона (б) и предела прочности при сжатии (в) в зависимости от радиуса удаления от скважины и времени нагнетания глинокислотного реагента  
1 – 14 мин; 2 – 4 ч; 3 – 9 ч; 4 – 32 ч

Анализируя рис.4, 5, можно сделать вывод, что прослеживается тенденция к уменьшению напряжений в околоскважинной зоне при кислотной обработке, что связано с изменением упругих характеристик пород. Также следует отметить, что при депрессии 1 МПа в верхней и нижней областях скважины наблюдаются распределение растягивающих напряжений (отрицательные значения). Несмотря на то, что их величина небольшая – максимум 1,78 МПа (рис.4, а), предел прочности породы при растяжении может уменьшиться при воздействии кислоты, что может привести к возникновению вывалов пород на данных участках.

На следующем этапе производилась оценка прочности пород-коллекторов вблизи скважины на основе критерия Кулона – Мора. В пласте при расчетах учитывается давление флюида, поэтому данный критерий записывался в следующем виде:

- на левой границе из-за симметрии модели закреплялись перемещения по направлению нормали к поверхности (нулевые перемещения в горизонтальном направлении).

С применением разработанной конечно-элементной модели были проведены многовариантные численные расчеты напряженного состояния околоскважинной зоны, учитывающие постепенное проникновение кислоты в глубину продуктивного пласта. Следует отметить, что при этом не производился расчет нестационарной фильтрации жидкости, а область распространения кислотного реагента бралась на основе данных статьи [7]. На рис.3 показано, как меняются упруго-прочностные свойства пород на различный момент времени фильтрации и воздействия глинокислоты. Изменение данных характеристик учитывает помимо времени фильтрации реагента его воздействие при выдержке образцов без фильтрации в течение 4 ч. В процессе расчетов, кроме трансформации физико-механических свойств, варьировалась также величина депрессии на пласт, имитируя работу скважины после кислотной обработки. Величина депрессии равна 1; 5 и 10 МПа.

### Обсуждение результатов

На рис.4, 5 показано распределение горизонтальных и вертикальных напряжений в случае предельных величин депрессий (1 и 10 МПа) и времени закачки глинокислотного реагента (14 мин и 4 ч). Как видно из рис.4, 5, увеличение депрессии в большинстве расчетных вариантов приводит к увеличению величин эффективных напряжений, как горизонтальных, так и вертикальных. При максимальном времени нагнетания кислоты происходит уменьшение максимальных значений эффективных напряжений при одинаковой депрессии на пласт. Минимальные значения эффективных напряжений ведут себя следующим образом: для горизонтальной компоненты напряжений и депрессии 1 МПа они увеличиваются, при депрессии 10 МПа – уменьшаются; для вертикальной компоненты при депрессии 1 и 10 МПа – уменьшаются.



$$\sigma_1 - \alpha p = USC + (\sigma_3 - \alpha p) \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi},$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  – главные максимальные и минимальные напряжения;  $USC$  – предел прочности породы при одноосном сжатии;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $p$  – пластовое давление.

На рис.6 показаны результаты определения коэффициента запаса прочности пород-коллекторов на основе критерия Кулона – Мора при депрессии на пласт 1; 5 и 10 МПа для различного времени закачки реагента. При этом, если данный коэффициент выше 1, то это говорит об устойчивости пород, если меньше 1, то вероятно ее разрушение.

Результаты расчетов показали, что для моделируемых условий разрушение пород-коллекторов не должно происходить, хотя минимальный коэффициент запаса прочности равен 1,5, т.е. породы близки к разрушению. Как видно из рис.6, область с наименьшим коэффициентом запаса прочности находится вблизи боковой поверхности скважины, что вызвано воздействием вертикальных напряжений, которые гораздо больше горизонтальных. Уменьшение упругих свойств вследствие воздействия глинокислотного реагента приводит к уменьшению напряжений и

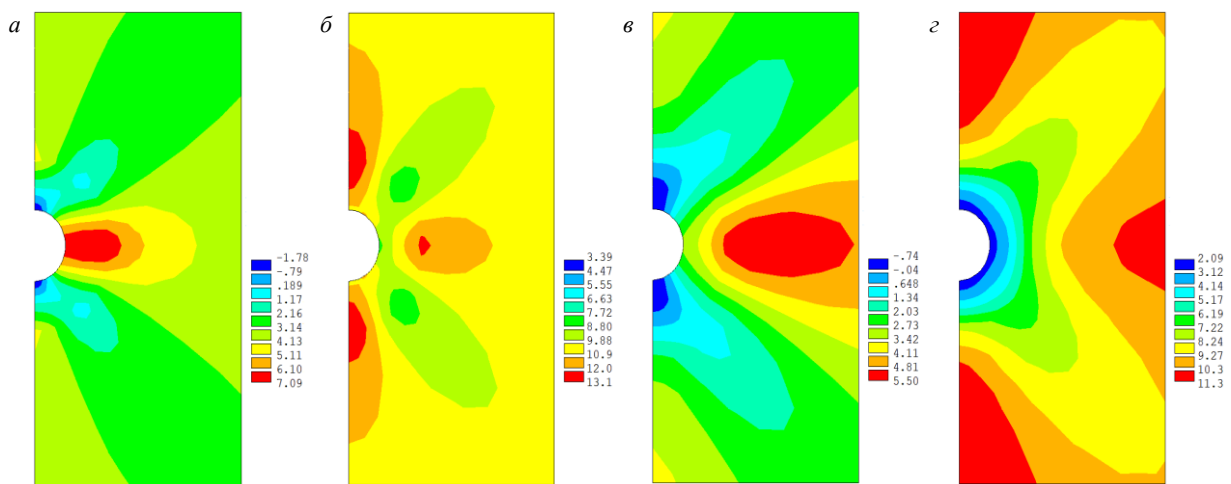


Рис.4. Распределение горизонтальных эффективных напряжений при депрессии 1 (а, в) и 10 (б, з) МПа после закачки глинокислотного реагента в течение 14 мин (а, б) и 4 ч (в, з)

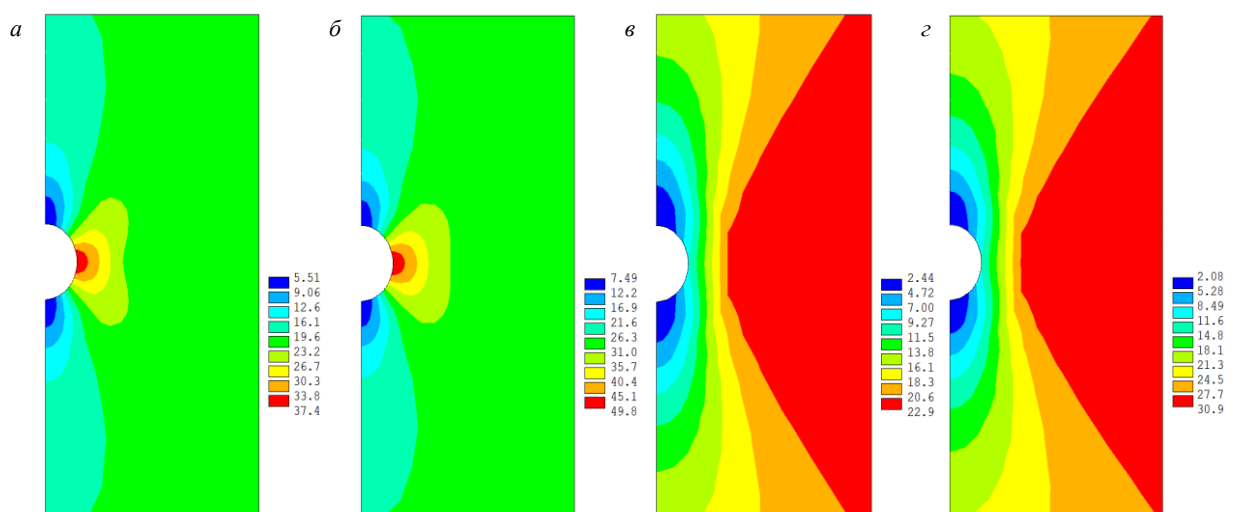


Рис.5. Распределение вертикальных эффективных напряжений при депрессии 1 (а, в) и 10 (б, з) МПа после закачки глинокислотного реагента в течение 14 мин (а, б) и 4 ч (в, з)

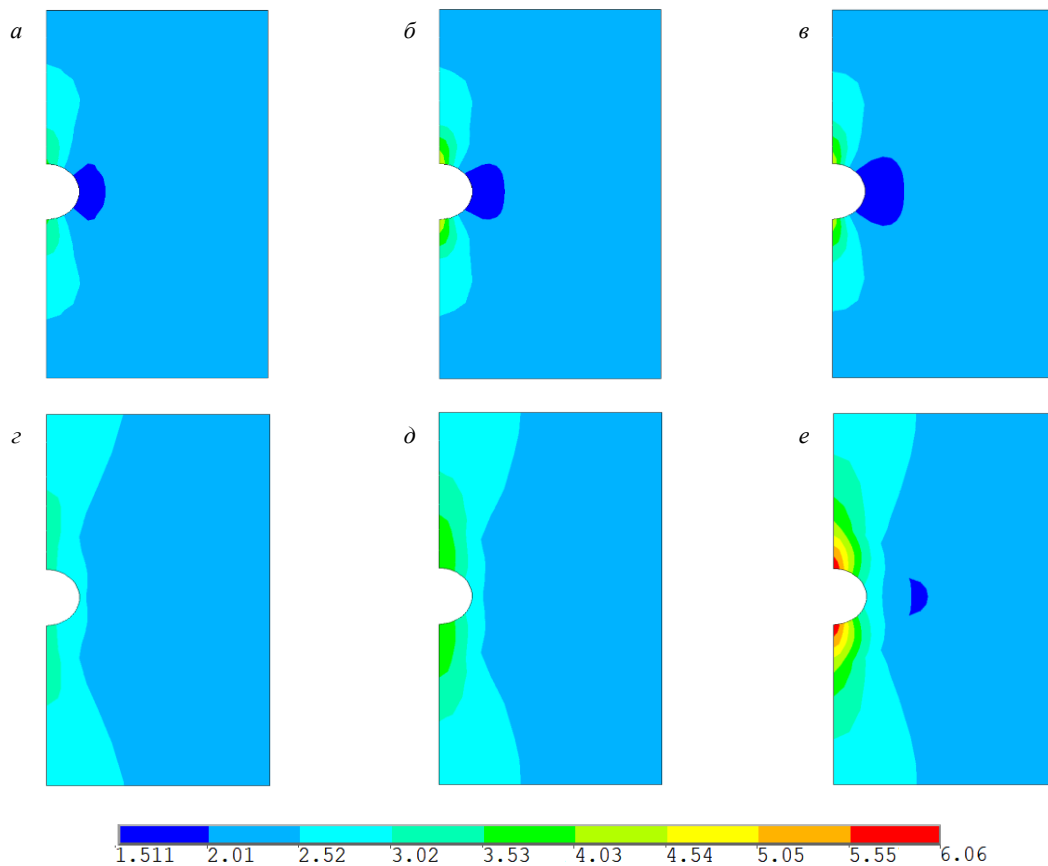


Рис.6. Распределение коэффициента запаса прочности породы вблизи скважины для депрессии 1 (а, г), 5 (б, д) и 10 (в, е) МПа после закачки глинокислотного реагента в течение 14 мин (а, б, в) и 4 ч (г, д, е)

увеличению коэффициента запаса прочности, особенно в верхней и нижней частях скважины (рис.6, е), при этом увеличение величины депрессии приводит к увеличению данного параметра в рассматриваемых областях и уменьшению в боковой области скважины.

При дальнейшем изучении рассмотренной проблемы планируется сопоставление промышленных данных по горизонтальным скважинам, в которых будет проводиться глинокислотная обработка для оценки вероятности возникновения пескопроявлений в зависимости от времени воздействия и объемов закачки реагента, а также изменения проницаемости в околоскважинной зоне.

Результаты полученных исследований могут быть применимы к терригенным породам-коллекторам Тульского и Бобриковского продуктивных объектов южной группы месторождений Пермского края с близкими фильтрационно-емкостными и физико-механическими свойствами. Отличие в значениях проницаемости приводит к изменению области фильтрации кислоты в зависимости от времени, а отличие в исходных механических свойствах приведет к другим соотношениям, описывающим связь их изменения в зависимости от прокачанного поровых объемов реагента, что может потребовать проведения дополнительных лабораторных и численных экспериментов.

### Заключение

На примере терригенного коллектора одного из нефтяных месторождений юга Пермского края проведен анализ напряженного состояния коллектора вблизи открытого ствола горизонтальной скважины с учетом трансформации упруго-прочностных свойств пород под воздействием глинокислотного реагента. По итогам выполненного анализа можно сделать следующие основные выводы:

- В рамках данной работы разработана численная конечно-элементная модель участка терригенного пласта, включающая открытый ствол горизонтальной скважины и позволяющая учитывать изменение упруго-прочностных свойств пород-коллекторов при глинокислотной обработке.
- С использованием разработанной модели проведено многовариантное численное моделирование напряженного состояния коллектора при различных величинах депрессии на пласт и времени фильтрации глинокислотного реагента.



- Анализ поля распределения напряжений показал, что увеличение депрессии приводит к росту величин эффективных напряжений в коллекторе, а следствием изменения упругих свойств пород под воздействием кислоты является, наоборот, их уменьшение.
- На основе применения критерия Кулона – Мора определено распределение коэффициента запаса прочности пород, которое показало, что коллектор находится в стабильном состоянии как без воздействия глинокислоты, так и при обработке околоскважинной зоны данным реагентом. При этом увеличение депрессии на пласт приводит к уменьшению коэффициента запаса прочности породы, а воздействие кислоты – к его увеличению.
- Разработанная в рамках работы численная модель может быть использована при расчете поля распределения напряжений вблизи горизонтальных скважин для других продуктивных объектов, как с учетом, так и без учета изменения упруго-прочностных свойств под воздействием не только глинокислотного реагента, но и других различных физико-химически активных жидкостей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Peifeng Jia, Chuanzhi Cui, Yingfei Sui et al. Uniform Acid Cleaning Technology and Its Application in Horizontal Wells with Open Hole Screen Tube // Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2594. № 012052. DOI: [10.1088/1742-6596/2594/1/012052](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2594/1/012052)
2. Ганиев Ш.Р., Лысенков А.В., Гафаров Ш.А. Разработка алгоритма выбора скважин и технологий солянокислотного воздействия на карбонатные пласты Республики Башкортостан // Нефтяное хозяйство. 2021. № 2. С. 77-81. DOI: [10.24887/0028-2448-2021-2-77-81](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-2-77-81)
3. Кривошеков С.Н., Кочнев А.А., Равелев К.А. Разработка алгоритма определения технологических параметров нагнетания кислотного состава при обработке призабойной зоны пласта с учетом экономической эффективности // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 587-595. DOI: [10.31897/PMI.2021.4.12](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.12)
4. Al-Arji H., Al-Azman A., Le-Hussain F., Regenauer-Lieb K. Acid stimulation in carbonates: A laboratory test of a wormhole model based on Damköhler and Péclet numbers // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 203. № 108593. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.108593](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108593)
5. Yifan Dong, Yu Lei, Ting Jin et al. Optimized Acidizing Stimulation Technology Achieves Production Increase in Ultra-High Temperature Carbonate Reservoirs // SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, 12-14 September 2023, Muscat, Sultanate of Oman. OnePetro, 2023. № SPE-215682-MS. DOI: [10.2118/215682-MS](https://doi.org/10.2118/215682-MS)
6. Alameedy U., Fatah A., Abbas A.K., Al-Yaseri A. Matrix acidizing in carbonate rocks and the impact on geomechanical properties: A review // Fuel. 2023. Vol. 349. № 128586. DOI: [10.1016/j.fuel.2023.128586](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128586)
7. Попов С.Н., Сметанников О.Ю. Численное моделирование изменения проницаемости и напряженно-деформированного состояния призабойной зоны продуктивного пласта при совместном воздействии кислотного состава и изменяющихся эффективных напряжений // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2017. № 12. С. 45-53.
8. Plotnikov V.V., Rehachev P.N., Barkovsky N.N. et al. The Effect of Acid Treatments on the Bottom Zone of Clastic Reservoir Rocks of Perm Region // SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition, 24-26 October 2016, Moscow, Russia. OnePetro, 2016. № SPE-182063-MS. DOI: [10.2118/182063-MS](https://doi.org/10.2118/182063-MS)
9. Mustafa A., Alzaki T., Aljawad M.S. et al. Impact of acid wormhole on the mechanical properties of chalk, limestone, and dolomite: Experimental and modeling studies // Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 605-616. DOI: [10.1016/j.egyr.2021.11.249](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.249)
10. Alameedy U., Alhaleem A.A., Isah A. et al. Effect of acid treatment on the geomechanical properties of rocks: an experimental investigation in Ahdeb oil field // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2022. Vol. 12. Iss. 12. P. 3425-3441. DOI: [10.1007/s13202-022-01533-x](https://doi.org/10.1007/s13202-022-01533-x)
11. Jahani N., Berge G., Haugen B. Prediction of Rock Strength with Matrix Acidizing Stimulation and Induced Wormhole by Computational Simulation Methods // ISRM Regional Symposium – EUROCK 2014, 27-29 May 2014, Vigo, Spain. OnePetro, 2014. № ISRM-EUROCK-2014-213.
12. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Сопоставление подходов к оценке сжимаемости порового пространства // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С.1008-1017. DOI: [10.31897/PMI.2022.97](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.97)
13. Петраков Д.Г., Пеньков Г.М., Золотухин А.Б. Экспериментальное исследование горного давления на проницаемость песчаника // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 244-251. DOI: [10.31897/PMI.2022.24](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.24)
14. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Определение параметров направленной разгрузки пласта на основе физического моделирования на установке истинно трехосного нагружения // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 906-914. DOI: [10.31897/PMI.2022.95](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.95)
15. Турегелдиева К.А., Жапбасбаев У.К., Асилбеков Б.К., Золотухин А.Б. Моделирование кислотной обработки призабойной зоны скважины с учетом ее ухудшенных фильтрационно-емкостных характеристик (часть 2) // Нефтяное хозяйство. 2016. № 4. С. 108-110.
16. Deng J., Mou J., Hill A.D., Zhu D. A New Correlation of Acid-Fracture Conductivity Subject to Closure Stress // SPE Production & Operation. 2012. Vol. 27. Iss. 2. P. 158-169. DOI: [10.2118/140402-PA](https://doi.org/10.2118/140402-PA)
17. Mingwei Wang, Wen Zhou, Song Li, Wen Wu. Simulated Investigation in Wormhole Expansion Law of Gelling Acid Etching and Its Influencing Factors in Deep Carbonate Reservoirs // Gels. 2022. Vol. 8. Iss. 8. № 470. DOI: [10.3390/gels8080470](https://doi.org/10.3390/gels8080470)
18. Хасанов М.М., Мальцев А.А. Моделирование кислотной обработки полимиктового коллектора // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 678-687. DOI: [10.31897/PMI.2021.5.7](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.7)



19. Сулейманова М.В., Трофимчук А.С., Хабибуллин Г.И. Опыт применения нагнетательных горизонтальных скважин при разработке терригенных коллекторов на месторождениях ООО «РН-Юганскнефтегаз» // Нефтяное хозяйство. 2023. № 1. С. 23-27. DOI: [10.24887/0028-2448-2023-1-23-27](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-1-23-27)
20. Деряев А.Р. Управление траекторией скважины и контроль за пространственным положением ствола // SOCAR Proceedings. 2023. Спец. вып. № 2. С. 1-6. DOI: [10.5510/OGP2023SI200870](https://doi.org/10.5510/OGP2023SI200870)
21. Муртазин Р.Р., Аксаков А.В., Ямилов И.М. и др. Исследование развития продольных трещин при проведении гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах // Нефтяное хозяйство. 2023. № 2. С. 90-94. DOI: [10.24887/0028-2448-2023-2-90-94](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-2-90-94)
22. Осоргин П.А., Каишапов А.А., Егоров Е.Л. и др. Опыт реализации систем разработки на основе горизонтальных скважин с множественными гидроразрывами пласта на Приобском лицензионном участке ООО «РН-Юганскнефтегаз» // Нефтяное хозяйство. 2023. № 6. С. 38-43. DOI: [10.24887/0028-2448-2023-6-38-43](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-6-38-43)
23. Li W., Chen L., Wang X. et al. Acid Fracturing Technology and Effect Evaluation of Carbonate Horizontal Well in Fuman Oilfield // Journal of Physics: Conference Series. 2024. Vol. 2679. № 012010. DOI: [10.1088/1742-6596/2679/1/012010](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2679/1/012010)
24. Fei Liu, Yu Fan, Li Li et al. Case Study of Successfully Staged Acid Fracturing on the Ultra-Deep Horizontal Well for the Qixia Fm HTHP Tight Carbonate Gas Reservoir in China // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. № 917740. DOI: [10.3389/fenrg.2022.917740](https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.917740)
25. 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, United Arab Emirates. OnePetro, 2017. № SPE-188683-MS. DOI: [10.2118/188683-MS](https://doi.org/10.2118/188683-MS)
26. Козырев А.С., Ермолаев Н.И., Мишин А.В. и др. Технические решения по стабилизации ствола горизонтальных скважин при наличии угольных отложений // Нефтяное хозяйство. 2023. № 4. С. 28-33. DOI: [10.24887/0028-2448-2023-4-28-33](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-4-28-33)
27. Двойников М.В., Сидоркин Д.И., Юртаев С.Л. и др. Бурение глубоких и сверхглубоких скважин с целью поиска и разведки новых месторождений полезных ископаемых // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 945-955. DOI: [10.31897/PMI.2022.55](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.55)
28. Лутфуллин А.А., Гирфанов И.И., Усманов И.Т., Сотников О.С. Создание отечественного программного обеспечения для геомеханического моделирования // Нефтяное хозяйство. 2021. № 7. С. 49-52. DOI: [10.24887/0028-2448-2021-7-49-52](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-7-49-52)
29. Tappi N., Cherdasa J.R. 1D Geomechanical Model For Wellbore Stability in Z Field, Y Well Sanga Sanga Working Area, Kutai Basin // Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology. 2023. Vol. 8. № 02-2. P. 72-84. DOI: [10.25299/jgeet.2023.8.02-2.13871](https://doi.org/10.25299/jgeet.2023.8.02-2.13871)
30. Linsheng Wang, Xinpui Shen, Baocheng Wu et al. Integrated Analysis of the 3D Geostress and 1D Geomechanics of an Exploration Well in a New Gas Field // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 2. № 806. DOI: [10.3390/en16020806](https://doi.org/10.3390/en16020806)
31. Fallahzadeh S.H., Shadizadeh S.R., Pourafshary P., Zare M.R. Modeling the Perforation Stress Profile for Analyzing Hydraulic Fracture Initiation in a Cased Hole // Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 31 July – 7 August, 2010, Tinapa – Calabar, Nigeria. OnePetro, 2010. № SPE-136990-MS. DOI: [10.2118/136990-MS](https://doi.org/10.2118/136990-MS)
32. Магадова Л.А., Сиротин А.Н., Пахомов М.Д., Давлетов З.Р. Определение растворяющей способности фторсодержащих кислотных систем по отношению к кварцевой составляющей породы терригенного коллектора // Территория «Нефтегаз». 2020. № 7-8. С. 72-80.
33. Магадова Л.А., Давлетишина Л.Ф., Пахомов М.Д., Давлетов З.Р. Осадкообразование при взаимодействии кислотных составов с минералами терригенного коллектора // Нефтепромысловое дело. 2015. № 9. С. 31-36.
34. Чернышов С.Е., Попов С.Н., Варушкин С.В. и др. Научное обоснование методов вторичного вскрытия фаменских отложений юго-востока Пермского края на основании геомеханического моделирования // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 732-743. DOI: [10.31897/PMI.2022.51](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.51)
35. Jiecheng Zhang, Moridis G., Blasingame T. Message Passing Interface (MPI) Parallelization of Iteratively Coupled Fluid Flow and Geomechanics Codes for the Simulation of System Behavior in Hydrate-Bearing Geologic Media. Part 1: Methodology and Validation // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. 2022. Vol. 25. Iss. 03. P. 600-620. DOI: [10.2118/206161-PA](https://doi.org/10.2118/206161-PA)
36. Харламов С.Н., Джанхорбани М., Зайковский В.В. Транспорт шлама буровым раствором в горизонтальных скважинах. Часть 1. Моделирование структуры дисперсных частиц // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 10. С. 34-48. DOI: [10.18799/24131830/2023/10/4433](https://doi.org/10.18799/24131830/2023/10/4433)

**Авторы:** Сергей Николаевич Попов, д-р техн. наук, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0002-1110-7802> (Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия), Сергей Евгеньевич Чернышов, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, [nirgnf@bk.ru](mailto:nirgnf@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2034-3014> (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), Ванг Ксяопу, д-р наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-1013-2691> (Китайский нефтяной университет, Циндао, Китай).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Глушение скважин с контролем поглощения

Д.С.Садуакасов<sup>1</sup>, А.Т.Жолбасарова<sup>1</sup>, Р.У.Баямирова<sup>1</sup>, А.Р.Тогашева<sup>1</sup>, М.Т.Табылганов<sup>1</sup>, М.Д.Сарбопеева<sup>1</sup>, А.Г.Касанова<sup>1</sup>, В.Н.Гусаков<sup>2</sup>, А.Г.Телин<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup> Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова, Актау, Республика Казахстан

<sup>2</sup> Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

<sup>3</sup> ООО «Уфимский научно-технический центр», Уфа, Республика Башкортостан, Россия

**Как цитировать эту статью:** Садуакасов Д.С., Жолбасарова А.Т., Баямирова Р.У., Тогашева А.Р., Табылганов М.Т., Сарбопеева М.Д., Касанова А.Г., Гусаков В.Н., Телин А.Г. Глушение скважин с контролем поглощения // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16420. С. 119-135. [EDN SBXUTZ](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.16420)

### Аннотация

Освоение новых месторождений с низкопроницаемыми коллекторами потребовало внедрения новых технологий добычи, из которых наиболее значимыми для глушения и подземного ремонта скважин явились многотоннажные гидроразрывы пласта (ГРП), одновременная эксплуатация двух-трех объектов разработки одной сеткой скважин, а также повышение темпов отбора жидкости. Эти глобальные решения в разработке месторождений привели к необходимости поиска новых эффективных материалов и технологий глушения скважин. Статья посвящена анализу проблем, связанных с процессом глушения добывающих скважин на месторождениях, характеризующихся повышенной трещиноватостью, как естественной, так и искусственной (вследствие ГРП), с пониженным пластовым давлением и высоким газовым фактором. Актуальность анализа обусловлена увеличением количества объектов разработки, на которых возникают осложнения при глушении скважин. Особое внимание уделяется техническим решениям, направленным на сохранение фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны пласта, препятствующих поглощению технологической жидкости, а также блокирующим проявление газа. Приводится классификация блок-пачек, применяемых при глушении, исходя из природы технологической жидкости. Рассмотрены суспензионные загущенные водно-солевые растворы, образующие на поверхности горной породы водонепроницаемую корку, которая предотвращает проникновение воды и водных растворов в пласт. Такой подход позволяет обеспечивать безопасность и эффективность проведения операций глушения, особенно при работе с пластами, в которых сохранение водонасыщенности и предотвращение попадания водной фазы имеют критическое значение. Выявлены современные тенденции развития технологии, и намечены перспективные направления дальнейшего совершенствования глушения скважин с контролем поглощения.

### Ключевые слова

глушение скважин; ремонт скважин; блокирующий состав; фильтрация; контроль поглощения; реологические свойства

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19679430).

Поступила: 29.03.2024

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 26.02.2025

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Статья представляет собой обзор научно-технической литературы, посвященной проблеме глушения скважин с контролем поглощения за период с середины 1970-х годов по настоящее время. Актуальность работы – обобщение опубликованных материалов и определение возможности использования блокирующих составов разной природы в качестве технологических жидкостей глушения скважин в осложненных горно-геологических условиях. Особое внимание уделено блокирующим жидкостям глушения на полимерной основе, содержащим взвешенные частицы с твердой фазой, как наиболее универсальным и эффективным.



Общемировой тенденцией эксплуатации нефтяных месторождений является постепенное ухудшение структуры запасов [1-4]. Эксплуатация скважин также сопровождается ухудшением фильтрационно-емкостных характеристик призабойной зоны пласта [5, 6], прорывами газа или воды по высокопроницаемым каналам, механическим износом подземного оборудования. Для эффективного преодоления этих осложнений и поддержания целевого уровня добычи нефти необходимо проведение текущих и капитальных ремонтных работ. Один из важных этапов подготовки к проведению таких работ – глушение скважин – включает введение технологической жидкости в ствол скважины для создания противодействия с целью предотвращения нефтегазопроявлений. Анализ результатов глушения показал, что технологические жидкости оказывают существенное негативное влияние на добывной потенциал скважин в пластах с низкой проницаемостью и пониженным пластовым давлением из-за поглощения солевых растворов в продуктивный пласт [7, 8].

Глушение скважин является самой распространенной операцией, которая сопровождает скважину весь период ее эксплуатации. Все подземные и капитальные ремонты, а также обработка призабойной зоны скважин начинаются с глушения. Основные причины осложнений при глушении скважин хорошо известны. Первая по значимости связана со снижением фазовой проницаемости по нефти, происходящим из-за увеличения водонасыщенности в призабойной зоне пласта. Когда поглощается ремонтно-технологическая жидкость на водной основе при пониженных пластовых давлениях, в призабойной зоне происходит увеличение водонасыщенности, нехарактерное для пласта в целом при текущей стадии разработки. Особенно остро эта проблема возникает в низкопроницаемых гидрофильных коллекторах, и для ее устранения в жидкость глушения добавляют гидрофобизаторы из числа катионоактивных поверхностно-активных веществ (ПАВ) или проводят обработки взаимным растворителем [9]. Такие мероприятия позволяют вернуть доремонтные эксплуатационные параметры скважин, однако сопровождаются значительными дополнительными затратами.

Вторая немаловажная причина осложнения тоже связана с проникновением солевых растворов в призабойную зону – набуханием глинистых минералов и образованием труднорастворимых солей вследствие нарушения солевого равновесия [10]. При этом снижается проницаемость по жидкости и уменьшается приток нефти. Для предотвращения этих негативных явлений в жидкости глушения добавляют понизители набухания глин и ингибиторы солеотложений, которые помогают снять осложнение, но заметно удорожают процесс.

Существует еще один вид осложнений при глушении, характерный для скважин с высоким газовым фактором или объектов разработки, в разрезе которых присутствуют газовые пропластки [11]. Газопроявление при ремонте недопустимо, и для его предотвращения используют закачку растворов ПАВ в призабойную зону, чтобы прорывающийся газ образовывал пену, а это опять дополнительные затраты. Использование жидкостей с контролем поглощения принципиально снимает все указанные проблемы. Контроль поглощения осуществляется тогда, когда ремонтно-технологические жидкости обладают свойствами, препятствующими их уходу в пласт.

Цель обзора – анализ технологических решений, связанных с глушением скважин с контролем поглощения в условиях разработки месторождений с низкопроницаемыми коллекторами, включая естественную и искусственную трещиноватость, с высоким газовым фактором и пониженным пластовым давлением. Материалы, приведенные в обзорной работе, будут полезны промышленным работникам при проведении глушения скважин в сложных горно-геологических условиях.

### **Материалы и методы исследования**

Для получения эмульсионных блокирующих составов глушения применяются дегазированная нефть, дизельное топливо, конденсат, минерализованная вода, эмульгаторы, микрокальциты [12, 13]. Для получения загущенных составов используются водорастворимые полимеры синтетической природы (полиакриламид, полиакриловая кислота, поливинилпирролидон, полиэтиленоксид) и растительного происхождения (карбоксиметилцеллюлоза, гидроксизтилцеллюлоза, гидроксипропилгуар), биополимеры (ксантан, сукциноглюкан, склерогликан), а также вязкоупругие ПАВ (цивтер-ионные соединения) [13, 14]. В качестве коагулянтов для получения загущенных дисперсий применяются мел, микрокальциты, выварочный галит, доломит, сидерит [13, 14]. Для



трещиноватых коллекторов используют волокнистые материалы: асбест, торф, водонабухающие и разлагаемые синтетические волокна [15-17].

В качестве брейкеров, применяемых после глушения при освоении скважин, используются кислоты (соляная, муравьиная, уксусная, сульфаминовая); ферменты, специфичные на разложение био- и растительных полимеров; перекиси (персульфаты, пероксокарбонаты, гидроперекись мочевины); комплексоны (оксиэтилидендифосфоновая, нитрилотриметилфосфоновая, щавелевая кислоты) [14]. Для определения реологических параметров блокирующих жидкостей (предельное напряжение сдвига, модуль упругости и модуль вязкости) применяются современные ротационные вискозиметры, в том числе с опцией осцилляционной реометрии [18]. Фльтрационно-блокирующие характеристики изучаются на фильтр-прессах низкого и высокого давления, а также с использованием фильтрационных установок: импортных, например FDES-645 (Coretest Systems Corporation), и отечественных, например СМП-ПС/ФЕС-2Р (ООО «Кортех») [19, 20].

Промышленная реализация приготовления блокирующих жидкостей осуществляется в соответствии с положениями, описанными в статье [21]. Блокирующие составы готовят на специализированных растворных узлах [12, 22] или с использованием передвижной установки смешительно-осреднительной. Используемые емкости должны быть снабжены лопастными мешалками, обеспечивающими равномерное распределение химических реагентов по всему объему, исключаящее возникновение «мертвых зон». Блок приготовления реагентов или емкость необходимого объема должна быть укомплектована внешним электроцентробежным насосом, лопастной мешалкой, эжектором для подачи сыпучих продуктов, обвязкой на насос, а также линией для наполнения и отгрузки. Возможно диспергирование порошка водорастворимого реагента-загустителя через сухую гидроворонку эжектора в струю водно-солевой основы, создаваемую электроцентробежным насосом. Допускается диспергирование полимера высыпанием в водно-солевой раствор в зону перемешивания лопастной мешалки в емкости приготовления.

Трубопроводная обвязка емкостей для приготовления блокирующих жидкостей должна иметь конструкцию, предусматривающую возможность ее промывки в случае возникновения в ней «гелевых дефектов». Блокирующие составы повышенной вязкости готовятся растворением водорастворимого полимера-загустителя в водно-солевой основе и предназначаются для временного и обратимого снижения проницаемости на границе стенки скважины – входа в пласт, контроля поглощения жидкости глушения при подземном ремонте добывающих и нагнетательных скважин без ГРП, в том числе с аномально высоким пластовым давлением (АВПД).

Приготовление блокирующего состава с твердой фазой включает растворение водорастворимого полимера-загустителя на водно-солевой основе с последующим диспергированием частиц с твердой фазой, в качестве которой используют микрокальциты разных марок, выварочный галит, доломит. Суспензия твердых частиц в полимерном растворе предназначена для временного и обратимого снижения проницаемости на границе стенки скважины – входа в пласт, контроля поглощения жидкостей глушения при подземном ремонте добывающих и нагнетательных скважин, в том числе – с ГРП, скважин, имеющих в разрезе пропластки супер-коллекторов, скважин с щелевыми и гравийными фильтрами в условиях с аномально низким пластовым давлением (АНПД) и АВПД.

Приготовление эмульсионного блокирующего состава глушения требует эффективную диспергацию дегазированной нефти в водно-солевой основе и химического реагента-эмульгатора. Эмульсионные блокирующие составы предназначены для временного и обратимого снижения проницаемости на границе стенки скважины – входа в пласт добывающих скважин, контроля поглощения жидкостей глушения при ремонте скважин без ГРП, скважин с высоким газовым фактором (более 400 м<sup>3</sup>/т), скважин, эксплуатирующих водочувствительные коллекторы. Технология приготовления эмульсионных блокирующих составов включает набор расчетного количества дегазированной нефти или углеводородного растворителя в блок приготовления реагентов. Далее дозируется эмульгатор и не менее 30 мин перемешивается при включенном электроцентробежном насосе миксера и мешалки. Затем подается необходимое количество водно-солевой основы и снова перемешивается не менее 2 ч. Эмульсионный блокирующий состав может храниться в емкости приготовления до отгрузки не более 2 ч. Перед отгрузкой после указанного срока данный состав перемешивается в емкости с помощью центробежного насоса.



## Обсуждение

Контроль поглощения при глушении скважин обеспечивается согласно двум основным механизмам: увеличением вязкости технологической жидкости, а также коркообразованием на поверхности горной породы, когда взвесь твердых частиц закупоривает поры и каналы фильтрации. В частности, загущенные полимерные растворы, гидрогели, обратные эмульсии действуют по первому механизму, а суспензионные системы – по второму. Существует несколько близких по сути классификаций блокирующих составов [23, 24]. Схема, предложенная в статье [24], основанная на природе блокирующих жидкостей, представляется нам более наглядной (рис.1). Остановимся подробнее на основных типах блокирующих составов, применяемых при глушении с контролем поглощения. Исторически массовое внедрение обратных эмульсий при глушении скважин впервые было осуществлено в ПО «Татнефть» в 1970-х годах [12]. Построены специальные стационарные растворные узлы, на которых готовилась обратная эмульсия необходимой плотности. Данная технология успешно применяется и в настоящее время [25], являясь востребованным инструментом при осуществлении капитальных и подземных ремонтных работ. Сервисные подрядчики пользуются эмульгаторами, которые позволяют создавать обратные эмульсии для различных температурных интервалов. Обратные эмульсии показали свою эффективность при глушении скважин в гранулярных коллекторах. В случае же глушения скважин в трещиноватых коллекторах, а также в скважинах с ГРП обратные эмульсии далеко не всегда справляются со своей задачей, потому что естественные и искусственно созданные трещины способны поглощать вязкие жидкости.

Показательный пример изменения эффективности действия инвертной дисперсии «Дисин», представляющей обратную эмульсию, стабилизированную карбонатом кальция и гидратом окиси кальция, продемонстрирован в ПО «Юганскнефтегаз». Этот реагент предложил Г.С.Поп для глушения скважин на объектах Западной Сибири [26, 27]. В начале применения, когда глушили скважины с малообъемным ГРП, инвертная дисперсия «Дисин», относящаяся к классу стабилизированной твердыми частицами эмульсии Пикеринга, прекрасно справлялась со своей задачей [28-30]. По мере развития метода ГРП, когда масса закачанного проппанта выросла до 200-300 т, «Дисин» как блокпачка перестал проявлять блокирующие свойства. Дело в том, что при эксплуатации многопластового объекта Приобского месторождения единым фильтром высокопроницаемый пласт вырабатывается интенсивнее и в нем пластовое давление снижается более значительно. И, хотя в составе «Дисина» имелись твердые стабилизаторы, создать прочную корку на поверхности проппантной набивки не удалось, потому что дисперсные частички были субмикронного размера и поглощались пластом. В процессе ремонтных работ в скважины приходилось доливать значительное количество ремонтно-технологической жидкости, и впоследствии эти скважины долго осваивались и не выходили на предремонтный уровень добычи. Эта проблема была решена специалистами ООО «РН-УфаНИПИнефть» использованием суспензионных блокирующих жидкостей на основе ксантановых полимерных растворов со взвешенной дисперсией микрокальцита. Под руководством В.Н.Гусакова совместно с промышленными инженерами (О.В.Акимов и др.) разработаны суспензионные жидкости глушения, где в качестве дисперсионной среды применялись ксантановые полимерные растворы, а в качестве дисперсной фазы – микрокальциты разных марок [31, 32].

Более эффективные инвертные дисперсии с твердой фазой предложили использовать Д.В.Мардашов и Ш.Р.Исламов [33, 34]. Это обратные эмульсии, в которых взвешены дисперсии микрокальцита разных типоразмеров в зависимости от степени раскрытости трещин (для которых



Рис.1. Основные типы блокирующих составов глушения



подобран эффективный эмульгатор) с целью глушения скважин в трещиновато-поровых коллекторах с пониженным пластовым давлением. Фракционный состав микрокальцитов рассчитывался чисто геометрически согласно критериям М.Кaeuffer или S.Vickers.

Существенным преимуществом блок-состава на основе обратных эмульсий является то обстоятельство, что внешняя фаза у них – углеводородная и не вызывает дополнительных фильтрационных сопротивлений при вызове притока нефти после ремонта. Инвертные дисперсии с гранулярными и волокнистыми наполнителями успешно использованы при глушении поглощающих скважин в карбонатных коллекторах [35, 36]. Данное комбинированное решение позволяет совместить два важных эффекта от применения блокирующих жидкостей – не увеличивать водонасыщенность коллектора и формировать фильтрационную корку из твердых кольматантов. Если сравнить эффективность действия инвертных дисперсий с гранулярными наполнителями и загущенных жидкостей на водной основе с теми же кольматантами, то предпочтение нужно отдать инвертным дисперсиям, поскольку они не привносят дополнительной водной фазы в призабойную зону пласта [37]. Особенно актуально применение инвертной дисперсии в водочувствительных низкопроницаемых гранулярных коллекторах, где попадание водной фазы в призабойную зону пласта недопустимо.

Интересный подход к применению эмульсии Пикеринга показан в работе [38], в которой эмульсии стабилизировались гидрофобными и гидрофильными нанокремнеземами, что обеспечило их устойчивость при высокой температуре. В статье [39] эмульсионный состав получен на основе «зеленой химии». В частности, в качестве углеводородной фазы использовался биодизель – метиловые эфиры жирных кислот, получаемых переэтерификацией рапсового масла.

Применение для глушения скважин загущенных растворов на водной основе также известно давно. Б.А.Андросом (1976 г.) предложено использовать солевые растворы, загущенные полиакриламидом с добавкой ПАВ, для глушения скважин в ПО «Башнефть». На месторождениях АНК «ЮКОС» с успехом использовался ПАВ-содержащий полимерный раствор «Шанс» [40] с введением облагораживающих добавок.

В отличие от полимерных растворов, гидрогели, применяемые в качестве блок-пачек при глушении скважин, более эффективны, поскольку благодаря своей сшитой структуре практически не фильтруются в пласт. В частности, чтобы начала фильтроваться в пласт полисахаридная жидкость глушения на основе растворов ксантана или гидроксипропилгуара, сшитых боратным сшивателем, требуется перепад давления более 6,0 МПа [41, 42]. Для глушения скважин в трещиновато-поровых коллекторах с высоким газовым фактором Д.В.Мардашовым и А.В.Бондаренко [20, 43] в качестве блок-пачки предложен гидрогель на основе ксантановой камеди, сшитой ацетатом хрома. Преимущество такого гидрогеля заключается в том, что он с успехом блокирует трещины, обладая при этом высокой газодерживающей способностью.

Направление использования гидрогелей в качестве блокирующих жидкостей в последние годы бурно развивается благодаря возможности гибкого регулирования их свойств в зависимости от условий применения. Так, при глушении скважин в трещиноватых коллекторах нашел применение вязкоупругий гель на основе оксиэтилированной целлюлозы, сшитой сульфатом меди. В качестве брейкера применялась система пероксигидрат – лимонная кислота [44]. С этой же целью в работе [45] предложен гидрогель на основе гуара и ксантановой камеди, сшитой боратным сшивателем. Эта технология отличается регулируемым временем разложения геля, что достигается за счет использования инкапсулированного брейкера – той же системы пероксигидрата с лимонной кислотой.

При глушении скважин в трещиноватых коллекторах с высоким пластовым давлением разработана утяжеленная бромидом натрия нанокompозитная гидрогелевая система, сшитая ковалентными связями, с плотностью 1,2-1,5 г/см<sup>3</sup> [46]. Термостойкость блокирующего состава определена до 160 °С, а время гелеобразования регулируется от 8 до 12 ч.

Пенгель на основе гидрогеля с двойной сшивкой (полиакриламид+Cr<sup>3+</sup>+полиэтиленимин), вспененный за счет выделения CO<sub>2</sub> при реакции кислоты с карбонатами, нашел применение при капитальном ремонте скважин в коллекторах с низким пластовым давлением и низкой температурой [47, 48].



Для глушения скважин, содержащих в попутном газе токсичные кислые газы, такие как  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ , предложен гель на основе растительной смолы со сшивателем и регулятором pH. При pH 8 гель не разрушается в течение 72 ч при 150 °С с концентрацией в воде  $H_2S$  – 300 мг/л и  $CO_2$  – 100 мг/л. После гелеобразования вязкость составляет 30 Па·с, а после введения брейкера в течение 6 ч она снижается до 3 мПа·с [49].

Блок-состав на основе солеустойчивого частично гидролизованного полиакриламида при глушении высокообводненных скважин в трещиноватых коллекторах позволяет не только беспроблемно осуществить ремонтные работы, но и снизить обводненность и увеличить добычу нефти за счет эффекта водоизоляции при утечках геля в трещины [50]. В статье [51] описано применение высоковязкой гель-пробки при ремонте скважин, удобное тем, что вязкость гелированного состава достигает 30000 мПа·с, а после воздействия кислотного брейкера через 4 ч она снижается до 5 мПа·с. Вязкие гелированные блокирующие составы с регулируемым временем разложения геля используются для текущего и капитального ремонта скважин с целью снижения риска газопроявлений [52].

Необходимо отметить, что гидрогели на основе частично гидролизованного полиакриламида в последние годы все чаще модифицируются наночастицами. Дело в том, что в жестких условиях температурно-солевой агрессии происходит разложение блок-пачек на основе сшитых полимерных систем. Деструкция гидрогелей заключается в разрыве основных полимерных цепей, в разрыве сшивок, гидролизе полимера и синерезисе [53]. Частицы нанокремнезема взаимодействуют своими силанольными группами с карбоксильной группой частично гидролизованного полиакриламида с образованием водородной связи (доказано ИК-спектрами) [54], усиливая тем самым взаимодействие с молекулами воды и предотвращая дегидратацию и синерезис геля [55]; при этом наночастицы равномерно распределяются по всему объему гидрогеля. В работе [56] показано, что введение 9 % нанокремнезема увеличивает прочность гидрогеля на 5000 %. Из снимков, полученных с помощью электронного микроскопа, видно, что наночастицы армируют гидрогель при гелеобразовании *in situ*, что позволяет временно блокирующему материалу значительно лучше противостоять температурным, солевым и сдвиговым воздействиям по сравнению с гидрогелем без добавки нанокремнезема. В трещиноватых карбонатных пластах с пониженным пластовым давлением достаточно ввести в гидрогель 5 % наночастиц, и при этом увеличение структурно-механических свойств такого нанокompозита позволяет безаварийно проводить ремонтные работы [57]. Приводятся данные о том, что добавка 8 % нанокремнезема в гель на основе частично гидролизованного полиакриламида и экологически чистого сшивателя – полиэтиленimina обеспечивает увеличения модуля упругости в 14 раз при модуле вязкости, равного всего 71 Па, что чрезвычайно благоприятно с точки зрения малой повреждаемости гранулярного коллектора [58]. Для скважин в высокотемпературных объектах разработки нанокompозитный гель получают из термостойкого сульфанированного полиакриламида с добавкой вторично-модифицированного лапонита, тиомочевины, сшивателя – полиэтиленimina [59]. Авторы статьи [60] отметили, что линейные размеры нанокремнезема существенно влияют на свойства нанокompозитов. Так, гидрогель на основе частично гидролизованного сульфанированного полиакриламида, сшитого ацетатом хрома, имеет максимальные прочностные характеристики с наночастицами размером 20-30 нм по сравнению с аналогичными гелями при добавлении нанокремнезема размером 7-10 нм и 60-70 нм.

Большое внимание специалистами из разных стран мира уделяется саморазрушающимся гидрогелям. Так, в работах [61, 62] предложены саморазрушающиеся под действием температуры гели на основе предварительно сформированных гель-частиц. В статьях [63, 64] описаны гели с внутренним брейкером с регулируемым временем разложения. Безопасное время ремонта определено на основании лабораторных экспериментов при пластовой температуре. С целью прогнозирования времени температурного саморазрушения гидрогелевых блок-составов в работе [65] проведены кинетические эксперименты и разработана математическая модель, совпадающая с результатами изучения температурного старения с коэффициентом корреляции 0,988. Такой подход позволяет прогнозировать время нахождения блок-составов в рабочем состоянии и оценивать безопасный период проведения ремонтных работ на скважинах.

Рассмотрены варианты использования гелеволоконистых систем для временного блокирования пласта. В гидрогель на основе термостойкого сульфанированного полиакриламида, сшитого полиэтилениминимом, добавлялись наночастицы целлюлозы [66]. При этом такой нановолоконистый



композит превосходил по своим структурно-механическим и термостойким свойствам нанокompозит с добавкой равного количества нанокремнезема. Волокнистый синтетический наполнитель подавался в высокотемпературную скважину в полимерном растворе, где за предварительно рассчитанное время синтетические волокна гидролизировались с выделением органических кислот, которые в свою очередь разрушали полимер [67]. Подытоживая анализ применения блок-составов, можно отметить обзор в статье [68], где обобщены свойства гелей, получаемых *in situ*, способы повышения их термостойкости и структурно-механических свойств, регулирования скорости гелеобразования, методы разрушения и саморазрушения.

В качестве гидрогелевых блок-пачек все чаще используются композиции вязкоупругих ПАВ на основе цвиттер-ионных соединений [69, 70], которые имеют немаловажное преимущество перед гидрогелями на основе водорастворимых полимеров – они разрушаются при контакте с нефтью и водой с вызовом притока после ремонта.

Загущенные растворы на нефтяной основе (товарная загущенная нефть) [71] применяются при глушении скважин с пониженным пластовым давлением. В последнее время их использование весьма ограничено согласно правилам пожарной безопасности. Хотя в некоторых добычных предприятиях, например в ПАО «Славнефть-Мегионнефтегаз», блокирующие жидкости на углеводородной основе в свое время имели достаточно широкое применение [72].

Использование суспензионных блокирующих составов на водной основе тоже давно известно. Сначала в таком качестве применялись глинистые растворы, которые, хотя и имели небольшое преимущество над растворами минеральных солей, были недостаточно эффективны из-за кольматации призабойной зоны пласта. В частности, С.З.Зариповым (1981 г.) показано, что глушение скважин глинистыми растворами (ПО «Башнефть») в 1970-х годах приводило к существенному снижению производительности скважин. Исследования сервисной фирмы M-I Swako убедительно показали, что наиболее целесообразно взвешивать частицы кольматанта в загущенных растворах биополимеров. Поскольку биополимеры микробного происхождения имеют разветвленное строение и достаточно высокие значения вязкоупругой составляющей комплексной вязкости, взвешенные частицы не осаждаются. Кроме того, в работах [73, 74] приведен расчет оптимального фракционного состава кольматирующих частиц в зависимости от диаметра пор горной породы.

Реализация технологий с применением материалов контроля поглощения (Liquid Control Materials – LCM), или LCM-технологий, подразумевает использование таких компонентов, как водно-солевая основа, водорастворимый полимер-загуститель, брейкер для разрушения полимера и восстановления проницаемости (рис.2) [75]. В качестве водно-солевой основы используется техническая вода, а также растворы минеральных солей (водорастворимые полимеры, применяемые в качестве загустителей).

Основными технологическими недостатками полимерных загустителей являются риск получения «гелевых дефектов» [76] и значительная потеря вязкости при повышении температуры. Лишь системы, загущенные сукциногликаном и эруциламидопропилбетаином (относится к классу ВУПАВ), сохраняют свою вязкость до 70 °С [75].

Для сохранения добычного потенциала скважин, а также быстрого их вывода на режим после глушения при использовании полимерных блокирующих жидкостей необходимо применять брейкеры, индивидуально подобранные для каждого класса загустителей. Брейкеры воздействуют на углеродные цепочки полимеров, химически модифицируют функциональные группы макромолекул и разрушают сетчатую

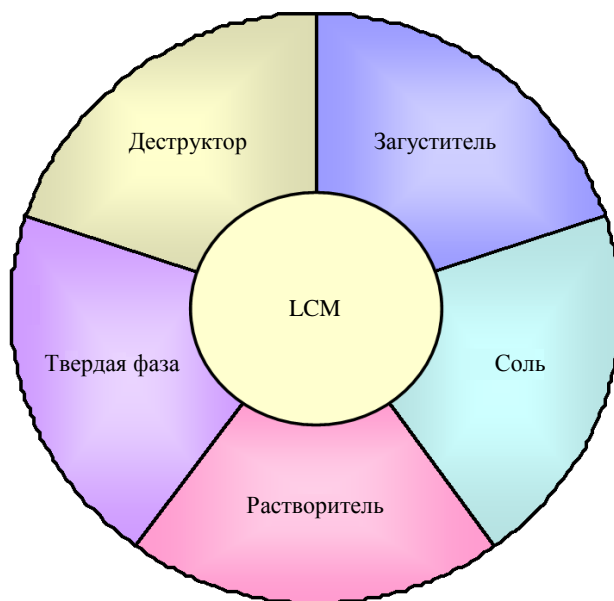


Рис.2. Система компонентов для реализации LCM-технологий



структуру гидрогелей. Для этих целей используются перекиси, энзимы, кислоты, комплексоны. Применение брейкеров осуществляется в двух вариантах. В первом случае брейкер является компонентом технологической жидкости. Такой вариант возможен, когда действие брейкера начинается с большим периодом индукции. К этому моменту основные операции текущего ремонта скважины должны завершиться, и после разрушения полимерных молекул при вызове притока происходит восстановление коэффициента проницаемости. По второму варианту брейкер закачивается после проведения основных стадий ремонта скважины и также обеспечивает восстановление проницаемости. Беспolyмерные загущенные жидкости не требуют применения брейкера, поскольку снижение вязкости такой системы достигается при контакте с водой или нефтью с вызовом притока после ремонта [77, 78]. В связи с тем, что применяемые для этих целей цвиттер-ионные ПАВ обладают хорошими поверхностно-активными свойствами, после разрушения цилиндрических мицелл с вязкоупругими свойствами достигается облегченный вызов притока. При использовании суспензионных блокирующих жидкостей глушения возможно применение модифицирующих добавок из класса гликолей, которые снижают сцепление корки кольматанта к поверхности горной породы [74].

Другой способ формирования фильтрационной корки с малой глубиной проникновения кольматантов в пласт осуществляется подбором фракционного состава кольматанта, соответствующего распределению пор по размерам. Если размер частиц много меньше среднего диаметра пор, то будет происходить нежелательное проникновение этих частиц в каналы фильтрации; частицы, диаметром, намного превышающим размеры пор, не способны образовывать низкопроницаемую корку, что приводит к поглощению жидкости во время ремонта.

Оптимизация размеров кольматанта сводится к подбору состава дисперсий, различных по размерам [79]. Согласно теории идеальной упаковки (Ideal Packing Theory – IPT, M.Kaueffer), подбор осуществляется методом приближения зависимости «интегральный фракционный состав – корень квадратный из диаметра частиц» к идеальной прямой. Другой вариант оптимизации распределения частиц по размерам (по S.Vickers) задается кривой с параметрами [79] при диаметрах:  $D_{max}$  – доля частиц 90 %;  $2/3D_{max}$  – 75 %;  $1/3D_{max}$  – 50 %;  $1/7D_{max}$  – 25 %;  $D_{min}$  – 10 %. Для создания наиболее плотной фильтрационной корки по критерию A.Abrams необходим кольматант с диаметром частиц от  $1/7$  до  $1/3$  диаметра пор. Максимально плотную низкопроницаемую и тонкую фильтрационную корку удастся получить при подборе частиц по размерам согласно критерию S.Vickers (табл.1 [79]).

Таблица 1

Результаты испытаний фильтрационных корок, образуемых жидкостями глушения

Размер пор диска, мкм	Параметр	Расчет фракционного состава кольматанта по критериям		
		S.Vickers	M.Kaueffer	A.Abrams
5	Фильтроотдача, см <sup>3</sup> /30 мин	21,0	22,0	30,0
	Коэффициент восстановления, %	93,8	49,5	61,5
20	Фильтроотдача, см <sup>3</sup> /30 мин	20,0	42,0	23,0
	Коэффициент восстановления, %	85,7	69,5	80,9
60	Фильтроотдача, см <sup>3</sup> /30 мин	20,8	31,0	19,0
	Коэффициент восстановления, %	86,2	78,1	93,5

Отметим, что обоснованный состав кольматанта можно определить при знании распределения размеров пор пористой среды. Для использования блокирующей жидкости с твердой фазой на скважинах после ГРП нахождение оптимального размера дисперсных частиц упрощается, так как типоразмер проппанта для каждой скважины известен (рис.3). Алгоритм действий, предназначенный для практического использования технологии глушения с контролем поглощения, указан в табл.2 [14]. Промысловый опыт ООО «РН-Юганскнефтегаз» по глушению скважин с контролем поглощения, осуществляемому согласно приведенному в табл.2 алгоритму, подтвердил правильность выбранного решения [14, 31]. Использование микрокальцитов в качестве твердой фазы для суспензионных блокирующих жидкостей безопасно, поскольку при необходимости этот кольматант легко растворяется в кислоте [80]. Применение полимерных загустителей характеризуется рисками образования так называемых гелевых дефектов, возникающих из-за неполного растворения



полимера в водно-солевой основе. Для предотвращения этого явления применяют диспергацию полимера в неводных полярных растворителях.

Современные технологии глушения скважин с контролем поглощения быстро развиваются, поскольку с их помощью уменьшается потребление водных рас-соллов и соответственно снижается число осложнений, вызванных интенсивной разработкой терригенных и карбонатных коллекторов. Так, в 2008 г. в ООО «РН-УфаНИПИнефть» совместно с работниками ООО «РН-Юганскнефтегаз» разработано и запатентовано эффективное решение для глушения многопластовых скважин Приобского месторождения с многотоннажным ГРП [32, 81]. При сравнительных испытаниях с технологией компании M-I Swaco (Seal-N-Peel) российский вариант с использованием блок-состава глушения с микрокальцитом (БСГ-МК) показал сопоставимую эффективность.

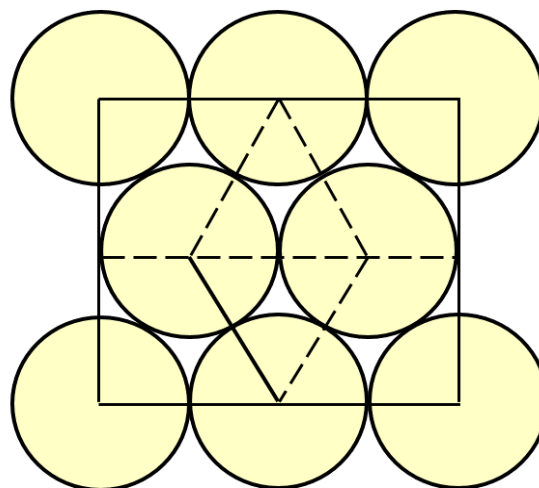


Рис.3. Графическое построение расчета просветности пропантной упаковки

Таблица 2

#### Алгоритм выбора дизайна глушения с контролем поглощения

Требуемый расчетный параметр	Источник информации	Определяемая характеристика	Алгоритм действия
Объем блокирующей жидкости глушения $V$ , м <sup>3</sup>	Данные цеха добычи нефти и газа	Удельный объем скважины в зоне от текущего забоя до верхних перфорационных отверстий	$V = 0,001 V_{уд} [h_{тек.заб} - h_{вд} + 150] + V_{изб}$
Объем избытка блокирующей жидкости глушения $V_{изб}$ , м <sup>3</sup>	Данные цеха добычи нефти и газа	Положение верхних перфорационных отверстий и перфорированный интервал	$V_{изб} = 0,0007 h_{вд} + K h_{перф}$ $K = 0,05$ и $0,01$ м <sup>3</sup> /м для наклонно-направленных и горизонтальных скважин
Пластовое давление $P_0$ на начало ремонта, Па	Данные цеха добычи нефти и газа	Избыточное устьевое давление $P_{изб}$ по воде на начало ремонта	$P_0 = \rho g h + P_{изб}$
Пластовое давление $P_{пл}$ на срок ремонта, Па	Данные гидродинамических исследований скважин	Кривая восстановления давления для скважины	$P_{пл} = P_0 + K(T)^{1/2}$
Плотность жидкости глушения при 20 °С с учетом теплового расширения при пластовой температуре $\rho(t)$ , кг/м <sup>3</sup>	Справочная литература	Коэффициент температурного расширения раствора глушения $\alpha \approx 0,5838$ кг/(м <sup>3</sup> ·°С)	$\rho(t) = \rho(20) - \alpha(t - 20)$
Посуточный прогноз изменения плотности жидкости глушения с учетом кривой восстановления давления	Расчетные данные	Пластовые температура и давление $p(T, t) = \frac{P_0 + K\sqrt{T}}{g h_{верт}} + \alpha(t - 20)$	Расчет плотности жидкости глушения с поправкой на кривую восстановления давления
Диаметр устьев пор зерен пропантанта $D_{max} - D_{min}$ , мкм	Паспорт скважины	Фракционный состав пропантанта	Марка пропантанта
Фракционный состав смеси микрокальцитов для формирования фильтрационной корки	Теория заполнения (по критерию S.Vickers)	Критерий по S.Vickers: $D_{max} - 90\%$ $2/3 D_{max} - 75\%$ $1/3 D_{max} - 50\%$ $1/7 D_{max} - 25\%$ $D_{min} - 10\%$	Минимизация отклонения модельной кривой микрокальцитов от кривой по S.Vickers (программный продукт)
Концентрация загустителя в блокирующей жидкости глушения	Экспериментальные данные	Зависимость седиментационной стабильности суспензии от концентрации загустителя	Визуальное наблюдение стабильности суспензии
Эффективная вязкость блокирующей жидкости глушения	Экспериментальные данные	Время истечения 500 см <sup>3</sup> блокирующей жидкости на воронке ВБР-2 в лабораторных и полевых условиях	Определение времени истечения 500 см <sup>3</sup> блокирующей жидкости на воронке ВБР-2

Примечания:  $K$  – проницаемость, мкм<sup>2</sup>;  $h_{тек.заб}$  – расстояние от устья до текущего забоя, м;  $h_{вд}$  – расстояние от устья до верхних перфорационных отверстий, м;  $h_{перф}$  – интервал перфорации, м;  $h_{верт}$  – глубина верхних перфорационных отверстий по вертикали, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $T, t$  – пластовая температура, °С.



В 2009 г. в ряде добывающих обществ ОАО «НК «Роснефть» внедрена технология суспензионной блокирующей жидкости с саморазрушающейся кольматирующей твердой фазой – галитом (БСГ-галит) [82]. Основное технологическое преимущество такого состава заключается в способности твердых шунтирующих частиц полностью растворяться при вызове притока обводненной продукции после завершения подземного ремонта скважин (ПРС). Эта особенность позволяет исключить риск кольматации призабойной зоны пласта, устанавливать блок-пачку с продавкой на пласт, проводить промывки и нормализацию забоя в условиях поглощений. За счет роста начального градиента сдвига при появлении свободной газовой фазы этот материал можно успешно использовать для глушения нефтяных скважин с высоким газовым фактором и газоконденсатных скважин [83]. Подобный подход применения водорастворимых солевых дисперсий описан в более поздней публикации [84]. В качестве нефтерастворимых кольматантов известно использование дисперсии полиэтиленового воска и нефтерастворимой фенольной смолы с канифолью. Преимущество таких материалов заключается в том, что при вызове притока они полностью растворяются в нефти. По данным керновых исследований, они обеспечивают коэффициент восстановления проницаемости от 0,90 до 0,95 [85].

Другой характерный пример применения блок-пачек продемонстрирован при глушении скважин юрских объектов разработки ООО «Харампурнефтегаз», где работа осложнена целым рядом негативных факторов, таких как низкая проницаемость гидрофильного пласта-коллектора, высокий газовый фактор, пониженное пластовое давление. С целью устранения влияния этих осложнений на успешность ПРС был разработан подход технологии глушения, заключающийся в комбинировании нескольких видов технологической жидкости, которые при совместном применении позволяют свести к минимуму риски снижения добычного потенциала скважин [19]. Так, для предотвращения газопроявлений разработана блокирующая жидкость на основе полимера «Биопол» и ПАВ (газоблокирующий состав – ГазоБС), действующая за счет своих вязкоупругих свойств (полимер) и пенообразующей способности при контактах с газом (ПАВ).

Буферная жидкость, предназначенная для предотвращения набухания глинистого цемента, снижения межфазного натяжения и восстановления фазовой проницаемости по нефти, разработана на основе 6 %-ного раствора HCl с добавкой ПАВ-гидрофобизатора (буферная солянокислотная жидкость – БуфСК). Блокирующие составы глушения БСГ-МК и БСГ-галит использовались для предотвращения поглощения жидкости глушения при пониженном пластовом давлении в скважинах с ГРП. Опытно-промысловые работы проводились на 23 скважинах, где блок-пачки ГазоБС использовались 21 раз, БуфСК – 9 раз, БСГ-галит и БСГ-МК – 14 и 9 раз соответственно (табл.3). На всех скважинах проведен ПРС по замене электроприводного центробежного насоса без смены его типоразмера, а также замене/реvisions насосно-компрессорных труб. На двух скважинах проведена нормализация забоя. Отмеченное незначительное увеличение дебита жидкости после ПРС связано с очисткой перфорационных отверстий от отложений кальцита за счет действия БуфСК и с абразивной очисткой парафиноотложений – составами БСГ-галит и БСГ-МК.

Таблица 3

Результаты опытно-промышленных испытаний технологических жидкостей

Блокирующая жидкость	Количество испытаний		Суммарный относительный дебит, до ПРС / после ПРС (вывода на режим), %	
	Всего	Со снижением дебита нефти во время вывода скважины на режим	Жидкость	Нефть
БСГ-МК	9	2	100/100,6	100/100,5
БСГ-галит	14	2	100/102,4	100/104,3
БуфСК	9	0	100/100,7	100/105,4
ГазоБС	21	3	100/102,7	100/101,6
Всего скважин	23	3	100/102,5	100/102,8

Применение аэрированных жидкостей для глушения скважин необходимо на месторождениях с АНПД, чтобы избежать поглощения жидкости глушения в пласт. Еще в 1970-х годах А.В.Аммян предложил использовать для этого двух- и трехфазные пены [86]. Впоследствии эту технологию успешно распространили для газовых и газоконденсатных месторождений, весьма



чувствительных к водной фазе в призабойной зоне пласта [87]. Вместе с тем использование пенных систем для глушения скважин осложнено их нестабильностью во времени, а также разрушением при контакте с нефтью. Оперативное восстановление свойств пенных систем в стволе скважины возможно путем их повторной циркуляции.

Для глушения газоконденсатных объектов с пониженным пластовым давлением и с высокой температурой предложен пенно-полимерный состав с повышенной устойчивостью пены на основе додецилсульфоната натрия и додецилметилбетаина, стабилизированной ксантановой камедью [88] и полиуретановым загустителем [89]. Состав сохраняет работоспособность при минерализации до 10000 мг/л и температуре до 150 °С в течение 24 ч. Если ремонт скважины длится дольше, необходимо восстанавливать пенную систему в стволе скважины путем подкачки новых порций [88]. В настоящей статье приведен пример ремонта скважины по удалению песка с забоя, который длился 58 ч и прошел без осложнений. Описанное в работе [88] техническое решение подразумевает применение сложного дополнительного оборудования – автоцистерну-перекачиватель жидкого азота или передвижной грузовик-генератор азота, пеногенератор. Применение же самогенерирующихся пеногелевых систем в качестве блокирующих жидкостей [90] позволяет проводить ремонтные работы при высоких температурах без риска уменьшения объема азотной пены. Данная пеногелевая система состоит из гелеобразующей композиции, газогенерирующего минерального состава и ПАВ. За счет низкой плотности пеногель легко выносится из ствола скважины при вызове притока. Высокая устойчивость пеногелей во времени и при повышенных температурах обусловлена тем, что ламели пены представляют сшитый полимерный состав, обладающий высокими структурно-механическими свойствами [91].

Другим перспективным направлением для объектов с АНПД является использование афродов – микропузырьковых систем, стабилизированных из растворов полимеров и ПАВ, впервые предложенных фирмой M-I Drilling Fluids. Первоначально эти азириванные жидкости использовались в бурении [92, 93].

На основании материалов, приведенных в данной обзорной статье, составлены рекомендации по применению различных блокирующих составов жидкостей глушения (табл.4). Для глушения в условиях множественных осложнений требуется сочетание нескольких видов блокирующих жидкостей глушения, а также разработка матрицы выбора и технологии применения в условиях конкретного объекта исследования, фиксирующей порядок закачки, риски и ограничения применимости.

Таблица 4

Выбор блокирующих жидкостей глушения скважин

Блокирующая жидкость глушения	Основание для выбора блокирующей жидкости глушения
ИЭР	Скважины в гранулярных и трещиноватых коллекторах без ГРП с нормальным пластовым давлением
ИЭР с дисперсными или волокнистыми наполнителями	Скважины в гранулярных коллекторах с ГРП. Скважины в трещиноватых коллекторах при нормальном пластовом давлении и АНПД. Факт газопроявлений за предыдущий ПРС
БСГ-галит	Скважины в гранулярных и трещиноватых коллекторах с нормальным пластовым давлением и АНПД. Факт превышения расхода раствора глушения выше на 30 м <sup>3</sup> , чем по технологическому плану глушения за предыдущий ПРС (или превышение скорости долива раствора глушения свыше 1 м <sup>3</sup> /ч)
БСГ-МК	Скважины в гранулярных и трещиноватых коллекторах с ГРП с нормальным пластовым давлением, АНПД и АВПД. Факт превышения расхода раствора глушения выше на 30 м <sup>3</sup> , чем по технологическому плану глушения за предыдущий ПРС (или превышение скорости долива раствора глушения свыше 1 м <sup>3</sup> /ч)
БСГ-МК	Скважины в многопластовых объектах, эксплуатирующихся единым фильтром, гранулярных и трещиноватых коллекторах с ГРП с нормальным пластовым давлением, АНПД и АВПД. Факт превышения расхода раствора глушения выше на 30 м <sup>3</sup> , чем по технологическому плану глушения за предыдущий ПРС (или превышение скорости долива раствора глушения свыше 1 м <sup>3</sup> /ч)
ИЭР с дисперсными или волокнистыми наполнителями	Скважины в многопластовых объектах, эксплуатирующихся единым фильтром, гранулярных и трещиноватых коллекторах с ГРП с нормальным пластовым давлением, АНПД и АВПД. Факт превышения расхода раствора глушения выше на 30 м <sup>3</sup> , чем по технологическому плану глушения за предыдущий ПРС (или превышение скорости долива раствора глушения свыше 1 м <sup>3</sup> /ч)



Блокирующая жидкость глушения	Основание для выбора блокирующей жидкости глушения
ГазоБС	Скважины в гранулярных и трещиноватых коллекторах с нормальным пластовым давлением, АНПД и АВПД. Факт газопроявлений за предыдущий ПРС при дебите по газу не менее 1000 м <sup>3</sup> /сут.
БуфСК	Скважины в гранулярных низкопроницаемых водочувствительных коллекторах. Обводненность добываемой жидкости менее 50 %. Требуется сочетание со второй блок-пачкой (ИЭР, БСГ-галит, БСГ-МК)

### Заключение

Отметим несколько основных тенденций развития технологии глушения с контролем поглощения. В периметре стран постсоветского пространства первая тенденция – это осуществление научного развития данных технологий в нефтяных университетах и институтах. Так, в Санкт-Петербургском горном университете под руководством М.К.Рогачева и Д.В.Мардашова разработан спектр современных технологий глушения, отвечающих практически на все вызовы производства [94-97]. В РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина под руководством Л.А.Магадовой и М.А.Силина разработан и внедрен способ глушения с использованием полисахаридной жидкости в качестве блок-пачки [98]. В Уфимском государственном нефтяном техническом университете под руководством Ю.В.Зеймана и В.Ш.Мухаметшина это направление также с успехом развивается [99].

Вторая тенденция – развитие, адаптация и оптимизация технологии глушения с контролем поглощения в отраслевых научно-исследовательских институтах. Здесь несомненным лидером является ООО «РН-БашНИПИнефть». Этот институт сопровождает данное направление в периметре ОАО «НК «Роснефть», где объекты разработки, радикально отличающиеся друг от друга по своим геолого-физическим характеристикам, географически расположены почти во всех регионах России. В связи с этим универсальные технические решения невозможны, и для каждой характерной группы месторождений необходимо оптимизировать лучшие технологии. Следует отметить, что системный подход сотрудников ООО «РН-БашНИПИнефть» позволил им сначала систематизировать технические решения по глушению скважин в разных горно-геологических условиях, четко обосновать критерии применимости блок-пачек различной природы [100], а затем – провести адаптацию и оптимизацию технологий глушения для конкретных объектов разработки. Так, для карбонатного объекта Куюмбинского нефтегазоконденсатного месторождения адаптированы суспензионные и пеногелевые блок-пачки [101]. Для месторождений Восточной Сибири с низкотемпературными высокопроницаемыми терригенными коллекторами рекомендованы суспензионные блок-пачки с мгновенной фильтрацией, способные быстро образовывать прочную корку и предотвращать поглощение технологической жидкости [102]. Для глушения газовых скважин, эксплуатирующих ачимовские отложения, ООО «РН-БашНИПИнефть» рекомендовало использование суспензионных блок-пачек, в которых в качестве загустителя применяется термостойкий полимер, а также модифицированный солевой состав на основе вязкоупругих ПАВ [103].

Третья тенденция – это большая вариативность предлагаемых технических решений, заявляемых сервисными фирмами на рынке услуг. У каждой сервисной компании имеется собственная линейка технических решений, с которой они выходят на тендерные комиссии нефтяных компаний. В этом виде бизнеса необходимо отметить такие сервисные фирмы, как ГК «Миррико» [104], ГК «Зиракс» [105].

В тенденции развития технологий глушения с контролем поглощения за рубежом явно прослеживается использование нанокompозитных гидрогелей; причем варианты применения блок-составов на основе гидрогелей весьма разнообразны в зависимости от пластовых условий и технической задачи ремонта [68]. Сравнивая технический уровень российских и зарубежных подходов, можно отметить, что развитие уровня техники и технологии в этом направлении идет параллельными курсами без явного опережения или отставания какой-либо из сторон. Публикации российских специалистов регулярно печатаются в престижных международных журналах уровня Q1, что свидетельствует о мировом признании актуальности и новизны публикуемых материалов.

Таким образом, можно смело констатировать, что на сегодняшний день технологии глушения скважин с контролем поглощения в нефтяном деле успешно применяются во всем мире. В России



потребности производства к адаптации технических решений для конкретных геолого-физических условий удовлетворяются отраслевыми институтами и сервисными фирмами. Сформировался устойчивый рынок услуг, что, несомненно, способствует прогрессу в данной области. Обратим внимание на азрированные жидкости для контроля поглощения, в частности афроны, дискуссия о строении и свойствах которых продолжается по сегодняшний день [106]. Тем не менее они уже стабильно применяются в бурении, причем это направление развивается [107-110]. Есть упоминание об использовании афроподобных составов для водоизоляции [111], а об их применении для глушения скважин пока имеются лишь единичные публикации, из которых видна перспективность данного подхода; например, в использовании афроподобных пенопластических блокирующих жидкостей, образованных за счет взаимодействия ПАВ и полимеров с газожидкостной системой, получивших название fuzzy-ball (нечеткие пушистые шарики) [112, 113].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шмаль Г.И. Проблемы при разработке трудноизвлекаемых запасов нефти в России и пути их решения // Георесурсы. 2016. Т. 18. № 4. Ч. 1. С. 256-260. DOI: 10.18599/grs.18.4.2
2. Искрицкая Н.И., Макаревич В.Н., Щепочкина А.А. Изменение структуры трудноизвлекаемых запасов нефти в связи с переходом на новую классификацию // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2016. Т. 11. № 4. 12 с. DOI: 10.17353/2070-5379/44\_2016
3. Хафизов Ф.З. Проблемы освоения трудноизвлекаемых запасов // Недропользование XXI век. 2014. № 3 (47). С. 68-73.
4. Короткевич А.И. Роль ТРИЗ в условиях ухудшения структуры запасов // Neftegaz.RU. 2018. № 6 (78). С. 52-57.
5. Фунг Ван Хай, Шамаев Г.А., Нгуен Хью Нян и др. Основные причины ухудшения проницаемости призабойной зоны пласта нижнего олигоцене месторождения «Белый тигр» // Башкирский химический журнал. 2008. Т. 15. № 2. С. 135-139.
6. Ерофеев А.А., Мордвинов В.А. Изменение свойств призабойной зоны скважины в процессе разработки бобриковской залежи Уньвинского месторождения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2012. Т. 11. № 5. С. 57-62.
7. Дмитрук В.В., Рахимов С.Н., Бояркин А.А., Штахов Е.Н. Повышение эффективности глушения скважин Уренгойского месторождения // Нефтяное хозяйство. 2010. № 5. С. 130-135.
8. Вахрушев С.А., Михайлов А.Г., Костин Д.С. и др. Глушение скважин, эксплуатирующих высокотемпературные кавернозно-трещиноватые карбонатные пласты месторождения имени Р.Требса // Нефтяное хозяйство. 2017. № 10. С. 41-45. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-10-41-45
9. Хакимов А.М., Макатров А.К., Караваев А.Д. и др. Фильтрационное тестирование нового поколения поверхностно-активных веществ отечественного и зарубежного производства в качестве добавок к ремонтно-технологическим жидкостям при проведении подземных ремонтов и ОПЗ скважин в гидрофильных коллекторах // Нефтепромысловое дело. 2005. № 12. С. 48-53.
10. Авиновская Т.В. Роль жидкости глушения в процессе ремонта скважин // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О.Сухого. 2018. № 2. С. 34-41.
11. Кравцов А.А., Мухутдинов А.А., Грядинов Д.А. Глушение скважин в условиях АНПД и высокого газового фактора на месторождениях АО «Оренбургнефть» // Инженерная практика. 2018. № 11.
12. Орлов Г.А., Кендис М.Ш., Глуценко В.Н. Применение обратных эмульсий в нефтедобыче. М.: Недра, 1991. 224 с.
13. Мардашов Д.В. Обоснование технологий регулирования фильтрационных характеристик призабойной зоны скважин при подземном ремонте: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В.Плеханова, 2008. 20 с.
14. Акимов О.В. Совершенствование технологий глушения скважин при интенсификации разработки низкопроницаемых терригенных коллекторов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2011. 23 с.
15. Патент № 2499131 РФ. Применение разлагаемых волокон в растворах обращенных эмульсий для глушения скважины / О.Бустос, С.Али, Ч.Нгуйен. Оpubл. 20.11.2013. Бюл. № 32.
16. Патент № 2330055 РФ. Способ приготовления полидисперсного торфяного реагента для буровых растворов и жидкостей глушения / А.А.Перейма, В.Е.Черкасова, Р.Р.Гасумов. Оpubл. 27.07.2008. Бюл. № 21.
17. Гасумов Р.А., Костюков С.В., Гасумов Р.Р. и др. Сохранение фильтрационно-емкостных свойств продуктивных пластов при их временной изоляции // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2017. № 4. С. 58-66. DOI: 10.31660/0445-0108-2017-4-58-66
18. Шрам Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: КолосС, 2003. 312 с.
19. Гусаков В.Н., Королев А.Ю., Ягудин Р.А. и др. Технологии глушения скважин в условиях множественных осложнений // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21. № 2. С. 17-24. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-2-17-24
20. Бондаренко А.В., Мардашов Д.В., Исламов Ш.Р. Оценка эффективности применения блокирующих полимерных составов при глушении скважин в условиях карбонатного коллектора и высокого газового фактора // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20. № 1. С. 53-64. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-1-53-64
21. Силин М.А., Магадова Л.А., Акимов О.В. и др. Передовые технологии глушения скважин // Нефтяное хозяйство. 2015. № 1. С. 66-70.
22. Маннапов Г.М., Хазимуратов Р.Х., Смыков Ю.В., Сафуанова Р.М. Опыт организации работ узла подготовки технологических жидкостей // Нефтепромысловое дело. 2006. № 4. С. 36-39.



23. *Мардашов Д.В.* Разработка блокирующих составов с кольматантом для глушения нефтяных скважин в условиях аномально низкого пластового давления и карбонатных пород-коллекторов // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 667-677. DOI: [10.31897/PMI.2021.5.6](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.6)
24. *Краевский Н.Н., Исламов Р.А., Линд Ю.Б.* Выбор технологии глушения скважин для сложных геолого-технологических условий // Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18. № 4. С. 16-26. DOI: [10.17122/ngdelo-2020-4-16-26](https://doi.org/10.17122/ngdelo-2020-4-16-26)
25. *Глуценко В.Н., Хижняк Г.П.* Направления совершенствования составов обратных эмульсий для глушения скважин // Недропользование. 2023. Т. 23. № 1. С. 44-50. DOI: [10.15593/2712-8008/2023.1.6](https://doi.org/10.15593/2712-8008/2023.1.6)
26. *Поп Г.С.* Причины возникновения и методы ликвидации газопроявлений в скважинах. М.: ВНИИЭгазпром, 1991. 19 с.
27. *Поп Г.С., Кучеровский В.М., Зотов А.С., Бодачевская Л.Ю.* Глушение скважин в условиях снижающегося пластового давления на месторождениях Западной Сибири // Нефтепромысловое дело. 2002. № 11. С. 26-29.
28. *Куликов А.Н., Исмаилов Т.А., Шадымухаметов С.А., Телин А.Г.* Разработка и применение новых составов для глушения скважин на месторождениях НК «ЮКОС» // Вестник Инжинирингового центра ЮКОС. 2002. № 4. С. 52-55.
29. *Куликов А.Н., Исмаилов Т.А., Телин А.Г., Хакимов А.М.* Применение инвертной дисперсии «Дисин» для глушения поглощающих скважин после проведения гидроразрыва пласта // Башкирский химический журнал. 2001. № 3. С. 73-75.
30. *Лезов Г.О., Яшин В.И., Исмаилов Т.А. и др.* Технология комбинированного глушения и вторичного вскрытия нефтяных скважин с использованием инвертной дисперсии «Дисин» // Нефтяное хозяйство. 1994. № 2. С. 48-51.
31. *Здольник С.Е., Згоба И.М., Телин А.Г., Гусаков В.Н.* Проблемы глушения скважин Приобского месторождения и пути их решения // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2006. № 1. С. 36-39.
32. *Акимов О.В., Здольник С.Е., Худяков Д.Л. и др.* Технологии глушения скважин с гидроразрывом пласта в условиях аномально высоких и аномально низких пластовых давлений // Нефтяное хозяйство. 2010. № 2. С. 92-95.
33. *Islamov Sh.R., Bondarenko A.V., Mardashov D.V.* Substantiation of a well killing technology for fractured carbonate reservoirs // Youth Technical Sessions Proceedings. CRC Press, 2019. P. 256-264. DOI: [10.1201/9780429327070-35](https://doi.org/10.1201/9780429327070-35)
34. *Mardashov D., Islamov S., Nefedov Yu.* Specifics of well killing technology during well service operation in complicated conditions // Periódico Tchê Química. 2020. Vol. 17. № 34. P. 782-792. DOI: [10.52571/PTQ.v17.n34.2020.806\\_P34\\_pgs\\_782\\_792.pdf](https://doi.org/10.52571/PTQ.v17.n34.2020.806_P34_pgs_782_792.pdf)
35. *Исламов Ш.Р.* Обоснование технологии глушения нефтяных скважин перед подземным ремонтом в условиях трещинно-поровых карбонатных коллекторов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. 20 с.
36. *Шамсутдинов Р.Д.* Применение волокнистых наполнителей в инвертно-эмульсионных растворах для повышения качества капитального ремонта скважин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2002. 24 с.
37. *Islamov S., Islamov R., Shelukhov G. et al.* Fluid-Loss Control Technology: From Laboratory to Well Field // Processes. 2024. Vol. 12. Iss. 1. № 114. DOI: [10.3390/pr12010114](https://doi.org/10.3390/pr12010114)
38. *Sergeev V., Tanimoto K., Abe M.* Innovative Emulsion-Suspension Systems Based on Nanoparticles for Drilling and Well Workover Operation // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 11-14 November 2019, Abu Dhabi, United Arab Emirates. OnePetro, 2019. № SPE-197510-MS. DOI: [10.2118/197510-MS](https://doi.org/10.2118/197510-MS)
39. *Uliasz M.* Workover fluid for the reconstruction of wells with reduced reservoir pressure // Nafta-Gaz. 2020. Vol. 76. № 7. P. 457-465 (in Polish). DOI: [10.18668/NG.2020.07.04](https://doi.org/10.18668/NG.2020.07.04)
40. *Шадымухамедов С., Куликов А.* Развитие работ по улучшению качества глушения скважин в НК «ЮКОС» // Научно-технический вестник ЮКОС. 2003. № 7. С. 30-32.
41. *Магадова Л.А., Силин М.А., Гаевой Е.Г. и др.* Жидкости глушения и промывки, сохраняющие коллекторские свойства пласта // Время колтубинга. 2009. № 3 (028). С. 72-80.
42. *Силин М.А., Магадова Л.А., Пономарева В.В. и др.* Разработка нефилтующейся полисахаридной жидкости глушения с высокой плотностью на водной основе // Территория «Нефтегаз». 2010. № 8. С. 56-61.
43. *Бондаренко А.В., Исламов Ш.Р., Игнатьев К.В., Мардашов Д.В.* Лабораторные исследования полимерных составов для глушения скважин в условиях повышенной трещиноватости // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2020. Т. 20. № 1. С. 37-48. DOI: [10.15593/2224-9923/2020.1.4](https://doi.org/10.15593/2224-9923/2020.1.4)
44. *Окромелидзе Г.В., Некрасова И.Л., Гаршина О.В. и др.* Глушение скважин с использованием вязкоупругих составов // Нефтяное хозяйство. 2016. № 10. С. 56-61.
45. *Martyushev D.A., Govindarajan S.K.* Development and study of a Visco-Elastic Gel with controlled destruction times for killing oil wells // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 2022. Vol. 34. Iss. 7. P. 408-415. DOI: [10.1016/j.jksues.2021.06.007](https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.06.007)
46. *Hu Jia, Zheng Kang, Jinzhi Zhu et al.* High density bromide-based nanocomposite gel for temporary plugging in fractured reservoirs with multi-pressure systems // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 205. № 108778. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.108778](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108778)
47. *Hu Jia, Xin-Yu Yang, Jin-Zhou Zhao.* Development of a Novel In-Situ-Generated Foamed Gel as Temporary Plugging Agent Used for Well Workover: Affecting Factors and Working Performance // SPE Journal. 2019. Vol. 24. Iss. 4. P. 1757-1776. DOI: [10.2118/194215-PA](https://doi.org/10.2118/194215-PA)
48. *Hu Jia, Hao Chen, Jin-Zhou Zhao.* Development of a Highly Elastic Composite Gel through Novel Intercalated Crosslinking Method for Wellbore Temporary Plugging in High-Temperature Reservoirs // SPE Journal. 2020. Vol. 25. Iss. 6. P. 2853-2866. DOI: [10.2118/201090-PA](https://doi.org/10.2118/201090-PA)
49. *Xu Yuan, Tang Yongfan.* Development and Application of Temporary Plugging and Killing System Suitable for Sour Gas Field // Oilfield Chemistry. 2022. Vol. 39. № 3. P. 381-386. DOI: [10.19346/j.cnki.1000-4092.2022.03.001](https://doi.org/10.19346/j.cnki.1000-4092.2022.03.001)
50. *Hu Jia, Hao Chen.* The Potential of Using Cr<sup>3+</sup>/Salt-Tolerant Polymer Gel for Well Workover in Low-Temperature Reservoir: Laboratory Investigation and Pilot Test // SPE Productions & Operations. 2018. Vol. 33. Iss. 3. P. 569-582. DOI: [10.2118/189460-PA](https://doi.org/10.2118/189460-PA)
51. *Xiong Ying, Xi Yuan, Zhang Yadong, Fu Ziyi.* Study of Gel Plug for Temporary Blocking and Well-Killing Technology in Low-Pressure, Leakage-Prone Gas Well // SPE Production & Operations. 2021. Vol. 36. Iss. 1. P. 234-244. DOI: [10.2118/204213-PA](https://doi.org/10.2118/204213-PA)



52. Shaydullin V.A., Vakhrushev S.A., Magzumov N.R. et al. Features of Killing Wells Operating Fractured Formations with Abnormally Low Formation Pressures and High Gas Factor // SPE Russian Petroleum Technology Conference, 26-29 October 2020. OnePetro, 2020. № SPE-202071-MS. DOI: [10.2118/202071-MS](https://doi.org/10.2118/202071-MS)
53. Chunming Xiong, Falin Wei, Weitao Li et al. Mechanism of Polyacrylamide Hydrogel Instability on High-Temperature Conditions // ACS Omega. 2018. Vol. 3. Iss. 9. P. 10716-10724. DOI: [10.1021/acsomega.8b01205](https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01205)
54. Zhongliang Hu, Maje Haruna, Hui Gao et al. Rheological Properties of Partially Hydrolyzed Polyacrylamide Seeded by Nanoparticles // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2017. Vol. 56. Iss. 12. P. 3456-3463. DOI: [10.1021/acs.iecr.6b05036](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b05036)
55. Pan Xu, Zhijie Shang, Meiling Yao, Xinxue Li. Mechanistic insight into improving strength and stability of hydrogels via nano-silica // Journal of Molecular Liquids. 2022. Vol. 357. № 119094. DOI: [10.1016/j.molliq.2022.119094](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119094)
56. Zareie C., Bahramian A.R., Sefti M.V., Salehi M.B. Network-gel strength relationship and performance improvement of polyacrylamide hydrogel using nano-silica; with regards to application in oil wells conditions // Journal of Molecular Liquids. 2019. Vol. 278. P. 512-520. DOI: [10.1016/j.molliq.2019.01.089](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.089)
57. Hu Jia, Cheng-Cheng Niu, Xin-Yu Yang. Improved understanding nanocomposite gel working mechanisms: From laboratory investigation to wellbore plugging application // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 191. № 107214. DOI: [10.1016/j.petrol.2020.107214](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107214)
58. Hu Jia, Xin-Yu Yang. Environmental and strength-enhanced nanosilica-based composite gel for well temporary plugging in high-temperature reservoirs // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2019. Vol. 14. Iss. 1. № e2270. DOI: [10.1002/apj.2270](https://doi.org/10.1002/apj.2270)
59. Hu Jia, Dong-Shan Xie, Zheng Kang. Secondary surface modified laponite-based nanocomposite hydrogel for gas shutoff in wellbore // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 191. № 107116. DOI: [10.1016/j.petrol.2020.107116](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107116)
60. Dijvejin Z.A., Ghaffarkhah A., Sadeghnejad S., Sefti M.V. Effect of silica nanoparticle size on the mechanical strength and wellbore plugging performance of SPAM/chromium (III) acetate nanocomposite gels // Polymer Journal. 2019. Vol. 51. № 7. P. 693-707. DOI: [10.1038/s41428-019-0178-3](https://doi.org/10.1038/s41428-019-0178-3)
61. Dao-Yi Zhu, Xing-Yu Fang, Ren-Xian Sun et al. Development of degradable pre-formed particle gel (DPPG) as temporary plugging agent for petroleum drilling and production // Petroleum Science. 2021. Vol. 18. Iss. 2. P. 479-494. DOI: [10.1007/s12182-020-00535-w](https://doi.org/10.1007/s12182-020-00535-w)
62. Hong-Jun Zhang, Dao-Yi Zhu, Yong-Long Gong et al. Degradable preformed particle gel as temporary plugging agent for low-temperature unconventional petroleum reservoirs: Effect of molecular weight of the cross-linking agent // Petroleum Science. 2022. Vol. 19. Iss. 6. P. 3182-3193. DOI: [10.1016/j.petsci.2022.07.013](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.07.013)
63. Bougha A., Ndukauba G., Okeke C., Abudu R. Restoring Integrity and Production on a Well with Compromised Barriers: Use of Crosslinked Polymer Gel to Prevent Fluid Loss Post Well Kill to Enable the Safe Repair of Compromised Christmas Tree Valves // Gas & Oil Technology Showcase and Conference, 13-15 March 2023, Dubai, United Arab Emirates. OnePetro, 2023. № SPE-214228-MS. DOI: [10.2118/214228-MS](https://doi.org/10.2118/214228-MS)
64. Zeeshan Ahmad, Abdullah Alhaj Al Hosini, Mohammed Ibrahim Al Janahi et al. Challenges of Gas Wells Killing Operation with Emphasis on Reservoir & Completion Integrity Issues // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 15-18 November 2021, Dubai, United Arab Emirates. № SPE-208063-MS. DOI: [10.2118/208063-MS](https://doi.org/10.2118/208063-MS)
65. Hu Jia, Zheng Kang, Sanxi Li et al. Thermal degradation behavior of seawater based temporary plugging gel crosslinked by polyethyleneimine for fluid loss control in gas well: Kinetics study and degradation prediction // Journal of Dispersion Science and Technology. 2021. Vol. 42. Iss. 9. P. 1299-1310. DOI: [10.1080/01932691.2020.1740727](https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1740727)
66. Yang Yang, Xiaoxuan He, Dalong Sun et al. Pseudointerpenetrating network nanocomposite hydrogel for temporary plugging in fractured reservoirs // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 656. Part A. № 130369. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2022.130369](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130369)
67. Uguna G., Rachid R., Milne A., Ali S. Controlling Losses When Recompleting Low-Pressure Reservoirs // SPE European Formation Damage Conference and Exhibition. 2015. № SPE-174169-MS. DOI: [10.2118/174169-MS](https://doi.org/10.2118/174169-MS)
68. Zheng Kang, Yin-Tao Liu, Hu Jia et al. Progress and Prospects of In Situ Polymer Gels for Sealing Operation in Wellbore and Near-Well Zone // Energy & Fuels. 2024. Vol. 38. Iss. 5. P. 3539-3563. DOI: [10.1021/acs.energyfuels.3c04382](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c04382)
69. Telin A., Lenchenkova L., Yakubov R. et al. Application of Hydrogels and Hydrocarbon-Based Gels in Oil Production Processes and Well Drilling // Gels. 2023. Vol. 9. Iss. 8. № 609. DOI: [10.3390/gels9080609](https://doi.org/10.3390/gels9080609)
70. Патент № 2746499 РФ. Вязкоупругая композиция для применения в технологиях добычи нефти и газа / Л.А.Магадова, М.А.Силин, Д.Н.Малкин, П.К.Крисанова. Опубл. 14.04.2021. Бюл. № 11.
71. Токунов В.И., Саушин А.З. Технологические жидкости и составы для повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин. М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. 711 с.
72. Рябоконт С.А., Мартынов Б.А., Доктор С.А. Технологические решения при заканчивании и ремонте скважин, направленные на сохранение коллекторских свойств продуктивных пластов // Бурение и нефть. 2008. № 9. С. 4-7.
73. Ross C.M., Williford J., Sanders M.W. Current Materials and Devices for Control of Fluid Loss // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 20-22 April 1999, Jakarta, Indonesia. OnePetro, 1999. № SPE-54323-MS. DOI: [10.2118/54323-MS](https://doi.org/10.2118/54323-MS)
74. Dick M.A., Heinz T.J., Svoboda C.F., Aston M. Optimizing the Selection of Bridging Particles for Reservoir Drilling Fluids // SPE International Symposium on Formation Damage Control, 23-24 February 2000, Lafayette, LA, USA. OnePetro, 2000. № SPE-58793-MS. DOI: [10.2118/58793-MS](https://doi.org/10.2118/58793-MS)
75. Svoboda C. Optimizing High-Temperature Kill Pills: The Åsgard Experience // SPE Drilling & Completion. 1999. Vol. 17. Iss. 1. № SPE-76639-PA. DOI: [10.2118/76639-PA](https://doi.org/10.2118/76639-PA)
76. Патент № 2287549 РФ. Стабильные жидкие суспензионные композиции и способ их получения и применения / К.Б.Фокс. Опубл. 20.11.2006. Бюл. № 32.
77. Патент № 2004120281 РФ. Не наносящая ущерба жидкость для снижения поглощения бурового раствора и способ ее применения / М.Сэмьюэл, Р.Марсинева, К.Ж.Джун. Опубл. 27.03.2005. Бюл. № 9.
78. Samuel M., Marcinev R., Al-Harbi M. et al. A New Solids-Free Non-Damaging High Temperature Lost-Circulation Pill: Development and First Field Applications // SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 9-12 June 2003, Bahrain. OnePetro, 2003. № SPE-81494-MS. DOI: [10.2118/81494-MS](https://doi.org/10.2118/81494-MS)



79. *Vickers S., Cowie M., Jones T. et al.* A new methodology that surpasses current bridging theories to efficiently seal a varied pore throat distribution as found in natural reservoir formations // AADE Drilling Fluids Technical Conference, 11-12 April 2006, Houston, TX, USA. American Association of Drilling Engineers, 2006. № AADE-06-DF-HO-16.
80. *Araujo A., Calderon A.* Field Use of Temporary Fluid-Loss Control Pill During Deepwater Completions in High Permeability Formations // SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, 21-23 April 1999, Caracas, Venezuela. OnePetro, 1999. № SPE-53924-MS. DOI: [10.2118/53924-MS](https://doi.org/10.2118/53924-MS)
81. Патент № 2380391 РФ. Технологическая скважинная жидкость с контролируемым поглощением в термобарических условиях пласта / О.В.Акимов, С.Е.Здольник, В.Н.Гусаков, Д.Л.Худяков, Н.Н.Краевский. Оpubл. 27.01.2010. Бюл. № 3.
82. *Гусаков В.Н., Краевский Н.Н., Хакимов А.Ф. и др.* Технология предупреждения поглощений при проведении текущего ремонта скважин в условиях низких пластовых давлений // Нефтяное хозяйство. 2013. № 10. С. 50-51.
83. Патент № 2482152 РФ. Технологическая скважинная жидкость с низкими повреждающими свойствами и контролируемым поглощением в термобарических условиях пласта / С.Е.Здольник, О.В.Акимов, Д.Л.Худяков, А.С.Малышев, В.Н.Гусаков, Н.Н.Краевский. Оpubл. 20.05.2013. Бюл. № 14.
84. *Yousry Abd El-Aziz Mohamed, El-Gindy A.T., El-Agamy H.A. et al.* Field Application of Newly Designed Non-Damaging Sealing Killing Fluid to Control Losses in Completion and Workover Operations in Western Desert, Egypt // SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference, 28-30 June 2021. OnePetro, 2021. № SPE-200936-MS. DOI: [10.2118/200936-MS](https://doi.org/10.2118/200936-MS)
85. *Cuixia Li, Xiaoping Qin, Liangchuan Li et al.* Preparation and Performance of an Oil-Soluble Polyethylene Wax Particles Temporary Plugging Agent // Journal of Chemistry. 2018. Vol. 2018. Iss. 1. № 7086059. DOI: [10.1155/2018/7086059](https://doi.org/10.1155/2018/7086059)
86. *Амиян В.А., Амиян А.В.* Повышение производительности скважин. М.: Недра, 1986. 159 с.
87. *Тагиров К.М., Гасунов Р.А., Перейма А.А., Минликаев В.З.* Пенные системы с наполнителем для глушения скважин // Газовая промышленность. 1999. № 8. С. 50-51.
88. *Lijuan Pan, Huifeng Liu, Wu Long et al.* A Novel Foamy Well Killing Fluid for Low-Pressure Gas Reservoirs in Tarim Basin, China // International Petroleum Technology Conference, 23 March – 1 April 2021. OnePetro, 2021. № IPTC-21434-MS. DOI: [10.2523/IPTC-21434-MS](https://doi.org/10.2523/IPTC-21434-MS)
89. *Dongdong Liu, Renyuan Sun, Yunfei Zhang et al.* A Low Density Micro-Foam Workover Fluid for Deep and Ultra-Deep Wells with Low-Pressure Coefficient and High Inorganic Salt // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2024. Vol. 682. № 132870. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2023.132870](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132870)
90. *Гурбанов А.Г., Баснаев Е.Т.* Новый способ глушения газопровяляющих скважин // SOCAR Proceedings. 2022. № 2. С. 28-34. DOI: [10.5510/OGP20220200671](https://doi.org/10.5510/OGP20220200671)
91. *Telin A., Karazeev D., Vezhnin S. et al.* Use of Self-Generating Foam Gel Composition with Subsequent Injection of Hydrogel to Limit Gas Inflow in Horizontal Wells of Vostochno-Messoyakhskoye Field // Gels. 2024. Vol. 10. Iss. 4. № 215. DOI: [10.3390/gels10040215](https://doi.org/10.3390/gels10040215)
92. *Васильченко С.В., Меденцев С.В.* Решение проблем вскрытия истощенных пластов: технология афронов // Бурение и нефть. 2003. № 6. С. 36-37.
93. Патент № 2322472 РФ. Технологическая жидкость для глушения нефтегазовых скважин и способ ее приготовления / Н.Г.Усанов, Р.К.Андресон, Е.А.Гильванова, В.Н.Гусаков, А.Г.Телин, Г.З.Калимуллина. Оpubл. 20.04.2008. Бюл. № 11.
94. *Бондаренко А.В., Исламов Ш.Р., Мардашов Д.В.* Комплексная методика исследований по разработке эмульсионных блокирующих составов для глушения добывающих скважин // Территория «Нефтегаз». 2018. № 10. С. 42-49.
95. *Mardashov D.V., Rogachev M.K., Zeigman Y.V., Mukhametshin V.V.* Well Killing Technology before Workover Operation in Complicated Conditions // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 3. № 654. DOI: [10.3390/en14030654](https://doi.org/10.3390/en14030654)
96. *Дурагин В.Н., Лыманов М.Н., Онегов Н.А., Шамсутдинова Г.Т.* Глушение морских скважин // Бурение и нефть. 2023. Спец. вып. 1. С. 44-47.
97. *Mardashov D., Duryagin V., Islamov S.* Technology for Improving the Efficiency of Fractured Reservoir Development Using Gel-Forming Compositions // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 24. № 8254. DOI: [10.3390/en14248254](https://doi.org/10.3390/en14248254)
98. *Силин М.А., Мазадова Л.А., Гаевой Е.Г. и др.* Применение жидкостей глушения на полисахаридной основе в скважинах с низким давлением и после гидроразрыва пласта // Нефтяное хозяйство. 2010. № 4. С. 104-107.
99. *Зейгман Ю.В., Мухаметшин В.Ш., Хафизов А.Р., Харина С.Б.* Перспективы применения многофункциональных жидкостей глушения скважин в карбонатных пластах // Socar Proceedings. 2016. № 3. С. 33-39. DOI: [10.5510/OGP20160300286](https://doi.org/10.5510/OGP20160300286)
100. *Никулин В.Ю., Мукминов Р.Р., Мухаметов Ф.Х. и др.* Обзор перспективных технологий глушения скважин в условиях anomalно низких пластовых давлений и резкого прорыва газа. Часть 1. Классификация технологий и опыт применения загущенных жидкостей на водной и углеводородной основе // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20. № 3. С. 87-96. DOI: [10.17122/ngdolo-2022-3-87-96](https://doi.org/10.17122/ngdolo-2022-3-87-96)
101. *Гребенюк А.Н., Куришев А.В., Корытко И.А. и др.* Обоснование эффективных технологий глушения скважин в условиях трещиноватых карбонатных коллекторов Восточной Сибири // Инженерная практика. 2023. № 3.
102. *Никулин В.Ю., Бритов Е.В., Мукминов Р.Р. и др.* Применение состава с мгновенной фильтрацией для контроля поглощений при глушении скважин, эксплуатирующих низкотемпературные терригенные коллекторы Восточной Сибири // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 1. С. 76-80. DOI: [10.24412/2076-6785-2023-1-76-80](https://doi.org/10.24412/2076-6785-2023-1-76-80)
103. *Никулин В.Ю., Мукминов Р.Р., Нигматуллин Т.Э. и др.* Снижение негативного влияния растворов глушения высокой плотности на продуктивность газовых скважин, эксплуатирующих ачимовские коллекторы. Часть 2. Обоснование применения блокирующих составов // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 4. С. 16-21. DOI: [10.24412/2076-6785-2023-4-16-21](https://doi.org/10.24412/2076-6785-2023-4-16-21)
104. *Демахин С.А., Меркулов А.П., Касьянов Д.Н. и др.* Глушение скважин блок-пачками – эффективное средство сохранения фильтрационных свойств продуктивного пласта // Нефть. Газ. Новации. 2015. № 1. С. 66-69.
105. *Меркулов А.П., Мершиев М.П.* Глушение скважин с anomalно низким пластовым давлением (АНПД) химическими реагентами группы компаний Zigrax // Нефть. Газ. Новации. 2019. № 7. С. 13-15.
106. *Yong-li Yan, Yang Zhang, Christian-chibuike Una.* On the nature of colloidal aphrons // Colloid and Interface Science Communications. 2020. Vol. 34. № 100232. DOI: [10.1016/j.colcom.2019.100232](https://doi.org/10.1016/j.colcom.2019.100232)



107. Патент № 2301822 РФ. Буровой раствор / Н.Г.Усанов, Р.К.Андресон, Е.А.Гильванова, П.М.Зобов, В.Е.Андреев, Ю.А.Котенев, Н.Ш.Хайрединов, В.Н.Поляков, Ю.С.Кузнецов, Р.Р.Хузин. Оpubл. 27.06.2007. Бюл. № 18.
108. Патент № 2563856 РФ. Способ бурения скважин, осложненных поглощающими горизонтами / А.М.Нацепинская, Ф.Н.Гребнева, С.Е.Ильясов, Г.В.Окромелидзе, О.В.Гаршина, П.А.Хвоцин, С.Г. Попов, П.И.Клыков. Оpubл. 20.09.2015. Бюл. № 26.
109. *Рабеев Р.У.* К вопросу применения афронсодержащих буровых растворов для бурения скважин в осложненных условиях на месторождениях Черноморского шельфа // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 5 (133). С. 9-23. DOI: [10.17122/nij-oil-2021-5-9-23](https://doi.org/10.17122/nij-oil-2021-5-9-23)
110. *Jinliang Han, Jinsheng Sun, Kaihe Lv et al.* Polymer Gels Used in Oil-Gas Drilling and Production Engineering // Gels. 2022. Vol. 8. Iss. 10. № 637. DOI: [10.3390/gels8100637](https://doi.org/10.3390/gels8100637)
111. Патент № 2332439 РФ. Газонаполненный состав для изоляции водопритока в скважину / В.А.Волков, В.Г.Беликова. Оpubл. 27.08.2008. Бюл. № 24.
112. *Xiaoyong Li., Lihui Zheng, Yuanbo Chen et al.* Fuzzy-Ball Fluids Enhance the Production of Oil and Gas Wells: A Historical Review // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 18. № 6647. DOI: [10.3390/en16186647](https://doi.org/10.3390/en16186647)
113. *Fanghui Zhu, Lihui Zheng, Yang Zhao et al.* Plugging Efficiency in Fractured Carbonate Gas Reservoirs Using Fuzzy-Ball Fluids Combined with Solid Plugging Agents // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 18. № 6688. DOI: [10.3390/en16186688](https://doi.org/10.3390/en16186688)

**Авторы:** **Данабек Салдырович Садуакасов**, канд. техн. наук, и.о. ассоциированного профессора, <https://orcid.org/0000-0003-1248-8747> (Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова, Актау, Республика Казахстан), **Акшырын Тангалиевна Жолбасарова**, канд. техн. наук, и.о. ассоциированного профессора, <https://orcid.org/0000-0002-4258-7933> (Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова, Актау, Республика Казахстан), **Рыскуль Умаровна Баямирова**, канд. техн. наук, и.о. ассоциированного профессора, <https://orcid.org/0000-0003-1588-3144> (Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова, Актау, Республика Казахстан), **Алия Ризабековна Тогашева**, канд. техн. наук, и.о. ассоциированного профессора, <https://orcid.org/0000-0002-5615-2711> (Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова, Актау, Республика Казахстан), **Максат Токсанович Табылганов**, канд. техн. наук, и.о. ассоциированного профессора, <https://orcid.org/0000-0003-3807-2774> (Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова, Актау, Республика Казахстан), **Маншук Дагистановна Сарбопеева**, PhD, и.о. ассоциированного профессора, <https://orcid.org/0000-0003-1721-119X> (Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова, Актау, Республика Казахстан), **Актоты Гарифоллаевна Касанова**, докторант PhD, <https://orcid.org/0000-0002-6604-2575> (Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова, Актау, Республика Казахстан), **Виктор Николаевич Гусаков**, канд. хим. наук, заместитель директора по научной работе, <https://orcid.org/0009-0005-3831-7251> (Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН, Уфа, Республика Башкортостан, Россия), **Алексей Герольдович Телин**, канд. хим. наук, заместитель директора по научной работе, [telinag@ufntc.ru](mailto:telinag@ufntc.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0822-8515> (ООО «Уфимский научно-технический центр», Уфа, Республика Башкортостан, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Определение касательной составляющей сопротивления резанию мерзлых осадочных пород по блокированной, глубокоблокированной и сотовой схемам

С.А.Шемякин, Е.А.Шишкин✉

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

**Как цитировать эту статью:** Шемякин С.А., Шишкин Е.А. Определение касательной составляющей сопротивления резанию мерзлых осадочных пород по блокированной, глубокоблокированной и сотовой схемам // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16356. С. 136-144. [EDN FRCVVZ](#)

### Аннотация

В связи с недостаточной для практических расчетов точностью существующих исследований процесса резания мерзлых осадочных пород в работе решается задача определения касательной составляющей сопротивления резанию для блокированного, глубокоблокированного и сотового резания, наиболее часто используемых в землеройной технике. Рассмотрено силовое взаимодействие режущего инструмента с массивом породы с точки зрения возникающих напряжений, действующих на отделяющийся элемент стружки. Получены аналитические зависимости для определения касательной составляющей сопротивления резанию. Приведено численное обоснование выбора сотового резания по отношению к блокированному и глубокоблокированному резанию. Для всех трех случаев резания при равных геометрических параметрах режущего инструмента и физико-механических характеристиках мерзлой породы получены численные значения касательной составляющей сопротивления резанию. Сравнение расчетных значений сопротивления резанию показало, что сотовое резание требует меньших затрат энергии и предпочтительно при разработке мерзлых осадочных пород. В ходе полевых и лабораторных исследований с применением универсального стенда установлена удовлетворительная сходимость аналитических положений с физической картиной резания мерзлых осадочных пород. Результаты исследований позволяют более обоснованно подходить к корректировке существующих методик определения необходимых тяговых усилий и потребной мощности на привод выемочных машин, а следовательно, фактической производительности и рентабельности выполнения работ.

### Ключевые слова

мерзлые осадочные породы; блокированное резание; глубокоблокированное резание; сотовое резание; режущий инструмент; напряжения; сопротивление резанию; стенд

Поступила: 07.12.2023

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 07.04.2025

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Большая часть поверхностного слоя территории Российской Федерации покрыта осадочными породами (глины, суглинки, супеси, пески), которые из-за горно-климатических условий 6-8 мес. в году находятся в мерзлом или вечномерзлом состоянии [1]. Горные предприятия на разрезах в зимнее время для разрушения мерзлой породы применяют локальный или массовый взрыв [2]. С учетом всех затрат на буровзрывные работы, включая стоимость взрывчатых веществ, складские помещения и их охрану, транспорт, стоимость взрывного и бурового оборудования, содержание бригады взрывников и буровиков, простои горной техники в ожидании взрыва и на рассеивание взрывного облака, расчетная себестоимость разрушения слоя мерзлой породы достаточно высока [3]. Повышение стоимости взрывчатых веществ, а в ряде случаев и трудности с их приобретением, привело к попыткам отказа от буровзрывных работ. Другой путь – использование специальных машин, работающих по принципу механического разрушения, а именно рыхления (резания) [4, 5]. К этой категории следует отнести навесные рыхлители на тракторах промышленного назначения, экскаваторы с фрезерным оборудованием, траншейные экскаваторы (роторные и цепные), карьерные фрезерные комбайны, буровые машины и т.д. [6, 7]. Механический способ не связан с выполнением



значительных по объему подготовительных работ, а также дает возможность наряду со специальными землеройными машинами применять горные машины, предназначенные преимущественно для разработки талых пород. Механический способ выемки мерзлых пород по принципу резания доминирует в строительстве и горном деле [8, 9].

На протяжении более 70 лет целая плеяда российских ученых проводила исследования в области сопротивления резанию и черпанию мерзлых пород [10, 11]. Работы, выполненные Н.Г. Домбровским, А.Н. Зелениным, В.В. Абезгаузом, М.И. Гальпериным, В.И. Баловневым, Ю.А. Ветровым и др., дали определенный материал для понимания закономерностей резания мерзлых пород. Однако изученность процесса резания мерзлых пород еще не отвечает современным требованиям промышленности при создании новой техники. Зависимости для определения сопротивлений резанию носят эмпирический характер и не учитывают физическую картину и сущность резания [12–14]. Есть противоречия в определении влияния крепости породы на сопротивление резанию [15]. Результаты расчета по известным эмпирическим зависимостям касательной составляющей усилия резания свидетельствуют о значительном расхождении значений, при этом максимальное значение превышает минимальное в 4,8 раза [16–18].

Принципиальное отличие предлагаемой методики определения сопротивления резанию мерзлых осадочных пород заключается в том, что она носит аналитический характер с последующей проверкой полученных результатов экспериментальным путем для основных схем резания, применяемых на практике (блокированного, глубокоблокированного и сотового резания).

### Методология

Целью исследования является разработка аналитических зависимостей определения касательной составляющей сопротивления блокированному, глубокоблокированному и сотовому резанию. Сравнение численных значений касательной составляющей сопротивления резанию для этих видов при равных геометрических параметрах режущего инструмента и типе мерзлой породы позволит определить наиболее эффективную с точки зрения энергоемкости выемку породы.

Схема блокированного резания приведена на рис.1 [19]. При блокированном резании элементы отделяемых стружек представляют собой тела достаточно сложной формы (рис.2) [19].

Форма элемента стружки представляет собой при небольших допущениях половину усеченного конуса [20–22] глубиной  $(h - h_2)$ , ограниченного поверхностью ОПС. Касательную составляющую резания  $P_{01}$  можно определить при рассмотрении предельного состояния элемента стружки перед отрывом от основного массива [23]. Параметры режущего инструмента – угол резания  $\alpha_p$ , угол заострения  $180^\circ$ . Нормально к поверхности отделения действуют напряжения разрыва  $\sigma_p$ , по касательной к поверхности – напряжения сдвига  $\tau$  [24]. В нижней части (плоскость  $h_2S$ ) происходит формирование уплотненного ядра и, следовательно, смятие породы напряжениями  $\sigma_{см}$  [25, 26].

В данной методике рассматривается резание зубьями, при котором параметры  $h$ ,  $S$ ,  $\alpha_p$ ,  $h_2$  могут варьировать в широком диапазоне. Резание осуществлялось на связных (суглинках) и несвязных (песке) мерзлых осадочных породах, что учитывается величинами  $\sigma_p$ ,  $\tau$  и  $\sigma_{см}$ . Во время экспериментов измерялись параметры прорези и, в частности зона  $h_2$ , где нет развала под углом  $\theta$  и формируется уплотненное ядро смятой породы. Выведена эмпирическая зависимость для определения величины  $h_2$  [11, 19]:

- для несвязных мерзлых пород (песка)  $h_2 = 1,021h^{-0,46} e^{0,029h}$ ;
- для связных мерзлых пород (суглинков)  $h_2 = 0,728h^{-0,024} e^{0,067h}$ .

В зависимости от величины  $h_2$  сечение прорези разбивают на две зоны.

На схеме действия сил (рис.2) сила  $N$  и ее составляющие  $P_{01}$  и  $P_{02}$  являются внешними силами, действующими со стороны рабочего органа на массив. Сила  $P$  и ее составляющие  $P_1$  и  $P_2$  являются внутренними силами, действующими со стороны уплотненного ядра на отделяющийся элемент стружки. Силы  $P'_{01}$  и  $P'_{02}$  являются составляющими внутреннего сопротивления смятию со стороны массива, действующими на уплотненное ядро. Силы  $P_x^{пз}$  и  $P_y^{пз}$  являются составляющими

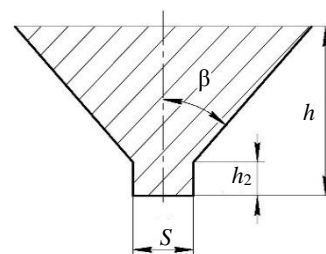


Рис.1. Схема сечения прорези при блокированном резании  
 $\beta$  – угол развала;  $S$  – ширина режущего инструмента;  $h$  – глубина прорези;  $h_2$  – глубина нижней части прорези

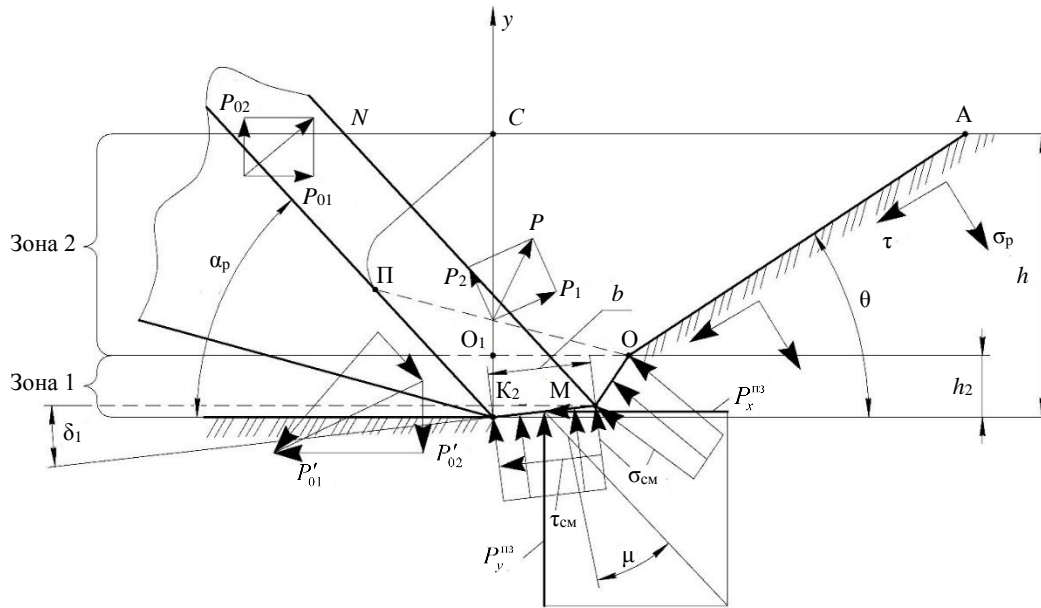


Рис.2. Расчетная схема заблокированного резания

внутреннего сопротивления со стороны массива породы, действующими на площадку затупления рабочего органа. Сила  $P_{01}$  равна сумме трех слагаемых: касательной составляющей силового воздействия со стороны массива на уплотненное ядро, на отделяющийся элемент стружки, на площадку затупления рабочего органа. Все касательные составляющие внутренних сил воздействия на рабочий орган сведены в формуле с определенными углами наклона к оси  $x$ . Таким образом, приложение сил на схеме (рис.2) выполнено для общего представления о внутренних сопротивлениях при движении рабочего органа в массиве мерзлой породы, а не для соответствия друг другу.

Опуская тригонометрические соотношения размеров и напряжений и суммируя сопротивления в зонах 1 и 2, а также сопротивления, связанные с затуплением режущего инструмента, получим аналитическую зависимость определения касательной составляющей сопротивления заблокированному резанию мерзлой осадочной породы:

$$P_{01} = \sigma_{cm} \left[ Sh_2 + \frac{\xi_1 h_2^2 \operatorname{tg} \varphi_2 \sin(2\alpha_p + \psi)}{\sin(\alpha_p + \psi)} + \frac{\xi_1 S^2 \operatorname{tg} \varphi_2}{8} + \frac{\pi S h_2 \operatorname{tg} \varphi_2 \operatorname{ctg}(\alpha_p + \psi)}{2} \right] + \quad (1)$$

$$+ (\tau - \sigma_p \operatorname{tg} \theta) \left[ \frac{h - h_2}{\operatorname{tg}^2 \theta} (S \operatorname{tg} \theta + h - h_2) \right] + \frac{\sigma_{cm} b S \sin(\delta_1 + \mu)}{\cos \mu},$$

где  $b$  – ширина площадки износа;  $\delta_1$  – угол наклона между плоскостью площадки износа и касательной к траектории движения режущего инструмента;  $\mu$  – угол трения породы по режущему инструменту;  $\xi_1$  – коэффициент бокового распора породы;  $\varphi_2$  – угол трения породы о породу;  $\alpha_p$  – угол резания;  $\theta$  – угол переднего отрыва;  $\psi$  – угол между лобовыми поверхностями уплотненного ядра и режущего инструмента.

В вопросах резания мерзлых пород дифференцирование напряжений в различных зонах поперечного сечения стружки не проводилось, поэтому основным отличием выполненной работы является разделение сечения по зонам с различными напряжениями. Суммирование касательных составляющих возникающих сопротивлений в зонах отделения элементов стружки, уплотненного ядра и по площадке затупления проводилось на основании фундаментальных законов физики твердого тела, теоретической механики и сопротивления материалов.

Степень крепости (мерзлотности) породы учитывается в формуле (1) напряжениями  $\sigma_p$ ,  $\tau$ ,  $\sigma_{cm}$ , значения которых в зависимости от температуры приведены в литературе по механике мерзлых пород (грунтов). Здесь следует отметить труды А.Н.Зеленина, Г.М.Веселова, А.Н.Степанова, Н.К.Пекарской, С.С.Вялова, М.И.Ровинского, Г.А.Шлойдо, Л.И.Свердловой и многих других исследователей.



Глубокоблокированное резание (рис.3) используется при разрушении мерзлых пород значительно реже, чем блокированное [27-29]. При работе роторных траншейных экскаваторов на мерзлых породах в нижней части забоя срезание происходит тонкими стружками и развала породы в прорезях после прохода режущего инструмента нет [30, 31]. Здесь наблюдается глубокоблокированное резание. Подобный процесс происходит и при работе фрезерных комбайнов на любых породах – слабых и средней крепости [32]. Если рыхлительный зуб бульдозерно-рыхлительного агрегата после прохода в породе при блокированном резании снова вводит в прорез с целью углубления, то будет происходить глубокоблокированное резание [33]. Глубокоблокированное резание исследовалось только экспериментально [34, 35], поэтому теоретическое толкование этого вопроса представляет существенный интерес.

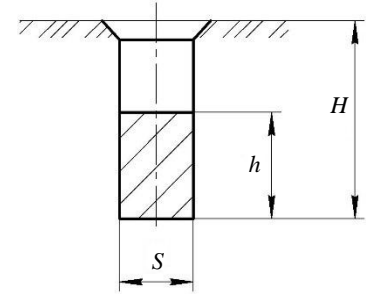


Рис.3. Схема сечения прорези при глубокоблокированном резании

$H$  – расстояние от поверхности массива до дна прорези

Касательная составляющая сопротивления мерзлой породе глубокоблокированному резанию определяется путем суммирования сопротивления резанию в зонах 1 и 2 (рис.4), учитывая касательную составляющую сопротивления сдвигу срезанной стружки по двум боковым плоскостям ABCD, а также по плоскости АД и лобовой поверхности притупленного режущего инструмента из прорези.

В конечном виде аналитическая зависимость определения касательной составляющей сопротивления глубокоблокированному резанию имеет вид:

$$P_{01} = \sigma_{cm} \left[ Sh_2 + \frac{\xi_1 h_2^2 \operatorname{tg} \varphi_2 \sin(2\alpha_p + \psi)}{\sin(\alpha_p + \psi)} + \frac{\xi_1 S^2 \operatorname{tg} \varphi_2}{8} + \frac{\pi S h_2 \operatorname{tg} \varphi_2 \operatorname{ctg}(\alpha_p + \psi)}{2} \right] +$$

$$+ 2\tau \cos \theta \left\{ \frac{(h-h_2)^2}{2\operatorname{tg} \alpha_p} + \frac{h_2^2}{\operatorname{tg} \alpha_p} + h_2^2 \operatorname{tg} [\psi - (90 - \alpha_p)] + \frac{h_2 S}{2} + \frac{(h-h_2)^2}{2\operatorname{tg} \theta} \right\} +$$

$$+ S(h-h_2)(\tau \cos \theta - \sigma_p \sin \theta) + h(H-h)S\gamma_n \operatorname{ctg} \alpha_p (\mu_1 \cos \alpha_p + \sin \alpha_p), \quad (2)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент трения породы о сталь;  $\gamma_n$  – объемная сила тяжести срезанной породы.

По расчету согласно формуле (2) при значениях параметров, равных указанным выше значениям, касательная составляющая сопротивления резанию составит  $P_{01} = 85600$  Н, что в 1,6 раза больше, чем при блокированном резании.

Сотовое резание (рис.5) широко применяется на машинах для выемки мерзлых пород [36]. К ним относятся роторные и цепные траншейные экскаваторы, баровые установки на тракторах, карьерные фрезерные комбайны и т.д. [37, 38].

Для аналитического определения касательной составляющей сопротивления резанию  $P_{01}$  целесообразно разделить поверхности на четыре зоны (рис.6) [19], проинтегрировать возникающие напряжения в каждой зоне и с учетом тригонометрических функций сложить полученные усилия.

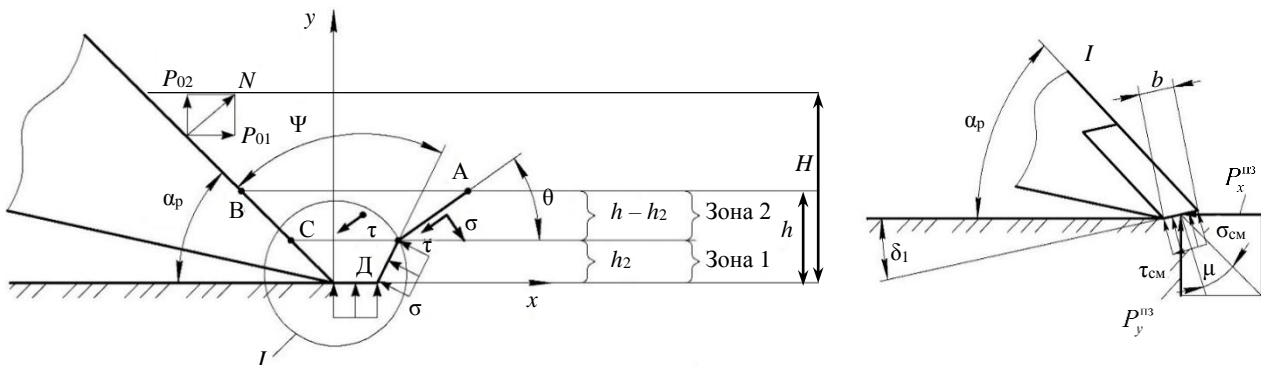


Рис.4. Схема возникновения в предельном состоянии на отделяющийся элемент стружки напряжений сопротивлений при глубокоблокированном резании



В результате аналитическая зависимость определения касательной составляющей сопротивлению сотовому резанию имеет вид:

$$P_{01} = \sigma_{см} \left[ Sh_2 + \frac{bS \sin(\delta_1 + \mu)}{\cos \mu} \right] + \frac{(\tau - \sigma_p \operatorname{tg} \theta)}{\operatorname{tg}^2 \theta} \left\{ \left[ \frac{h}{2} \left( \operatorname{Stg} \theta + \frac{h}{2} \right) + \frac{2h_2^2 (\operatorname{Stg} \theta + h - h_2)}{3(\operatorname{Stg} \theta + h)} \right] + \left[ \frac{(\operatorname{Stg} \theta + 2h - 2h_2)^2 - (\operatorname{Stg} \theta + h)^2}{4} \right] \left[ \frac{\operatorname{Stg} \theta + h - 2h_2}{3,5(\operatorname{Stg} \theta + h)} + \frac{2,5 \operatorname{Stg} \theta}{3,5(\operatorname{Stg} \theta + 2h - 2h_2)} \right] \right\}. \quad (3)$$

При указанных ранее значениях величин, входящих в формулу (3), для сотового резания касательная составляющая сопротивления резанию составит  $P_{01} = 33400 \text{ Н}$ , что в 1,63 раза меньше, чем при заблокированном резании, и в 2,5 раза меньше, чем при глубокоблокированном резании.

**Методика проведения лабораторных и полевых испытаний**

Для подтверждения сходимости полученных взаимосвязей (1)-(3) с физикой процесса резания мерзлых осадочных пород проведена серия экспериментов по резанию мерзлых суглинков и песков с коэффициентом крепости 2 в естественных условиях при температуре окружающего воздуха

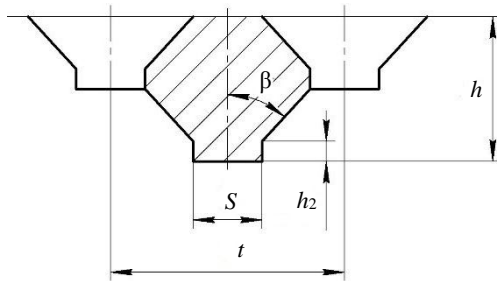


Рис.5. Схема сечения прорези при сотовом резании мерзлой породы  
t – шаг резания

от  $-10$  до  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$  [39-41]. Резание осуществлялось с помощью универсального стенда (рис.7), агрегатированного с трактором ДТ-75. Поскольку песчаную породу найти в естественном залегании довольно сложно и только в поймах рек, то резание песчаных пород велось в лабораторных условиях на замороженных блоках размером  $1,2 \times 1,2 \times 0,4 \text{ м}$  в морозильной камере с температурой от  $-15$  до  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  и последующей установкой замороженного блока под режущий инструмент стенда.

Режущий инструмент (стальные зубья) имел ширину режущей кромки 40 мм с напайками из ВК-8 и площадкой затупления 3 мм. Возможность заглубления зубьев в породу составляла 300 мм.

Характеристика стенда: максимальная скорость резания 0,8 м/с, максимальное усилие резания 180 кН, наибольшая глубина резания 0,4 м. Стенд включает измерительную тележку 6, установленную на раму 4 (рис.7). В процессе измерений горизонтальность рамы обеспечивается с помощью лыж 3, а тяговое усилие от трактора передается на раму через шаровый шарнир 1. Транспортировка стенда к месту измерений осуществляется посредством пневматических колес 5. Расстояние от рамы до слоя породы изменяется посредством винтовых домкратов 2, вмонтированных в лыжи 3. Передвижение

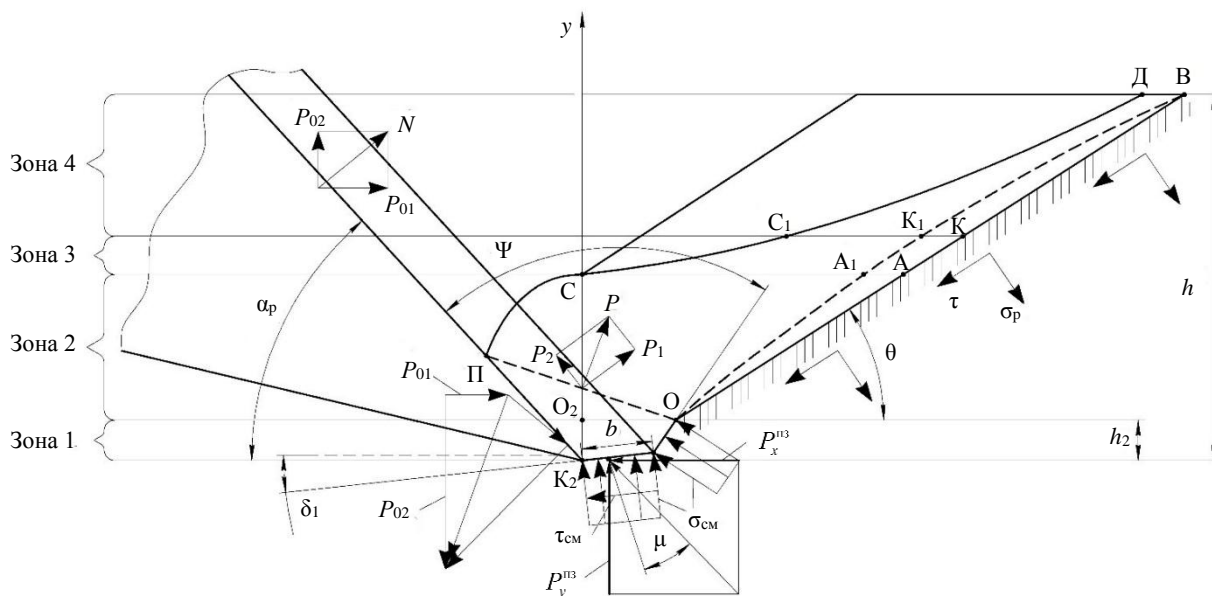


Рис.6. Расчетная схема сотового резания

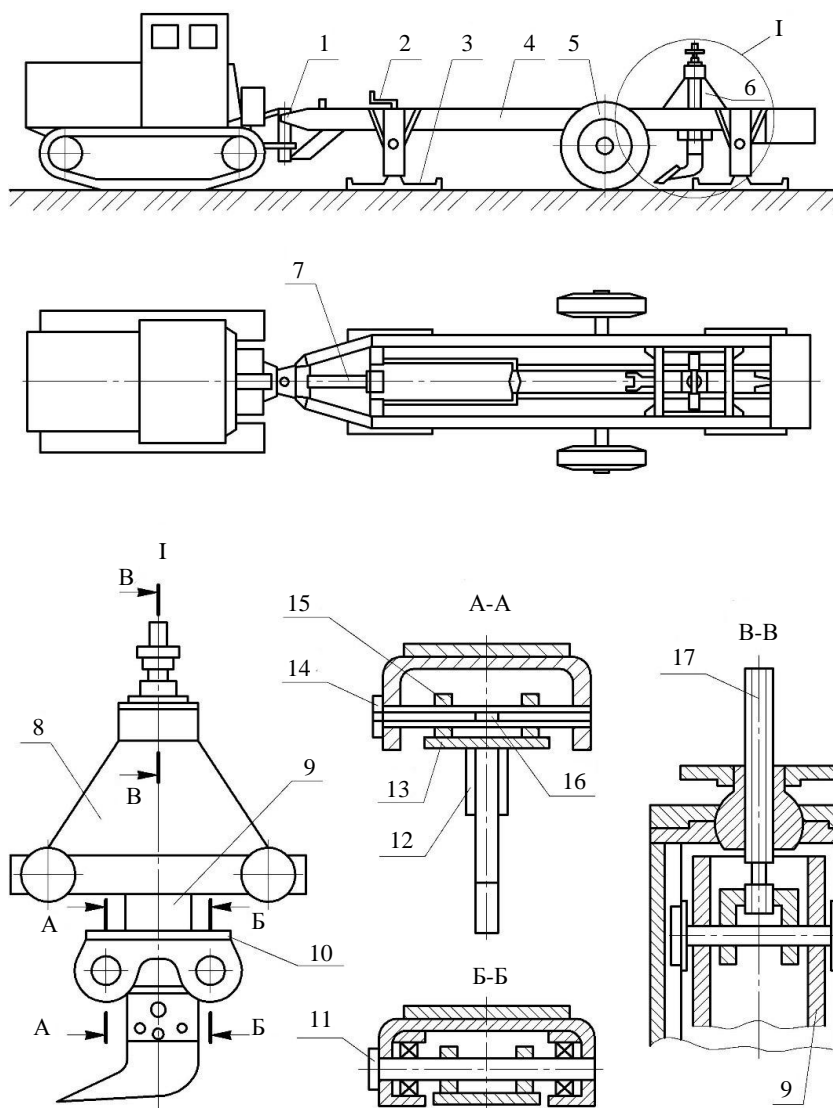


Рис.7. Схема станда для послойного резания породы

измерительной тележки 6 вдоль направляющих рамы 4 производится с помощью гидроцилиндра 7, подключенного к гидросистеме трактора. Стойка 9, установленная в раме 8 измерительной тележки, перемещается с помощью винта 17. В отверстиях фланца 10 установлены измерительная ось 14 и задняя ось 11. Рабочий орган подвешен на осях 11, 14 посредством фланцев 13 с проушинами 15 и направляющими 12. Касательная компонента сопротивления резанию фиксируется при помощи датчиков 16, установленных на оси 14 в вертикальной плоскости. Нормальная составляющая сопротивления резанию фиксируется датчиками, установленными на оси 14 в горизонтальной плоскости.

При испытании пород на срез со сжатием и растяжением косвенным способом диаметрального сжатия применялись образцы высотой 100 мм и диаметром 71,4 мм. Напряжение смятия измерялось путем вдавливания в породу стального пуансона с помощью универсальной испытательной машины УММ-50 (ГОСТ 7855-61).

В ходе экспериментальных исследований определялись параметры прорези, оставляемые режущим инструментом: угол развала  $\beta$ , глубина  $h_2$  и  $h$ , угол переднего отрыва  $\theta$ , угол между лобовой поверхностью уплотненного ядра и лобовой поверхностью режущего инструмента  $\psi$ .

### Обсуждение результатов

В результате сравнения экспериментальных данных с расчетными по зависимостям (1)-(3) установлена удовлетворительная сходимость аналитических положений с физической картиной блокированного, глубокоблокированного и сотового резания мерзлых осадочных пород (расхождение не превышает 11 %). Из большого количества опытов в данном случае было отобрано несколько (табл.1-3).



Таблица 1

Расчетные величины максимальных значений касательной составляющей сопротивления резанию одним зубом по блокированной схеме согласно уравнению (1)

Номер опыта	Порода	$h$ , м	$a_p$ , град	$S$ , мм	$b$ , мм	$\delta_1$ , град	$\mu$ , град	$h_2$ , мм	$\xi_1$	$\phi_2$ , град	$\psi$ , град	$\sigma_{св}$ , Н/см <sup>2</sup>	$\tau$ , Н/см <sup>2</sup>	$\sigma_p$ , Н/см <sup>2</sup>	$T$ , °С	$P_{01}$ , Н (расчет)	$P_{01}$ , Н (опыт)	Ошибка расчета, %
1	Мерзлый песок	0,1	35	40	5	5	12	20	0,4	40	80	2000	300	195	-10	5350	5280	11
2	Мерзлый песок	0,2	35	40	5	5	12	25	0,4	40	80	2000	300	195	-15	1070	1050	10,8
3	Мерзлый суглинок	0,1	35	40	5	5	12	23	0,4	35	75	1800	250	180	-10	19000	20000	-8,15
4	Мерзлый суглинок	0,2	35	40	5	5	12	25	0,4	35	75	1800	250	180	-10	38000	37000	10,5

Таблица 2

Расчетные величины максимальных значений касательной составляющей сопротивления резанию одним зубом по глубокоблокированной схеме согласно уравнению (2)

Номер опыта	Порода	$h_1$ , м	$h_2$ , мм	$S$ , мм	$b$ , мм	$\delta_1$ , град	$\mu$ , град	$h_2$ , мм	$\phi_2$ , град	$\psi$ , град	$\sigma_{св}$ , Н/см <sup>2</sup>	$\tau$ , Н/см <sup>2</sup>	$\sigma_p$ , Н/см <sup>2</sup>	$T$ , °С	$P_{01}$ , Н (расчет)	$P_{01}$ , Н (опыт)	Ошибка расчета, %
1	Мерзлый песок	0,1	20	40	5	5	12	20	40	38	2000	300	195	-10	8480	8300	9,6
2	Мерзлый песок	0,2	23	40	5	5	12	23	40	38	2000	300	195	-15	16000	15900	9,7
3	Мерзлый суглинок	0,1	23	40	5	5	12	23	35	36	1800	250	180	-10	30400	30800	-9,7
4	Мерзлый суглинок	0,2	25	40	5	5	12	25	35	36	1800	250	180	-10	60800	60100	9,1

Таблица 3

Расчетные величины максимальных значений касательной составляющей сопротивления резанию одним зубом по сотовой схеме согласно уравнению (3)

Номер опыта	Порода	$T$ , °С	$\sigma_p$ , Н/см <sup>2</sup>	$\mu$ , град	$t$ , мм	$h$ , м	$S$ , мм	$\sigma_p$ , град	$\delta_1$ , град	$\theta$ , град	$h_2$ , мм	$\tau$ , Н/см <sup>2</sup>	$\sigma_{св}$ , Н/см <sup>2</sup>	$P_{01}$ , Н (расчет)	$P_{01}$ , Н (опыт)	Ошибка расчета, %
1	Мерзлый песок	-10	120	12	132	0,1	35	45	15	25	11	300	2000	19300	18000	-7,2
2	Мерзлый песок	-10	120	12	300	0,2	35	45	15	25	12	300	2000	20300	19000	-6,9
3	Мерзлый песок	-10	120	12	140	0,1	35	45	15	25	9	300	2000	18000	17500	-2,86
4	Мерзлый суглинок	-10	120	12	350	0,2	58	45	15	25	13	300	2000	34500	32000	-7,8
5	Мерзлый суглинок	-8	87	24	230	0,2	35	45	15	27	16	250	1800	6500	7000	7,1
6	Мерзлый суглинок	-8	87	24	140	0,11	22	45	15	27	20	250	1800	5550	6100	9



## Заклучение

Разработанные аналитические зависимости определения касательной составляющей процесса резания осадочных мерзлых пород одиночным режущим инструментом дают обоснованную возможность, при известных предельных напряжениях сдвига, растяжения и смятия породы, вычислять на рабочих органах выемочных машин необходимые тяговые усилия, потребную мощность на привод и, следовательно, фактическую производительность и рентабельность выполнения работ. Приведенные аналитические зависимости позволяют получить результаты расчета с допустимыми значениями погрешности по сравнению с данными в проведенных экспериментальных исследованиях. Численные расчеты по трем выведенным аналитическим зависимостям для определения касательной составляющей сопротивления резанию, при равных параметрах режущего инструмента, толщины и ширины срезаемой стружки и прочностных свойствах породы, показывают, что при глубокоблокированном резании величина сопротивления в 1,6 раза больше, чем при блокированном, и в 2,5 раза больше, чем при сотовом. Таким образом, сотовое резание желательно использовать в машинах для разработки мерзлых осадочных пород.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин Ю.В., Овешников Ю.М., Авдеев П.Б. Подготовка мерзлых пород к выемке при разработке россыпных месторождений в Забайкальском крае // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 3. С. 125-133. DOI: [10.25018/0236-1493-2019-03-0-125-133](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-03-0-125-133)
2. Тихонов В.А., Дудник Г.А., Панфилов С.Ю., Жуликов В.В. Особенности ведения взрывных работ при освоении минеральных ресурсов северных и арктических районов России // Горная промышленность. 2021. № 2. С. 102-106. DOI: [10.30686/1609-9192-2021-2-102-106](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-2-102-106)
3. Егоров В.В., Волокитин А.Н., Угольников Н.В., Соколовский А.В. Обоснование параметров и технологии производства буровзрывных работ, обеспечивающих требуемую кусковатость // Горная промышленность. 2021. № 3. С. 110-115. DOI: [10.30686/1609-9192-2021-3-110-115](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-3-110-115)
4. Каменев А.В. Анализ рыхления мерзлых грунтов // Научно-практические исследования. 2020. № 5-2 (28). С. 114-118.
5. Илюхин А.В., Марсов В.И., Джабраилов Х.А., Чантиева М.Э. Особенности процессов разработки грунтов землеройно-транспортными машинами // Вестник Евразийской науки. 2018. Т. 10. № 2. № 65SAVN218.
6. Перепелкин М.А., Мокрицкая Н.И. К вопросу о разработке рабочих органов землеройных и землеройно-транспортных машин // Горная промышленность. 2019. № 2 (144). С. 81-82. DOI: [10.30686/1609-9192-2019-2-144-81-82](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-2-144-81-82)
7. Третьяк А.Я., Попов В.В., Гроссу А.Н., Борисов К.А. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 225-230. DOI: [10.25018/0236-1493-2017-8-0-225-230](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-8-0-225-230)
8. Yi Liu, Feng Dai. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 13. Iss. 5. P. 1203-1230. DOI: [10.1016/j.jrmge.2021.03.012](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.03.012)
9. Pebrianto R., Asof M., Susilo B.K., Gofar N. Evaluation of Factors Affecting Ripping Productivity in Open Pit Mining Excavation // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2014. Vol. 19. Bund. Zs. P. 10447-10456.
10. Ивкин В.С., Вольницков П.Ю. Разработка мерзлых грунтов при выполнении работ в стесненных условиях строительства // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2013. № 2 (62). С. 62-66.
11. Шемякин С.А., Гамоля Ю.А., Чебан А.Ю. Техничко-технологические решения разработки мерзлых и крепких пород в горном деле и строительстве. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2017. 188 с.
12. Бурый Г.Г., Потеряев И.К., Скобелев С.Б., Ковалевский В.Ф. Повышение производительности одноковшового гидравлического экскаватора за счет ковша новой конструкции // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 9. С. 12-19.
13. Жабин А.Б., Поляков А.В., Аверин Е.А. и др. Пути развития теории разрушения углей и горных пород резовым инструментом // Уголь. 2019. № 9 (1122). С. 24-28. DOI: [10.18796/0041-5790-2019-9-24-28](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-9-24-28)
14. Xinzhong Wang, Weiquan Fang, Dianlei Han, Xuegeng Chen. Review of the Research on Soil Disturbance by Tools // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 1. № 338. DOI: [10.3390/app13010338](https://doi.org/10.3390/app13010338)
15. Feng Hou, Yuanming Lai, Enlong Liu et al. A creep constitutive model for frozen soils with different contents of coarse grains // Cold Regions Science and Technology. 2018. Vol. 145. P. 119-126. DOI: [10.1016/j.coldregions.2017.10.013](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.10.013)
16. Шемякин С.А., Шишкин Е.А. Аналитические теории определения сопротивлений резанию (рыхлению) горных пород и их применение в практике расчета землеройной техники. Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2014. 144 с.
17. Kuznetsova V.N., Savinkin V.V., Ratushnaya T.Y. et al. Study of the Spatial Distribution of Forces and Stresses on Wear Surfaces at Optimization of the Excavating Part of an Earthmoving Machine Transverse Profile // Coatings. 2021. Vol. 11. Iss. 2. № 182. DOI: [10.3390/coatings11020182](https://doi.org/10.3390/coatings11020182)
18. Шемякин С.А., Чебан А.Ю. Определение сопротивления резанию мерзлых пород глубокоблокированным (щелевым) способом // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 6. С. 39-44.
19. Шемякин С.А. Обоснование эффективных технологий открытых горных работ на основе совершенствования процесса выемки пород: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Хабаровск: Институт горного дела ДВО РАН, 2004. 34 с.



20. Aresh B., Khan F.N., Haider J. Experimental investigation and numerical simulation of chip formation mechanisms in cutting rock-like materials // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 209. № 109869. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.109869](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109869)
21. Кузнецова В.Н. Физическое моделирование процесса контактного взаимодействия рабочего органа землеройной машины с мерзлым грунтом // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 61. С. 70-81. DOI: [10.17223/19988621/61/7](https://doi.org/10.17223/19988621/61/7)
22. Xuezheng Wang, Sen Zhang, Hongbo Pan et al. Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations // Biosystems Engineering. 2019. Vol. 182. P. 138-150. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2019.04.005](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.005)
23. Желудевич Р.Б., Селиванов Н.И., Кайзер Ю.Ф., Лысянников А.В. Определение усилий, возникающих на дисковом резце при блокированном резании мерзлых грунтов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 8. Ч. 2. С. 66-78.
24. Кузнецова В.Н., Кузнецов И.С. Моделирование процесса контактного взаимодействия рабочих органов землеройных и землеройно-транспортных машин с мерзлым грунтом // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15. № 2 (60). С. 189-198. DOI: [10.26518/2071-7296-2018-2-189-198](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-189-198)
25. Hu M., Gao T., Dong X et al. Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH) // Soil and Tillage Research. 2023. Vol. 229. № 105671. DOI: [10.1016/j.still.2023.105671](https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105671)
26. Tekeste M.Z., Way T.R., Syed Z., Schafer R.L. Modeling soil-bulldozer blade interaction using the discrete element method (DEM) // Journal of Terramechanics. 2020. Vol. 88. P. 41-52. DOI: [10.1016/j.jterra.2019.12.003](https://doi.org/10.1016/j.jterra.2019.12.003)
27. Трояновская И.П., Разношинская А.В., Козьминых В.А., Леценко Е.А. Экспериментальные исследования процесса промышленного рыхления грунта // Горный журнал. 2021. № 5. С. 87-90. DOI: [10.17580/gzh.2021.05.11](https://doi.org/10.17580/gzh.2021.05.11)
28. Rashidov T., Djuraeva N., Atamirzayev M., Normuminov B. Strain state agrogenic soil under its interaction with a deep ripper // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. № 012109. DOI: [10.1088/1757-899X/896/1/012109](https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012109)
29. Ucgul M., Saunders C., Fielke J.M. Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge // Biosystems Engineering. 2018. Vol. 169. P. 199-208. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2018.03.003](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.003)
30. Шемякин С.А., Шишкин Е.А. Физико-математическая модель разрушения горных пород зубом фрезерной установки // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 639-647. DOI: [10.31897/PMI.2021.5.3](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.3)
31. Yadav S., Saldana C., Murthy T.G. Experimental investigations on deformation of soft rock during cutting // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 105. P. 123-132. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2018.03.003](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.03.003)
32. Николаев В.А. Расчет затрат энергии на резание грунта горизонтальным лезвием путем анализа процесса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 2. С. 243-250. DOI: [10.22281/2413-9920-2019-05-02-243-250](https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-243-250)
33. Katinas E., Chotěborský R., Linda M., Jankauskas V. Wear modelling of soil ripper tine in sand and sandy clay by discrete element method // Biosystems Engineering. 2019. Vol. 188. P. 305-319. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2019.10.022](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.022)
34. Makange N.R., Changying Ji, Nyalala I. et al. Prediction of precise subsoiling based on analytical method, discrete element simulation and experimental data from soil bin // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. № 11082. DOI: [10.1038/s41598-021-90682-w](https://doi.org/10.1038/s41598-021-90682-w)
35. Cviklovič V., Mojžiš M., Majdan R. et al. Data Acquisition System for On-the-Go Soil Resistance Force Sensor Using Soil Cutting Blades // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 14. № 5301. DOI: [10.3390/s22145301](https://doi.org/10.3390/s22145301)
36. Бояркина И.В. Удельная энергоёмкость процессов копания грунтов и материалов ковшом технологической машины // Омский научный вестник. 2017. № 2 (152). С. 5-7.
37. Hegde A., Murthy T.G. Experimental studies on deformation of granular materials during orthogonal cutting // Granular Matter. 2022. Vol. 24. Iss. 3. № 70. DOI: [10.1007/s10035-022-01227-5](https://doi.org/10.1007/s10035-022-01227-5)
38. Hegde A., Murthy T. An experimental study on shear bands in sand using the orthogonal cutting setup // EPJ Web of Conferences. 2021. Vol. 249. № 10007. DOI: [10.1051/epjconf/202124910007](https://doi.org/10.1051/epjconf/202124910007)
39. Aresh B., Khan F.N., Haider J. Experimental investigation and numerical simulation of chip formation mechanisms in cutting rock-like materials // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 209. № 109869. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.109869](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109869)
40. Zaid M.B., El Naim A.M., Abdalla O.A., Sulieman A.M. Effect of Tine Depth and Width on Soil Failure Angle, Cutting Coefficients and Power in Three-Dimensional Case: Computer Modeling // World Journal of Agricultural Research. 2016. Vol. 4. № 1. P. 24-30. DOI: [10.12691/wjar-4-1-4](https://doi.org/10.12691/wjar-4-1-4)
41. Masch F.R., Hecker R.L., Flores G.M. et al. On-the-go sensor with embedded load cells for measuring soil mechanical resistance // Ciencia del Suelo. 2020. Vol. 38. № 1. P. 21-28.

**Авторы:** Станислав Аркадьевич Шемякин, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-3238-0840> (Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия), Евгений Алексеевич Шишкин, канд. техн. наук, доцент, [004655@pmi.edu.ru](mailto:004655@pmi.edu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228> (Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Экономика сырьевых отраслей

## Государственно-частное партнерство в минерально-сырьевом комплексе РФ: как реализовать классическую модель?

С.М.Лавлинский✉, А.А.Панин, А.В.Плясунов

Институт математики им. С.Л.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

**Как цитировать эту статью:** Лавлинский С.М., Панин А.А., Плясунов А.В. Государственно-частное партнерство в минерально-сырьевом комплексе РФ: как реализовать классическую модель? // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16412. С. 145-158. [EDN VQCWOF](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.16412.145-158)

### Аннотация

Статья посвящена сравнительному финансово-экономическому анализу различных форм государственно-частного партнерства (ГЧП) в проектах производственно-инфраструктурного строительства в малоосвоенном ресурсном регионе. Используется теоретико-игровая модель Штакельберга и строится параметризованное семейство двухуровневых моделей математического программирования, описывающее целый спектр механизмов партнерства. Это позволяет сопоставить различные стратегии распределения инфраструктурных инвестиций между правительством и недропользователем и построить сценарий трансформации сегодняшней российской схемы ГЧП в классическую модель партнерства, используемую в развитых экономиках. Для этого в работе формируется база данных по пятидесяти месторождениям полиметаллов в Забайкальском крае и проводится сравнительный анализ равновесных по Штакельбергу программ развития, реализующих ту или иную модель ГЧП. Результаты численного эксперимента показывают, что в условиях бюджетного дефицита именно классическая модель ГЧП является наиболее эффективной. Проведенный анализ позволяет дать экономическую оценку последствий постепенной трансформации института партнерства в производственно-инфраструктурном строительстве от помощи инвестору в российской модели к помощи государству в классической схеме. Промежуточные модели партнерства, играющие роль переходного института, позволяют снизить бюджетную нагрузку. Механизм их практической реализации основан на кластеризации месторождений, формировании консорциумов недропользователей и долевым строительстве необходимой транспортной и энергетической инфраструктуры. Активизация горизонтальных связей недропользователей порождает благоприятные условия для появления дополнительных эффектов от консолидации ресурсов и может быть положена в основу практической схемы партнерства в рамках классической модели.

### Ключевые слова

программа освоения минерально-сырьевой базы; производственно-инфраструктурные проекты; государственно-частное партнерство; консорциум недропользователей; модель Штакельберга; двухуровневые задачи математического программирования

### Финансирование

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-28-00849, <https://rscf.ru/project/23-28-00849>.

Поступила: 18.03.2024

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 14.01.2025

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Механизм государственно-частного партнерства (ГЧП) широко используется во многих отраслях экономики для согласования интересов правительства и частного инвестора [1-3]. Мировой опыт демонстрирует успешность ГЧП прежде всего для создания новой и поддержания существующей инфраструктуры общественного сектора. В минерально-сырьевом комплексе ГЧП обычно используется при строительстве новой производственной инфраструктуры и позволяет существенно расширить источники финансирования проектов, заинтересовать недропользователей в освоении новых месторождений в труднодоступных районах. Институт партнерства в развитых экономиках эволюционирует уже двести лет, стартовав в XIX в. с концессии, традиционно обозначаемой BOT (Built, Own, Transfer). Такая модель предполагает передачу некоторых видов



деятельности от государства частному сектору и использовалась при создании транспортной инфраструктуры [4].

Австралийская модель BOOT (Built, Own, Operate, Transfer) [5] существенно расширила функционал партнерства – строительство, финансирование, управление и эксплуатация осуществляется частным инвестором, но его право собственности на созданный объект сохраняется только до момента окончания контракта, после чего оно переходит к государству [6]. Эта модель превалировала в инфраструктурных проектах конца XX в.

Следующий этап развития механизма ГЧП связан с моделью DBFO (Design, Built, Finance, Operate) [7] и принятием в Великобритании новой стратегии осуществления государственных проектов – Private Finance Initiative [8]. Частный инвестор создает специальную управляющую компанию на длительный срок (30-60 лет), которая строит, финансирует, управляет созданным объектом и предоставляет услуги, оговоренные государством в контракте.

Такая эволюция института партнерства в развитых экономиках [9-11] привела к тому, что здесь уже утвердилась модель ГЧП [12-14], которую можно считать классической. Ее содержательная основа – строительство частной компанией объекта государственной собственности и последующая передача его государству по мере реализации условий контракта и согласованного сценария взаиморасчетов [15, 16]. В минерально-сырьевом комплексе такая форма ГЧП дает возможность диверсификации источников финансирования проектов, снижения рисков [17-19] и создания стимулов для привлечения недропользователей в неосвоенные районы с перспективными месторождениями [20-22].

Процесс формирования института ГЧП в российском сырьевом секторе находится на начальном этапе, и у правительства нет полной ясности относительно того, каким образом должна трансформироваться стартовая модель [23-25]. В отличие, например, от проектов дорожного строительства в развитом промышленном регионе, в котором рентабельность концессии для инвестора формируется платным использованием дороги общего назначения и гарантируется бюджетом [26], проекты создания производственной инфраструктуры на малоосвоенной ресурсной территории по ряду причин не привлекают частного инвестора даже в нефтегазовых регионах [27, 28]. Государство, заинтересованное в освоении минерально-сырьевой базы (МСБ), пытается стимулировать привлечение частного инвестора в такие регионы на основе масштабной помощи недропользователю в создании инфраструктуры и реализации части необходимых природоохранных мероприятий [29-31]. Такую стратегию сотрудничества с частным инвестором государство использовало в программе «Комплексное развитие Нижнего Приангарья» [32, 33] и проектах «Создание транспортной инфраструктуры для освоения минерально-сырьевых ресурсов юго-востока Читинской области» [34, 35], «Комплексное развитие Южной Якутии» [36]. Здесь правительством были использованы средства Инвестиционного фонда РФ на проектирование и создание транспортной и электросетевой инфраструктуры Канкунской ГЭС в Якутии, строительство железной дороги Нарын – Лугокан в Забайкальском крае, а в Красноярском крае государство профинансировало не только крупные инфраструктурные проекты, но и затраты, связанные с подготовкой ложа водохранилища Богучанской ГЭС и переселением населения.

Текущие результаты реализации этих проектов не оправдывают ожиданий бюджета и вызывают справедливую критику экспертного сообщества. Практика показала, что использованная форма партнерских отношений требует не только чрезмерных бюджетных затрат, но и доказательной оценки баланса интересов общества и предпринимателей. Это подтверждает и сегодняшний опыт реализации мегапроекта «Енисейская Сибирь». Общественная эффективность стратегии строительства железной дороги Элегест – Кызыл – Курагино и Бейской транспортной инфраструктуры за счет бюджета в достаточной мере не подтверждена – в технико-экономических обоснованиях (ТЭО) проектов превалируют оценки эффективности с точки зрения частного инвестора, оставляя без ответа ключевой вопрос о достижении компромисса интересов участников партнерства [37-39]. При каких условиях классическая модель ГЧП эффективна для современного российского минерально-сырьевого комплекса? Каким образом может быть трансформирован российский вариант партнерства и осуществлен переход от помощи инвестору к помощи государству? Как построить механизм ГЧП, эффективный для конкретного ресурсного региона?



Цель работы – сравнительный финансово-экономический анализ эффективности различных механизмов партнерства в рамках теоретико-игровой модели Штакельберга. Оставив в стороне вопросы нормативно-правового регулирования ГЧП и сконцентрировавшись на оценке экономической эффективности конкретной модели партнерства, можно ответить на ключевые вопросы с точки зрения оценки уровня достижения компромисса интересов государства и бизнеса, а также предложить переходные формы института партнерства, в перспективе открывающие возможность трансформации в классическую модель. Соответствующие экономико-математические модели дополняют инструментарий стратегического планирования и могут быть использованы в рамках цифровых технологий управления недропользованием.

### Методы

Процесс формирования конкретного механизма партнерства может быть описан целым рядом математических моделей, решение которых позволяет априори оценить эффективность принимаемого управленческого решения [40-43]. В нашем случае задача существенно шире – необходимо увязать перечень и сроки запуска проектов освоения месторождений минерального сырья с планами создания необходимой, но отсутствующей на сегодняшний день производственной инфраструктуры; ее строительство предполагается в рамках партнерства, механизм которого предстоит определить [44]. Для большинства российских ресурсных территорий эта проблема актуальна – инвестор не может запустить проекты освоения месторождений из-за отсутствия дорог, ЛЭП, а государство не готово строить инфраструктурные объекты без полной уверенности в их достаточной загрузке. В большинстве сибирских и дальневосточных регионов этот фактор сдерживает развитие региональных экономик и стимулирует разработку механизмов достижения компромисса интересов участвующих сторон.

Процесс формирования программы недропользования в ресурсном регионе с недостаточным уровнем развития транспортной и энергетической инфраструктуры характеризуется иерархией взаимодействия государства и частного инвестора. Это обстоятельство позволяет предложить в качестве модели партнерства игру Штакельберга [45-47]. Два игрока с индивидуальными целевыми функциями – лидер и последователь – поочередно принимают решения. Эффективность решений каждого игрока зависит от решения другого. Первым принимает решение лидер, вторым – последователь, оптимальным для себя образом строящий решение с учетом действий лидера. Задача заключается в нахождении равновесных решений, обеспечивающих лидеру максимальное значение целевой функции на всем множестве альтернатив. В нашем случае роль лидера принадлежит государству – оно делает первый ход, продавая лицензию, определяя перспективы инфраструктурного строительства на территории. Без этого инвестор не может принять решение о реализации проекта освоения месторождения и поэтому выступает в роли последователя.

Рассмотрены три базовые модели партнерства. Первая из них является классической моделью ГЧП. Поскольку необходимой для реализации проектов освоения месторождений производственной инфраструктуры нет, инвестор согласует с властями список объектов инфраструктуры, «открывающих» интересные для него объекты ресурсной базы, и строит эти дороги, ЛЭП и т.п. за свой счет. Государство рассчитывается с ним некоторое время спустя – например с момента получения первых рентных платежей. Для компенсации инфраструктурных затрат инвестора используются два механизма возмещения. В первом варианте инвестор получает компенсационные выплаты с учетом его дисконта по некоторому графику, построенному государством и не зависящему от общих результатов партнерства (модель K1). В основе второго алгоритма взаимных расчетов лежит интегральная оценка  $NPV$  инвестора в реализованной программе освоения недр, учитывающая его непрофильные инфраструктурные затраты, компенсационные платежи и ту долю ренты, которую он получил, осваивая месторождения (модель K2).

В отличие от классических моделей K1, K2, вторая модель P отражает российскую практику последних лет и предполагает, что государство на малоосвоенной территории само строит инфраструктуру.

Третья модель – переходная и предполагает, что инфраструктуру строит и государство и инвестор с использованием механизмов компенсации инфраструктурных затрат инвестора первого (модель П1) и второго (модель П2) типов.



Целевой функцией инвестора во всех моделях является его чистый дисконтированный доход. Цель государства – максимизация бюджетных доходов с учетом выплаченных компенсаций и собственных затрат на строительство. Введем бинарные параметры  $\alpha$  и  $\beta$ , фиксирующие участие в инфраструктурном строительстве государства и частного инвестора. Это позволяет параметризовать все семейство вышеописанных моделей ГЧП. Так, в первой модели классического ГЧП  $\alpha = 0$  и  $\beta = 1$ . Российской модели Р соответствует  $\alpha = 1, \beta = 0$ . Переходная модель использует единичные значения  $\alpha$  и  $\beta$ .

Введем обозначения:  $NP$  – число проектов освоения месторождений;  $NI$  – число проектов строительства производственной инфраструктуры;  $T$  – временной горизонт.

Проект освоения месторождения  $i$ :  $CFP_{it}$  – операционное кэш-флоу;  $DBP_{it}$  – налоговые доходы бюджета в году  $t$  от проекта.

Проект строительства инфраструктурного объекта  $j$ :  $ZI_{jt}$  – необходимый объем инвестиций в году  $t$ ;  $VDI_{jt}$  – дополнительные бюджетные доходы, связанные с мультипликативным воздействием создаваемой инфраструктуры на экономику территории.

Связность инфраструктурных и добычных проектов:  $\mu_{ij}$  – индикатор, если производственный проект  $i$  не может быть запущен без построенного инфраструктурного объекта  $j$ , то  $\mu_{ij} = 1$ , иначе  $\mu_{ij} = 0$ .

Ограничения на бюджет:  $BudI_t$  – инвестор;  $BudG_t$  – государство.

Дисконты партнеров:  $DI$  – дисконт инвестора;  $DG$  – дисконт государства.

Булевы переменные модели: если государство в диалоге лидера – последователя предлагает взять на себя реализацию инфраструктурного проекта  $j$ , то  $\bar{x}_j = 1$ , иначе  $\bar{x}_j = 0$ ; если инфраструктурный проект  $j$  реализуется государством, то  $x_j = 1$ , иначе  $x_j = 0$ ; если инвестор реализует проект освоения месторождения  $i$ , то  $z_i = 1$ , иначе  $z_i = 0$ ; если инфраструктурный проект  $j$  реализуется инвестором, то  $v_j = 1$ , иначе  $v_j = 0$ .

Вещественные переменные:  $\bar{W}_t$  – график компенсационных выплат инвестору, предлагаемый государством;  $W_t$  – реализовавшийся график выплат государством инвестору за инфраструктуру.

Модель Штакельберга. Задача верхнего уровня (государство)

$$\sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^{NP} DBP_{it} z_i + \sum_{j=1}^{NI} VDI_{jt} (\alpha x_j + \beta v_j) - \alpha \sum_{j=1}^{NI} ZI_{jt} x_j - \beta W_t \right) / (1 + DG)^t \rightarrow \max \quad (1)$$

при условиях

$$\beta \bar{W}_t + \alpha \sum_{j=1}^{NI} ZI_{jt} \bar{x}_j \leq BudG_t, \quad t = 1, \dots, T; \quad (2)$$

$$\bar{W}_t \beta \geq 0, \quad t = 1, \dots, T; \quad (3)$$

$$\bar{W}_t \beta = 0, \quad t = 1, \dots, T_0; \quad (4)$$

$$(v, z, x) \in Q^*(\alpha \bar{x}, \beta \bar{W}); \quad (5)$$

$$\bar{x}_j \in \{0, 1\}, \quad j = 1, \dots, NI, \quad (6)$$

где  $Q^*(\alpha \bar{x}, \beta \bar{W})$  – множество оптимальных решений для задачи инвестора.

Задача нижнего уровня (инвестор)

$$\sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^{NP} CFP_{it} z_i - \beta \sum_{j=1}^{NI} ZI_{jt} v_j + \beta W_t \right) / (DI + 1)^t \rightarrow \max \quad (7)$$

при условиях

$$\sum_{t=1}^T \left( -\beta \sum_{j=1}^{NI} ZI_{jt} v_j + \beta W_t \right) / (1 + DI)^t \geq 0; \quad (8)$$



$$\sum_{t=1}^T \left[ \sum_{i=1}^{NP} DBP_{it} z_i - \beta W_t \right] / (1 + DG)^t \geq 0; \quad (9)$$

$$-\sum_{i=1}^{NP} CFP_{it} z_i + \beta \sum_{j=1}^{NI} ZI_{jt} v_j - \beta W_t \leq BudI_t, \quad t = 1, \dots, T; \quad (10)$$

$$\alpha x_j + \beta v_j \geq z_i \mu_{ij}, \quad i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, NI; \quad (11)$$

$$\alpha x_j + \beta v_j \leq 1, \quad j = 1, \dots, NI; \quad (12)$$

$$\alpha x_j \leq \alpha \bar{x}_j, \quad j = 1, \dots, NI; \quad (13)$$

$$\beta W_t \leq \beta \bar{W}_t, \quad t = 1, \dots, T; \quad (14)$$

$$x_j, z_i, v_j \in \{0;1\}, \quad i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, NI. \quad (15)$$

Целевая функция государства – часть природно-ресурсной ренты, получаемой в виде налогов с учетом собственных затрат на инфраструктуру и компенсационных выплат. Бюджетные рамки (10) и (2) ограничивают число проектов, реализуемых партнерами. Связь добычных и инфраструктурных проектов фиксируется ограничениями (11). Ограничение (9) блокирует производственные программы, не обеспечивающие положительное сальдо бюджетных доходов и компенсационных выплат государства с учетом дисконта государства, формализующего степень либеральности проводимой инвестиционной политики. Условие (8) играет важную роль в выборе механизма генерации компенсационных выплат инвестору. Задача (1)-(15) реализует требование инвестора возместить его непрофильные затраты без учета того, что он получает долю ренты непосредственно в процессе освоения месторождения.

Альтернативный принцип взаиморасчетов реализован в модели К2 и П2. В его основе оценка общего эффекта инвестора, полученного в процессе освоения месторождений, строительства необходимых ему инфраструктурных объектов и получения компенсаций от государства, обеспечивающих положительное *NPV* реализованной инвестором программы (7). Такая схема предполагает большой уровень доверия в партнерстве и наличие институтов, позволяющих провести мониторинг эффективности инвестора. Формально такой механизм партнерства описывается той же двухуровневой задачей, но без ограничения (8): {(1)-(7), (9)-(15)}.

Решение задачи (1)-(15) ({(1)-(7), (9)-(15)}) определяет программу освоения МСБ – фронт инфраструктурного строительства, открываемый государством; перечень инфраструктурных и производственных проектов, реализуемых частным инвестором; график бюджетных компенсаций затрат инвестора на инфраструктуру. Для того, чтобы на практике наполнить данными двухуровневую задачу математического программирования (1)-(15), нужна довольно обширная информационная база. Исходные данные для задачи государства включают графики инвестиционных затрат на инфраструктурные проекты и экспертные оценки их мультипликаторов. По добычным проектам предполагается наличие прогнозов налоговых поступлений в бюджет. На практике этот перечень данных государство получает от проектных организаций по инфраструктуре и в ТЭО недропользователя по месторождениям в разделе ожидаемых выплат сотрудникам и доходов бюджета. База данных задачи инвестора дополнительно включает *CFP*, которое формируется на основе оценки необходимых инвестиций и деталей технологии добычи на месторождении. Здесь требуется прогноз динамики рыночных цен на сырье и детальный анализ проекта освоения.

Для решения двухуровневых задач математического программирования (1)-(15), ({(1)-(7), (9)-(15)}), принадлежащих классу  $\sum_2^p$  – трудных проблем, использованы стохастические алгоритмы локального поиска и покоординатного спуска [48-50]. Для сравнительного анализа эффективности классического и российского механизмов партнерства применялась модельная база данных по пятидесяти месторождениям полиметаллов и десяти проектам строительства транспортной и энергетической инфраструктуры в Забайкальском крае. Часть модельных инфраструктурных проектов описывает реализуемое сегодня строительство железной дороги Нарын – Лугокан



и четырех линий электропередач. Другие модельные инфраструктурные проекты формируют дополнительную дорожную сеть, которой сегодня нет, но она необходима для некоторых месторождений. База данных скомпонована так, чтобы реализация всех инфраструктурных проектов открывала возможность освоения полного набора месторождений.

Исходной информацией для базы данных модели (1)-(15) в приведенных расчетах являлись ТЭО производственных и инфраструктурных проектов. В распоряжении авторов имелась информация по девяти месторождениям, двум проектам дорожного строительства, одной ЛЭП и проектная документация по железной дороге Нарын – Лугокан, включающая в основном затратную часть. Сами ТЭО разработаны в разные годы периода 2006-2017 гг., и авторам пришлось приводить их данные к базовому 2010 г. с помощью региональных дефляторов. По остальным месторождениям использованы оценки ресурсов, а затратные характеристики технологий освоения строились экспертным образом на основе выбора максимально близкого по параметрам прототипа из числа девяти. Плановый период в расчетах составлял 20 лет – с 2010 по 2030 гг. Сценарии инфляции и курса национальной валюты для периода 2020-2030 гг. продолжали сложившиеся тенденции.

Для проектов добычи полезных ископаемых использовался специальный модельный инструментарий [51], позволяющий построить долгосрочные прогнозы цен на металлы и сгенерировать поток наличности в прогнозных ценах на основе имитационной модели процесса освоения рудных месторождений. Процессы строительства транспортной и энергетической инфраструктуры описывались графиками инфраструктурных затрат партнеров, учитывающих схему модели ГЧП и инфляцию. Для месторождений строился прогноз налоговых платежей и потока наличности, после чего применялась процедура дефлирования и формировалась общая база данных двухуровневой модели планирования (1)-(15) в сопоставимых ценах, решение которой определяло программу освоения МСБ региона.

Сформированная информационная база во многом соответствует управленческим технологиям в недропользовании и настроена на инвестиционные процессы с длительным временным горизонтом и нестационарным характером рыночных цен. Это дает возможность учесть особенности моделируемого объекта – процесса формирования программы освоения МСБ на сырьевой территории с недостаточным уровнем развития производственной инфраструктуры. Поскольку такая программа будет строиться на основе равновесия по Штакельбергу, то в первую очередь будет интересно, каким образом меняется решение задач (1)-(15) ( $\{(1)-(7), (9)-(15)\}$ ) при вариации основных модельных параметров. Особенно важно это для дисконтов партнеров, рабочие диапазоны которых эксперт может оценить лишь приближенно.

Это обстоятельство определяет фокус внимания численного эксперимента – анализ зависимости эффективности равновесной по Штакельбергу программы от параметров  $DG$  и  $DI$ . Первый из этих параметров отражает качество инвестиционного климата с точки зрения инвестора. Благоприятным условиям инвестирования в расчетах соответствует  $DI = 0,11$  (экспертная оценка для сегодняшнего Забайкалья  $DI = 0,15-0,17$ ). Дисконт государства отражает уровень либеральности государственной инвестиционной политики. Опираясь на дисконт уровня 0,01, либеральное государство понимает, что на длительном горизонте наиболее важны мультипликативные эффекты, превосходящие прямую отдачу в виде налоговых платежей недропользователей от инвестиций бюджета в инфраструктурные проекты (включая компенсационные платежи). Консервативная инвестиционная политика государства оперирует существенно большим дисконтом, отражающим устремления правительства реализовать ожидания собственника недр [52].

### Обсуждение результатов

Численные эксперименты показывают существенную зависимость характеристик эффективности программ развития, генерируемых различными моделями партнерства, от качества инвестиционного климата и уровня либеральности государства.

Приведены некоторые результаты расчетов, позволяющие количественно оценить и сопоставить ключевые характеристики программ развития, генерируемых в предположении неограниченности бюджетов партнеров при различных алгоритмах компенсации инфраструктурных затрат инвестора,  $\alpha$  и  $\beta$ . В рамках российской модели (рис.1) государство в условиях благоприятного

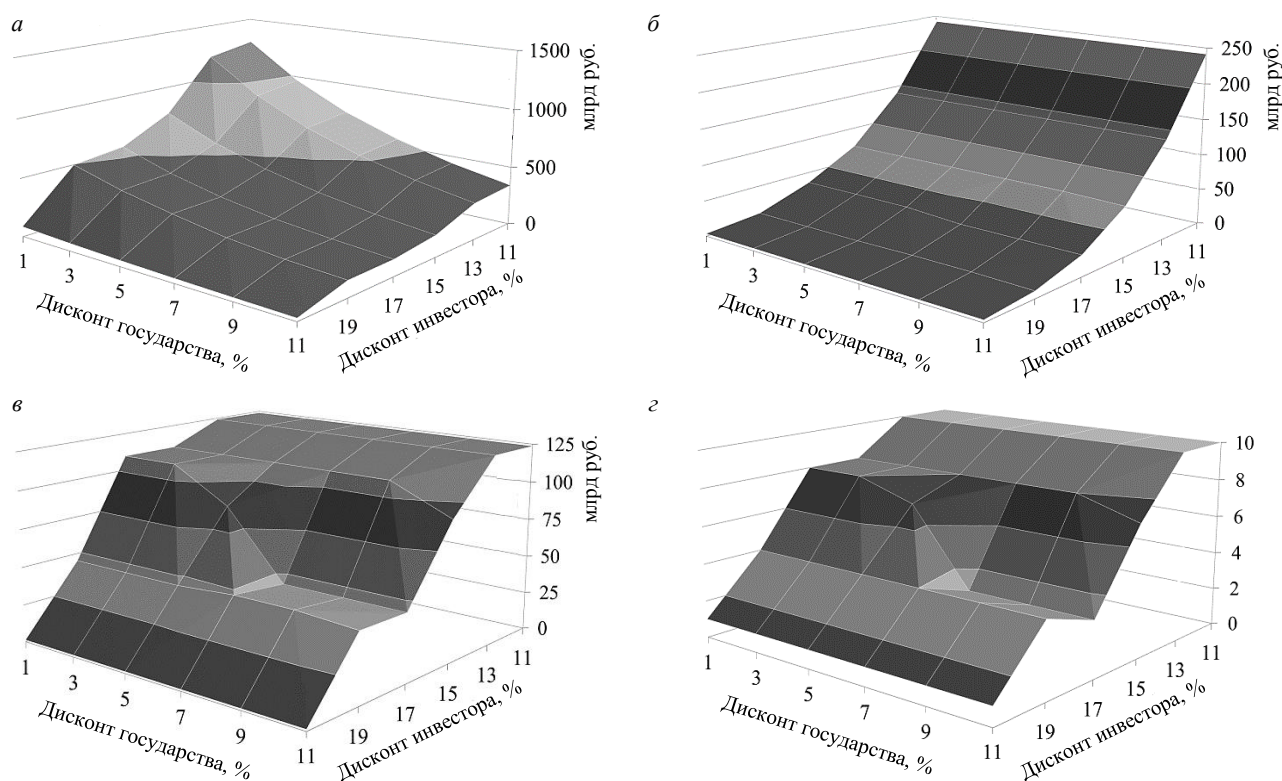


Рис. 1. Модель ГЧП на базе Инвестиционного фонда РФ (модель Р,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0$ ): значения целевой функции государства (а); инвестора (б); затраты государства (в); число реализованных инфраструктурных проектов (з)

инвестиционного климата затрачивает 125 млрд руб. и реализует полную программу инфраструктурного строительства. Это происходит независимо от дисконта государства и дает возможность инвестору запустить максимальный фронт добычных проектов. При ухудшении инвестиционного климата (росте  $DI$ ) государство вынуждено сократить фронт инфраструктурного строительства, что закономерно приводит к сворачиванию производственной программы инвестором и падению значений целевых функций партнеров. Вне пределов благоприятного инвестиционного климата на результатах начинает существенно сказываться и дисконт государства – переход к консервативной инвестиционной политике сужает спектр эффективных для него инфраструктурных проектов.

Переход к классической модели партнерства в значительной степени меняет программу развития территории. В условиях невысокого дисконта инвестора модель К1 генерирует программу, в которой реализуется пять-шесть инфраструктурных проектов из 10 возможных в зависимости от уровня дисконта государства (рис.2). Начиная с  $DI = 0,19$ , резко сокращается фронт инфраструктурного строительства и объем компенсационных выплат инвестору. Модель К2 стартует с восьми проектов и быстро уменьшает их число с ухудшением инвестиционного климата. Важно, что уровень компенсационных выплат здесь кардинально ниже, чем в варианте с инвестором, требующим немедленную компенсацию своих инфраструктурных затрат. Это происходит потому, что в процессе взаиморасчетов государство учитывает полученную в добычных проектах ренту и соответствующим образом корректирует платежи.

В переходной модели общее число реализуемых инфраструктурных проектов в меньшей степени зависит от алгоритма компенсации затрат инвестора (рис.3) и дисконта государства. Государство перестает участвовать в инфраструктурном строительстве в зависимости от уровня либеральности уже при  $DI = 0,13$  в рамках консервативной инвестиционной политики, сдвигая границу с уменьшением  $DG$ .

Затраты государства на компенсации (рис.4) ведут себя достаточно сложным образом. В благоприятных инвестиционных условиях модель П2 требует существенно меньших, чем П1, платежей инвестору, которые растут по мере ухудшения инвестиционного климата. В модели П1,

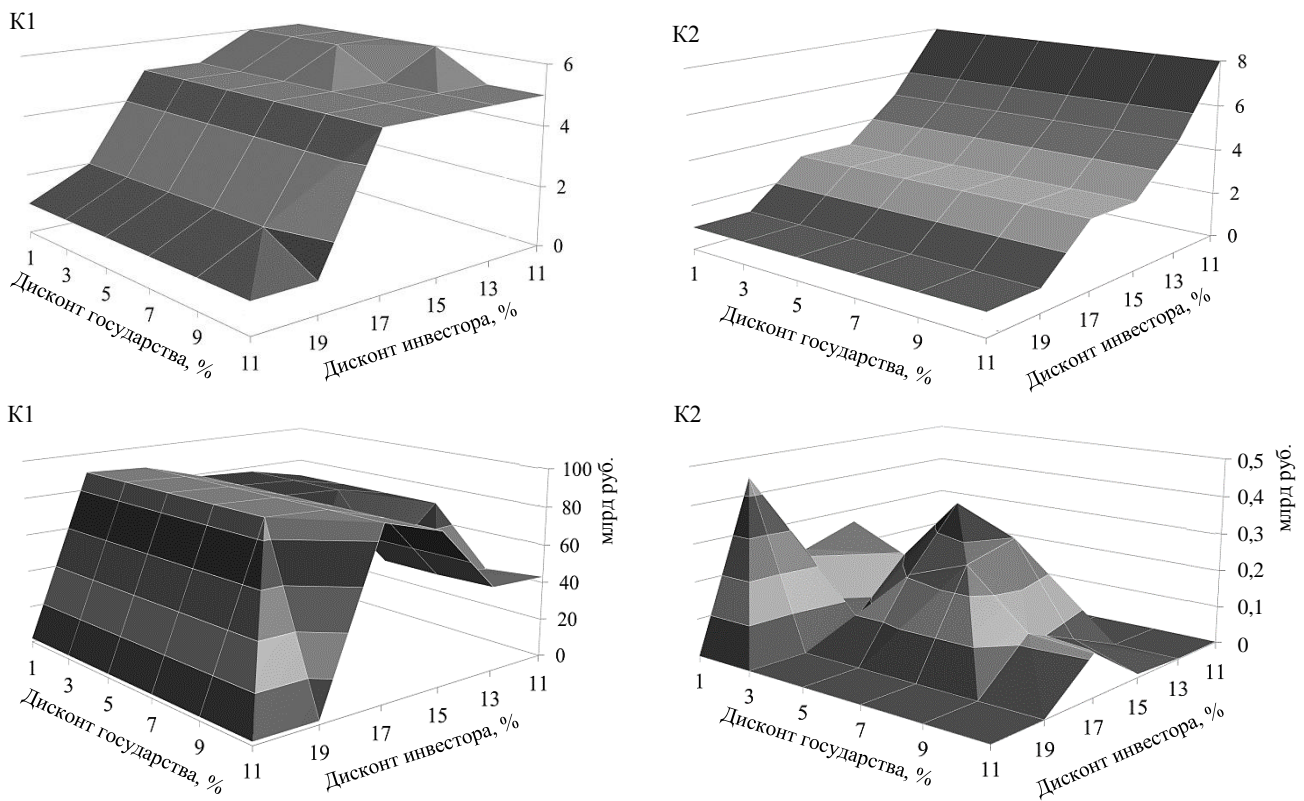


Рис.2. Классическая модель ГЧП: число реализованных инвестором инфраструктурных проектов (вверху);  
объем полученных компенсационных платежей (внизу)

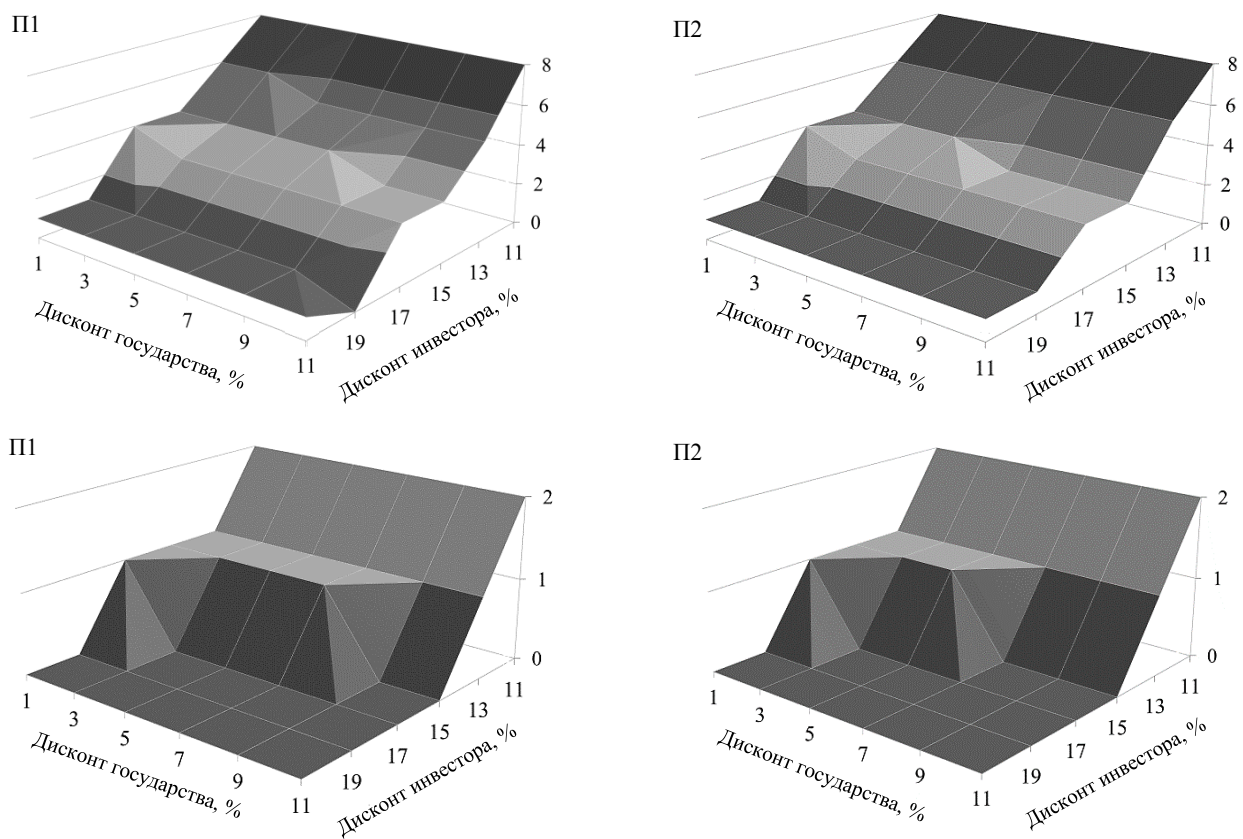


Рис.3. Переходная модель ГЧП: число реализованных инфраструктурных проектов совместно партнерами (вверху);  
в том числе государством (внизу)

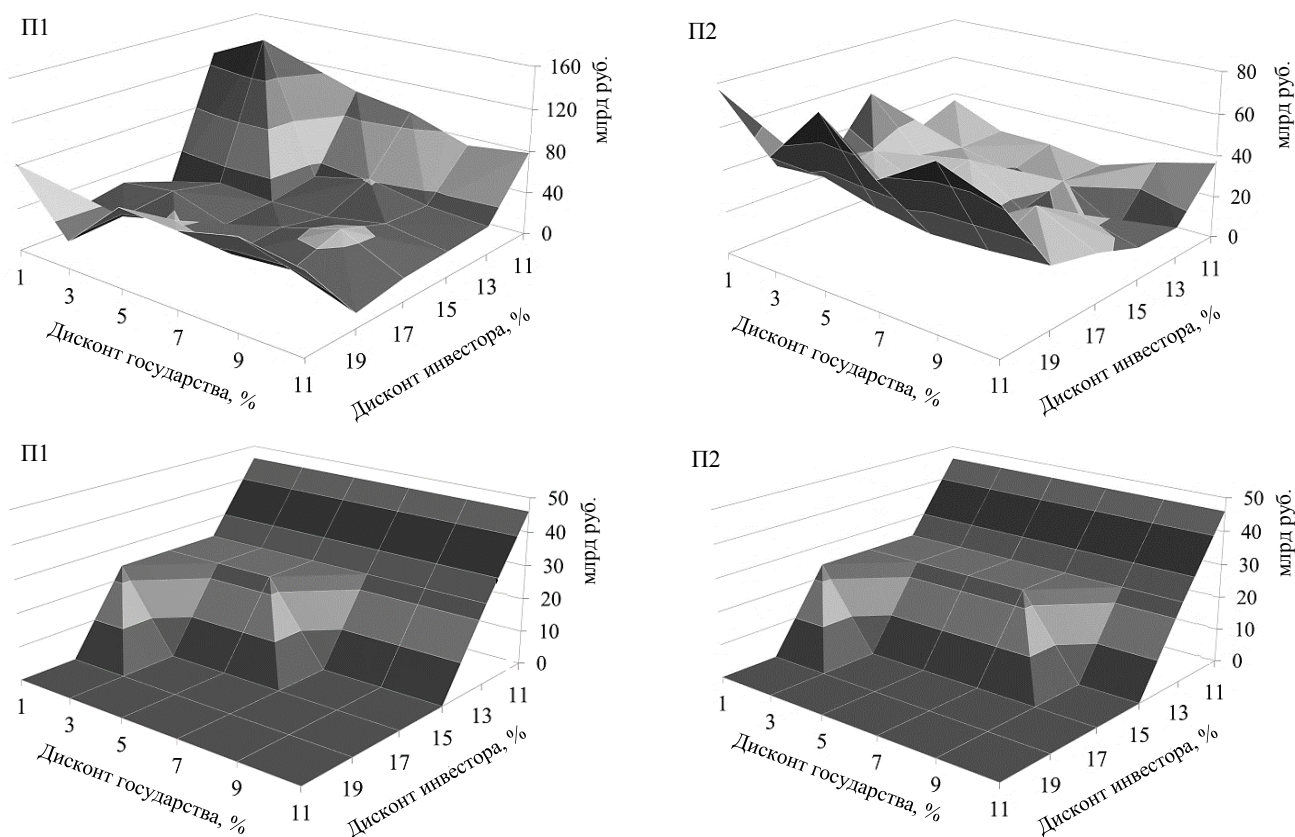


Рис.4. Переходная модель ГЧП: затраты государства – компенсационные выплаты (вверху); затраты на реализацию инфраструктурных проектов (внизу)

напротив, максимальные компенсационные выплаты приходятся на малые значения  $DI$  и существенно зависят от уровня консервативности проводимой государством инвестиционной политики. Как и в классической модели, инвестор, вполне доверяющий государству и готовый ко второй методике взаиморасчетов, более предпочтителен для государства в условиях бюджетного дефицита.

На рис.5, 6 представлены результирующие зависимости значения целевой функции государства и инвестора при возможных сочетаниях дисконтов партнеров в разных моделях. Такие данные позволяют ранжировать весь спектр рассматриваемых моделей партнерства в соответствии с интересами государства. Если мы попытаемся, анализируя рис.1 и 5, упорядочить все пять моделей по значению целевой функции государства, то окажется, что для любого уровня благоприятности инвестиционного климата российская модель в предположении неограниченности бюджета формально обеспечивает наилучший результат. Однако сегодня представляется маловероятной готовность бюджета в значительных объемах финансировать строительство производственной инфраструктуры для нужд минерально-сырьевого сектора.

В условиях бюджетного дефицита именно классическая модель ГЧП выходит на первый план. Прямые бюджетные инвестиции стартуют с момента начала строительства необходимой инфраструктуры, в то время как компенсационные платежи отсрочены во времени и начинаются с момента поступления первых налогов от недропользователей. Это позволяет существенно сократить объем бюджетных средств, необходимых для выполнения партнерских обязательств со стороны государства.

Именно поэтому при выборе модели ГЧП рассматриваются только модели К1, К2, П1 и П2. Анализ результатов расчетов, представленных на рис.5, позволяет упорядочить их по значению целевой функции государства (1) для каждого значения  $DI$ . Для благоприятного инвестиционного климата ( $DI = 0,11$ ) искомая последовательность имеет вид (К2, П2, П1, К1); для  $DI = 0,13$  – (П2, К2, П1, К1), для  $DI > 0,13$  – (К1, К2, П2, П1).

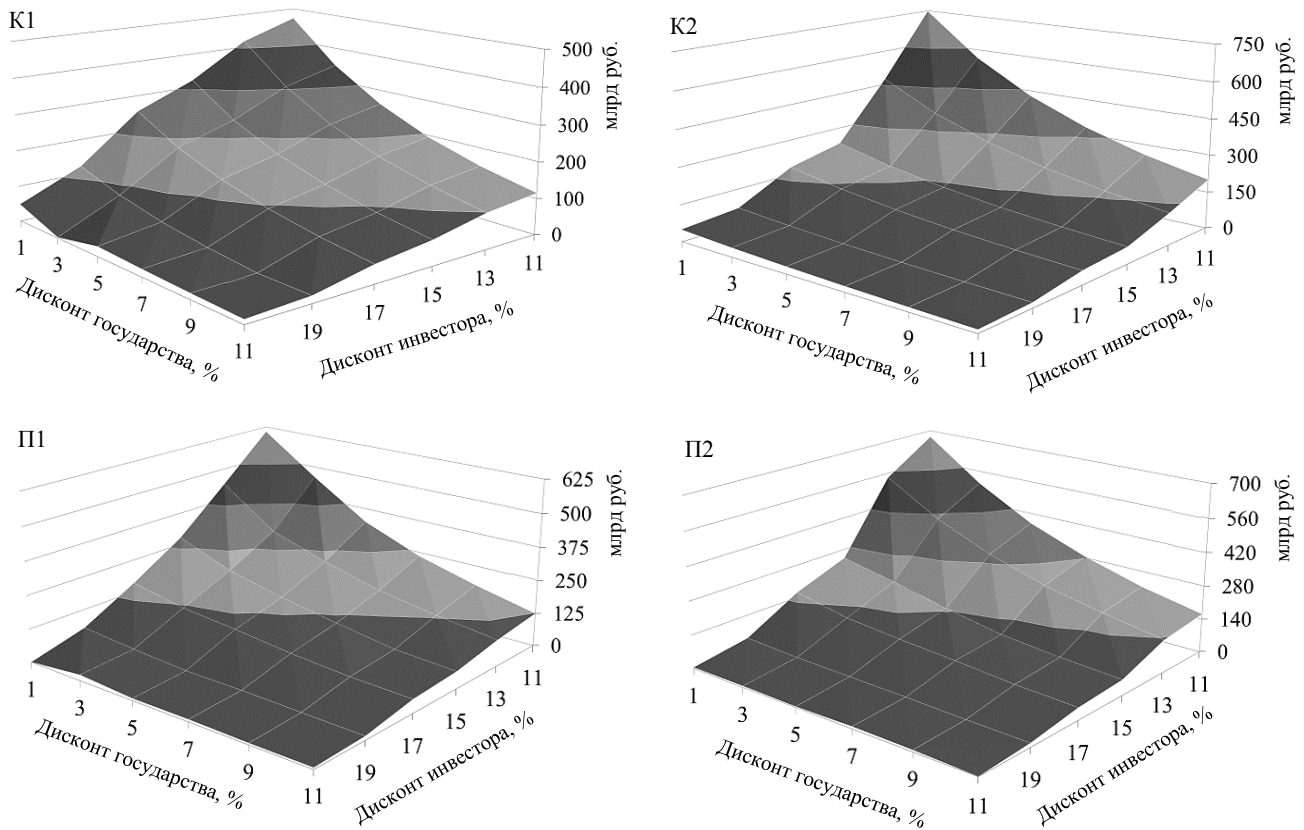


Рис.5. Значение целевой функции государства в различных моделях

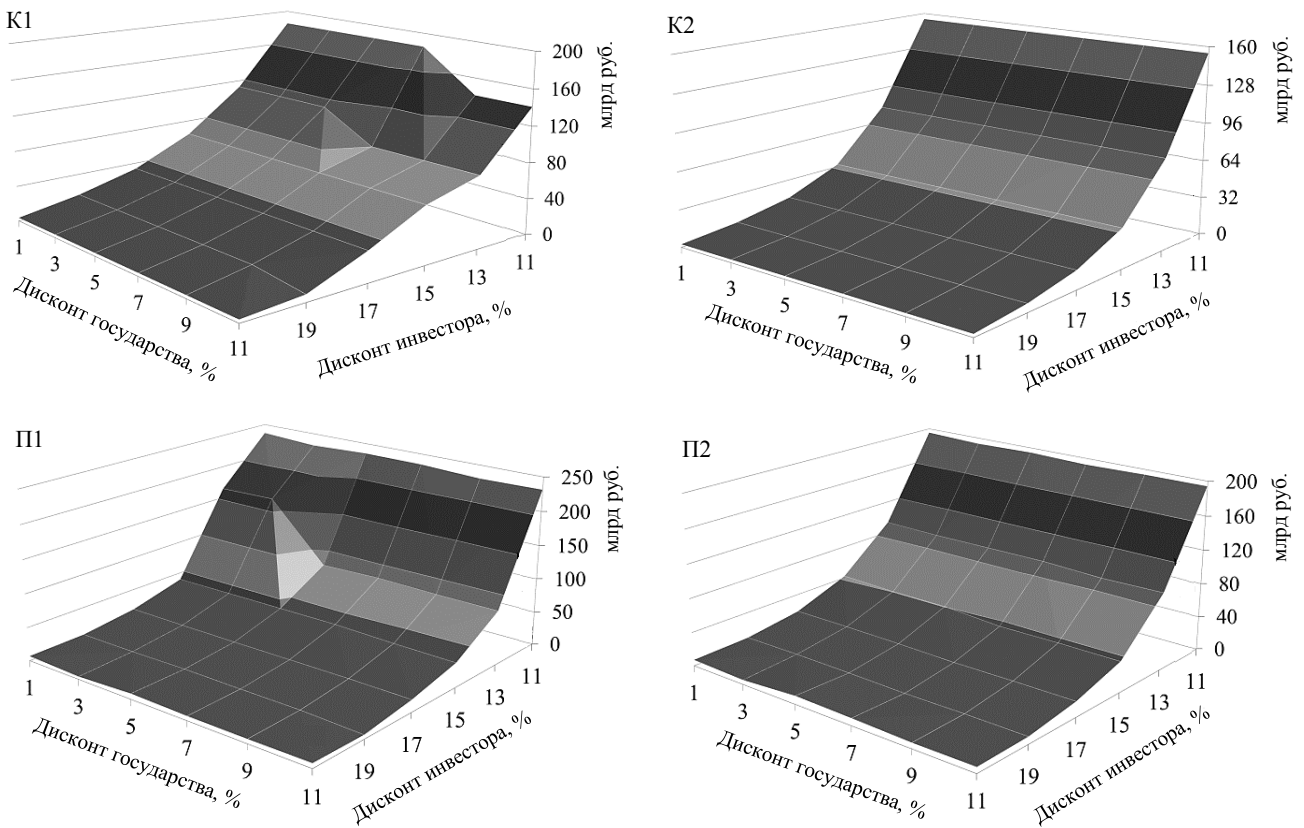


Рис.6. Значение целевой функции инвестора в различных моделях

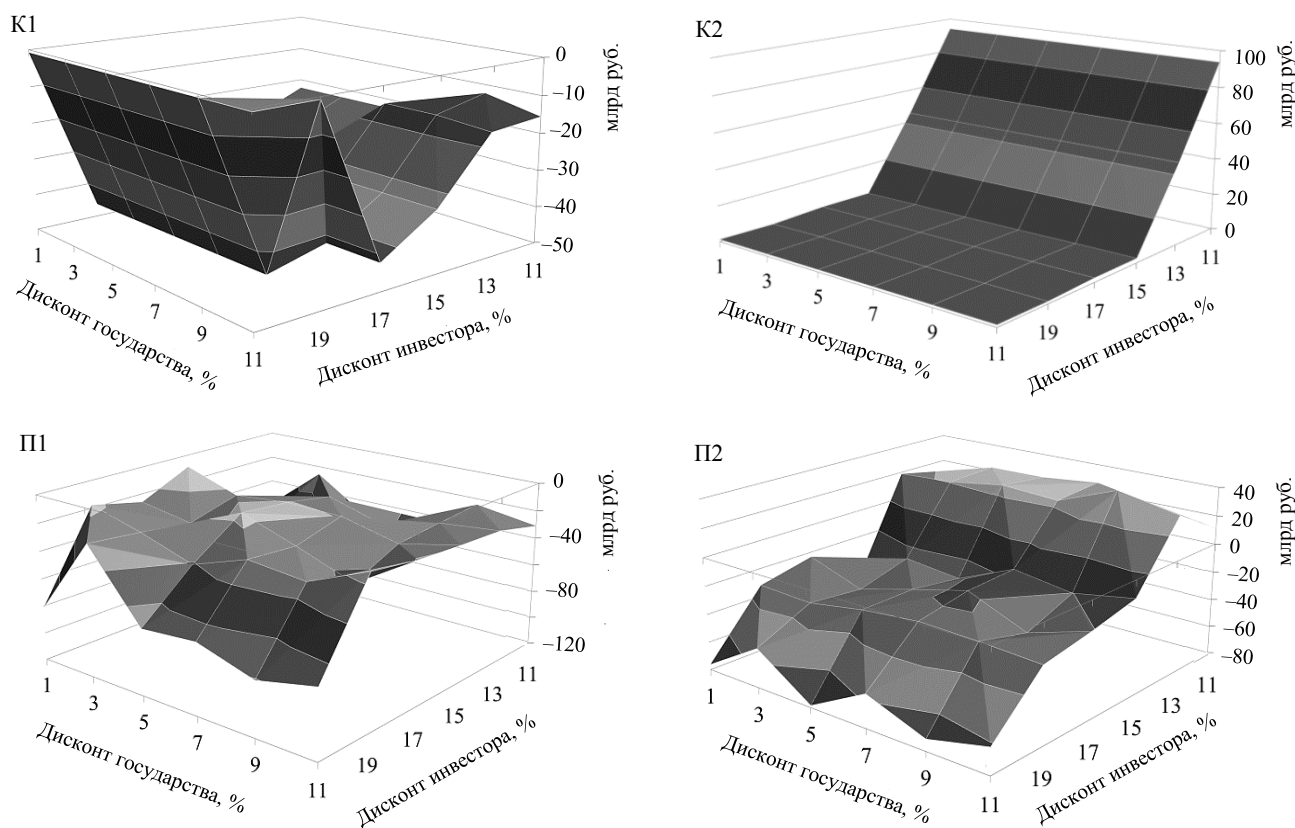


Рис.7. Баланс стоимости введенной инфраструктуры и компенсаций инвестору

Рассматривая модели П1, П2 как переходные к классической схеме и принимая во внимание, что они предполагают частичное участие государства в прямых инвестициях в инфраструктуру, можно оставить только классические модели К1 и К2. Выбор из этой пары может быть сделан на основе анализа баланса стоимости введенной инфраструктуры и компенсаций инвестору – разности суммарной стоимости введенных инфраструктурных фондов и общего объема компенсационных платежей инвестору (рис.7). Модель К2 здесь оказывается предпочтительной – она обеспечивает положительное сальдо на всем спектре значений  $DI$ . Сделанный выбор подтверждается и тем обстоятельством, что модель К2 требует компенсаций, на порядок меньших, чем К1 (см. рис.2) – наиболее мощный аргумент в условиях бюджетного дефицита.

Таким образом, для государства в сегодняшних условиях жесткого бюджетного дефицита цель ясна – реализация классической модели ГЧП в модификации К2. Методическая основа такой схемы – интегральная оценка  $NPV$  инвестора в реализованной программе освоения недр. Для этого уже нужен большой уровень доверия в партнерстве и наличие институтов, позволяющих провести мониторинг эффективности инвестора.

Одним из возможных институтов такого рода может быть консорциум во главе с государственной управляющей компанией, цели которой – организация, координация и формирование эффективной программы развития территории на основе горизонтального взаимодействия частных инвесторов. В условиях дефицита бюджета такая форма партнерства способна генерировать эффекты от консолидации ресурсов инвесторов, открывать возможность гармонизации их целей и в перспективе адаптировать классическую схему к российским реалиям. Подобная модель, в которой классическое партнерство дополнялось идеей консорциума, была исследована в работе [53]. Показано, что при некоторых условиях – возможности кластеризации территории, наличии и близком расположении высокорентабельных месторождений – формирование консорциума экономически целесообразно. Участие РЖД в реализации подобных проектов расширяет возможности подхода и привносит большую устойчивость такому институту.



## Заключение

Проведенный анализ моделей ГЧП позволяет дать экономическую оценку последствий постепенной трансформации института партнерства в производственно-инфраструктурном строительстве от помощи инвестору (модель Р) к помощи государству в классической модели. Результаты численных экспериментов на реальной информации типичного ресурсного региона, каким является Забайкальский край, позволяют сделать следующие выводы:

- В условиях жесткого бюджетного дефицита механизм партнерства, в котором государство само строит необходимую инфраструктуру (модель Р), не имеет экономических перспектив.
- Промежуточные модели партнерства П1, П2 играют роль переходного института, позволяющего снизить бюджетную нагрузку и повысить уровень доверия частного инвестора к государству. Такие схемы могут быть полезны для становления института ГЧП в российских условиях и после тщательного модельного анализа рекомендованы к практическому использованию в некоторых регионах. В большинстве случаев предпочтительной для государства является модель П2.
- В условиях бюджетного дефицита классическая модель ГЧП в модификации К2 в наибольшей степени отвечает интересам государства. Эта модель обеспечивает минимально возможный объем компенсационных выплат инвестору и положительность баланса стоимости введенной инфраструктуры и объема компенсаций.
- Необходимое условие реализуемости модели К2 – наличие института согласованной оценки NPV инвестора в реализованной программе освоения недр, учитывающей его непрофильные инфраструктурные затраты, компенсационные платежи и ту долю ренты, которую он получил.
- Одна из возможных форм такого института – механизм коллаборации, основанный на кластеризации месторождений и создании консорциума, реализующего проекты строительства необходимой производственной инфраструктуры. Такой подход позволяет не только построить необходимую производственную инфраструктуру, но и создать практическую основу для трансформации российского института ГЧП в направлении его классических форм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Addink H. Good Governance: Concept and Context. Oxford: Oxford University Press, 2019. 352 p. DOI: [10.1093/oso/9780198841159.001.0001](https://doi.org/10.1093/oso/9780198841159.001.0001)
2. Ivanov O., Inshakova A.O. Public-Private Partnerships in Russia. Institutional Frameworks and Best Practices. Springer, 2020. 312 p.
3. Yescombe E.R., Farquharson E. Public-Private Partnerships for Infrastructure. Principles of Policy and Finance. Butterworth-Heinemann, 2018. 548 p.
4. Резниченко Н.В. Модели государственно-частного партнерства // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия «Менеджмент». 2010. Вып. 4. С. 58-83.
5. Quiggin J. Risk, PPPs and the Public Sector Comparator // Australian Accounting Review. 2004. Vol. 14. Iss. 33. P. 51-61. DOI: [10.1111/j.1835-2561.2004.tb00229.x](https://doi.org/10.1111/j.1835-2561.2004.tb00229.x)
6. Grimsey D., Levis M.K. Public Private Partnerships: The Worldwide Revolution in Infrastructure Provision and Project Finance. Edward Elgar, 2004. 288 p.
7. Mayston D.J. The Private Finance Initiative in the National Health Service: An Unhealthy Development in New Public Management? // Financial Accountability & Management. 1999. Vol. 15. Iss. 3-4. P. 249-274. DOI: [10.1111/1468-0408.00084](https://doi.org/10.1111/1468-0408.00084)
8. Grout P.A. The economics of the private finance initiative // Oxford review of economic policy. 1997. Vol. 13. Iss. 4. P. 53-66. DOI: [10.1093/oxrep/13.4.53](https://doi.org/10.1093/oxrep/13.4.53)
9. Adamou M., Kyriakidou N., Connolly J. Evolution of public-private partnership: the UK perspective through a case study approach // International Journal of Organizational Analysis. 2021. Vol. 29. Iss. 6. P. 1455-1466. DOI: [10.1108/IJOA-08-2020-2397](https://doi.org/10.1108/IJOA-08-2020-2397)
10. Zhe Cheng, Yongjian Ke, Zhenshan Yang et al. Diversification or convergence: An international comparison of PPP policy and management between the UK, India, and China // Engineering, Construction and Architectural Management. 2020. Vol. 27. Iss. 6. P. 1315-1335. DOI: [10.1108/ECAM-06-2019-0290](https://doi.org/10.1108/ECAM-06-2019-0290)
11. Gleeson T.P., Grimsey D., Lewis M.K. How Successful Has the PPP Model Been in Australia? // Public Private Partnerships. Cham: Springer, 2019. P. 167-192. DOI: [10.1007/978-3-030-24600-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24600-6_9)
12. Dao N.H., Marisetty V.B., Jing Shi, Tan M. Institutional quality, investment efficiency, and the choice of public-private partnerships // Accounting & Finance. 2020. Vol. 60. Iss. 2. P. 1801-1834. DOI: [10.1111/acfi.12514](https://doi.org/10.1111/acfi.12514)
13. Grimsey D., Lewis M.K. Are Public Private Partnerships value for money? Evaluating alternative approaches and comparing academic and practitioner views // Accounting Forum. 2005. Vol. 29. Iss. 4. P. 345-378. DOI: [10.1016/j.accfor.2005.01.001](https://doi.org/10.1016/j.accfor.2005.01.001)
14. Karnes Y. Are There Optimal Forms of Public-Private Partnerships? // Journal of Behavioral and Applied Management. 2020. Vol. 20. Iss. 2. P. 51-68. DOI: [10.21818/001c.14178](https://doi.org/10.21818/001c.14178)



15. Nannan Wang, Minxun Ma. Public-private partnership as a tool for sustainable development – What literatures say? // Sustainable Development. 2021. Vol. 29. Iss. 1. P. 243-258. DOI: [10.1002/sd.2127](https://doi.org/10.1002/sd.2127)
16. Petersen O.H. Evaluating the costs, quality, and value for money of infrastructure public-private partnerships: A systematic literature review // Annals of Public and Cooperative Economics. 2019. Vol. 90. Iss. 2. P. 227-244. DOI: [10.1111/apce.12243](https://doi.org/10.1111/apce.12243)
17. Rybnicek R., Plakolm J., Baumgartner L. Risks in Public-Private Partnerships: A Systematic Literature Review of Risk Factors, Their Impact and Risk Mitigation Strategies // Public Performance & Management Review. 2020. Vol. 43. Iss. 5. P. 1174-1208. DOI: [10.1080/15309576.2020.1741406](https://doi.org/10.1080/15309576.2020.1741406)
18. Hongyu Jin, Shijing Liu, Chunlu Liu, Udawatta N. Optimizing the concession period of PPP projects for fair allocation of financial risk // Engineering, Construction and Architectural Management. 2019. Vol. 26. Iss. 10. P. 2347-2363. DOI: [10.1108/ECAM-05-2018-0201](https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2018-0201)
19. Carbonara N., Pellegrino R. Revenue guarantee in public-private partnerships: a win-win model // Construction Management and Economics. 2018. Vol. 36. Iss. 10. P. 584-598. DOI: [10.1080/01446193.2018.1467028](https://doi.org/10.1080/01446193.2018.1467028)
20. Cheng Chen, Caixia Man. Are good governance principles institutionalised with policy transfer? An examination of public-private partnerships policy promotion in China // Australian Journal of Social Issues. 2020. Vol. 55. Iss. 2. P. 162-181. DOI: [10.1002/ajs4.99](https://doi.org/10.1002/ajs4.99)
21. Hueskes M., Verhoest K., Block T. Governing public-private partnerships for sustainability: An analysis of procurement and governance practices of PPP infrastructure projects // International Journal of Project Management. 2017. Vol. 35. Iss. 6. P. 1184-1195. DOI: [10.1016/j.ijproman.2017.02.020](https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.02.020)
22. Jie Tan, Jerry Zhirong Zhao. The Rise of Public-Private Partnerships in China: An Effective Financing Approach for Infrastructure Investment? // Public Administration Review. 2019. Vol. 79. Iss. 4. P. 514-518. DOI: [10.1111/puar.13046](https://doi.org/10.1111/puar.13046)
23. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Васильевская Д.В. и др. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. DOI: [10.31897/PMI.2022.100](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100)
24. Заернюк В.М., Анисимов П.Ф., Забайкин Ю.В. Оценка состояния и перспектив развития государственно-частного партнерства в отрасли добычи полезных ископаемых // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2019. Т. 9. № 6А. С. 85-94.
25. Васильчиков А.В. Пути реализации потенциала региона через механизм государственно-частного партнерства // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2019. № 6. С. 68-73.
26. Chung D., Hensher D.A. Public private partnerships in the provision of tolled roads: Shared value creation, trust and control // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2018. Vol. 118. P. 341-359. DOI: [10.1016/j.tra.2018.08.038](https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.08.038)
27. Юдин С.С., Череповицын А.Е. Партнерство государства и бизнеса для обеспечения экономической устойчивости сложных промышленных нефтегазовых систем в Арктике // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2022. № 2. С. 7-18. DOI: [10.37614/2220-802X.2.2022.76.001](https://doi.org/10.37614/2220-802X.2.2022.76.001)
28. Filatova I., Nikolaichuk L., Zakaev D., Ilin I. Public-Private Partnership as a Tool of Sustainable Development in the Oil-Refining Sector: Russian Case // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 9. № 5153. DOI: [10.3390/su13095153](https://doi.org/10.3390/su13095153)
29. Agarchand N., Laishram B. Sustainable infrastructure development challenges through PPP procurement process: Indian perspective // International Journal of Managing Projects in Business. 2017. Vol. 10. Iss. 3. P. 642-662. DOI: [10.1108/IJMPB-10-2016-0078](https://doi.org/10.1108/IJMPB-10-2016-0078)
30. Ваславский Я. Государственно-частное партнерство: перспективы развития общественно значимой инфраструктуры // Федерализм. 2019. № 4. С. 75-94. DOI: [10.21686/2073-1051-2019-4-75-94](https://doi.org/10.21686/2073-1051-2019-4-75-94)
31. Бедняков А.С. Государственно-частное партнерство как модель развития публичной инфраструктуры // Вестник МГИМО-Университета. 2022. Т. 15. № 1. С. 143-176. DOI: [10.24833/2071-8160-2022-1-82-143-173](https://doi.org/10.24833/2071-8160-2022-1-82-143-173)
32. Малов В.Ю., Тарасова О.В., Ионова В.Д. Нижнее Приангарье как «связующее звено» между севером и югом Сибири // ЭКО. 2018. Т. 48. № 6. С. 50-74. DOI: [10.30680/ECO0131-7652-2018-6-50-74](https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2018-6-50-74)
33. Поподько Г.И., Нагаева О.С., Бухарова Е.Б. Применение проектного подхода в территориальном развитии восточных регионов России // Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки. 2021. Т. 14. Вып. 12. С. 1851-1862. DOI: [10.17516/1997-1370-0864](https://doi.org/10.17516/1997-1370-0864)
34. Глазырина И.П., Фалейчик Л.М., Фалейчик А.А. Инвестиции и потенциал роста качества жизни на Дальнем Востоке России // Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки. 2022. Т. 15. Вып. 7. С. 921-929 (in English). DOI: [10.17516/1997-1370-0897](https://doi.org/10.17516/1997-1370-0897)
35. Глазырина И.П., Фалейчик Л.М., Фалейчик А.А. «Дальневосточная» инвестиционная политика и доходы граждан в разрезе основных отраслей: опыт эмпирического анализа // ЭКО. 2022. Т. 52. № 7. С. 80-98. DOI: [10.30680/ECO0131-7652-2022-7-80-98](https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2022-7-80-98)
36. Местников Н.А., Николаева И.В., Павлова С.Н. Инвестиционный проект «Комплексное развитие Южной Якутии»: перспективы, проблемы, решения // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. Т. 8. № 20 (161). С. 24-33.
37. Самаруха В.И., Краснова Т.Г., Трусова С.В. Модель создания и реализации межрегионального проекта «Енисейская Сибирь» // Известия Байкальского государственного университета. 2019. Т. 29. № 2. С. 324-331. DOI: [10.17150/2500-2759.2019.29\(2\).324-331](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2019.29(2).324-331)
38. Брюханова Е.А., Ефимов В.С., Шишацкий Н.Г. Исследование проблем формирования центров экономического роста в южных районах Ангаро-Енисейского макрорегиона // Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки. 2020. Т. 13. Вып. 11. С. 1736-1745 (in English). DOI: [10.17516/1997-1370-0679](https://doi.org/10.17516/1997-1370-0679)
39. Брюханова Е.А., Шишацкий Н.Г., Ефимов В.С. Стратегический анализ перспектив развития Саяно-Енисейского мезорегиона с использованием балансовой модели // Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки. 2021. Т. 14. Вып. 12, р. 1760-1769. DOI: [10.17516/1997-1370-0856](https://doi.org/10.17516/1997-1370-0856)
40. Hong Zhang, Lu Yu, Wenyu Zhang. Dynamic performance incentive model with supervision mechanism for PPP projects // Engineering, Construction and Architectural Management. 2020. Vol. 27. Iss. 9. P. 2643-2659. DOI: [10.1108/ECAM-09-2019-0472](https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2019-0472)
41. Xiangtian Nie, Kai Feng, Guoxiang Zhao et al. The Evolutionary Game of Trust in Public-Private Partnership Project Networks // Mathematical Problems in Engineering. 2021. Vol. Iss. 1. № 5514708. DOI: [10.1155/2021/5514708](https://doi.org/10.1155/2021/5514708)



42. Лавлинский С.М., Панин А.А., Плясунов А.В. Двухуровневая модель планирования государственно-частного партнерства // Автоматика и телемеханика. 2015. № 11. С. 89-103.
43. Lei Shi, Lu Zhang, Onishi M. et al. Contractual Efficiency of PPP Infrastructure Projects: An Incomplete Contract Model // Mathematical Problems in Engineering. 2018. Vol. 2018. Iss. 1. № 3631270. DOI: [10.1155/2018/3631270](https://doi.org/10.1155/2018/3631270)
44. Калгина И.С. Модели оценки проектов государственно-частного партнерства в сфере недропользования // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 247-254. DOI: [10.18454/PMI.2017.2.247](https://doi.org/10.18454/PMI.2017.2.247)
45. Лавлинский С.М., Панин А.А., Плясунов А.В. Сравнение моделей планирования государственно-частного партнерства // Дискретный анализ и исследование операций. 2016. Т. 23. № 3. С. 35-60. DOI: [10.17377/daio.2016.23.527](https://doi.org/10.17377/daio.2016.23.527)
46. Лавлинский С.М., Панин А.А., Плясунов А.В. Модели Штакельберга в территориальном планировании // Автоматика и телемеханика. 2019. № 2. С. 111-124. DOI: [10.1134/S0005231019020077](https://doi.org/10.1134/S0005231019020077)
47. Luming Shang, Aziz A.M.A. Stackelberg Game Theory-Based Optimization Model for Design of Payment Mechanism in Performance-Based PPPs // Journal of Construction Engineering and Management. 2020. Vol. 146. Iss. 4. № 04020029. DOI: [10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001806](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001806)
48. Alekseeva E., Kochetov Y., Talbi E.-G. A matheuristic for the discrete bilevel problem with multiple objectives at the lower level // International Transactions in Operational Research. 2017. Vol. 24. Iss. 5. P. 959-981. DOI: [10.1111/itor.12268](https://doi.org/10.1111/itor.12268)
49. Dempe S., Khamisov O., Kochetov Yu. A special three-level optimization problem // Journal of Global Optimization. 2020. Vol. 76. Iss. 3. P. 519-531. DOI: [10.1007/s10898-019-00822-w](https://doi.org/10.1007/s10898-019-00822-w)
50. Davydov I., Kochetov Y., Dempe S. Local Search Approach for the Competitive Facility Location Problem in Mobile Networks // International Journal of Artificial Intelligence. 2018. Vol. 16. Iss. 1. P. 130-143.
51. Лавлинский С.М. Модели индикативного планирования социально-экономического развития ресурсного региона. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 247 с.
52. Лапинская А.А. Влияние горной ренты на эффективность использования природного потенциала: парадокс изобилия и его российская специфика // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 79-94. DOI: [10.31897/PMI.2023.13](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.13)
53. Lavlinskii S., Zyryanov A. Model for Long-Term Partnerships Between the Government and Subsoil Users in Production and Infrastructure Construction // 19th International Asian School-Seminar on Optimization Problems of Complex Systems (OPCS), 14-22 August 2023, Novosibirsk, Moscow, Russia. IEEE, 2023. P. 53-58. DOI: [10.1109/OPCS59592.2023.10275768](https://doi.org/10.1109/OPCS59592.2023.10275768)

**Авторы:** Сергей Михайлович Лавлинский, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, [lavlin@math.nsc.ru](mailto:lavlin@math.nsc.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4607-0632> (Институт математики им. С.Л.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), Артем Александрович Панин, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1844-6276> (Институт математики им. С.Л.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), Александр Владимирович Плясунов, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-7199-3092> (Институт математики им. С.Л.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Тиристорное вольтодобавочное устройство для снижения колебаний напряжения в системах электроснабжения горно-рудных предприятий

Е.Н.Соснина✉, А.А.Асабин, Р.Ш.Бедретдинов, Е.В.Крюков, Д.А.Гусев

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**Как цитировать эту статью:** Соснина Е.Н., Асабин А.А., Бедретдинов Р.Ш., Крюков Е.В., Гусев Д.А. Тиристорное вольтодобавочное устройство для снижения колебаний напряжения в системах электроснабжения горно-рудных предприятий // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16450. С. 159-170. [EDN UIBVZK](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.16450)

### Аннотация

Статья посвящена решению проблемы колебаний напряжения в системах электроснабжения горно-рудных предприятий. Подключение мощных электроприемников с резкопеременным режимом работы (например, высоковольтных мегаваттных карьерных экскаваторов) вызывает в распределительной электрической сети 6-10 кВ колебания и провалы напряжения, выводящие из строя электрооборудование, устройства связи и автоматики, что нарушает технологические процессы и др. Использование существующих решений и средств снижения колебаний напряжения, вызванных динамической нагрузкой, неэффективно. Рассматривается возможность использования вольтодобавочных трансформаторов с быстродействующими тиристорными коммутаторами, позволяющих обрабатывать переключение ступеней регулирования в сторону повышения или понижения напряжения. Предложено новое схемотехническое решение тиристорного вольтодобавочного устройства (ТВДУ) с импульсно-фазовым способом управления для определения законов регулирования ТВДУ, позволяющих эффективно снижать колебания напряжения от динамической нагрузки в системах электроснабжения горно-рудных предприятий. Предусмотрены режимы повышения и понижения выходного напряжения ТВДУ, а также базовый режим (без добавки напряжения). В результате математического моделирования процессов регулирования ТВДУ и построения имитационной компьютерной модели электрической сети 6 кВ с динамической нагрузкой установлены законы регулирования выходного напряжения. Определены пределы эффективного регулирования ТВДУ, значения нечетных гармоник которых не превышают нормально допустимых пределов. Проведенные исследования позволяют реализовать систему управления устройством.

### Ключевые слова

горно-рудные предприятия; системы электроснабжения; динамическая нагрузка; колебания напряжения; тиристорное вольтодобавочное устройство; законы регулирования

### Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00872, <https://rscf.ru/project/24-29-00872/>.

Поступила: 11.04.2024

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 17.01.2025

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Горнодобывающая промышленность играет важную роль в экономике России [1]. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 г.\* включает задачи разработки прогрессивных технологий добычи, транспортировки и переработки полезных ископаемых, строительства новых элементов инфраструктуры. Решение данных задач связано с непрерывным увеличением мощности энергетических установок и повышением потребления электроэнергии.

Электроснабжение горно-рудных предприятий отличается территориальной рассредоточенностью электроприемников [2], непрерывным продвижением фронта горных работ и перемещением потребителей электроэнергии [3, 4]. Подключение мощных электроприемников с резкопеременным режимом работы (например, мегаваттных карьерных экскаваторов) вызывает в электрической

\* Распоряжение Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р «Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года».



сети колебания напряжения, превышающие допустимые значения, что негативно влияет на другие нагрузки [5]. Так, сбой в работе мощных подъемных машин, мельниц самоизмельчения и других нагрузок горнодобывающего производства, чувствительных к колебаниям напряжения, приводит к остановке производственного процесса, авариям и др. Поэтому вопросы разработки технических решений быстродействующих устройств, обеспечивающих снижение колебаний напряжения в электрической сети объектов горно-рудной отрасли, являются актуальными.

К средствам, позволяющим снижать колебания напряжения, можно отнести устройства плавного пуска, статические источники реактивной мощности, установки продольной компенсации, сдвоенные реакторы и др. [6, 7]. Известно, что пусковой ток электродвигателя может в восемькратно превышать номинальный, вызывая механические и электромагнитные ударные нагрузки как на электропривод, так и на исполнительные механизмы [8, 9]. Устройства плавного пуска способны обеспечить плавность нарастания нагрузки [10]. Однако при частых пусках и отключениях привода не исключена ситуация, при которой перегрев устройства плавного пуска и двигателя оказывается критичным.

Компания Siemens Industry Inc. выпускает активные входные преобразователи частоты AFE на основе IGBT-транзисторов для работы драглайна (одноковшовый экскаватор, широко используемый на предприятиях горнодобывающей промышленности) [11]. Несмотря на то, что AFE более устойчивы к возмущениям сети (провалы, колебания напряжения) даже при работе в инвертирующих режимах, эта надежность зависит от динамической реакции схемы управления выпрямителем [12, 13].

Для устранения колебаний и провалов напряжения может быть использован распределенный статический компенсатор (D-STATCOM) [14-16], выполненный на основе инвертора напряжения на управляемых IGBT-транзисторах. D-STATCOM сравнивает форму линейного и опорного сигналов, что обеспечивает правильную меру компенсации запаздывания или опережения реактивной мощности [17]. Однако IGBT-транзисторы имеют меньшую перегрузочную способность по сравнению с тиристорами, поэтому в сети 6-10 кВ более целесообразно применять быстродействующие устройства на тиристорах.

Для снижения колебаний напряжения в шахтных системах электроснабжения разработан новый тип шахтного взрывозащищенного стабилизирующего трансформатора [18]. Компенсирующее напряжение накладывается на напряжение сети через компенсирующий трансформатор, включенный последовательно с линией электроснабжения. Таким образом происходит восстановление отклонения амплитуды напряжения сети в режиме реального времени.

Компанией «Энергетическое оборудование» предложен динамический компенсатор напряжения (ДКИН) – устройство с двойным преобразованием напряжения [19-21] и пофазным управлением. ДКИН построен на базе управляемых выпрямителей, через которые напряжение передается конденсаторам [22, 23]. Выходные зажимы ДКИН подключаются к нагрузке через инверторный блок, состоящий из IGBT-модулей и вольтодобавочный трансформатор, во вторичной обмотке которого наводится ЭДС, компенсирующая провал напряжения [24, 25].

Известна система бесперебойного электроснабжения с применением возобновляемых источников энергии [26] и многоступенчатого устройства автоматического ввода резерва [27]. Однако даже если источником питания горнодобывающего предприятия является достаточно мощная электростанция, для поддержания необходимого уровня короткого замыкания необходимы дополнительные генераторы, что увеличивает эксплуатационные расходы.

Среди подходов и устройств для снижения колебаний напряжения можно выделить и двухтрансформаторную подстанцию с общим двухдиапазонным управляемым регулятором напряжения [28].

Рассмотренные устройства позволяют уменьшить колебания напряжения. Однако их существенным недостатком является дороговизна и сложность схем управления. Поскольку колебания относятся к изменениям напряжения длительностью от полупериода до нескольких секунд, необходимо быстрое реагирование устройства на изменение напряжения для последующего регулирования. В существующих сетях оперативное регулирование напряжения выполняется с помощью электромеханического устройства РПН [29, 30]. Время переключения отводов РПН составляет около 10 с, и устройство не успевает реагировать на колебания напряжения.



Авторами разработано быстродействующее тиристорное вольтодобавочное устройство (ТВДУ) [31], реализующее функцию продольного регулирования, позволяющего с помощью вольтодобавки компенсировать колебания напряжения на шинах потребителя. Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска эффективных и малозатратных мероприятий для повышения качества электроснабжения объектов горно-рудной отрасли.

Цель исследований – определить законы регулирования ТВДУ, позволяющие эффективно снижать колебания напряжения от динамической нагрузки в системах электроснабжения горно-рудных предприятий.

### Методы

Для проведения исследований необходимо разработать имитационные математическую и компьютерную модели электрической сети с ТВДУ и динамической нагрузкой, позволяющие получить регулировочные характеристики ТВДУ для различных режимов работы устройства и параметров нагрузки. На рис.1 приведены принципиальная электрическая схема и схема замещения разработанного ТВДУ.

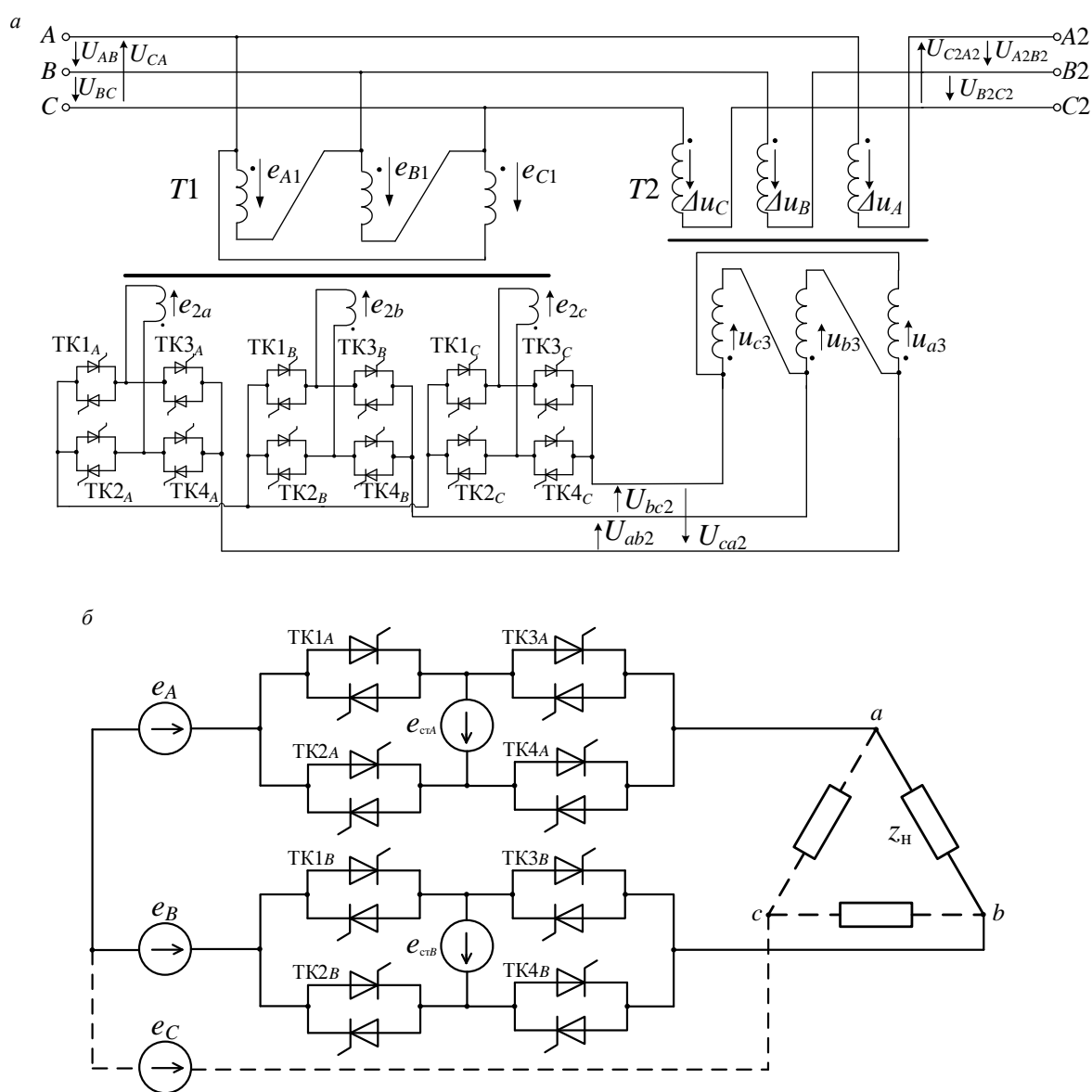


Рис.1. Тиристорное вольтодобавочное устройство:  
а – принципиальная электрическая схема; б – схема замещения

$T1, T2$  – шунтовый и серийный трансформаторы;  
TK1-TK4 – модули тиристорного коммутатора фаз A, B и C



В состав ТВДУ входят трехфазный тиристорный коммутатор, трехфазные шунтовый  $T1$  и серийный  $T2$  трансформаторы. Каждая фаза тиристорного коммутатора является мостовым преобразователем с двунаправленными ключами ТК1-ТК4 в каждом плече (рис. 1, а). Принцип действия ТВДУ основан на введении добавочного напряжения при изменении амплитуды выходного напряжения устройства относительно входного.

Предусмотрены 32 ступени регулирования для трех основных режимов работы ТВДУ (1 – повышение выходного напряжения; 2 – базовый режим (без добавки напряжения); 3 – понижение выходного напряжения): 16 ступеней соответствуют режиму 1 (0-15 ступени); 16 ступеней – режиму 3 (17-32 ступени); ступень регулирования 16 соответствует базовому режиму 2. Каждая ступень соответствует определенным значениям углов регулирования тиристоров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . В зависимости от заданного режима происходит открытие нужного блока встречно-параллельных тиристоров в каждой фазе – ТК1 и ТК4 для режима 1, ТК2 и ТК3 для режима 3. Режим прямой проводимости (базовый) соответствует открытию блоков встречно-параллельных тиристоров ТК2 и ТК4. Время одного переключения ТВДУ составляет около 20 мс, максимальное время переключения всех 32 ступеней регулирования – 1 с.

В режиме 1, когда требуется повысить уровень напряжения на шинах нагрузки, добавляется ЭДС регулировочной ступени  $e_{ст}$ :

$$U_n = U_c + e_{ст},$$

где  $U_n$  и  $U_c$  – действующие напряжения нагрузки и сети.

В режиме 2 (базовом) ЭДС регулировочной ступени  $e_{ст}$  исключена из контура тока.

В режиме 3, когда уровень напряжения на нагрузке требуется снизить, справедливо выражение

$$U_n = U_c - e_{ст}.$$

Предусмотрено двухзонное регулирование: переход от режима 1 к режиму 2 осуществляется увеличением угла регулирования тиристоров  $\alpha_1$  от 0 до  $180^\circ$  при неизменном значении угла регулирования  $\alpha_2 = 180^\circ$ , а затем уменьшением  $\alpha_2$  от  $180$  до  $0^\circ$  при неизменном  $\alpha_1 = 180^\circ$ . Такое же поочередное двухзонное регулирование применяется и для плавного перехода из режима 3 к режиму 2.

В систему управления ТВДУ заложены активно-адаптивные алгоритмы, позволяющие устройству работать автоматически. Управление тиристорами ТВДУ предусмотрено импульсно-фазовым способом, обеспечивающим точность и эффективность регулирования напряжения [32]. Применение датчиков тока не требуется, что сохраняет регулировочные свойства ТВДУ при оперативном реагировании на изменение нагрузочных токов.

С помощью ТВДУ в сети 6-10 кВ регулируется линейное напряжение (отсутствует нейтральный провод). Принцип работы ТВДУ на примере регулирования линейного напряжения  $U_{AB}$ : в режиме 1 включены ТК1<sub>А</sub>, ТК4<sub>А</sub>, ТК1<sub>В</sub>, ТК4<sub>В</sub>; в режиме 2 – ТК2<sub>А</sub>, ТК4<sub>А</sub>, ТК2<sub>В</sub>, ТК4<sub>В</sub>; в режиме 3 – ТК2<sub>А</sub>, ТК3<sub>А</sub>, ТК2<sub>В</sub>, ТК3<sub>В</sub>.

Преимуществами ТВДУ перед тиристорными регуляторами [33, 34] являются сниженное число модулей тиристорного коммутатора и уменьшенная мощность трансформаторов (что повышает надежность и безопасность работы устройства), а также меньшее искажение кривой выходного напряжения.

Математическое и компьютерное моделирование режимов повышения и понижения напряжения ТВДУ с учетом параметров нагрузки позволит сформировать законы регулирования, которые лягут в основу системы управления устройством в составе электрической сети.

*Математическое моделирование режимов работы ТВДУ.* Законы изменения напряжения нагрузки (фазных и линейного) при переводе ТВДУ из режима 1 или 3 в базовый режим 2 поочередным изменением углов управления тиристорами  $\alpha_1$  (в интервалах положительного направления мощности) и  $\alpha_2$  (в интервалах отрицательного направления мощности) подробно описаны в работе [35]. На рис.2 приведен пример диаграмм изменения напряжения нагрузки при переводе ТВДУ из режима 1 в режим 2 путем поочередного изменения углов  $\alpha_1$  (рис.2, а) и  $\alpha_2$  (рис.2, б).

Анализ работы ТВДУ по построенным диаграммам позволяет математически описать процессы регулирования выходного напряжения ТВДУ и определить основные параметры, оказывающие

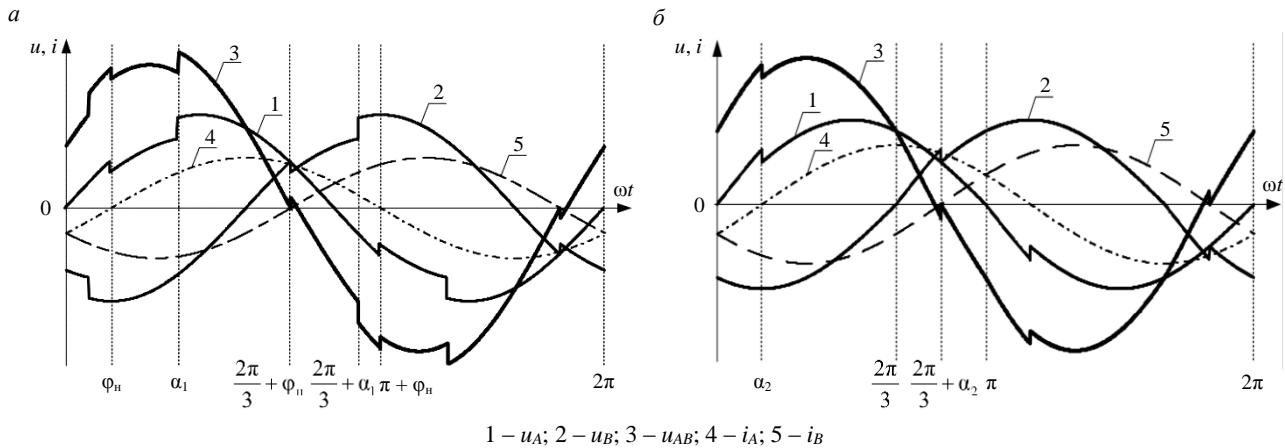


Рис.2. Мгновенные фазные и линейные напряжения нагрузки в режиме 1 ТВДУ при изменении  $\alpha_1$  (а) и  $\alpha_2$  (б)

влияние на поведение регулировочных характеристик устройства, т.е. выявить зависимость действующего значения выходного напряжения от напряжения управления  $U_{упр}$  при различных углах нагрузки.

Математические выражения, описывающие регулировочные характеристики, получены с использованием метода припасовывания граничных значений [36, 37]. Метод позволяет описать процессы в кусочно-линейных системах. В каждом интервале времени постоянные интегрирования определяются путем сопряжения уравнений на границах смежных интервалов с помощью первого и второго законов коммутации (условий непрерывности тока в индуктивных элементах и напряжения на конденсаторах) в моменты коммутации. Принятые допущения: не учитываются сопротивления магнитной цепи и обмотки  $T2$  (рис.1, а); нагрузка активно-индуктивная, линейная. За базисную величину берется амплитуда фазного напряжения сети.

На основе анализа режимов 1 и 3 работы ТВДУ по построенным диаграммам получены мгновенные значения фазных напряжений на стороне нагрузки. Мгновенные значения линейного напряжения нагрузки, подключенной между фазами  $A$  и  $B$ , определяются по формуле

$$u_{л}^* = u_{Ан}^* - u_{Вн}^*, \quad (1)$$

где  $u_{Ан}^*$ ,  $u_{Вн}^*$  – мгновенные напряжения нагрузки фаз  $A$  и  $B$ , отн.ед.

Действующие значения напряжения нагрузки вычисляются по формуле

$$U_{л}^* = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (U_{л}^*)^2 d\theta}, \quad (2)$$

где  $U_{л}^*$  – линейное напряжение нагрузки, отн.ед.

Рассмотрен переход ТВДУ из режимов 1 и 3 в режим 2 в интервалах эффективного изменения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Эффективными являются интервалы, обеспечивающие существенное изменение формы и амплитуды напряжения).

*Режим 1 ТВДУ в интервале увеличения  $\alpha_1$  от 0 до  $180^\circ$  при  $\alpha_2 = 180^\circ = const$ .* Из диаграммы (рис.2, а) видно, что изменение линейного напряжения нагрузки в течение полупериода можно разбить на четыре интервала:  $\varphi_n - \alpha_1$ ;  $\alpha_1 - \frac{2\pi}{3} + \varphi_n$ ;  $\frac{2\pi}{3} + \varphi_n - \frac{2\pi}{3} + \alpha_1$ ;  $\frac{2\pi}{3} + \alpha_1 - \pi + \varphi_n$ . Для всех интервалов получены мгновенные значения фазных и линейных напряжений на стороне нагрузки (1).

Мгновенное значение линейного напряжения:

- для первого интервала

$$U_{л1}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = \sin \theta - (1 + k_{ст}) \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$



- для второго интервала

$$U_{л2}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = (1 + k_{ст}) \sin \theta - (1 + k_{ст}) \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$

- для третьего интервала

$$U_{л3}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = (1 + k_{ст}) \sin \theta - \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$

- для четвертого интервала

$$U_{л4}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = (1 + k_{ст}) \sin \theta - (1 + k_{ст}) \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right).$$

Согласно уравнению (2), закон регулирования действующего значения выходного напряжения:

$$U_{д}^* = \sqrt{\frac{(\sin(2\alpha_1) - \sin(2\varphi_n) + 2(\varphi_n - \alpha_1))(3k_{ст} + 2k_{ст}^2) + 3\pi(1 + k_{ст}^2)}{2\pi}}. \quad (3)$$

Аналогично получены выражения для режима 1 ТВДУ в интервале эффективного изменения  $\alpha_2$ ; для режима 3 в интервалах эффективного изменения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Режим 1 ТВДУ в интервале  $\alpha_2$  от  $180^\circ$  до  $0^\circ$  при  $\alpha_1 = 180^\circ = const$ . Изменения линейного напряжения нагрузки (рис.2, б) в течение полупериода разбиваются на четыре интервала:  $0 - \alpha_2$ ;

$$\alpha_2 - \frac{2\pi}{3}; \frac{2\pi}{3} - \frac{2\pi}{3} + \alpha_2; \frac{2\pi}{3} + \alpha_2 - \pi.$$

Мгновенное значение линейного напряжения:

- для первого интервала

$$U_{л1}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = (1 + k_{ст}) \sin \theta - \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$

- для второго интервала

$$U_{л2}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = \sin \theta - \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$

- для третьего интервала

$$U_{л3}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = \sin \theta - (1 + k_{ст}) \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$

- для четвертого интервала

$$U_{л4}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = \sin \theta - \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right).$$

Действующее значение напряжения нагрузки

$$U_{д}^* = \sqrt{\frac{(2\alpha_1 - \sin(2\alpha_2))(3k_{ст} + k_{ст}^2) + 3\pi}{2\pi}}. \quad (4)$$

Режим 3 ТВДУ в интервале уменьшения  $\alpha_1$  от  $180^\circ$  до  $0^\circ$  при  $\alpha_2 = 180^\circ = const$ . Изменения линейного напряжения нагрузки, согласно [35], в течение полупериода разбиваются на четыре интервала: от 0 до  $\alpha_1$ ; от  $\alpha_1$  до  $\frac{2\pi}{3}$ ; от  $\frac{2\pi}{3}$  до  $\frac{2\pi}{3} + \alpha_1$ ; от  $\frac{2\pi}{3} + \alpha_1$  до  $\pi$ .



Мгновенное значение линейного напряжения:

- для первого интервала

$$U_{л1}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = \sin \theta - (1 - k_{ст}) \sin \theta \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$

- для второго интервала

$$U_{л2}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = (1 - k_{ст}) \sin \theta - (1 - k_{ст}) \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$

- для третьего интервала

$$U_{л3}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = (1 - k_{ст}) \sin \theta - \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$

- для четвертого интервала

$$U_{л4}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = (1 - k_{ст}) \sin \theta - (1 - k_{ст}) \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right).$$

Действующее значение напряжения нагрузки

$$U_{д}^* = \sqrt{\frac{(2\alpha_1 - \sin(2\alpha_2))(3k_{ст} - 2k_{ст}^2) + 3\pi(1 - k_{ст})^2}{2\pi}}. \quad (5)$$

Режим 3 ТВДУ на интервале уменьшения  $\alpha_2$  от  $180^\circ$  до  $0^\circ$  при  $\alpha_1 = 180^\circ = \text{const}$ . Изменения линейного напряжения нагрузки, согласно [35], в течение полупериода разбиваются на интервалы: от  $\varphi_n$  до  $\alpha_2$ ; от  $\alpha_2$  до  $\frac{2\pi}{3} + \varphi_n$ ; от  $\frac{2\pi}{3} + \varphi_n$  до  $\frac{2\pi}{3} + \alpha_2$ ; от  $\frac{2\pi}{3} + \alpha_2$  до  $\pi + \varphi_n$ .

Мгновенное значение линейного напряжения:

- для первого интервала

$$U_{л1}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = (1 - k_{ст}) \sin \theta - \sin \theta \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$

- для второго интервала

$$U_{л2}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = \sin \theta - \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$

- для третьего интервала

$$U_{л3}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = \sin \theta - (1 - k_{ст}) \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right);$$

- для четвертого интервала

$$U_{л4}^* = U_{Ан}^* - U_{Вн}^* = \sin \theta - \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right).$$

Действующее значение напряжения нагрузки

$$U_{д}^* = \sqrt{\frac{(\sin(2\varphi_n) - \sin(2\alpha_2) + 2(\alpha_2 - \varphi_n))(k_{ст}^2 - 3k_{ст}) + 3\pi}{2\pi}}. \quad (6)$$

Анализ законов регулирования (3)-(6) говорит о влиянии фазового угла нагрузки  $\varphi_n$ , углов регулирования  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и глубины ступени регулирования  $k_{ст}$  на действующее значение выходного напряжения ТВДУ.



Углы регулирования  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  зависят от напряжения управления  $U_{упр}$ , диапазон изменения которого составляет от 0 до 2. Таким образом, действующее значение выходного напряжения ТВДУ также зависит и от  $U_{упр}$ . Амплитуда опорного пилообразного напряжения схемы импульсно-фазового управления принимается за базисную величину. При этом в моменты, когда напряжение управления и опорное напряжение равны, происходит формирование импульсов включения тиристоров.

По уравнениям (3)-(6) построены регулировочные характеристики ТВДУ в режимах 1 и 3 при  $\varphi_n = 0^\circ, 30^\circ$  и  $60^\circ$ . Графики построены при глубине ступени регулирования  $k_{ст} = 0,1$  и напряжении сети  $U = 6000$  В.

**Имитационное моделирование.** В среде моделирования Matlab (Simulink) разработана имитационная модель участка электрической сети 6-10 кВ, позволившая верифицировать и уточнить полученные в ходе математического моделирования регулировочные характеристики ТВДУ. В модели использованы как готовые элементы библиотеки SimPowerSystems, так и маскированные блоки, отсутствующие в стандартной библиотеке. Большая точность расчетов и высокое быстродействие модели ТВДУ обусловлены двухэтапным подходом к решению дифференциальных уравнений (для решения использован метод ode23tb). На первом этапе работает метод Рунге – Кутты, а на втором – метод, в основу которого заложены формулы обратного дифференцирования второго порядка.

Номинальная мощность нагрузки  $S_n = 630$  кВ·А. Мощность, регулируемая в разработанной модели ТВДУ при изменении угла сдвига основной гармоники выходного напряжения относительно входного в интервале  $\pm 5^\circ$  и регулировании выходного напряжения в диапазоне  $\pm 14\%$ , составляет  $\sim 20\%$  от мощности нагрузки. В блоки параметров элементов модели ТВДУ вводятся паспортные значения его силовых элементов (трансформаторов, тиристоров и др.) для моделирования работы устройства в реальных условиях.

На рис.3 представлена структурная схема имитационной модели участка электрической сети с ТВДУ.

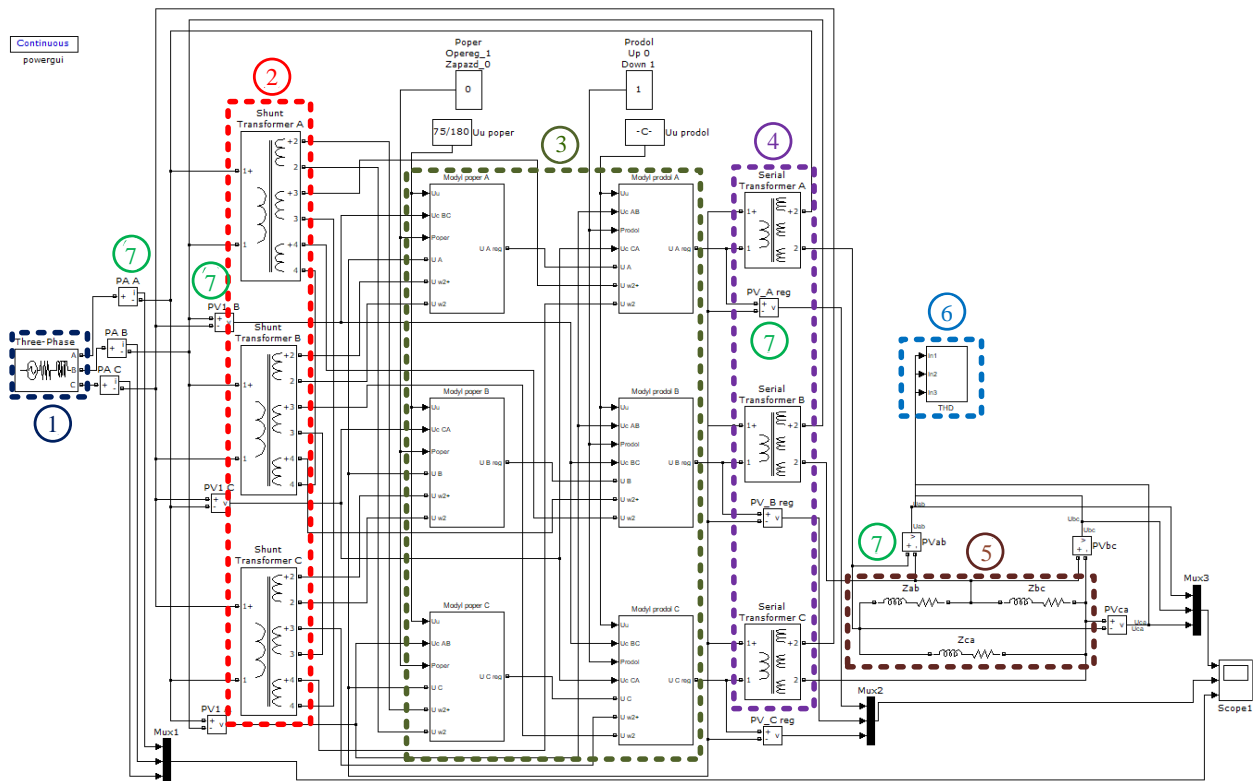


Рис.3. Имитационная модель участка электрической сети с ТВДУ

- 1 – блок трехфазного источника питания ( $U = 6$  кВ;  $f = 50$  Гц;  $R = 0,231$  Ом;  $L = 0,00368$  Гн);
- 2 – блок шунтового трансформатора ( $S = 106$  кВ·А); 3 – модуль тиристорных коммутаторов;
- 4 – блок серийных трансформаторов ( $S = 3 \times 28$  кВ·А); 5 – блок электрической нагрузки ( $U = 6$  кВ;  $S = 630$  кВ·А);
- 6 – блок измерения высших гармоник (преобразование Фурье); 7 – измерительные приборы



В состав имитационной модели входят семь основных блоков: источник питания (трехфазный источник напряжения); три однофазных шунтовых трансформатора; три однофазных модуля продольного регулирования ТВДУ; три однофазных сериесных трансформатора; трехфазная электрическая нагрузка; измерительные приборы (осциллограф, амперметры и вольтметры); трехфазный измерительный блок параметров линейных напряжений на выходе ТВДУ.

На выходе ТВДУ формируются напряжения, которые совпадают или находятся в противофазе с соответствующими фазными напряжениями. Режим 1 реализуется при совпадении указанных напряжений, а режим 3 – если указанные напряжения находятся в противофазе. Для визуального контроля входных токов, выходных напряжений и ЭДС, вносимых ТВДУ в электрическую сеть, используется трехканальный осциллограф. С помощью имитационной модели построены регулировочные характеристики (действующие значения напряжения) ТВДУ в режимах 1 и 3 для различных углов нагрузки.

### Обсуждение результатов

Проведенное исследование регулировочных характеристик ТВДУ, полученных на основе математического и компьютерного моделирования при различных режимах работы устройства и параметрах нагрузки, позволило сформировать для системы управления законы регулирования ТВДУ при его интеграции в электрическую сеть. Примеры регулировочных характеристик ТВДУ в режиме 1 в составе электрической сети, полученной при математическом и имитационном моделировании, приведены на рис.4.

Анализ графиков, полученных при имитационном моделировании, показал, что в режиме повышения напряжения добавка напряжения составляет 551 В (9,4 %). В режиме понижения выходного напряжения амплитуда действующего значения выходного напряжения снижается на 590 В (т.е. на 10 %). В обоих режимах влияние на характер изменения регулировочных характеристик ТВДУ оказывает угол нагрузки.

Эффективное изменение углов регулирования тиристоров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  для изменения (рис.4) напряжения нагрузки находится в следующих диапазонах:

$$\varphi_n \leq \alpha_1 < 180^\circ;$$

$$0^\circ < \alpha_2 \leq \varphi_n.$$

Сравнение регулировочных характеристик ТВДУ, полученных с помощью математического и компьютерного моделирования, показало совпадение их характера и формы (рис.5). Зависимости, полученные на имитационной модели, располагаются ниже, чем при математическом моделировании. Это объясняется учетом падения напряжения в линии питающей сети и на силовых элементах ТВДУ, а также учетом коммутационных интервалов, на которых добавленное напряжение равно нулю. Наибольшее отклонение характеристик  $\delta$  наблюдается для режима 1 при  $\varphi = 60^\circ$  и составляет 3,5 %.

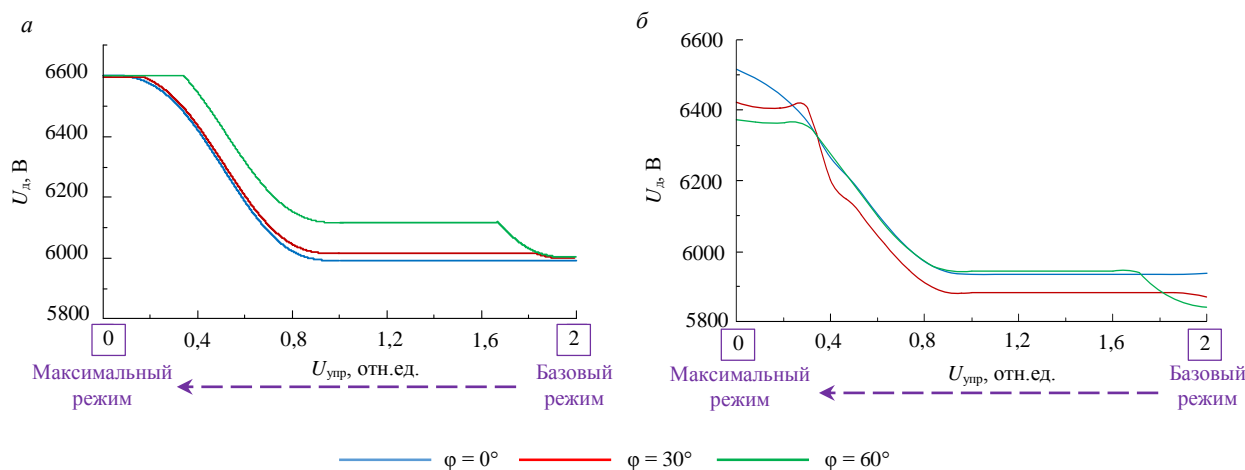


Рис.4. Регулировочные характеристики ТВДУ в режиме 1 в составе электрической сети, полученной при математическом (а) и компьютерном моделировании (б)

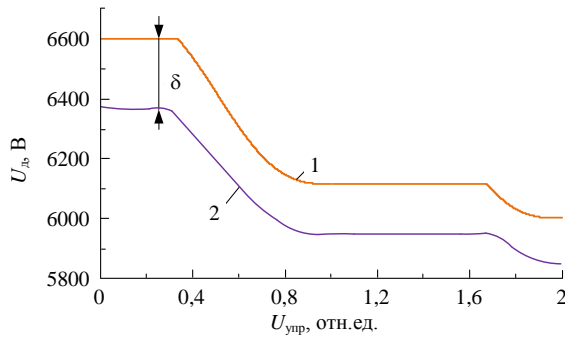


Рис.5. Регулировочные характеристики для режима повышения напряжения при  $\varphi = 60^\circ$ :  
1 – математическое моделирование;  
2 – имитационное моделирование

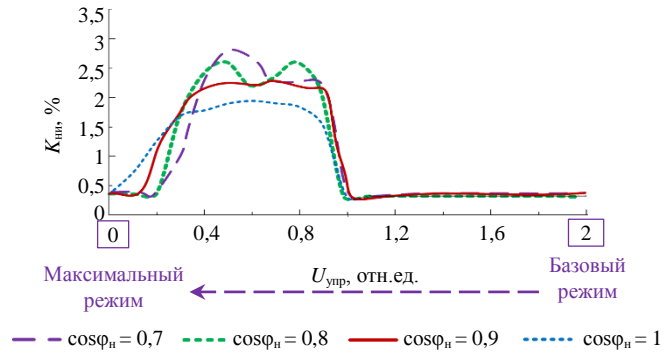


Рис.6. График зависимости коэффициента нелинейных искажений выходного напряжения ТВДУ

При импульсно-фазовом способе управления тиристорами ТВДУ в электрическую сеть генерируются нечетные гармоники, значения которых не превышают допустимых пределов. Имитационное моделирование позволило получить графики изменения коэффициента нелинейных искажений  $K_{нн}$  выходного напряжения ТВДУ в режимах 1 и 3. Пример графика изменения  $K_{нн}$  выходного напряжения ТВДУ в режиме 1 при различных коэффициентах мощности нагрузки ( $\cos\varphi_n$ ) показан на рис.6.

Из рис.6 можно увидеть, что коэффициент нелинейных искажений  $K_{нн}$  выходного напряжения ТВДУ обратно пропорционально зависит от коэффициента мощности нагрузки, т.е. со снижением  $\cos\varphi_n$   $K_{нн}$  повышается. При активной нагрузке ( $\cos\varphi_n = 1$ )  $K_{нн}$  принимает наименьшее значение.

### Заключение

В результате проведенных исследований получены законы регулирования ТВДУ, позволяющие снижать колебания напряжения внесением в электрическую сеть вольтдобавки. Законы регулирования представляют зависимости действующего значения выходного напряжения ТВДУ от фазового угла нагрузки  $\varphi_n$ , глубины регулирования ступени напряжения  $k_{ст}$ , углов регулирования  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . В зависимости от размаха колебания напряжения автоматически выбирается необходимая степень регулирования  $U_{упр}$ .

Выражения законов регулирования ТВДУ позволили получить регулировочные характеристики ТВДУ. Пределы регулирования действующего значения выходного напряжения в зависимости от напряжения управления составили  $\pm 10\%$ . Импульсно-фазовый способ управления тиристорами ТВДУ обеспечивает плавное изменение выходного напряжения. В то же время коэффициент гармонических искажений синусоидального напряжения во всем диапазоне зон эффективного регулирования входит в область допустимых значений, установленных ГОСТ 32144-2013.

Внедрение ТВДУ в электрическую сеть горно-рудных предприятий позволит повысить надежность электроснабжения и увеличить пропускную способность ЛЭП.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Д.В. Роль горной промышленности в экономике страны // Московский экономический журнал. 2020. № 12. С. 175-185. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10870
2. Назарычев А.Н., Устинов Д.А., Пеленев Д.Н., Бабырь К.В. Исследование защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на измерении тока обратной последовательности // Электричество. 2024. № 2. С. 31-41. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-2-31-41
3. Скамыин А.Н., Добуш В.С., Жопри М.Х. Определение сопротивления электрической сети при расчете режимов с искажениями в напряжениях // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 443-454. DOI: 10.31897/PMI.2023.25
4. Abdallah W.J., Hashmi K., Faiz M.T. et al. A Novel Control Method for Active Power Sharing in Renewable-Energy-Based Micro Distribution Networks // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 2. № 1579. DOI: 10.3390/su15021579
5. Yaghoobi J., Abdullah A., Kumar D. et al. Power Quality Issues of Distorted and Weak Distribution Networks in Mining Industry: A Review // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 162500-162518. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2950911
6. Chun-Hsi Su, Yian-Ting Chen. A Remote-Controllable Variable Frequency Drive // Sixth International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), 30 June – 3 July 2023, Taichung, Taiwan. IEEE, 2023. P. 292-294. DOI: 10.1109/IS3C57901.2023.00084



7. Токарев И.С. Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности // Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 171-180.
8. *Sinvula R., Abo-Al-Ez K.M., Kahn M.T.* Harmonic Source Detection for an Industrial Mining Network with Hybrid Wind and Solar Energy Systems // Control and Operation of Grid-Connected Wind Energy Systems. Cham: Springer, 2021. P. 153-192. DOI: [10.1007/978-3-030-64336-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64336-2_7)
9. Ле Ван Тунг. Структура и алгоритмы управления электроприводом конвейеров для повышения энергоэффективности их работы на горнодобывающих предприятиях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. 20 с.
10. Волотковская Н.С., Семенов А.С., Федоров О.В. Энергоэффективность и энергосбережение в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О.Сухого. 2019. № 3. С. 52-62.
11. *Morán L., Espinoza J., Burgos R.* Voltage regulation in mine power distribution systems: Problems and solutions // IEEE Industry Application Society Annual Meeting, 5-9 October 2014, Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2014. 7 p. DOI: [10.1109/IAS.2014.6978453](https://doi.org/10.1109/IAS.2014.6978453)
12. *Sukanth T., Jayanthu S., Jayalaxmi A.* Mitigation of power quality problem in underground mine using different control strategies // IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), 21-23 December 2016, Agra, India. IEEE, 2016. 4 p. DOI: [10.1109/R10-HTC.2016.7906798](https://doi.org/10.1109/R10-HTC.2016.7906798)
13. *Serebryannikov S.V., Serebryannikov S.S., Kovalchuk V.G. et al.* Electromagnetic Parameters of the Ferrite Materials for Electromagnetic Compatibility // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 26-30 June 2023, Divnomorskoe, Russia. IEEE, 2023. P. 316-319. DOI: [10.1109/RSEMW58451.2023.10201985](https://doi.org/10.1109/RSEMW58451.2023.10201985)
14. *Negi P., Pal Y., Leena G.* A Review of Various Topologies and Control Schemes of DSTATCOM Implemented on Distribution Systems // Majlesi Journal of Electrical Engineering. 2017. Vol. 11. № 1. P. 25-35.
15. *Salkuti S.R.* An efficient allocation of D-STATCOM and DG with network reconfiguration in distribution networks // International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. 2022. Vol. 9. Iss. 88. P. 299-309. DOI: [10.19101/IJATEE.2021.874812](https://doi.org/10.19101/IJATEE.2021.874812)
16. *Xuefeng Wang, Li Peng.* Dynamic Voltage Equalization Control of D-STATCOM Under Unbalanced Grid Faults in a Low-Voltage Network // IEEE Transactions on Power Electronics. 2023. Vol. 38. Iss. 2. P. 2384-2397. DOI: [10.1109/TPEL.2022.3213405](https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3213405)
17. *Dash S.K., Mishra S., Abdelaziz A.Y.* A Critical Analysis of Modeling Aspects of D-STATCOMs for Optimal Reactive Power Compensation in Power Distribution Networks // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 19. № 6908. DOI: [10.3390/en15196908](https://doi.org/10.3390/en15196908)
18. Малафеев С.И., Серебренников Н.А. Повышение энергетической эффективности карьерных экскаваторов на основе модернизации электрооборудования и систем управления // Уголь. 2018. № 10. С. 30-35. DOI: [10.18796/0041-5790-2018-10-30-34](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-10-30-34)
19. *Mohite S., Jape V.S., Bankar D.S.* Power Quality Problems Mitigation by DVR Using SC Structured Cascaded MPAC // Proceedings of the 1st International Conference on Data Science, Machine Learning and Applications. Springer, 2019. Vol. 601. P. 796-804. DOI: [10.1007/978-981-15-1420-3\\_86](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1420-3_86)
20. *Seershak M., Muhammed Ramees M.K.P.* Power Quality Improvement Using ZSI-DVR // International Conference on Futuristic Technologies in Control Systems & Renewable Energy (ICFCR), 21-22 July 2022, Malappuram, India. IEEE, 2022. 6 p. DOI: [10.1109/ICFCR54831.2022.9893660](https://doi.org/10.1109/ICFCR54831.2022.9893660)
21. *Jape V.S., Kulkarni H.H., Lokhande N.M., Ubale D.* Observations and Analysis of Power Quality Indices Using Custom Power Devices in Power Distribution Network // Information and Communication Technology for Competitive Strategies (ICTCS 2021), 17-18 December 2021, Rajasthan, India. Springer, 2021. Vol. 401. P. 121-130. DOI: [10.1007/978-981-19-0098-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0098-3_13)
22. *Amarendra A., Srinivas L.R., Rao R.S.* Contingency Analysis in Power System- Using UPFC and DVR Devices with RDOA // Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy. 2022. Vol. 7. Iss. 1. № 17. DOI: [10.1007/s40866-022-00129-y](https://doi.org/10.1007/s40866-022-00129-y)
23. *Kandil T., Ahmed M.A.* Control and Operation of Dynamic Voltage Restorer With Online Regulated DC-Link Capacitor in Microgrid System // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2020. Vol. 43. Iss. 4. P. 331-341. DOI: [10.1109/CJECE.2020.3002855](https://doi.org/10.1109/CJECE.2020.3002855)
24. Бахтеев К.Р. Повышение эффективности функционирования систем централизованного и автономного электроснабжения путем комплексного применения электрохимических накопителей энергии, малой генерации и форсировки возбуждения синхронных машин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. 24 с.
25. *Yerbayev Y., Artyukhov I., Zemtsov A. et al.* Negative Impact Mitigation on the Power Supply System of a Fans Group with Frequency-Variable Drive // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 23. № 8858. DOI: [10.3390/en15238858](https://doi.org/10.3390/en15238858)
26. *Jahromi M.G., Mirzaeva G., Mitchell S.D., Gay D.* Powering Mobile Mining Machines: DC Versus AC Power // IEEE Industry Applications Magazine. 2016. Vol. 22. Iss. 5. P. 63-72. DOI: [10.1109/MIAS.2015.2459082](https://doi.org/10.1109/MIAS.2015.2459082)
27. Абрамович Б.Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 31-40. DOI: [10.25515/PMI.2018.1.31](https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.31)
28. Табаров Б.Д., Соловьев В.А., Иванов В.И. Двухтрансформаторная подстанция с общим двухподдиапазонным управляемым регулятором напряжения // Электричество. 2024. № 4. С. 74-84. DOI: [10.24160/0013-5380-2024-4-74-84](https://doi.org/10.24160/0013-5380-2024-4-74-84)
29. *Hem P., Heang S., Eam D. et al.* Service Restoration in Distribution Systems with a Load Tap Changer // International Electrical Engineering Congress (iEECON), 9-11 March 2022, Khon Kaen, Thailand. IEEE, 2022. 4 p. DOI: [10.1109/IEECON53204.2022.9741590](https://doi.org/10.1109/IEECON53204.2022.9741590)
30. *Dyussebekova N., Schütt R., Leiße I., Ralfs B.* Decision Process for Identifying Appropriate Devices for Power Transfer between Voltage Levels in Distribution Grids // Energies. 2024. Vol. 17. Iss. 9. № 2158. DOI: [10.3390/en17092158](https://doi.org/10.3390/en17092158)
31. Патент № 2813363 РФ. Тиристорное вольтодобавочное устройство продольного регулирования напряжения / А.А.Асабин, Е.Н.Соснина, А.А.Кралин, Е.В.Крюков, Р.Ш.Бедретдинов, Д.А.Гусев. Оpubл. 12.02.2024. Бюл. № 5.
32. Патент № 2450420 РФ. Полупроводниковое фазоповоротное устройство / В.П.Жмуров, В.Н.Стедьмаков, А.Н.Тарасов, А.Л.Тимошенко, И.И.Казеннова. Оpubл. 10.05.2012. Бюл. № 13.
33. Патент № 157116 РФ. Полупроводниковое фазоповоротное устройство / Р.Ш.Бедретдинов, С.Я.Верховский, Е.Н.Соснина, Д.А.Кисель, А.А.Асабин, А.И.Гардин. Оpubл. 20.11.2015. Бюл. № 32.



34. Asabin A., Sosnina E., Belyanin I. et al. Control System of the Thyristor Voltage Regulator // 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 29 June – 2 July 2020, Prague, Czech Republic. IEEE, 2020. P. 802-806. DOI: [10.1109/CoDIT49905.2020.9263984](https://doi.org/10.1109/CoDIT49905.2020.9263984)

35. Крюков Е.В. Применение тиристорных вольтодобавочных устройств для повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, 2018. 18 с.

36. Белов Г.А., Малинин Г.В. Векторно-матричный метод расчета переходных процессов в резонансном преобразователе постоянного напряжения типа LCL-T // Практическая силовая электроника. 2020. № 1 (77). С. 28-37.

37. Умаров Ш.Б. Сравнительный анализ двух способов моделирования вентильных преобразовательных устройств // Universum: технические науки. 2023. № 11 (116). Ч. 6. С. 13-18. DOI: [10.32743/UniTech.2023.116.11.16253](https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.116.11.16253)

**Авторы:** Елена Николаевна Соснина, д-р техн. наук, профессор, [sosnyna@yandex.ru](mailto:sosnyna@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6207-9103> (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия), Анатолий Александрович Асабин, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0009-0000-1505-5918> (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия), Рустам Шамилович Бедретдинов, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-0767-1096> (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия), Евгений Валерьевич Крюков, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-9145-2453> (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия), Даниил Александрович Гусев, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2183-6582> (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности

**И.С.Токарев**

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

**Как цитировать эту статью:** Токарев И.С. Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16516. С. 171-180. [EDN UIZSOQ](#)

### Аннотация

Рассматривается вопрос определения основных параметров систем накопления электроэнергии – мощности и энергоемкости, определение которых является принципиально важной задачей при внедрении подобных устройств в системы электроснабжения предприятий как по техническим (технологическим), так и по экономическим причинам. В работе анализируются задачи, решение которых возможно путем установки систем накопления электроэнергии на объектах газовой промышленности. Сформирована отраслевая методика расчета параметров системы накопления электроэнергии на базе традиционной методики и методики, направленной на минимизацию нормированной стоимости электроэнергии с адаптацией к условиям газовой отрасли. Отличительной чертой представленной методики является возможность определения мощности и энергоемкости систем накопления электроэнергии при выполнении нескольких функций. Методика апробирована на типовом объекте газовой промышленности – компрессорной станции «Ярынская» ООО «Газпром трансгаз Ухта», характерной чертой которого является автономная система электроснабжения. Приводится пример расчета нормированной стоимости накопления электроэнергии с помощью усовершенствованного показателя LCOS, учитывающего влияние изменения коэффициента заполнения графика электрических нагрузок на величину потребления газа электростанцией собственных нужд. Для подтверждения экономической эффективности внедрения систем накопления электроэнергии, рассчитанной по приведенной методике, представлены вычисления интегрального эффекта, чистого дисконтированного дохода и индекса эффективности.

### Ключевые слова

система накопления электроэнергии; автономная система электроснабжения; регулирование электрической нагрузки; замещение горячего резерва; нормированная стоимость электроэнергии; газовая отрасль

Поступила: 12.06.2024

Принята: 18.07.2024

Онлайн: 26.07.2024

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Одной из основных проблем энергообеспечения автономных объектов и технологических комплексов в газовой промышленности является недостаточный уровень технико-экономической эффективности систем автономного электроснабжения [1], связанный с необходимостью одновременного обеспечения надежности и бесперебойности электроснабжения, устойчивости и экономичности работы источников электрической энергии, особенно в случаях создания систем для электроснабжения далеко разнесенных друг от друга потребителей или потребителей, имеющих резкопеременный график электрических нагрузок (в соответствии с Концепцией развития энергоснабжения производственных объектов ПАО «Газпром» на период до 2030 г.).

Решением указанной проблемы может являться применение системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Развитие технологий накопления электроэнергии позволяет всерьез рассматривать данные устройства в качестве основного элемента систем электроснабжения [2-4]. Отличительной чертой систем накопления электроэнергии, стимулирующей их повсеместное внедрение, является возможность выполнения одним устройством нескольких функций [5]. Даже без учета функциональных особенностей СНЭЭ при интеграции возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) [6-8] применение данных устройств в централизованных и автономных системах позволяет следующее:

- уменьшить плату за установленную мощность за счет покрытия пиков нагрузки средствами СНЭЭ;



- уменьшить капитальные вложения в создание и эксплуатационные затраты для электростанций собственных нужд за счет уменьшения количества работающих агрегатов и покрытия пиковой нагрузки средствами СНЭЭ;
- повысить бесперебойность электроснабжения и качество электроэнергии;
- снизить затраты на обеспечение требуемого уровня категорийности путем исключения нагруженного (вращающегося) резерва по электроагрегатам и его замены средствами СНЭЭ;
- снизить негативное влияние резкопеременной нагрузки на приводные двигатели электростанций за счет покрытия переменной части нагрузки средствами СНЭЭ.

При рассмотрении СНЭЭ в качестве основного элемента системы электроснабжения необходимо рассчитать ее физические параметры: номинальную энергоемкость, номинальную мощность, предельное количество полных циклов заряд/разряд, характеристику зависимости предельного числа циклов заряд/разряд от их глубины, КПД, постоянную саморазряда, удельную энергоемкость и др. При этом, учитывая широкий функционал систем накопления электроэнергии, определение ее параметров становится трудоемким, поскольку сводится к многокритериальной оптимизации, когда приходится одновременно рассматривать набор из нескольких несоизмеримых, противоречивых целевых функций [9-11].

Несмотря на активные работы по определению критериев, оказывающих наибольшее влияние на выбор параметров СНЭЭ, в настоящее время не существует единой установленной методики расчета основных параметров СНЭЭ – мощности и энергоемкости. Так, в работах [12-14] методики разработаны, исходя из особенностей функционирования систем электроснабжения с ВИЭ; в статье [15] методика направлена на расчет параметров СНЭЭ для применения в микросетях. В источнике [16] в основе методики лежат эмпирические выражения, направленные на определение энергоемкости накопителя электроэнергии для рекуперации энергии тягового подвижного состава. В статье [17] описывается методика расчета оптимальных параметров СНЭЭ, исходя из доступной мощности технологического присоединения, и дополняется критерием поддержания определенного напряжения в наиболее загруженном узле сети. В источнике [18] параметры систем накопления электроэнергии предлагается рассчитывать с использованием линейной фильтрации, которая заключается в анализе гармонического состава нагрузочных диаграмм генерирующих агрегатов и определении тех гармоник, что подлежат подавлению. В статье [19] приводится альтернативная методика выбора параметров СНЭЭ по условиям ограничения глубины провалов напряжения.

Применение указанных методик для решения задач в газовой отрасли весьма затруднительно, поскольку они либо ориентированы на другую отрасль и практически не подлежат адаптации, либо нацелены на решение только одной задачи, что, в свою очередь, сказывается на окончательном эффекте от внедрения СНЭЭ. Поэтому целью данного исследования является обобщение и формирование универсальной методики определения основных параметров СНЭЭ для объектов газовой отрасли с автономной системой электроснабжения [20-22].

## Методы

Для формирования методики определения параметров СНЭЭ сформулированы перспективные задачи для автономных систем электроснабжения газовой отрасли – замещение вращающегося резерва электростанции собственных нужд и обеспечение стабильной работы или изменение установленной мощности генерирующих агрегатов за счет выравнивания графиков электрических нагрузок.

Применение систем накопления электроэнергии позволит сократить расходы на поддержание агрегата в работающем состоянии, что в свою очередь сократит расход топлива и увеличит межсервисный интервал. Также предполагается обеспечение более равномерной загрузки электроагрегатов с накапливанием энергии в часы наименьшего потребления и отдачей энергии в часы наибольшего потребления. При необходимости возможно уменьшение мощности технологического присоединения к внешней энергосистеме за счет снижения потребления от нее в пиковые часы [23, 24].

С учетом выявленных задач и анализа уже разработанных методик расчета параметров СНЭЭ наиболее подходящими являются традиционная (классическая) методика [25] и методика, направленная на минимизацию нормированной стоимости электроэнергии [26]. Однако они требуют дополнительной адаптации к особенностям газовой отрасли.

Традиционная методика расчета отличается простотой, но не учитывает экономическую составляющую внедрения подобных систем, в расчетах фигурируют только технические и технологические аспекты. Согласно адаптированной традиционной методике, мощность СНЭЭ определяется из нескольких составляющих:



• Мощность, требуемая для покрытия мощности генерации при аварийном отключении одного из генераторов, которая рассчитывается путем определения мощности замещающего агрегата вращающегося резерва, равной произведению установленной мощности генерирующего агрегата на коэффициент загрузки (без учета дерейтинга):

$$P_{\text{СНЭЭ}} = P_{\text{агр}} k_{\text{заг}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{агр}}$  – расчетная мощность заменяемого агрегата, кВт;  $k_{\text{заг}}$  – коэффициент загрузки агрегата, отн. ед.

Коэффициент загрузки агрегата зависит от количества работающих агрегатов и определяется внутренними нормативными документами, например СТО Газпром 2-6.2-208-2008, СТО Газпром 2-6.2-1028-2015.

• Мощность, требуемая для равномерной загрузки электроагрегатов. Необходимость ограничения потребляемой нагрузкой мощности имеет технические и организационные условия, связанные с количеством работающих электроагрегатов.

На рис.1, а в качестве примера представлен график нагрузки. Пусть требуется, чтобы мощность для питания нагрузки, получаемая от электроагрегатов, не превышала предельного значения  $P_{\text{пред}}$ , определяемого количеством работающих установок. Красным цветом обозначена область, в которой нагрузка превышает предельную мощность. Обеспечить устранение этого небаланса и призвана СНЭЭ.

На рис.1, б приведен тот же график нагрузки с установленной СНЭЭ. При превышении мощностью нагрузки предельной мощности система накопления энергии переходит в режим выдачи электроэнергии (разряда) и обеспечивает устранение небаланса. В этом случае расчетная мощность СНЭЭ должна соответствовать следующему неравенству:

$$P_{\text{СНЭЭ}} \geq P_{\text{max наг}} - P_{\text{пред}},$$

где  $P_{\text{max наг}}$  – максимальная мощность нагрузки, кВт.

Потребление электроэнергии СНЭЭ (заряд) происходит в периоды, когда мощность нагрузки не превышает предельной – на рис.1, б такие области показаны зеленым цветом. В данном случае суммарная площадь зон заряда должна быть больше площади зон разряда в  $\eta^2$  раз для обеспечения баланса энергии на заданном промежутке времени ( $\eta$  – эквивалентный КПД элементов СНЭЭ – согласующего трансформатора, фильтра и инвертора, согласно ГОСТ Р 58092.2.1-2020, ГОСТ Р 58092.3.1-2020).

Также для более точного определения расчетной мощности СНЭЭ необходимо учесть коэффициент запаса, установленный требованиями объекта:

$$P_{\text{СНЭЭ}} \geq |P_{\text{max наг}} - P_{\text{пред}}| k_{\text{зап}}, \quad (2)$$

где  $k_{\text{зап}}$  – коэффициент запаса, отн. ед. (определяется нормативными документами); если требований по наличию запаса нет, то  $k_{\text{зап}} = 1$ .

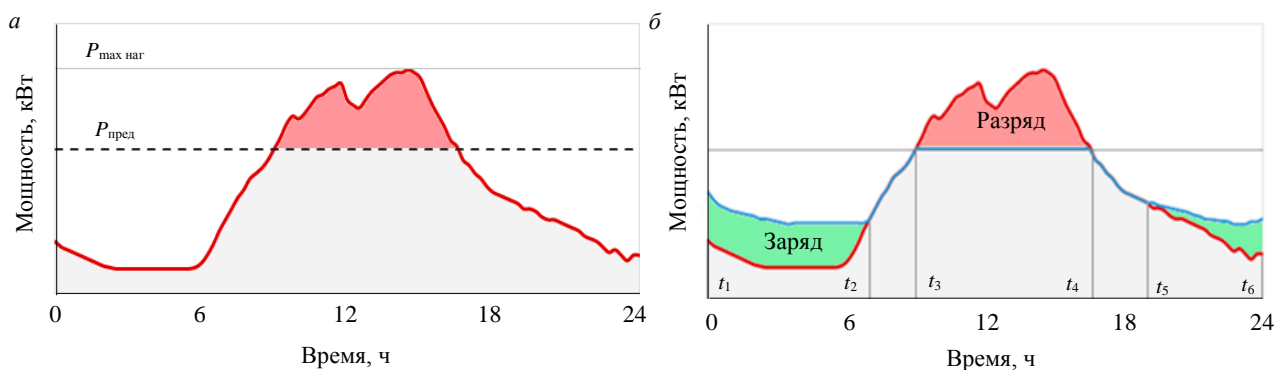


Рис.1. Суточный график электрической нагрузки (а) и график нагрузки с работающей СНЭЭ (б)



Расчет энергоемкости СНЭЭ с помощью адаптированной традиционной методики, состоящей из нескольких этапов, необходимо начать с расчета энергоемкости, требуемой для запуска в работу резервного агрегата (время до запуска составляет 15 мин – максимальное возможное время):

$$E_{\text{СНЭЭ}} = \frac{1}{k_{\text{зап}}} \frac{1}{\eta} \int_0^{15} P_{\text{арп}}(t) dt. \quad (3)$$

Определение энергоемкости, требуемой для ограничения загрузки электроагрегатов, необходимо разделить на следующие подзадачи, решаемые последовательно:

- определение обменной энергоемкости – количества энергии, которым СНЭЭ обменивается с энергосистемой в процессе управления мощностью при выполнении заявленных функций;
- определение минимальной энергоемкости подсистемы накопления.

Расчет обменной энергии на примере графика (рис.1, б) необходимо начать с вычисления энергии, которую выдает подсистема накопления, численно равная площади красной зоны, поделенной на КПД СНЭЭ:

$$E_{\text{СНЭЭ пр}} = \int_{t_4}^{t_3} (P_{\text{тек}}(t) - P_{\text{треб}}(t)) dt \eta^{-1},$$

где  $P_{\text{тек}}(t)$  – текущая мощность, кВт;  $P_{\text{треб}}(t)$  – требуемая мощность, кВт.

Энергия, которую накапливает подсистема накопления, равна площади зеленой зоны, умноженной на КПД СНЭЭ:

$$E_{\text{СНЭЭ нак}} = \int_{t_1}^{t_2} (P_{\text{треб}}(t) - P_{\text{тек}}(t)) dt \eta + \int_{t_6}^{t_5} (P_{\text{треб}}(t) - P_{\text{тек}}(t)) dt \eta.$$

В рассматриваемом суточном интервале времени СНЭЭ выдает столько же энергии, сколько накапливает ( $E_{\text{СНЭЭ выд}} = E_{\text{СНЭЭ нак}}$ ). Однако возможны различные варианты конфигурации графика нагрузки и, соответственно, графика заряда/разряда СНЭЭ, когда режимы выдачи либо потребления мощности в рассматриваемом периоде чередуются – один режим на непродолжительное время сменяется другим [27, 28]. В таком случае необходимо индивидуально подходить к анализу графика нагрузки и расчету энергоемкости, основываясь на приведенном подходе.

Правила для определения обменной энергоемкости:

- Если для достижения желаемой зависимости  $P(t)$  требуется выдать некоторую  $E_{\text{треб}}$  (определяется интегрированием), подсистема накопления должна быть способна выдать величину  $E_{\text{треб}}/\eta$  (большую величину).

- Если для достижения желаемой зависимости  $P(t)$  требуется потребить некоторую  $E_{\text{треб}}$ , подсистема накопления должна быть способна потребить величину  $E_{\text{треб}}\eta$  (меньшую величину).

Для определения минимальной энергоемкости подсистемы накопления необходимы следующие данные: требуемая обменная энергоемкость подсистемы накопления с учетом потерь на элементах  $E_{\text{обм}}$ ; требуемый срок службы (лет) аккумуляторной батареи или требуемый ресурс по количеству циклов заряда/разряда [29]; параметры применяемых аккумуляторных батарей (зависимость количества доступных циклов от глубины разряда) [30].

На основе указанных данных строится зависимость срока службы в циклах от глубины разряда накопителя электроэнергии. Используя методы интерполяции и экстраполяции и располагая знаниями об ориентировочном количестве циклов заряда/разряда, можно определить предельное значение глубины разряда СНЭЭ (DoD, отн.ед.). После определения расчетной глубины разряда рассчитывается конечная энергоемкость СНЭЭ. Далее полученное значение энергоемкости используется для выбора компоновки подсистемы накопления по формуле

$$E_{\text{СНЭЭ кон}} = \frac{E_{\text{обм}}}{\text{DoD}}. \quad (4)$$

Однако в традиционном методе при расчете параметров СНЭЭ внимание фокусируется лишь на технических аспектах решения поставленной задачи, экономическая составляющая проекта в расчетах никак не фигурирует, что принципиально важно при внедрении подобных систем [31, 32].



Учесть экономическую составляющую позволят применение методики, основанной на минимизации удельной стоимости накопления электроэнергии Levelized Cost of Storage – LCOS [33-35]. Данный показатель является альтернативой показателю нормированной стоимости электроэнергии Levelized Cost of Electricity – LCOE [36] и позволяет сравнивать различные системы накопления энергии и альтернативные решения, например, как это осуществляется при планировании строительства электростанций. Подробный разбор состояния расчета показателя LCOS, а также адаптация данного показателя для задач, решаемых при внедрении СНЭЭ в электротехнических комплексах газовой отрасли, представлен в статье [37].

Отличительной особенностью предлагаемой методики расчета LCOS [37] является возможность учитывать многофункциональность СНЭЭ, что также соответствует цели исследования:

$$LCOS = \frac{\text{Capital} + \sum_{t=1}^T \frac{OM_t(1+i)^t + (Aux_t)(1+e)^t + Am_t}{(1+r)^t} - \Delta S}{\sum_{t=1}^T \frac{k_2 P h n (1+e)^t + MWh_t (1+e)^t}{(1+r)^t}}, \quad (5)$$

где Capital – капитальные затраты, тыс. руб.;  $t$  – номер года эксплуатации;  $T$  – срок эксплуатации;  $OM_t$  – затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание за год, тыс. руб.;  $i$  – темп инфляции, отн. ед.;  $Aux_t$  – стоимость электроэнергии на собственные нужды СНЭЭ за год, тыс. руб.;  $e$  – темп ежегодного изменения стоимости электроэнергии, отн. ед.;  $Am_t$  – ежегодные издержки на амортизацию, тыс. руб.;  $r$  – ставка дисконтирования, отн. ед.;  $P$  – расчетная мощность заменяемого агрегата, кВт;  $k_2$  – коэффициент загрузки агрегата;  $h$  – время запуска резервного агрегата, с;  $n$  – количество аварийных пусков в год;  $MWh_t$  – количество энергии, произведенной СНЭЭ для выравнивания графика нагрузки, МВт·ч;  $\Delta S$  – сокращение затрат на топливо, тыс. руб.

Впервые введен показатель, позволяющий соотнести уровень выравнивания графика электрических нагрузок и изменение потребления топлива генерирующим оборудованием:

$$\Delta S = 0,537 Z_0 MWh_t (\gamma^{-1} - \gamma_v^{-1}), \quad (6)$$

где  $\gamma$  – коэффициент заполнения графика нагрузки (плотность графика нагрузки);  $\gamma_v$  – коэффициент заполнения графика нагрузки после выравнивания (плотность графика нагрузки);  $Z_0$  – суммарные затраты на топливо в год, тыс. руб.

Формула (6) позволяет учесть эффект от замещения вращающегося резерва и выравнивания графика электрических нагрузок, что, в свою очередь, позволяет точнее рассчитать величину LCOS.

Обобщенная методика расчета параметров СНЭЭ на базе адаптированных традиционной методики и методики, основанной на минимизации удельной стоимости накопления электроэнергии, представляет собой следующую последовательность действий:

1. Расчет параметров СНЭЭ для замещения вращающегося резерва по формулам (1), (3).
2. Расчет параметров СНЭЭ для выравнивания графика электрических нагрузок при  $\gamma_v = 1$  по формулам (2), (4).
3. Расчет показателя LCOS по усовершенствованной методике (5).
4. Если показатель LCOS превышает значение, допускающее положительный эффект (согласно концепции развития рынка систем накопления электроэнергии в РФ – 36 руб./кВт·ч), необходимо повторно рассчитать параметры СНЭЭ для выравнивания графика электрических нагрузок при  $\gamma_v < 1$ . Однако величина коэффициента заполнения графика нагрузки после выравнивания должна обеспечивать выполнение условия минимального значения LCOS ( $\min\{LCOS\}$ ).
5. Если показатель LCOS обеспечивает потенциальный положительный экономический эффект, то параметры СНЭЭ, использованные при расчете, можно учитывать для дальнейшего подробного технико-экономического обоснования применения выбранной системы.
6. Если добиться минимального значения LCOS не удастся, необходимо отказаться от ряда выполняемых СНЭЭ функций и повторно рассчитать данный показатель. Если даже в этом случае значение LCOS будет превышать минимально допустимую величину, обеспечивающую достижение положительного экономического эффекта, то от применения данных устройств стоит отказаться.

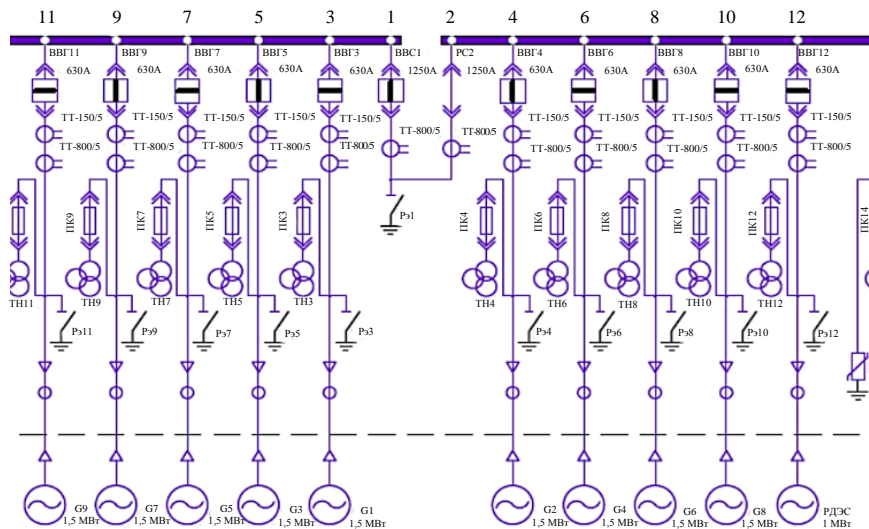


Рис.2. Проектная схема работы электростанции собственных нужд

ВВГ – выключатель высоковольтный; ВВС – выключатель высоковольтный секционный;  
РС – разъединитель секционный; ТТ – трансформатор тока; ПК – высоковольтный предохранитель;  
Рэ – разъединитель; РДЭС – резервная дизельная электростанция;  
ТН – трансформатор напряжения; G – генератор

Для апробации представленной методики параметры СНЭЭ рассчитываются на примере реального объекта газовой отрасли – типовой компрессорной станции «Яринская» ООО «Газпром трансгаз Ухта», элемент проектной схемы которой представлен на рис.2. Компрессорная станция (КС) относится к современным высокотехнологичным объектам транспорта газа, обеспечивает транспортировку газа по северо-западному коридору системы магистральных газопроводов ПАО «Газпром». Основные потребители электроэнергии на КС «Яринская» – аппараты воздушного охлаждения газа и газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом. Энергосистема данной КС полностью автономна, а электроснабжение осуществляется от электростанции собственных нужд на базе девяти газопоршневых электроагрегатов мощностью 1,5 МВт со средней нагрузкой 3-4 МВт. Такая нагрузка предписывает постоянное использование в работе минимум четырех энергоблоков для обеспечения вращающегося резерва, а в случае остановки одного из энергоблоков – распределение нагрузки на оставшиеся агрегаты без остановки технологического процесса.

### Обсуждение результатов

Для подтверждения экономической эффективности внедрения СНЭЭ, рассчитанной по приведенной методике, используется интегральный эффект – чистый дисконтированный доход (ЧДД) и индекс эффективности. За счет внедрения системы накопления электроэнергии предполагается изменить количество постоянно работающих агрегатов с четырех с загрузкой 70 % до трех с загрузкой 90 %, а также добиться дополнительного эффекта от выравнивания графика электрических нагрузок за счет снижения потребления газа.

В результате анализа литературных источников [2, 3, 5] можно сделать вывод, что подсистема накопления электрохимического типа на основе литий-ионных аккумуляторных батарей наиболее перспективна для применения в составе СНЭЭ для решения поставленных в исследовании задач, поскольку позволяет управлять как режимами работы электросетевого оборудования, так и параметрами сети. В таком случае СНЭЭ является не просто локальным буфером электрической энергии, а активным элементом, напрямую влияющим на энергоэффективность электроснабжения.

При использовании СНЭЭ на базе литий-ионных аккумуляторов можно реализовать следующие функции – обеспечение качества электроэнергии, управление электропотреблением, смещение пиков потребления, выравнивание графика нагрузки, холодный резерв – полностью соответствующие задачам данного исследования.

Несмотря на то, что сдерживающим фактором применения накопителей данного типа являлась их дороговизна, ожидается, что к 2030 г. стоимость накопителей данного типа сократится в четыре раза по сравнению с 2018 г.

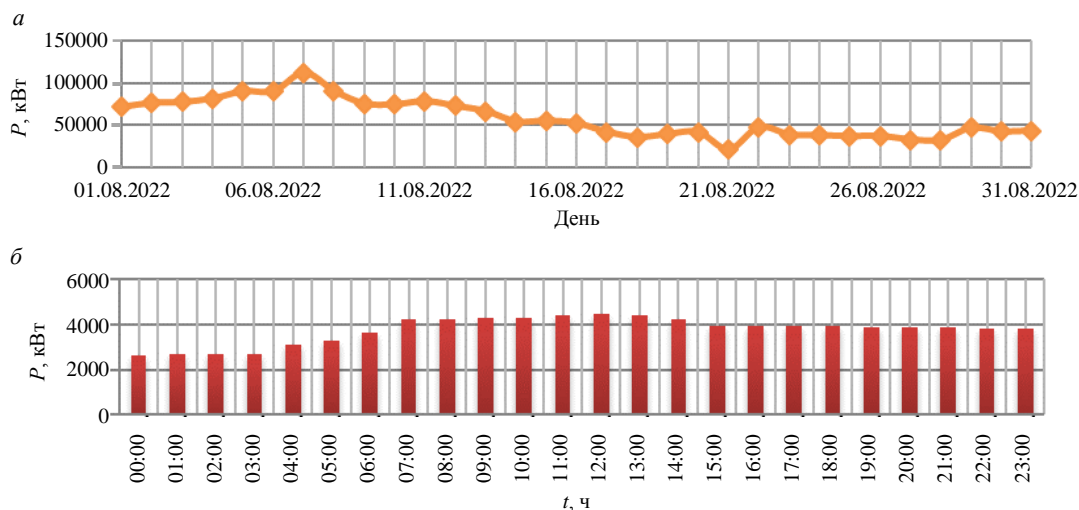


Рис.3. График электрических нагрузок КС «Яринская»: а – наиболее загруженный месяц (август); б – наиболее загруженные сутки (7 августа)

Основные параметры СНЭЭ рассчитываются согласно пунктам 1 и 2 предлагаемой методики. Если расчет мощности и энергоемкости СНЭЭ для замещения вращающегося резерва не вызывает трудностей (мощность агрегата 1,5 МВт; коэффициент загрузки 0,8; время запуска 15 мин), то для расчета параметров для регулирования графика нагрузки требуется подробный анализ электрических нагрузок выбранного объекта.

При анализе электрических нагрузок КС «Яринская» установлено, что наиболее загруженным месяцем является август (рис.3, а), а наиболее загруженным днем – 7 августа (рис.3, б). Период осреднения графика электрических нагрузок определяется, исходя из условий и способа решения поставленной задачи. В рассматриваемом случае и для унификации расчетов период осреднения принимается равным шести постоянным времени нагрева кабельных линий напряжением до 6 кВ и выше, питающим цеховые трансформаторные подстанции и распределительные устройства, что соответствует одному часу. При этом указанный интервал осреднения не противоречит условиям использования СНЭЭ для решения задачи выравнивания графика электрических нагрузок – интервал осреднения графика нагрузок должен быть более длительным, чем время отклика аккумулятора и время разряда минимального уровня заряда аккумулятора, но при этом не должен превышать время разряда текущего уровня заряда аккумулятора. Эти условия обеспечивают наличие энергии, запасенной в аккумуляторе, для выполнения поставленной задачи.

На графике нагрузки (рис.3, б) видно, что в часы дневного максимума потребление электроэнергии превышает 4000 кВт/ч, что приводит к запуску дополнительного генератора и, соответственно, дополнительному расходу ресурсов. Этого можно избежать, перераспределив переизбыток энергии на часы утреннего минимума. Тогда СНЭЭ выдает столько же энергии, сколько накапливает ( $E_{\text{СНЭЭ выд}} = E_{\text{СНЭЭ нар}}$ ), при этом, согласно графику электрических нагрузок, мощность не должна превышать значения 4000 кВт. Мощность и минимально допустимая энергоемкость рассчитывается по формулам (2) и (4), строится график нагрузки после регулирования (рис.4).

Применение СНЭЭ для регулирования графика электрических нагрузок позволяет достигнуть изменения плотности графика с 0,83 до 0,86 при энергоемкости накопителя 800 кВт·ч. Однако

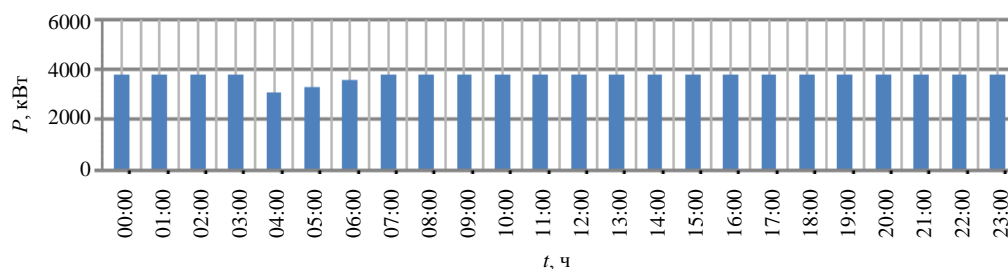


Рис.4. Суточный график нагрузки КС «Яринская» после регулирования с применением СНЭЭ

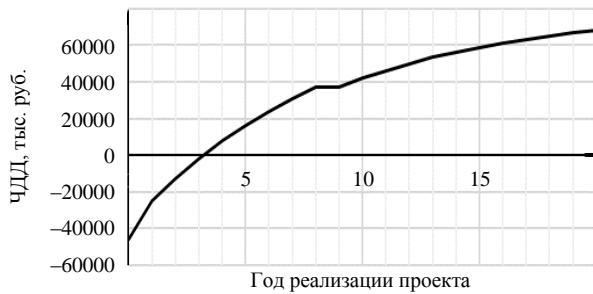


Рис.5. Изменение ЧДД в зависимости от года реализации проекта

обслуживание и ремонт – 796 тыс. руб.; стоимость электроэнергии для вспомогательной подсистемы – 6364,872 тыс. руб.; количество электроэнергии, которую выдала СНЭЭ за расчетный срок эксплуатации – 6714 кВт·ч; расчетная мощность СНЭЭ – 1600 кВт; расчетная энергоемкость СНЭЭ – 2745 кВт·ч; КПД СНЭЭ – 94 %; расчетный срок эксплуатации – 20 лет; ставка дисконтирования – 0,08 отн. ед.; ежегодный коэффициент коррекции стоимости электроэнергии – 0,06 отн. ед.; ежегодная инфляция – 0,077 отн. ед.; сокращение затрат на топливо в год – 23000 тыс. руб. Исходные данные для расчета капитальных затрат, затрат на монтажные работы и стоимость СНЭЭ определены, исходя из опыта эксплуатации подобных систем заводом-изготовителем СНЭЭ.

По формуле (5) рассчитан показатель LCOS – 20,68 руб./кВт·ч, что подтверждает эффективность совмещения нескольких функций для одной СНЭЭ и позволяет прогнозировать положительный экономический эффект от реализации проекта.

В результате расчета показателей интегрального эффекта без учета снижения затрат на капитальный ремонт и показателей амортизационных отчислений и налога на имущество получены следующие значения: ЧДД – 68,207 млн руб.; срок окупаемости по ЧДД – три года; внутренняя норма доходности – 23 %. График изменения ЧДД от года реализации проекта представлен на рис.5.

Внедрение СНЭЭ, рассчитанной по представленной методике, будет экономически эффективно, поскольку величина интегрального эффекта положительна, срок окупаемости по ЧДД составит три года.

### Заключение

Проведенные исследования подтверждают возможность расчета параметров системы электроснабжения – мощности и энергоемкости – с помощью предложенной отраслевой методики, при разработке которой предыдущий опыт исследования вопроса расчета параметров систем накопления электроэнергии обобщался и адаптировался под особенности функционирования автономных систем электроснабжения объектов газовой промышленности.

Отличительной чертой представленной методики является попытка учесть многофункциональность СНЭЭ с технической и экономической точки зрения при внедрении подобных систем.

Выбор в качестве целевой функции минимизации усовершенствованного показателя LCOS предоставляет заинтересованным сторонам следующие возможности:

- отбор наиболее эффективных комбинаций функций СНЭЭ при определении параметров системы, в особенности мощности и энергоемкости;
- комплексный анализ влияния технико-экономических и финансовых изменений на внедрение СНЭЭ в систему электроснабжения предприятия;
- сравнение отечественных и зарубежных технологий, определение конкурентных преимуществ различных технологий накопления электроэнергии.

Показатель LCOS не ограничивает расчет какими-то рамками и может усложняться до бесконечности за счет введения дополнительных коэффициентов и переменных, позволяющих учитывать большее количество факторов и тем самым повышать точность расчета. Также в пользу представленной методики говорит то, что количество задач, связанных с внедрением СНЭЭ, с каждым годом будет увеличиваться, поэтому целесообразно использовать модель расчета LCOS в качестве ключевого критерия определения состава СНЭЭ и выполняемых функций.

Показатель LCOS должен носить отраслевой характер, поскольку в двух одинаковых системах накопления, работающих на разных объектах, с разными технологическими процессами,



характером электрических нагрузок, типом системы электроснабжения, будет принимать разные значения. Расчет компонентов, влияющих на величину LCOS, таких как начальные капиталовложения и, особенно, обменная энергоёмкость системы накопления электроэнергии, всегда должен адаптироваться под особенности систем электроснабжения рассматриваемых объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Baburin S., Turysheva A.V., Kovalchuk M.S. Algorithm for the choice of power supply system rational structure of gas pumping stations // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1753. № 012009. DOI: [10.1088/1742-6596/1753/1/012009](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012009)
2. Ping-Chang Tsai, Jia-Zhang Jhan, Samuel Sin-Shuan Tang, Cheng-Chien Kuo. Estimation of Energy Storage Requirements in an Independent Power System from an Energy Perspective // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Iss. 2. № 814. DOI: [10.3390/app14020814](https://doi.org/10.3390/app14020814)
3. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю. и др. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт // Энергетическая политика. 2020. № 6 (148). С. 76-87. DOI: [10.46920/2409-5516\\_2020\\_6148\\_76](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_6148_76)
4. Токарев И.С., Югай В.Ф., Толмачев В.Н. и др. Применение систем накопления электроэнергии в составе генерирующего оборудования систем электроснабжения производственных объектов ПАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2023. № S3 (853). С. 34-40.
5. Das S.K., Bass O., Kothapalli G. et al. Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 1205-1230. DOI: [10.1016/j.rser.2018.03.068](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.068)
6. Fotopoulou M., Padiaditis P., Skopetou N. et al. A Review of the Energy Storage Systems of Non-Interconnected European Islands // Sustainability. 2024. Vol. 16. Iss. 4. № 1572. DOI: [10.3390/su16041572](https://doi.org/10.3390/su16041572)
7. Alsaman A.S., Alharbi T., Mahfouz A.A. Enhancing the Stability of an Isolated Electric Grid by the Utilization of Energy Storage Systems: A Case Study on the Rafha Grid // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 17. № 13269. DOI: [10.3390/su151713269](https://doi.org/10.3390/su151713269)
8. Mercier P., Cherkaoui R., Oudalov A. Optimizing a Battery Energy Storage System for Frequency Control Application in an Isolated Power System // IEEE Transactions on Power Systems. 2009. Vol. 24. Iss. 3. P. 1469-1477. DOI: [10.1109/TPWRS.2009.2022997](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2022997)
9. Нестеренко Г.Б., Зырянов В.М., Неумта А.С. и др. Методика расчета параметров системы накопления энергии для снижения расходов предприятия на электроэнергию // Электроэнергетика глазами молодежи: Материалы XI Международной научно-технической конференции, 15-17 сентября 2020, Ставрополь, Россия. В 2 т. Т. 2. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. С. 175-178.
10. Senchilo N.D., Ustinov D.A. Method for Determining the Optimal Capacity of Energy Storage Systems with a Long-Term Forecast of Power Consumption // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 21. № 7098. DOI: [10.3390/en14217098](https://doi.org/10.3390/en14217098)
11. Dobush V.S., Belsky A.A., Skamyin A.N. Electrical Complex for Autonomous Power Supply of Oil Leakage Detection Systems in Pipelines // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1441. № 012021. DOI: [10.1088/1742-6596/1441/1/012021](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1441/1/012021)
12. Nian Shi, Yi Luo. Energy Storage System Sizing Based on a Reliability Assessment of Power Systems Integrated with Wind Power // Sustainability. 2017. Vol. 9. Iss. 3. № 395. DOI: [10.3390/su9030395](https://doi.org/10.3390/su9030395)
13. Sioshansi R., Madaeni S.H., Denholm P. A Dynamic Programming Approach to Estimate the Capacity Value of Energy Storage // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 29. Iss. 1. P. 395-403. DOI: [10.1109/TPWRS.2013.2279839](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2279839)
14. Сокольников Т.В., Сулов К.В., Ломбарди П. Определение оптимальных параметров накопителя для интеграции возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах с активными потребителями // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 10 (105). С. 206-211.
15. Fossati J.P., Galarza A., Martín-Villate A., Fontan L. A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids // Renewable Energy. Vol. 77. P. 539-549. DOI: [10.1016/j.renene.2014.12.039](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.039)
16. Степаненко В.П. Определение параметров накопителей энергии комбинированных силовых установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 8. С. 166-174.
17. Гусев Ю.П., Субботин П.В. Разработка усовершенствованной методики выбора параметров и мест размещения систем накопления электроэнергии в распределительных электрических сетях // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19. № 2. С. 48-61. DOI: [10.14529/power190206](https://doi.org/10.14529/power190206)
18. Балувев Д.Ю., Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Пранкевич Г.А. Методика расчета основных параметров накопителя энергии по экспериментальным нагрузочным диаграммам // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 5 (136). С. 105-114. DOI: [10.21285/1814-3520-2018-5-105-114](https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-105-114)
19. Bakhteev K., Fedotov A., Chernova N., Misbakhov R. Methodological approaches to the choice of energy storage and optimization of their parameters to improve the electric power quality in various types of electric power systems // 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2019), 16-18 September 2019, Stara Lesna, Slovakia. Stara Lesna: Technical University of Kosice – Department of Electric Power Engineering, 2019. P. 488-493.
20. Шпенст В.А., Бельский А.А., Орел Е.А. Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 479-492.
21. Абрамович Б.Н., Богданов И.А. Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 408-416. DOI: [10.31897/PMI.2021.3.10](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.10)
22. Belsky A.A., Glukhanich D.Y. Standalone power system with photovoltaic and thermoelectric installations for power supply of remote monitoring and control stations for oil pipelines // Renewable Energy Focus. 2023. Vol. 47. № 100493. DOI: [10.1016/j.ref.2023.100493](https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.100493)
23. Zhukovskiy Y.L., Kovalchuk M.S., Batueva D.E., Senchilo N.D. Development of an Algorithm for Regulating the Load Schedule of Educational Institutions Based on the Forecast of Electric Consumption within the Framework of Application of the Demand Response // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 24. № 13801. DOI: [10.3390/su132413801](https://doi.org/10.3390/su132413801)
24. Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tsvetkov P. Optimizing the Size of Autonomous Hybrid Microgrids with Regard to Load Shifting // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 16. № 5059. DOI: [10.3390/en14165059](https://doi.org/10.3390/en14165059)



25. Бачурин П.А., Гладков Д.С., Зырянов В.М. и др. Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 2 (59). С. 18-24.
26. Dulout J., Jammes B., Alonso C. et al. Optimal sizing of a lithium battery energy storage system for grid-connected photovoltaic systems // 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids, 27-29 June 2017, Nuremberg, Germany. IEEE, 2017. P. 582-587. DOI: [10.1109/ICDCM.2017.8001106](https://doi.org/10.1109/ICDCM.2017.8001106)
27. Bardanov A.I., Vasilkov O.S., Pudkova T.V. Modeling the process of redistributing power consumption using energy storage system with various configurations to align the electrical loads schedule // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1753. № 012013. DOI: [10.1088/1742-6596/1753/1/012013](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012013)
28. Ustinov D.A., Khomiakov K.A. Determination of Dynamic Characteristics for Predicting Electrical Load Curves of Mining Enterprises // Electricity. 2022. Vol. 3. Iss. 2. № 162-181. DOI: [10.3390/electricity3020010](https://doi.org/10.3390/electricity3020010)
29. Бельский А.А., Добуш В.С. Анализ характеристик российских литий-ионных аккумуляторных батарей // Промышленная энергетика. 2019. № 9. С. 25-32.
30. Kuchak S.V., Brovanov S.V. Investigation of Impulse and Continuous Discharge Characteristics of Large-Capacity Lithium-Ion Batteries // Processes. 2022. Vol. 10. Iss. 12. № 2473. DOI: [10.3390/pr10122473](https://doi.org/10.3390/pr10122473)
31. Федотов А.И., Федотов Е.А., Абдуллазянов А.Ф. Использование электрохимических накопителей энергии в системах автономного электроснабжения для снижения расхода топлива энергоустановок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 3-17. DOI: [10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17)
32. Castro M., Alcanzate, Esparcia Jr.E., Ocon J. A Comparative Techno-Economic Analysis of Different Desalination Technologies in Off-Grid Islands // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 9. № 2261. DOI: [10.3390/en13092261](https://doi.org/10.3390/en13092261)
33. Moradi-Shahrbabak Z., Jadidoleslam M. A new index for techno-economical comparison of storage technologies considering effect of self-discharge // IET Renewable Power Generation. 2023. Vol. 17. Iss. 7. P. 1699-1712. DOI: [10.1049/rpg2.12704](https://doi.org/10.1049/rpg2.12704)
34. Castro M.T., Esparcia Jr. E.A., Ocon J.D. A Comparative Future Levelized Cost of Storage of Static Electrochemical and Mechanical Energy Storage Technologies in 1-MW Energy and Power Applications // Chemical Engineering Transactions. 2022. Vol. 94. P. 355-360. DOI: [10.3303/CET2294059](https://doi.org/10.3303/CET2294059)
35. Мельников В.Д., Нестеренко Г.Б., Лебедев Д.Е. и др. Проблемы, перспективы применения и методика расчета нормированной стоимости накопления электрической энергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 4 (44). С. 30-36.
36. Прохоров Д.А., Семенов Е.В. Сравнение показателя LCOE атомных электростанций и тэпозлектростанций на примере энергоблоков ВВЭР-ТОИ и ПГУ-410 // Вестник науки. 2023. Т. 4. № 6 (63). С. 964-970.
37. Токарев И.С., Васильков О.С., Шклярский Я.Э. и др. Выбор параметров системы накопления электроэнергии по критерию усовершенствованного показателя нормированной стоимости для объектов ПАО «Газпром» большой мощности // Научные труды КубГТУ. 2024. № 2. С. 170-184. DOI: [10.26297/2312-9409.2024.2.15](https://doi.org/10.26297/2312-9409.2024.2.15)

*Автор Иван Сергеевич Токарев, канд. техн. наук, старший преподаватель, [i.s.tokarev@gmail.com](mailto:i.s.tokarev@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0003-2172-3830> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия).*

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.*



## Методология управления развитием энергетики производственных объектов газовой отрасли

**А.А.Шаповало**

ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия

**Как цитировать эту статью:** Шаповало А.А. Методология управления развитием энергетики производственных объектов газовой отрасли // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16378. С. 181-190. [EDN XWKKKQ](#)

### Аннотация

Современный этап развития России характеризуется динамичными изменениями условий хозяйствования предприятий газовой отрасли, что приводит, в том числе, к существенной корректировке подходов к развитию энергетики производственных объектов. В статье рассматриваются способы совершенствования энергоснабжения с учетом целей и задач развития производственных объектов, условий решения единой технологической задачи газовой отрасли – качественного газоснабжения потребителей. Оптимальное функционирование систем энергоснабжения с учетом особенностей протекания технологических процессов на производственных объектах предполагает скоординированность моделей развития энергетических комплексов производственных объектов с параметрами предприятий газовой отрасли на основе интегрированного единого информационного пространства на всех этапах их жизненного цикла. Структура энергокомплекса производственного объекта и связи его элементов со смежными системами обосновываются с учетом целей их создания и требований к производственным объектам. Решение задач для каждой составляющей системы и обмен информацией между эквивалентными системами происходит на основе разработанной иерархии задач оптимизации, корректируемых в зависимости от типа задач совершенствования энергоснабжения производственного объекта. Определение параметров и показателей энергетических комплексов, а также оптимизацию перечней и содержания работ по совершенствованию энергоснабжения производственных объектов планируется выполнять в соответствии с рассматриваемой методологией с использованием комплекса математических моделей.

### Ключевые слова

системы энергоснабжения; газовая отрасль; риски; риск-ориентированный подход; системный подход; энергетический комплекс; задачи оптимизации

Поступила: 01.02.2024

Принята: 02.05.2024

Онлайн: 18.06.2024

Опубликована: 25.04.2025

### Введение

Системы энергоснабжения являются неотъемлемой и важной инфраструктурной составляющей, обеспечивающей функционирование производственных объектов газовой отрасли различного назначения, расположенных по всей территории Российской Федерации, включая удаленные районы Арктической зоны.

В газовой отрасли накоплен богатый опыт совершенствования энергоснабжения производственных объектов на базе разработанного общего концептуального подхода к их развитию<sup>1</sup>. На постоянной основе выполняются: анализ функционирования и реализация энергосберегающих мероприятий в системах энергоснабжения; поиск инновационных решений, участие в испытаниях и установка головных образцов современного энергетического оборудования на опытную эксплуатацию на производственных объектах; научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в части актуализации и разработки отраслевых стандартов и типовых решений, позволяющих повысить эффективность энергоснабжения объектов.

Трансформация мировой экономики и энергетики, введение различного рода санкций, существенные изменения в характере поставки продукции, диверсификация производства приводят к динамичным изменениям условий хозяйствования предприятий газовой отрасли нашей страны, изменению характера развития, реконструкции и технического перевооружения (РиТП) производственных объектов [1], делает актуальными целый ряд вопросов, в том числе:

<sup>1</sup> Годовой отчет ПАО «Газпром» за 2022 год. URL: <https://www.gazprom.ru/f/posts/56/691615/gazprom-annual-report-2022-ru.pdf> (дата обращения 31.01.2024).



- оценка с помощью аппарата риск-ориентированного подхода (РОП) влияния на целевые показатели предприятий добычи, транспортировки, подземного хранения и переработки природного газа и жидких углеводородов газовой отрасли темпов и качества выполнения технического обслуживания и ремонта (ТОиР), а также РИТП объектов энергоснабжения;
- использование данных этой оценки для разработки мер по минимизации последствий от применения РОП к управлению в газовой отрасли;
- разработка мер минимизации затрат ресурсов на различных этапах совершенствования энергоснабжения группы производственных объектов и газовой отрасли в целом.

Наибольшая эффективность решения задач развития энергоснабжения производственных объектов достигается при создании оптимально функционирующих с учетом особенностей протекания технологических процессов на производственных объектах энергетических комплексов, интегрированных в единое инфраструктурное и информационное пространство предприятий газовой отрасли. При этом под энергетическим комплексом производственного объекта (ЭК ПрОб) понимается совокупность технических и программных средств общеобъектовых систем энергоснабжения и систем промышленного кондиционирования сооружений с установками внешних сетей электро-, тепло-, водоснабжения и водоотведения, которая за счет реализации комплексного технического решения и алгоритмов оптимального управления, включая использование элементов искусственного интеллекта в управлении, позволяет получить максимальное значение индекса технического состояния ЭК ПрОб в условиях применения РОП в управлении газовой отраслью («индекс технического состояния» – интегральный показатель технического состояния, объединяет значения других показателей технического состояния в единую величину, удобную для сравнения и оценки). Для определения показателя технического состояния объектов электроэнергетики используется величина физического износа, проявляемого в формах механического износа, коррозии и усталости металлов, деформации и разрушения, изменения физико-химических свойств вещества<sup>2</sup>.

Оптимальное решение задач совершенствования энергоснабжения производственных объектов связано с совместным рассмотрением значительного количества вопросов при существенной неопределенности исходной информации и невозможности, в ряде случаев, использования формализованных методов определения отдельных показателей энергетических комплексов. В задачах такого класса обычно используется методология системного анализа [1-3] с применением РОП. В рамках перехода к РОП в управлении развитием в газовой отрасли разработана и утверждена Решением Совета директоров ПАО «Газпром» от 25.12.2018 «Политика управления рисками и внутреннего контроля ПАО «Газпром», которая является основой и для формирования методологии управления развитием энергетики газовой отрасли.

Для получения максимального технико-экономического эффекта в процессе совершенствования энергоснабжения производственных объектов газовой отрасли необходимо решить ряд научно-практических задач с целью разработки методологии управления развитием энергетики:

- Обосновать концепцию развития систем энергоснабжения производственных объектов предприятий в масштабе газовой отрасли с учетом обеспечения целевых показателей при применении РОП к управлению отраслью.
- Разработать в рамках создания системы поддержки принятия решений комплексную (адаптивную) модель определения и прогнозирования технических показателей энергетических комплексов для различных организационно-финансовых сценариев выполнения работ по совершенствованию энергоснабжения производственных объектов.
- Разработать типовые перечни мероприятий по совершенствованию энергоснабжения, позволяющие получить синергетический эффект от оптимизации технических решений и режимов функционирования систем энергоснабжения совместно функционирующих производственных объектов.
- Разработать методики, позволяющие эффективно решать задачи совершенствования энергоснабжения в масштабе производственного объекта, предприятия и отрасли в целом в условиях применения РОП в управлении газовой отраслью.

<sup>2</sup> Постановление Правительства РФ от 30.05.2023 № 878 «О внесении изменений в методику комплексного определения показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202306020055> (дата обращения 31.01.2024).



## Обзор проблемы

В настоящее время в мировой практике существенно активизировалось использование различных методов анализа и теории системного подхода для принятия экономических и технических решений в нефтегазовой сфере. В частности, в работах [4-6] освещаются вопросы, связанные с управлением рисками на энергетических рынках. В работах [7, 8] рассматриваются преимущества и недостатки различных подходов к моделированию и управлению рисками для практического использования, а также инструменты и стратегии для производителей, оптовых потребителей, инвесторов и специализированных участников управления рисками на товарных рынках.

Пути и политические последствия для обеспечения устойчивого развития энергетики показаны в [9, 10], в [11] рассмотрена комплексная методология системного подхода к процессам энергосбережения на промышленном предприятии. Результаты обсуждения частных проблем энергосбережения приведены в [12-14], результативности внедрения мероприятий по повышению энергоэффективности – в работах [15, 16].

В [17] рассмотрена нечеткая многокритериальная структура принятия решений для оценки рисков интегрированной энергетической системы, идентифицированы 16 факторов риска из экономики, технологий, политики, общества и управления, выполнено сравнение предлагаемого метода с другими методами оценки рисков, показаны его преимущества. Особенности применения риск-менеджмента на этапе цифровой трансформации промышленных предприятий проанализированы в [18]. Основные аспекты принятия решений для оценки рисков энергетических компаний приведены в работах [19-21].

Оценка последствий энергетического перехода для деятельности и бизнес-моделей нефтегазовой отрасли рассмотрена в [22], риски при добыче и транспортировке газа – в [23-25]. В статье [24] обосновывается актуальность управления рисками в нефтегазовых компаниях в современных условиях. На основе систематизации видов рисков выделены основные риски в нефтегазовом бизнесе: политические, социально-экономические, экологические и научно-технические риски.

Исследования [26-28] содержат информацию об опыте применения системного подхода к оптимизации производственной инфраструктуры предприятий. В [28] излагаются аргументы в пользу упреждающего управления затратами на приобретение электроэнергии и рассматриваются пять ключевых рычагов, которые способствуют оптимизации энергоснабжения и управления рисками.

Результаты современных исследований применения искусственного интеллекта в нефтегазовой отрасли и его вклад в разработку рекомендаций по повышению устойчивости нефтегазовых проектов представлены в [29]. В работе приведены сведения о наиболее перспективных приложениях и методологиях искусственного интеллекта, которые могут способствовать решению задач по устойчивому развитию нефтегазовой отрасли.

В [30] показана актуальность проведения исследований в области энергоэффективности объектов минерально-сырьевого комплекса вследствие их специфического характера и высокой энергоемкости, в том числе с использованием функции определения эффективности применения энергосберегающих мероприятий на основе определенных индикаторов энергетической эффективности.

Результаты исследований по разработке прогностических моделей на основе ретроспективных данных о плановом потреблении электроэнергии в регионе со значительной долей предприятий минерально-сырьевого комплекса представлены в статье [31]. Получены модели на основе ансамблевых методов машинного обучения (алгоритмов случайного леса, градиентного бустинга XGBoost и CatBoost), а также рекуррентной нейронной сети долгой краткосрочной памяти (LSTM), позволяющие с достаточно высокой точностью создавать краткосрочные прогнозы электропотребления (на период от суток до недели).

Статья [32] посвящена разработке SCADA-компонента для компрессорного цеха магистрального газопровода. Разрабатываемый компонент позволяет отслеживать выбранные оператором характеристики технологического процесса перекачки газа. Разработка выполнена на базе операционной системы Windows и интегрированной среды TRACE MODE (SCADA/HMI).

В работе [33] представлены теоретические основы выявления особенностей использования нейросетей на предприятиях электроэнергетики в условиях цифровой трансформации, а также анализ методов формализации систем искусственного интеллекта для использования их в составе автоматизированных систем.



В [34] приведены результаты анализа особенностей функционирования автономных электро-технических комплексов (ЭТК), по результатам которого разработана математическая модель ЭТК буровой установки с комбинированными источниками резервного питания.

Основные направления развития энергетики и модернизации систем электроснабжения технологических объектов топливно-энергетического комплекса рассмотрены в работах [35-37]. Вопросы совершенствования работы энергохозяйства и пути повышения качества энергоснабжения производственных объектов газовой отрасли изложены в работах [38, 39].

Необходима разработка методологии управления развитием энергетики производственных объектов для повышения эффективности совершенствования энергетики газовой отрасли в условиях применения РОП в управлении отраслью.

### **Методология управления развитием энергетики производственных объектов в газовой отрасли**

*Оптимизация процесса совершенствования энергоснабжения* выполняется на основании анализа целей и задач развития совокупности производственных объектов (предприятий) газовой отрасли, решающих единую технологическую задачу – качественное газоснабжение потребителей – в следующей последовательности:

- Выделение совокупности производственных объектов, в интересах которой предполагается развитие энергоснабжения, проводится на основе анализа состава и функционального назначения производственных объектов (объекты газового промысла, магистрального газопровода, подземного хранения газа, газоперерабатывающий завод, объекты предприятия газовой отрасли в пределах бизнес-процесса и т.п.), влияющих на решение единой технологической задачи.

- Определение границ создаваемого (реконструируемого) ЭК ПрОб выполняется, исходя из обеспечения требований к энергоснабжению со стороны технологического оборудования во всех режимах функционирования группы производственных объектов при обеспечении требуемого уровня качества внешних связей. Под требованиями к энергоснабжению понимается количество и качество энергоресурсов, уровень надежности, безопасности и экономичность функционирования, удобство эксплуатации оборудования ЭК ПрОб. Внешние связи ЭК ПрОб – связи с внешними системами электроснабжения, теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения, с существующими и проектируемыми компонентами системы автоматизации объектов. Качество внешних связей определяется составом технических и программных средств, отвечающих за их функционирование. В зависимости от разработанных требований и особенностей решаемых технологических задач и состава объектов набор функций, реализуемых ЭК ПрОб, их границы могут изменяться.

- Оценка перспектив развития ЭК ПрОб проводится на основании результатов технико-экономического обоснования, в ходе которого оцениваются состояние и технический уровень существующих систем энергоснабжения, эффекты от создания (реконструкции) энергокомплексов для конкретной группы производственных объектов, затраты на их создание и др.

- Формулирование задач оптимизации параметров ЭК ПрОб и разработка соответствующих критериев оптимальности. Оптимизация проводится по комплексному технико-экономическому показателю для минимизации затрат на достижение в ходе развития энергоснабжения заданной величины индекса технического состояния систем энергоснабжения. Процесс оптимизации должен предполагать учет обратного влияния технического уровня при создании и эксплуатации ЭК ПрОб на показатели группы производственных объектов в условиях применения риск-ориентированных принципов управления в газовой отрасли путем определения отдельных составляющих полученного эффекта в темпе технологических процессов и (или) процессов принятия решений с целью подготовки информации для принятия всесторонне обоснованного решения по управлению совершенствованием энергоснабжения.

*Определение структуры энергокомплекса производственного объекта и связи его элементов со смежными системами* выполняется на основании сформулированных целей создания и требований к ЭК ПрОб.

В качестве компонентов структуры энергетических комплексов производственных объектов выделяются общеобъектовые системы электроснабжения (СЭС), теплоснабжения (СТС), водоснабжения (СВС), водоотведения (СВО), вентиляции и кондиционирования воздуха производственных и бытовых зданий (СВиКВ), включая автоматизированные источники, сетевую структуру,



установки обеспечения качества энергоресурса, очистки исходной воды и стоков, а также средства сопряжения с автоматизированными системами производственного объекта и предприятия газовой отрасли.

Разделение ЭК ПрОб на структурные составляющие целесообразно проводить с учетом выполняемых ими групп функций определенного назначения. Состав структурных составляющих и их техническая реализация в зависимости от требований к ЭК ПрОб, технического уровня существующей системы управления и др. может различаться. Пример структуры и связей энергокомплекса производственного объекта с полным составом систем энергоснабжения показан на рис.1.

*Снижение размерности оптимизационной задачи, связанной с развитием энергоснабжения группы производственных объектов.*

С учетом многообразия технических решений существующих и создаваемых объектов энергоснабжения и разного влияния изменения отдельных технических параметров на показатели эффективности энергокомплексов, задача оптимизации процесса управления их развитием становится многомерной и многокритериальной. Снижение размерности оптимизационной задачи возможно путем замены совокупности реальных элементов энергокомплексов и их связей на эквивалентные системы, модели агрегатированных ЭК ПрОб, сохраняющие в себе лишь те свойства реальной системы, которые необходимо определять при решении задач функционирования и оптимизации.

Число уровней иерархии и количество эквивалентных систем для разных сценариев совершенствования энергоснабжения групп производственных объектов зависят от сложности исследуемой реальной группы энергетических комплексов, а также от сценарных условий финансирования процесса совершенствования энергоснабжения.

Агрегаты (в отличие от структурных составляющих отдельных подсистем) могут быть реализованы как в пределах отдельного ЭК ПрОб, так и группы энергетических комплексов совместно функционирующих производственных объектов предприятия газовой отрасли или в масштабе газовой отрасли в целом. Последнее зависит от требований к целям, структуре и функционированию,

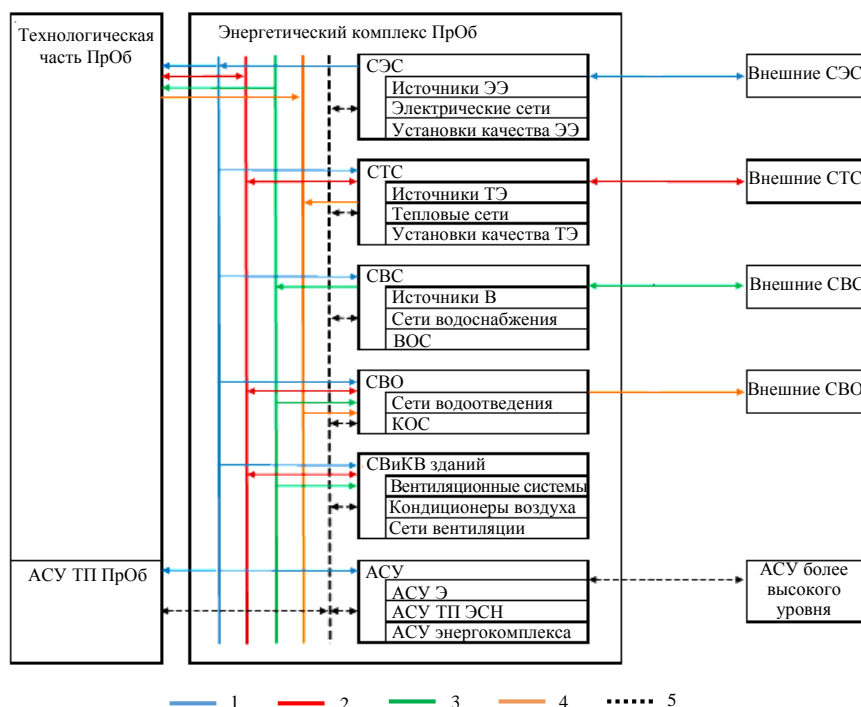


Рис.1. Структура энергетического комплекса производственного объекта с полным составом систем энергоснабжения

1 – электрическая энергия (ЭЭ); 2 – тепловая энергия (ТЭ);  
3 – исходная вода (В); 4 – стоки канализационные (ВО); 5 – информационные потоки;  
АСУ Э – автоматизированная система управления энергоснабжения;  
АСУ ТП ЭСН – АСУ технологическими процессами электростанции собственных нужд



надежности, безопасности, техническому обслуживанию и ремонту компонентов ЭК ПрОб и др. Агрегатирование ЭК ПрОб производится с учетом очередности реализации мероприятий по развитию энергоснабжения.

*Определение состава задач для эквивалентных систем.*

Иерархия задач оптимизации строится на основе иерархии эквивалентных систем. Она создается с целью упорядочения задач оптимизации на каждом из этапов совершенствования энергоснабжения производственных объектов. При этом задачи оптимизации для каждого из этапов различаются по глубине и детальности проработки. С точки зрения иерархии решаемых задач процесс применения ЭК ПрОб разделен на этапы: исследование, создание, эксплуатация (с учетом возможных сочетаний режимов функционирования группы производственных объектов и внешних систем энергоснабжения).

Оптимальное распределение функций между структурными составляющими и возможность их перераспределения в зависимости от этапа реконструкции (создания) и режима функционирования ЭК ПрОб в рамках совершенствования энергоснабжения позволяет создавать безизбыточные группы энергетических комплексов. Это необходимо в случаях совершенствования энергоснабжения в несколько очередей, существенном изменении требований к энергоснабжению, изменении состава работающих источников, сетей производственного объекта и внешних систем энергоснабжения, и может реализовываться, в том числе, средствами интеллектуальных систем автоматизации.

*Определение состава показателей и способов обмена энергетическими ресурсами и информацией между эквивалентными системами.*

Структурные составляющие ЭК ПрОб обмениваются между собой и внешними системами (электроснабжения, автоматизации более высокого уровня и др.), энергетическими ресурсами и информацией, которая может быть условно разделена на исходную, промежуточную, искомую и обратную; на внешнюю и внутреннюю [3].

На этапах жизненного цикла ЭК ПрОб решаются три группы задач:

- задача оптимизации требований к энергоснабжению ПрОб в зависимости от текущего ИТС и достижимого средствами реконструкции ИТС при выделенном объеме финансирования. Решение задачи обеспечивается информацией по обратной связи 1-го уровня (ОС-1) для каждого уровня иерархии задач оптимизации ЭК ПрОб от уровня иерархии 1 (газовая отрасль ОС-1.1) до уровня иерархии 5 (производственный объект ОС-1.5);

- задача оптимизации перечня и состава работ по мероприятиям развития энергоснабжения ПрОб в условиях заданных ограничений финансирования программы по достижению требуемого уровня ИТС (общего и (или) по отдельным составляющим) на этапе создания ЭК ПрОб. Решение задачи обеспечивается информацией по обратной связи 2-го уровня (ОС-2.1 – ОС-2.5);

- задача оптимизации перечня и состава работ по мероприятиям развития энергоснабжения ПрОб в условиях заданных ограничений финансирования программы по достижению требуемого уровня ИТС (общего и (или) по отдельным составляющим) на этапе эксплуатации ЭК ПрОб. Решение задачи обеспечивается информацией по обратной связи 3-го уровня (ОС-3.1 – ОС-3.5).

В условиях существенной неопределенности исходной информации и отсутствия строгой формализации при определении ряда показателей задачи оптимизации в процессе управления развитием энергоснабжения производственных объектов газовой отрасли решаются комбинированными методами – сужения Парето-оптимальных исходов и экспертными. Иерархия задач оптимизации на этапах развития энергетических комплексов производственных объектов газовой отрасли приведена на рис.2.

Анализ балансов выработки – потребления энергоресурсов и информации, которой отдельные агрегаты должны обмениваться между собой и внешними системами на различных этапах жизненного цикла ЭК ПрОб, позволит в дальнейшем более обоснованно решать оптимизационную задачу по определению приоритетов в реализации мероприятий по совершенствованию энергоснабжения и по распределению функций между агрегатами и отдельными структурными составляющими энергокомплексов.

Поиск оптимального перечня и состава работ по мероприятиям развития ЭК ПрОб связан с определением текущего значения ИТС ЭК ПрОб для различных уровней иерархии при сочетаниях состава и содержании мероприятий, возможных к реализации за счет выделенных средств на программу достижения требуемого уровня ИТС энергоснабжения.

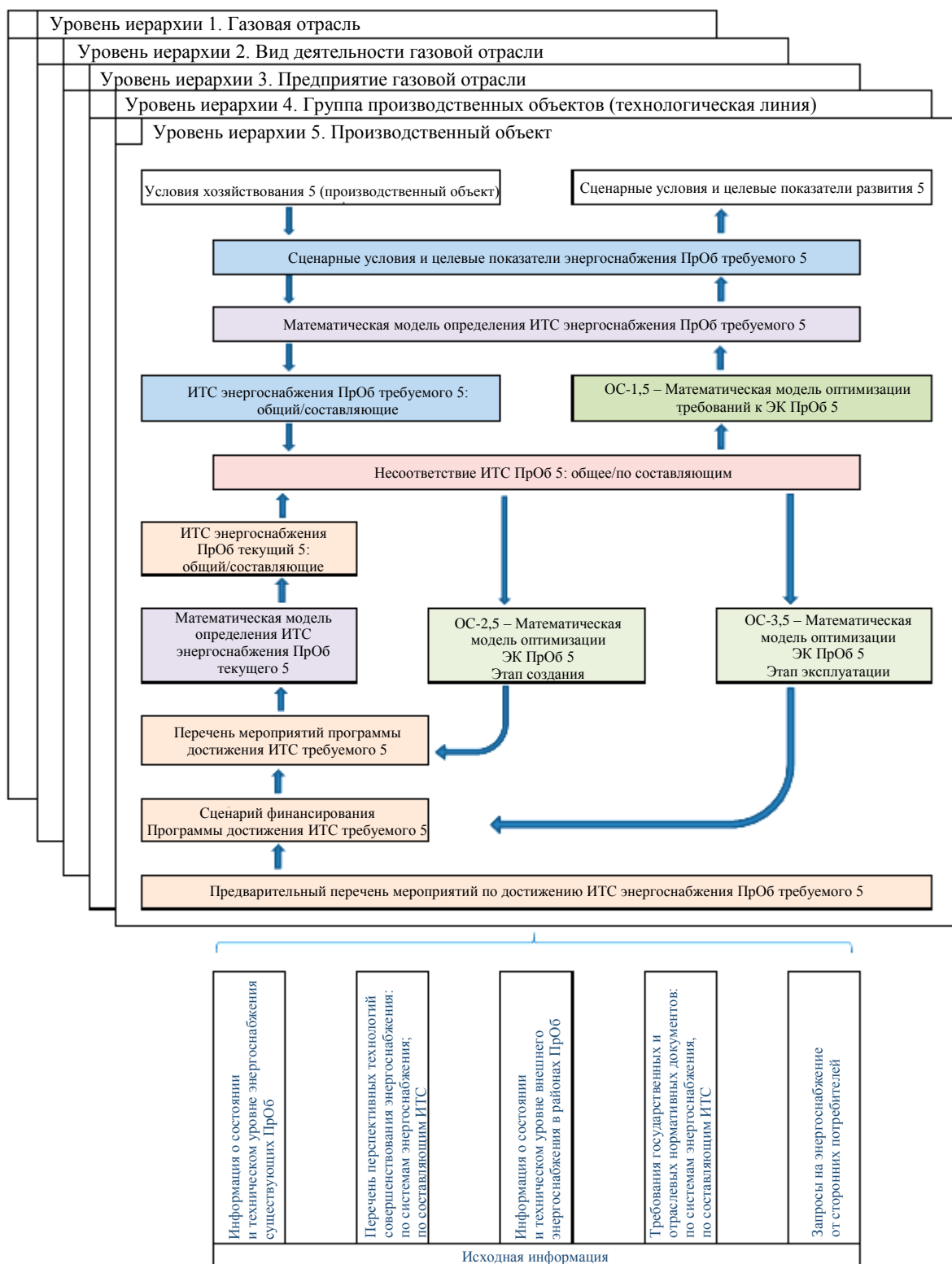


Рис.2. Иерархия задач оптимизации на этапах развития ЭК ПрОб газовой отрасли

Экстремальные значения отдельных показателей ЭК ПрОб и энергоснабжения в целом в большинстве случаев не являются суммой экстремальных значений показателей отдельных элементов и подсистем [3]. При наличии нескольких несводимых критериальных показателей требуется ранжировать критерии, выделяя один из них в качестве главного и используя остальные в виде ограничений.



*Состав математических моделей определения величин параметров и показателей энергетических комплексов, а также оптимизации перечней и содержания работ по развитию энергоснабжения производственных объектов.*

Комплекс математических моделей должен соответствовать перечню задач, решаемых в рамках развития энергоснабжения ПрОб. Генеральная модель должна позволять трансформировать величины заданных целевых показателей производственных объектов (ЦПпр) в требуемые целевые показатели энергоснабжения ПрОб (ЦПпр.э) и далее в величину требуемого индекса технического состояния энергоснабжения группы производственных объектов (ИТСпр.э.тр), функционирование которых напрямую влияет на достижение заданных ЦПпр.

Модель позволяет оценивать величину интегрального показателя энергоснабжения для заданного уровня иерархии ИТСпр.э.тр и величины составляющих его показателей: обеспеченности количества энергоносителей, качества энергоносителей, надежности энергоснабжения, безопасности энергоснабжения, энергоэффективности энергоснабжения, удобства эксплуатации (экономичности эксплуатации) энергокомплексов.

Основой процесса развития энергоснабжения должны стать следующие математические модели:

- модель определения текущего ИТС энергоснабжения заданной группы ПрОб как функции совокупности исходной информации, представленной на рис.2;
- модель оптимизации перечня и состава работ по достижению требуемого уровня ИТС энергоснабжения в условиях применения РОП к управлению в газовой отрасли (этап создания ЭК ПрОб). Данная модель должна позволять строить семейства трендов интегрального показателя и составляющих ИТС энергоснабжения для анализируемой группы ПрОб при различных сочетаниях перечней и состава работ, а также капитальных вложений в программу по достижению заданного уровня ИТС ПрОб для всех уровней иерархии с учетом проектных и фактически полученных в процессе создания показателей объектов энергоснабжения;
- модель оптимизации перечня и состава работ по достижению требуемого уровня ИТС энергоснабжения в условиях применения РОП к управлению в газовой отрасли (этап эксплуатации созданных ЭК ПрОб). В отличие от моделей этапа создания, модели этапа эксплуатации ЭК ПрОб оценивают различные варианты достижения требуемого уровня ИТС энергоснабжения, в том числе с учетом оптимизации совместного функционирования созданных ЭК ПрОб при определенном уровне их эксплуатации.

В состав комплекса должны входить адаптивные математические модели, требующие минимально необходимого количества исходной информации и позволяющие:

- обосновывать уровень требований по распределению баланса выработки и обеспечения качества энергоресурсов между источниками и установками ЭК ПрОб и внешними системами энергоснабжения, а также к информационным свойствам отдельных структурных составляющих ЭК ПрОб;
- определять необходимые коммуникационные возможности структурных составляющих ЭК ПрОб для обеспечения распределенной выработки и обеспечения качества энергоресурсов требуемого уровня;
- прогнозировать реализацию заданных сценарных условий, нагрузки на отдельные системы энергоснабжения и пр. с целью обоснованного принятия решения по оптимизации перечня и состава работ по совершенствованию энергоснабжения.

Результаты моделирования процессов развития энергоснабжения являются основой для выработки структурированного предложения от системы поддержки принятия решений с целью оптимизации процесса совершенствования энергоснабжения производственных объектов отрасли.

### **Обсуждение результатов**

С использованием описанной методологии разработаны Концепция развития и Комплексная целевая программа реконструкции и технического перевооружения энергетики производственных объектов газовой отрасли.

Методология явилась инструментом логической организации проведения исследований и средством расчета показателей, что позволило на основе решения задачи многокритериальной оптимизации сформулировать общее видение вектора развития энергоснабжения в условиях динамического изменения условий хозяйствования и ограничений на финансирование программ развития, а также сформировать оптимальный перечень и последовательность выполнения мероприятий по



реконструкции энергетики производственных объектов с целью достижения максимального значения индекса технического состояния объектов энергетики в масштабе отрасли.

Ранее основным инструментом формирования комплексных программ являлись лишь методики определения показателей экономической эффективности мероприятий реконструкции, не учитывающие важные технические аспекты функционирования энергетических комплексов.

На сегодняшний день не решены задачи разработки математических моделей поиска соответствия между целевыми производственными показателями различного уровня и минимально необходимым для этого техническим уровнем энергоснабжения групп производственных объектов предприятий отрасли, что является предметом дальнейших научных исследований.

### Заключение

Динамические изменения условий хозяйствования и использование РОП в газовой отрасли привели к необходимости разработки методологического подхода для повышения эффективности управления развитием энергетики производственных объектов, основанного на всестороннем анализе параметров совместно функционирующих технологических установок и энергетических комплексов производственных объектов с целью решения поставленных бизнес-задач.

Разработанная методология управления развитием энергетики производственных объектов основана на положениях системного анализа и позволяет оптимизировать при изменении условий функционирования процесс совершенствования энергоснабжения за счет решения многокритериальной задачи оптимизации при определении индекса технического состояния ЭК ПрОб в условиях ограничений.

Использование методологии позволило на системном уровне обосновать оптимальный перечень и очередность реализации мероприятий по совершенствованию энергетики производственных предприятий газовой отрасли в рамках разработки программы реконструкции и технического перевооружения энергоснабжения отрасли.

Дальнейшие научные исследования связаны с разработкой на базе предложенной методологии системы поддержки принятия решений, позволяющей путем структурирования разнородной информации о текущем состоянии и возможных вариантах совершенствования энергетики газовой отрасли оптимизировать процесс решения бизнес-задачи производственных объектов в рамках реализации различных сценарных условий развития отрасли.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров С.И., Медведев К.А., Гитарский М.Л. Российская нефтегазовая отрасль в условиях четвертого энергоперехода и изменения климата // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8. № 3. С. 74-87. DOI: [10.21513/2410-8758-2022-3-74-87](https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-3-74-87)
2. Маркелов В.А., Бронников А.Н., Шаповало А.А. и др. Концепция развития энергетики производственных объектов в условиях динамического изменения условий хозяйствования предприятий газовой отрасли // *Газовая промышленность*. 2023. № S3 (853). С. 8-11.
3. Воронин Н.И., Подковальников С.В., Труфонов В.В. и др. Обоснование развития электроэнергетических систем: методология, модели, методы, их использование. Новосибирск: Наука, 2015. 448 с.
4. Ишутина Т.А. Управление рисками в энергетических компаниях Российской Федерации // Развивая энергетическую повестку будущего: Сборник докладов Международной научно-практической конференции для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК, 10-11 декабря 2021, Санкт-Петербург, Россия. СПб: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), 2021. С. 339-343.
5. Handbook of Risk Management in Energy Production and Trading / Ed. by R.M.Kovacevic, G.Ch.Pflug, M.T.Vespucci. New York: Springer, 2013. 505 p. DOI: [10.1007/978-1-4614-9035-7](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9035-7)
6. Swindle G. Valuation and Risk Management in Energy Markets. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 487 p. DOI: [10.1017/CBO9781139568302](https://doi.org/10.1017/CBO9781139568302)
7. Burger M., Graeber B., Schindlmayr G. Managing Energy Risk. A Practical Guide for Risk Management in Power, Gas and Other Energy Markets. Wiley, 2014. 448 p. DOI: [10.1002/9781118618509](https://doi.org/10.1002/9781118618509)
8. Камчатова Е.Ю. Управление рисками генерирующих энергокомпаний // *Вестник университета*. 2018. № 2. С. 50-56. DOI: [10.26425/1816-4277-2018-2-50-56](https://doi.org/10.26425/1816-4277-2018-2-50-56)
9. Бахтеева Н.З., Шацких З.В. Некоторые аспекты управления рисками в электроэнергетике // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2015. № 1 (25). С. 111-124.
10. Xianlei Chen, Manqi Wang, Bin Wang et al. Energy Consumption Reduction and Sustainable Development for Oil & Gas Transport and Storage Engineering // *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 4. № 1775. DOI: [10.3390/en16041775](https://doi.org/10.3390/en16041775)
11. Sucic B., Peckaj M., Tomsic Z., Uranic J. Systematic approach for improving energy efficiency in industrial facilities, from energy audit to practical implementation – case study production of autoclaved aerated concrete // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 116. № 00083. DOI: [10.1051/e3sconf/201911600083](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600083)



12. *Kelchevskaya N.R., Shirinkina E.V., Atlasov I.V.* Assessing energy efficiency factors in industrial companies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. № 042001. DOI: [10.1088/1757-899X/862/4/042001](https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/4/042001)
13. *Тарасенко В.Н., Денисова Ю.В.* Проблема энергосбережения в России // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г.Шухова. 2016. Т. 1. № 11. С. 63-68. DOI: [10.12737/22375](https://doi.org/10.12737/22375)
14. *Уляшева В.М., Пономарев Н.С., Мартыанова А.Ю., Суханова И.И.* Энергосбережение на объектах добычи и транспортировки нефти и газа. СПб: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. 216 с.
15. *Hashim K.M., Hassim Mimi H., Ng D.K.S., Ten J.Y.* Leading Energy Performance Indicator: Tracking of Energy Management Systems in Oil and Gas Companies // ASM Science Journal. 2019. Vol. 12. 16 p. DOI: [10.32802/asmsci.2019.312](https://doi.org/10.32802/asmsci.2019.312)
16. *Arriola-Medellin A.M., López-Cisneros L.F., Aragón-Aguilar A. et al.* Energy efficiency to increase production and quality of products in industrial processes: case study oil and gas processing center // Energy Efficiency. 2019. Vol. 12. Iss. 6. P. 1619-1634. DOI: [10.1007/s12053-019-09803-0](https://doi.org/10.1007/s12053-019-09803-0)
17. *Gasumov E., Gasumov R., Suleymanov G., Gurbanov K.* Risk management in the production and transportation of natural gas under the conditions of the economic crisis in the energy market // Reliability: Theory & Applications. The Fourth Eurasian Risk Conference and Symposium, 11-13 October 2022, Baku, Azerbaijan. 2022. Vol. 17. Special Issue 4 (70). P. 502-508
18. *Пащенко Д.С., Комаров Н.М.* Риск-менеджмент – ключевой элемент в цифровой трансформации промышленного предприятия // Мир новой экономики. 2021. Т. 15. № 1. С. 14-27. DOI: [10.26794/2220-6469-2021-15-1-14-27](https://doi.org/10.26794/2220-6469-2021-15-1-14-27)
19. *Sterev N., Biolcheva P.* Market Mechanisms for Risk Management in Energy // Economic Alternatives. 2022. Iss. 1. P. 132-141. DOI: [10.37075/EA.2022.1.08](https://doi.org/10.37075/EA.2022.1.08)
20. *Nazarova F., Voropayeva T., Horobets N., Sokolova O.* Energy risk management in urban projects management // International Journal of Human Capital in Urban Management. 2023. Vol. 8. Iss. 2. P. 143-160. DOI: [10.22034/IJHCUM.2023.02.01](https://doi.org/10.22034/IJHCUM.2023.02.01)
21. *Рахмани Д.* Основные подходы к оценке эффективности применения методологии анализа и управления рисками в энергетической компании // Т-Сопп: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 9. С. 46-55 (англ.). DOI: [10.36724/2072-8735-2022-16-9-46-55](https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-9-46-55)
22. *Мастепанов А.М.* Энергетический переход: к чему готовиться мировому нефтегазу // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2019. № 10 (178). С. 5-14. DOI: [10.33285/1999-6942-2019-10\(178\)-5-14](https://doi.org/10.33285/1999-6942-2019-10(178)-5-14)
23. *Londoño A.A., Velásquez J.D.* Risk Management in Electricity Markets: Dominant Topics and Research Trends // Risks. 2023. Vol. 11. Iss. 7. № 116. DOI: [10.3390/risks11070116](https://doi.org/10.3390/risks11070116)
24. *Lenkova O.V.* Risk management of oil and gas company in terms of strategic transformations // Espacios. 2018. Vol. 39. № 6. 30 p.
25. *Бабаков А.В., Саулин А.Д.* Идентификация и классификация рисков газотранспортных предприятий // Вопросы экономики и права. 2018. № 10 (124). С. 75-83.
26. *Groten M., Gallego-García S.* A Systematic Improvement Model to Optimize Production Systems within Industry 4.0 Environments: A Simulation Case Study // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 23. № 11112. DOI: [10.3390/app112311112](https://doi.org/10.3390/app112311112)
27. *Anthony Paul, Lawrence Kelvin, Kelvin Brown.* Optimizing IT Growth: Strategies for Building and Scaling Robust Infrastructure Systems // Ladoke Akintola University of Technology. URL: <https://www.researchgate.net/publication/377447014> 17.01.2024 (дата обращения 16.02.2024).
28. *Bryan G., Carlson Ch., Gaponenko S., Mitra Sh.* The Benefits of Modeling and Optimizing Production Systems: An Application on Civil Infrastructure Projects. URL: <https://www.curt.org/2023/10/30/the-benefits-of-modeling-and-optimizing-production-systems-an-application-on-civil-infrastructure-projects/> (дата обращения 16.02.2024).
29. *Waqar A., Othman I., Shafiq N., Mansoor M.S.* Applications of AI in oil and gas projects towards sustainable development: a systematic literature review // Artificial Intelligence Review. 2023. Vol. 56. Iss. 11. P. 12771-12798. DOI: [10.1007/s10462-023-10467-7](https://doi.org/10.1007/s10462-023-10467-7)
30. *Шклярский Я.Э., Замятина Е.Н., Замятин Е.О.* Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 339-347.
31. *Клюев Р.В., Моргоева А.Д., Гаврина О.А. и др.* Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 392-402.
32. *Ильющин Ю.В., Афанасьева О.В.* Разработка Scada-модели компрессорной станции магистрального газопровода // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 686-693. DOI: [10.31897/PMI.2019.6.686](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.6.686)
33. *Унижаев Н.В.* Особенности внедрения нейросетей и систем искусственного интеллекта на предприятиях электроэнергетики // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13. № 1. С. 215-232. DOI: [10.18334/vinec.13.1.116945](https://doi.org/10.18334/vinec.13.1.116945)
34. *Червонченко С.С., Фролов В.Я.* Исследование работы автономного электротехнического комплекса с комбинированным составом резервных источников питания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 4. С. 90-104. DOI: [10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104)
35. *Богачков И.М., Хамитов Р.Н., Валиев М.К.* Пути выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газовых месторождений // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4 (49). С. 35-41. DOI: [10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-35-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-35-41)
36. *Саушев А.И., Еразумов М.И., Романов Л.Р. и др.* Интеллектуальное управление системой электроэнергетики нефтяного месторождения // Автоматизация и IT в нефтегазовой области. 2023. № 4 (54). С. 30-40.
37. *Токарев И.С., Югай В.Ф., Толмачев В.Н. и др.* Применение систем накопления электроэнергии в составе генерирующего оборудования систем электроснабжения производственных объектов ПАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2023. Спец. вып. № 3 (853). С. 34-40.
38. *Чеканский А.В., Ширишов Д.Н., Маркова В.Н. и др.* Перспективы применения атомных источников генерации энергии на объектах ПАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2024. № 3 (862). С. 74-83.
39. *Шаповало А.А., Коноплев Т.Ф., Аверьянов В.К. и др.* Пути повышения качества энергоснабжения производственных объектов ПАО «Газпром» в современных условиях // Наука и техника в газовой промышленности. 2022. № 2 (90). С. 93-101.

**Автор Анатолий Антонович Шаповало, канд. техн. наук, начальник управления, An19660106@yandex.ru (ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия).**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.