

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 329, № 12, 2018

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА.  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Редакционная коллегия**

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)  
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)  
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)  
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)  
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)  
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)  
Тойпель У., Dsc (Германия)  
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)  
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)  
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)  
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)  
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)  
Руи Д., PhD (Португалия)  
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)  
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)  
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)  
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)  
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)  
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)  
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)  
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)  
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)  
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)  
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)  
Кирьянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2018

**УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!**

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

ISSN (print) – 2500-1019  
ISSN (on-line) – 2413-1830

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ за 2015 г. – 0,339  
(без самоцитирования – 0,287)

«Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации геоактивов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей. Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com)

**BULLETIN  
OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY  
GEO ASSETS ENGINEERING**

Volume 329, № 12, 2018

**BULLETIN  
OF THE TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY.  
GEO ASSETS ENGINEERING**

**Editorial Board**

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)  
Rikhvanov L.P., Dr. Sc. (Russia)  
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)  
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)  
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)  
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)  
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)  
Belozеров V.B., Dr. Sc. (Russia)  
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)  
Silkin V.M., PhD (Spain)  
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)  
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)  
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)  
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)  
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)  
Teipel U., Dsc (Germany)  
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)  
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)  
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)  
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)  
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)  
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)  
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)  
Rui D., PhD (Portugal)  
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)  
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)  
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)  
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)  
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)  
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)  
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)  
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)  
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)  
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)  
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)  
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)  
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)  
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

**AIMS AND SCOPE**

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University.

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

ISSN (print) – 2500-1019  
ISSN (on-line) – 2413-1830

The journal publishes research papers in the field defined as "life cycle of georesources". It presents original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in geology, exploration and extraction of mineral resources, transportation technologies and deep processing of natural resources, energy-efficient production and energy conversion based on mineral resources as well as on safe disposal of geo assets.

The journal will be of interest to geologists, chemists, engineers, physicists, ecologists, power engineers, specialists in storage and transportation of energy resources, IT specialists as well as to other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering" in accordance with Geo Assets (GA) strategy includes:

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and questions Geoecology;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest 2 potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on  
[www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).

УДК 624.131

## ОЦЕНКА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БЕРЕГОВОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Строкова Людмила Александровна<sup>1</sup>,  
strokova@sibmail.com

Пургина Дарья Валерьевна<sup>1</sup>,  
purgina\_darya@mail.ru

Галеева Эльмира Ильдаровна<sup>1</sup>,  
holikaholika55@mail.ru

Курчатова Анна Николаевна<sup>2</sup>,  
kanni@igig.tngnu.tyumen.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Субарктический научно-учебный полигон ТюмНЦ СО РАН – ТюмГНГУ,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 56.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью оценки существующих инженерно-геологических условий, процессов и опасностей, а также связанных с ними рисков и воздействий в отношении предполагаемого использования участка Берегового месторождения Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа. Необходимым предварительным этапом при разработке проекта обустройства нефтегазоконденсатного месторождения является анализ данных территории строительства.

**Цель работы:** построение карты инженерно-геологических условий территории месторождения для оценки состояния и прогноза изменений инженерно-геологических условий по результатам проведенных инженерно-геологических изысканий.

**Объектами** исследования являются компоненты геологической среды, рассматриваемые при проектировании освоения Берегового месторождения.

**Методы исследования:** анализ материалов инженерно-геологических изысканий, детальный литолого-генетический анализ территории, учет закономерностей пространственной изменчивости основных показателей инженерно-геологических условий (состав пород, температура грунтов, характер распространения многолетнемерзлых пород, инженерно-геологические процессы).

**Результаты.** На основе дешифрирования космоснимка территории выделено шесть типов местностей: А (озерно-болотный); Б (хасырейный); В (приречный); Г (холмисто-увалистый); Д (линейно-грядовый) и Е (техногенные грунты). Результаты полевых работ и лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов позволили детализировать предварительную оценку инженерно-геокриологических условий. Основная часть трассы проходит по приречному типу местности В. Наиболее неблагоприятными для строительства сооружений и прокладки трубопровода являются типы местности: А (встречается локально в низинах, представлен болотами с мощностью торфа до 2,2 м) и Б (имеет широкое распространение, представлен заболоченными участками, сложенными глинистыми грунтами с отсутствием поверхностного стока), типы Г и Д по трассе не встречены. По результатам выполненных работ рекомендовано размещать площадки строительства и трассы линейных сооружений на хорошо дренированных суходольных участках распространения талых грунтов.

### Ключевые слова:

Грунт, многолетнемерзлые грунты, опасные криогенные процессы, инженерно-геокриологическое картографирование, инженерно-геологические условия.

### Введение

Инженерно-геологическим исследованиям Западно-Сибирской плиты посвящены работы многих российских исследователей – В.Т. Трофимова, Г.А. Голодковской, Д.С. Дроздова, Г.А. Сулакшиной и ряда других [1–5]. Результатами этих исследований явилось установление основных инженерно-геологических и геокриологических закономерностей региона, в частности закономерностей формирования состава, состояния, физико-механических свойств пород. В работах С.Н. Титкова, Ф.М. Ривкина и др. [6, 7] рассмотрены методики геокриологического районирования зон линейных объектов нефте- и газопроводов; показано, что главными факторами природной среды, влияющими на

формирование специфики геокриологических условий в исследованном регионе, является характер рельефа, распространение многолетнемерзлых грунтов (ММГ), их льдистость, пораженность территории опасными криогенными процессами, приуроченность различных типов процессов к определенным формациям и геолого-генетическим комплексам пород. В настоящей работе рассматриваются инженерно-геокриологические условия территории нефтегазоконденсатного месторождения Берегового, расположенного в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, определяется устойчивость геологической среды к природным и техногенным процессам, которые могут возникнуть в период строительства и эксплуатации трубопроводной системы.

Целью является построение инженерно-геологических карт территории месторождения для оценки состояния и прогноза изменений инженерно-геологических условий по результатам проведенных инженерно-геологических изысканий.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить анализ результатов инженерно-геологических изысканий; типизацию инженерно-геокриологических условий; выделение участков с развивающимися (или потенциально опасными) негативными инженерно-геокриологическими процессами, такими как оползнеобразование, эрозия, термоэрозия, термокарст, морозное пучение и пр.

#### **Характеристика Берегового нефтегазоконденсатного месторождения**

Береговое месторождение находится на территории Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа в 30 км юго-восточнее от п.г.т. Уренгой. Месторождение открыто в 1982 г., имеет площадь 600 км<sup>2</sup>. Согласно принятому нефтегазogeологическому районированию, Береговое месторождение приурочено к юго-западной части Тазовского нефтегазоносного района Пур-Тазовской нефтегазоносной области. На месторождении открыто 34 залежи углеводородов в 21 пласте. Коллектором являются песчаники с линзовидными прослоями глин и известняков. Этаж промышленной нефтегазоносности составляет более 2,5 км. Запасы газа составляют более 300 млрд м<sup>3</sup>, газового конденсата – 0,991 млн т, нефти – 9,035 млн т. Месторождение относится к классу крупных, характеризуется сложным геологическим строением, обусловленным обстановками формирования коллекторов и тектогенезом.

В 1998 г. ОАО «Сибнефтегаз» приобрело лицензию на право пользования недрами Берегового участка и подписало лицензионное соглашение. На первом этапе освоения месторождения произведено обустройство сеноманской газовой залежи. Залежи сеноманского газа располагаются на глубине 800–1700 м, представляют собой главным образом скопления метана. Гораздо ниже, через несколько ярусов после сеноманского газа, запасы которого постепенно истощаются, расположен валанжинский ярус. Валанжинский газ располагается на глубине 1700–3200 м и отличается значительным содержанием этана, пропана и газового конденсата. Валанжинский ярус является частью неокомского надъяруса. Объектом исследований геологов до сих пор являются и ачимовские отложения, запасы газа которых также значительны. Ачимовский газ характеризуется глубиной залегания порядка 4000 м, более сложным геологическим строением, аномально высоким пластовым давлением и значительным содержанием тяжелых парафинов.

#### **Характеристика природных условий территории месторождения**

Климат района континентальный, характеризуется долгой холодной зимой и коротким летом.

Среднегодовая температура воздуха составляет –7,5 °С. Переход температуры через 0 °С происходит весной до второй половины мая, а осенью – в начале октября. Устойчивый снежный покров сохраняется в течение 220–230 дней – с середины сентября до начала мая [8]. Среднегодовое количество осадков составляет более 44 мм. Число дней со снежным покровом – более 200.

Территория до 70 % покрыта лесом средней густоты. Растительность, характерная для границы зон тундры и лесотундры, представлена: хвойными породами, широким распространением мхов и лишайников. Значительные площади занимают низинные болота и торфяники [4]. Залежи торфа приурочены к котловинам спущенных озер (хасыреям), приозерным понижениям и ложбинам стока.

#### **Геоморфология**

В геоморфологическом отношении территория Берегового месторождения расположена в западной припуровской части обширного Пур-Тазовского междуречья. Она принадлежит бассейну правых притоков р. Пур от низовьев рек Пякупур и Айваседапур на юге до широты устья р. Евояха [4]. По центральной части месторождения протекает р. Большая Хадырь-Яха с юго-востока на северо-запад. На месторождении протекают притоки р. Бол. Хадырь-Яха, р. Лангъ-Яха и р. Вентоко-Яха шириной русловой части до 30 м и поймой до 600 м. Отметки по месторождению колеблются от 15 до 55 м.

Главной рельефообразующей силой, создавшей основные черты рельефа северной части Западно-Сибирской низменности, является деятельность моря и рек. Территория месторождения представляет собой полого снижающуюся в сторону Карского моря абразионно-аккумулятивную равнину с общим наклоном к северу и западу. Формирование современного рельефа началось после спада Ямальской трансгрессии и связано с развитием неотектонических структур и проявлением экзогенных процессов, рельефообразующей аккумуляции в верхнечетвертичное и современное время. Выделенные геоморфологические уровни в зависимости от своего происхождения объединены в три типа равнин: морского, озерно-аллювиального и аллювиального генезиса.

В северной части Пур-Тазовского междуречья развита *четвертая морская терраса*. Поверхность террасы плоская, расчленена долинами дренирующих ее рек. Содержащаяся в осадках морская фауна, по определению С.Л. Троицкого, характерна для казанцевских отложений, которые, по мнению И.Л. Кузина (1963), завершают разрез осадков Ямальской трансгрессии [9].

Развитие гидрографической сети северной части низменности началось с отступления моря, сопровождавшееся некоторыми задержками, во время которых в долинах рек были сформированы следующие эрозионно-аккумулятивные уровни: III, II и I надпойменные террасы и пойма.

*Третья надпойменная терраса* очень широко развита в средней части Пур-Тазовского междуречья. Плоская поверхность террасы изрезана густой сетью долин притоков основных рек, что придает ей характер полого увалистого рельефа. Образование этой своеобразной террасы происходило в условиях большого обводнения территории, когда в широких речных долинах существовал и речной, и озерно-болотный режим. На поверхности третьей надпойменной террасы широко развиты насаженные формы рельефа, образование которых связано с деятельностью многолетней мерзлоты – бугры пучения и термокарстовые просадки, занятые озерами и болотами.

*Вторая надпойменная терраса* занимает сравнительно большие площади в долинах крупных рек. Высота ее 18–25 м. На поверхности террасы развиты редкие бугры пучения, просадочные западины и закрепленные древние эоловые бугры.

*Первая надпойменная терраса* распространена небольшими фрагментами вдоль рек. Высота ее 8–12 м. Поверхность террасы ровная. На участках развития бугров пучения и просадочных западин она приобретает слабоволнистый характер. Иногда на ней встречаются эоловые и другие формы микрорельефа. На аэрофотоснимках поверхности этой террасы иногда видны следы блуждания русел рек, переработанные к настоящему времени эрозионно-мерзлотными процессами.

*Пойма* распространена в долинах всех рек и ручьев района. По высоте и строению поверхности она отчетливо делится на два уровня – высокую и низкую пойму.

*Высокая пойма* однотипна как в тундровой, так и в лесотундровой и лесной зонах. Высота ее до 5–7 м. Поверхность ее обычно ровная, количество стариц и вееров блуждания русла на ней значительно меньше, чем на низкой пойме. Широко развиты на поверхности высокой поймы бугры пучения и просадочные западины.

*Низкая пойма*, высотой до 2,5–3 м, по своим морфологическим особенностям подразделяется на два типа. Пойма первого типа представляет собой обширные песчаные поля, лишенные растительности, что благоприятствует образованию эоловых бугров и западин выдувания. Низкая пойма второго типа широко развита в долинах рек лесотундры и северной тайги. Поверхность ее обычно покрыта густой кустарниковой и древесной растительностью.

В целом рельеф территории равнинный, но имеется ряд специфических форм неровностей поверхности, например, различные типы бугристых торфяников, достигающие высоты 1–5 м. Широко распространены термокарстовые явления, при этом наиболее часто встречаются формы, возникшие при вытаивании сегрегационных повторно-жильных и инъекционных льдов. Характер современного микро- и мезорельефа определяют криогенные и посткриогенные процессы, связанные с существованием многолетней мерзлоты. Широко

развитые процессы заболачивания приводят к выравниванию микропонижений за счет нарастания торфяников.

#### Геологическое строение

Береговое месторождение расположено в северной части Западно-Сибирской плиты. Породы складчатого основания являются разновозрастными и слагают блоки с карельским, байкальским, салаирским и герцинским фундаментом. Согласно тектонической схеме платформенного чехла, район исследований расположен в пределах крупнейшей надпорядковой структуры – Надым-Тазовской синеклизы, в составе которой выделены чередующиеся положительные и отрицательные структуры I порядка, ориентированные в субмеридиональном направлении [10]. На территории Берегового месторождения к таким структурам относится Нижнепуровская впадина, являющаяся северным продолжением Пуровского мегапрогиба, расположенного в зоне Уренгойско-Колтогорского глубинного разлома. Она осложнена более мелкими структурами – элементами II и III порядка.

На Береговом месторождении чехол сложен осадочными толщами триасового, юрского, мелового и палеогенового возраста. Мощность чехла составляет 5,8–6,0 км.

Отложения четвертичной системы морского, озерно-аллювиального, озерного, аллювиального, болотного и смешанного происхождения [9] распространены сплошным покровом толщиной в десятки метров на размытой поверхности континентальных пород палеогена.

*Казанцевский горизонт.* К данному горизонту отнесены аллювиально-морские отложения четвертой террасы, представленные суглинками, супесями, песками четко-, горизонтально- и косослоистыми, с незначительным содержанием гравийно-галечниково-валунного материала. Мощность отложений 30–40 м.

*Ермаковский горизонт.* К данному горизонту отнесены озерно-аллювиальные отложения третьих надпойменных террас (Ia<sup>3</sup>IIIer), характеризуется большой пестротой осадков, от руслового аллювия до озерно-болотных разностей. В некоторых полных разрезах можно выделить русловую, пойменную и озерную фации. Обычно в базальной части (до 3–5 м) преобладают мелко- и среднезернистые пески, отдельными линзами крупнозернистые, с включениями гравия и гальки кварцевого состава. Характерна четкая косая и перистая слоистость. Средняя часть разреза (пойменная фация) имеет мощность до 6–8 м и представлена пылеватыми и мелкими песками, часто оторфованными с прослоями супесей и суглинков. Озерная фация сложена суглинками, реже глинами, содержащими прослой мелкого песка. Мощность обычно колеблется от 0,5 до 3,0–3,5 м, иногда достигая 6–8 м и более. Судя по данным спорово-пыльцевого анализа [10], климатические условия времени формирования отложений в рассматриваемой ча-

сти района были суровыми, а растительность представлена березово-ольховыми зарослями с незначительной примесью хвойных. Среди трав отмечены ксерофитные виды и растения прибрежно-водных местообитаний, среди спор доминируют *Sphagnum*, *Polypodiaceae*, *Lycopodium*. Мощность озерно-аллювиальных отложений третьей террасы составляет 10–22 м.

*Каргинский горизонт.* Озерно-аллювиальные отложения вторых надпойменных террас (Ia<sup>2</sup>IIIkr) развиты в долинах практически всех крупных и средних рек района. Аллювиальная фация представлена мелко- и среднезернистыми песками, характерны редкие включения гравия и гальки кварца, растительные остатки разной степени сохранности. В песках отчетливо видна косая или линзовидная слоистость. Озерная фация (верхние 1–3 м) представлена иловатыми песками со слабо-заметной слоистостью субгоризонтальной или волнистой, с отдельными прослоями (0,2–0,5 м) и линзами супеси и, реже, суглинка. Возраст озерно-аллювиальных отложений вторых надпойменных террас определяется их положением в сводном разрезе долинного комплекса. Имеющиеся немногочисленные данные спорового и пыльцевого анализа позволяют предполагать, что в период их формирования существовали ландшафты тундры и лесотундры. Д.В. Назаровым (2011 г.) в верховьях р. Табьяха из аллювия второй террасы получены OSL даты – 37,1; 31,3 и 24,2 тыс. лет, что не противоречит отнесению этих отложений к каргинскому горизонту. В т. н. 0113 по образцу торфа, отобранного из аллювия второй террасы, в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ получена радиоуглеродная дата  $33900 \pm 1400$  тыс. лет. Мощность лимно-аллювия второй террасы изменяется от 4–10 м в долинах мелких водотоков до 20–22 м в низовьях Пура [10].

*Аллювиальные отложения первой надпойменной террасы (a<sup>1</sup>III-N)* (верхний неоплейстоцен сартанский горизонт–голоцен) сложены в основном песками мелко- и среднезернистыми, часто пылеватыми, с прослоями супесей и суглинков. Мощность отложений составляет 2–5 м. Практически повсеместно аллювий представлен кварцевыми песками мелко- и среднезернистыми, иногда крупными с единичными прослоями и линзами супеси и оторфованного буровато-серого суглинка. Последние, вероятно, отвечают старичной фации (2–4 м). Русловые и пойменные фации аллювия обычно распознаются по наличию в песках следов косой и линзовидной слоистости, тонких прожилков растительного детрита, торфа или захороненных обломков древесины различной степени разложения. В основании разреза иногда фиксируются скопления гравийно-галечного материала и разномерных песков. Предполагается, что в пределах долин пойменные (половодные) и старичные фации развиты лишь в низовьях крупных рек, где их суммарная мощность не превышает 5–6 м, а общая мощность достигает 10–12 м [9].

*Голоценовые* отложения представлены современными осадками различного генезиса.

*Аллювиальные отложения пойменных террас (aH)* развиты во всех долинах. В наиболее полных разрезах, на фоне преобладания песчаных разностей, возможно расчленение данного осадочного комплекса на три фации: русловую, пойменную и старичную. Отложения русловой фации в основном представлены среднезернистыми песками, иногда мелкими и пылеватыми, с редкими линзами (до 0,5 м) крупного. Характерно обогащение растительными остатками и наличие следов косой слоистости. Мощность аллювия составляет от 8–10 м в долине р. Пур до 3–5 м в долинах малых рек. В составе пологоводной фации (до 5–7 м) обычно доминируют мелкие и пылеватые пески, часто интенсивно ожелезненные, с прослоями супесей, реже иловатых суглинков и линзами торфа. Пески имеют горизонтальную и пологоволнистую слоистость. Старичным фациям, наиболее широко развитым в долине р. Пур, свойственны супеси с прослоями мелких и пылеватых песков. Возможны линзы темно- и коричневатых скрытослоистых суглинков и прослои (0,3–0,5 м) погребенного торфа. Мощность старичной фации аллювия весьма непостоянна и колеблется в пределах 0–5 м. Такой тип разреза характерен для высокой поймы крупных рек. Пойменный аллювий этих рек и аллювий пойм малых водотоков представлен в основном песками мелко-среднезернистыми до крупнозернистыми. Основная масса песков развита на речных косах и береговых валах. Для косовых песков отмечена хорошая сортированность и промывтость терригенного материала, хотя в них иногда содержатся тонкие наилки суглинка и включения древесно-растительных остатков.

*Озерно-аллювиальные* отложения имеют ограниченное распространение. В разрезе преобладают пески мелко- и среднезернистые, иногда пылеватые, с прослоями супесей, суглинков. Мощность отложений 3–5 м.

*Болотные* отложения представлены торфом разной степени разложения, который перекрывает более древние породы на разных геоморфологических уровнях. Мощность отложений варьирует от 0,5–2,5 м до 2–4 м.

*Озерно-болотные* отложения приурочены к котловинам осушенных озер – хасыреев, и состоят из торфа и супесей. Мощность торфа составляет от десятков сантиметров до первых метров, супесей – обычно 1–2 м.

*Проллювиальные* образования слагают днища узких логов и балок. Представляют собой супеси с суглинками или их переслаивание. Мощность отложений 1–2 м.

Современные *техногенные* грунты (tQ<sub>IV</sub>) – насыпные грунты полотно автодорог, площадок – имеют локальное распространение. Насыпной грунт состоит из местных песчаных грунтов и представлен песками средней крупности. Насыпные грунты по литологическому составу и генезису

су имеют одинаковый состав и возраст. Отсыпка произведена сухим способом с уплотнением. По давности отсыпки более 5 лет, по плотности, за счет сосредоточенной нагрузки от движения тяжелой техники, насыпные грунты близки к грунтам в естественном состоянии. Консолидация подстилающих грунтов и процесс самоуплотнения насыпного слоя площадок и автодорог завершены.

#### Гидрогеологические условия

В гидрогеологическом отношении Береговое месторождение является частью Западно-Сибирского артезианского бассейна. В вертикальном разрезе этого района выделяются два гидрогеологических этажа: мезозойский и кайнозойский, отличающиеся геологическим строением, условиями питания и водообмена, составом водорастворенных газов, температурным режимом. Для территории месторождения, как и для всего бассейна, характерно наличие мощной глинистой водоупорной толщи, разделяющей их [11].

*Мезозойский гидрогеологический этаж* включает в себя юрский, неокомский и апт-альб-сеноманский водоносный комплексы.

*Юрский гидрогеологический комплекс* представлен песчано-алевролитовыми породами береговой, ягельной, котухтинской, тюменской и васюганской свит. Литологически породы комплекса представлены чередованием песчаников, алевролитов, аргиллитов, а в нижней части комплекса в береговой свите представлены грубозернистыми песчаниками, гравелитами с подчиненными прослоями серых уплотненных глин. Вскрытая мощность пород юрского комплекса на месторождении составляет 1569 м. Юрский комплекс характеризуется довольно низкими коллекторскими свойствами, что обуславливает его низкую водообильность. Воды комплекса относятся к хлоридным натриевым или хлоридно-гидрокарбонатным натриевым с минерализацией от 3,6 до 17,9 г/л. Температура подземных вод меняется в значительных пределах и составляет от 98 до 135 °С.

*Неокомский гидрогеологический комплекс* представлен отложениями мегионской, заполярной и ереямской свит общей мощностью 1250–1365 м. В литологическом отношении комплекс представлен песчано-алевритовыми разностями с прослоями аргиллитов. Песчаные разности обладают лучшими коллекторскими свойствами по сравнению с отложениями юрского гидрогеологического комплекса. По химическому составу воды относятся к хлоридному натриевому, хлоридному натриево-кальциевому или хлоридно-гидрокарбонатному натриевому типам с общей минерализацией, меняющейся в интервале 4,2–23,7 г/л. Водорастворенные газы комплекса имеют метановый состав. Температура пластовых вод меняется от 63 до 96 °С.

*Апт-альб-сеноманский гидрогеологический комплекс* приурочен к отложениям покурской свиты и представлен чередованием песков, песча-

ников и алевролитов. В отложениях комплекса развиты пласты группы ПК, часть из которых продуктивна. К пласту ПК1 приурочена крупная высокодебитная залежь. Кровля покурской свиты залегает на глубинах 1223–1274 м. Мощность комплекса на месторождении составляет 1140–1220 м. Вышележащие турон-палеогеновые глинистые отложения мощностью 770–780 м надежно изолируют комплекс от зоны свободного водообмена. Подземные воды комплекса относятся к хлоридному натриевому типу с величиной общей минерализации 3,5–22,7 г/л. Водорастворенные газы комплекса имеют метановый состав, газонасыщенность пластовых вод изменяется в интервале 1,5–2,8 л/л. Термобарические условия в пределах апт-альб-сеноманского гидрогеологического комплекса меняются в значительных пределах, так, температура составляет 25–65 °С, а пластовые давления варьируют в интервале от 12 до 24 МПа [11].

*Кайнозойский гидрогеологический этаж* представлен песчано-алевритистыми и глинистыми отложениями олигоцен-четвертичного возраста и содержит естественные запасы пресных вод. Формирование отложений происходило в условиях свободного водообмена, избыточного увлажнения, тесной связи подземных вод с поверхностными. Мощность составляет до 150–200 м. В отложениях этажа выделяются три водоносных горизонта: казанцевский, салехардский и некрасовский. В гидрогеологическом отношении горизонты на территории Берегового месторождения совершенно не изучены.

В формировании водоносных горизонтов верхнего гидрогеологического этажа большое значение имеют многолетнемерзлые породы. В связи с этим на рассматриваемой территории выделяются подземные воды сезонноталого слоя (СТС), надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные.

Пресные воды СТС распространены в местах, где ММП залегают с поверхности. Глубина залегания водоносного горизонта от 0,5 м до нескольких метров. В теплый период года на нормативную глубину сезонного оттаивания 3,0 м водовмещающими породами могут быть насыпные грунты, пески различного литологического состава, супеси и суглинки при условии, если они будут в талом состоянии. Водообильность пород невелика и весьма неравномерна. Коэффициент фильтрации в песках изменяется от 10 до 50 м/сут, в торфах – от 0,01 до 0,1 м/сут. Питание горизонта осуществляется за счет атмосферных осадков, поверхностных вод, а также за счет таяния в приповерхностном слое. По химическому составу воды гидрокарбонатные, натриевые, реже кальциевые, пресные и ультрапресные с минерализацией до 50 мг/л.

Надмерзлотные подземные воды приурочены к несквозным таликам под крупными озерами, хасыреями, по долинам ручьев и мелких рек. Водовмещающими породами являются пески, подстилаемые торфом, супесями и суглинками. Толщина горизонта составляет 5–10 м, а под крупными озе-

рами – 25 м. Водообильность составляет 2–3 л/с при очень ограниченных запасах. Источником питания являются атмосферные осадки, поверхностные воды СТС. По химическому составу воды сульфатно-гидрокарбонатные, магниевые, кальциевые, ультрапресные. Надмерзлотные воды, кроме этого, могут быть приурочены к аллювиальным отложениям, развитым на террасах. Водоносные линзы расположены в прослоях талых песков, толщина которых колеблется в пределах от 2–3 до 5–6 м. По составу воды гидрокарбонатные, кальциевые или натриевые, ультрапресные. Питание осуществляется за счет атмосферных осадков, поверхностных вод.

Межмерзлотные воды приурочены к отложениям некрасовского и салехардского горизонтов. Водоносный средне-четвертичный салехардский горизонт распространен повсеместно. Отложения представлены морскими, ледниково-морскими и прибрежно-морскими песками, слабоглинистыми алевроитами с гравием и галькой. Глубина залегания изменяется от 5 до 35 м. Водоносный горизонт напорный. Водоносный олигоцен-нижнечетвертичный горизонт (некрасовский) приурочен к континентальным песчаным отложениям с включениями гравия и гальки. В подошве отложений, примыкающих к глинам тавдинской свиты, горизонт может быть заморожен, а на участках развития крупных болотно-торфяных массивов может находиться в мерзлом состоянии. Водоносный горизонт напорный.

Подмерзлотный водоносный горизонт приурочен, преимущественно, к песчаным отложениям верхнетибейсалинской подсвиты. Водообильность пород незначительная. Воды по составу хлоридные, гидрокарбонатно-натриевые, с минерализацией более 2 г/л.

#### Инженерно-геологические условия

Основным этапом изучения закономерностей изменчивости инженерно-геологических условий территории является обобщение данных исследований и составление картографической модели. Источниками информации для составления комплекса карт служили данные: региональных геологических исследований района, результаты бурения 142 инженерно-геокриологических скважин в 2016 г., 15 точек статического зондирования, геокриологической полевой маршрутной съемки вдоль трассы газопровода (с юго-востока на северо-запад по направлению течения р. Бол. Хадырьяха), геофизических исследований (вертикального электрического зондирования и электропрофилирования), дешифрирования топографической основы и космоснимков высокого разрешения. Состав и физико-механические свойства грунтов изучались по 311 пробам нарушенной структуры и 138 монолитам [12].

В строении геологического разреза присутствуют талые и мерзлые грунты. По карте распространения и генетических типов мерзлых пород

(В.В. Баулин, Г.И. Дубиков, 1972) участок входит в зону прерывистого распространения ММП с мощностью верхнего слоя до 50–100 м, глубиной залегания кровли реликтового мерзлого слоя до 70–120 м и подошвы 400 м, в зоне распространения эпигенетических повторно-жильных образований [13].

Для северной и центральной части Пур-Тазовского междуречья до широты среднего течения р. Варга-Сылькы характерно сплошное распространение мерзлых пород на всех геоморфологических уровнях: преимущественно сплошные, монолитные по разрезу мерзлые толщины от 200 до 300 м. Несквозные талики небольшой мощности существуют только под водоемами – руслами рек и акваториями крупных озер. Толщи многолетнемерзлых пород имеют непрерывный разрез по вертикали от кровли до подошвы [8].

В центральной части Пур-Тазовского междуречья, южнее р. Варга-Сылькы, вплоть до широтного отрезка р. Часельки, мерзлые породы занимают 50 % территории, распространены в виде отдельных островов, развиты на плоских и бугристых торфяниках и, реже, на заболоченных участках с лесной растительностью, преобладающие пространства междуречий, занятые с поверхности песчаными казанцевыми осадками, являются тальми. Мощность мерзлых пород верхнего слоя колеблется от первых метров до 250 м на крупных массивах с монолитным по разрезу строением мерзлых толщ. Глубина залегания кровли реликтовых мерзлых толщ обычно менее 100 м; их мощность близка к 200 м [8].

По характеру залегания ММП выделяется два типа участков: центральные водораздельные поверхности и краевые участки водораздельных поверхностей, примыкающие к речным долинам. Для центральных заболоченных участков террас свойственно развитие массивов мерзлых грунтов сливающегося типа. Талые зоны возможны под крупными озерами. На краевых, более дренированных участках, покрытых лиственнично-березовым лесом и редколесьем, развиваются ММП несливающегося типа с понижением кровли мерзлых грунтов до 12 м и более.

Температурный режим многолетнемерзлых грунтов рассматриваемого района разнообразен и зависит от комплекса ландшафтно-геологических условий. Соответственно меняется и среднегодовая температура грунтов по площади области на глубине нулевых годовых колебаний. В заболоченных термокарстовых понижениях, по плоским заболоченным берегам озер и хасыреев, на участках грядово-мочажинных болот среднегодовая температура грунтов понижается до  $-1,2...-1,8$  °С, на залесенных поверхностях средние температуры мерзлых участков близки к нулю. Широко развиты процессы пучения, термокарста, на юге встречаются новообразования ММП.

Разрез по трассе до изученной глубины 17 м представлен преимущественно тальми грунтами

[12]. Мерзлые грунты встречены локально в девяти скважинах. На участках с многолетнемерзлыми грунтами были проведены замеры температуры грунтов (10 скважин), средняя температура на глубине нулевых колебаний температур (10 м) составляет минус 1,1 °С. Протяженность участков с ММГ составляет 1073,4 м или 7 % от общей протяженности трассы газопровода 16,06 км. На участках распространения многолетнемерзлых грунтов

встречены три бугра пучения высотой от 1 до 5 м, диаметром от 80 до 120 м.

Согласно СП 14.13330.2014 по карте общего сейсмического районирования России ОСР-2015 (А, Б, С), территория изысканий попадает в зону самой низкой сейсмичности – 5 баллов и меньше по шкале MSK-64. Среди современных ЭГП (экзогенных геологических процессов) ведущая роль принадлежит криогенным процессам и заболачи-



a/a



б/б



в/в



г/г



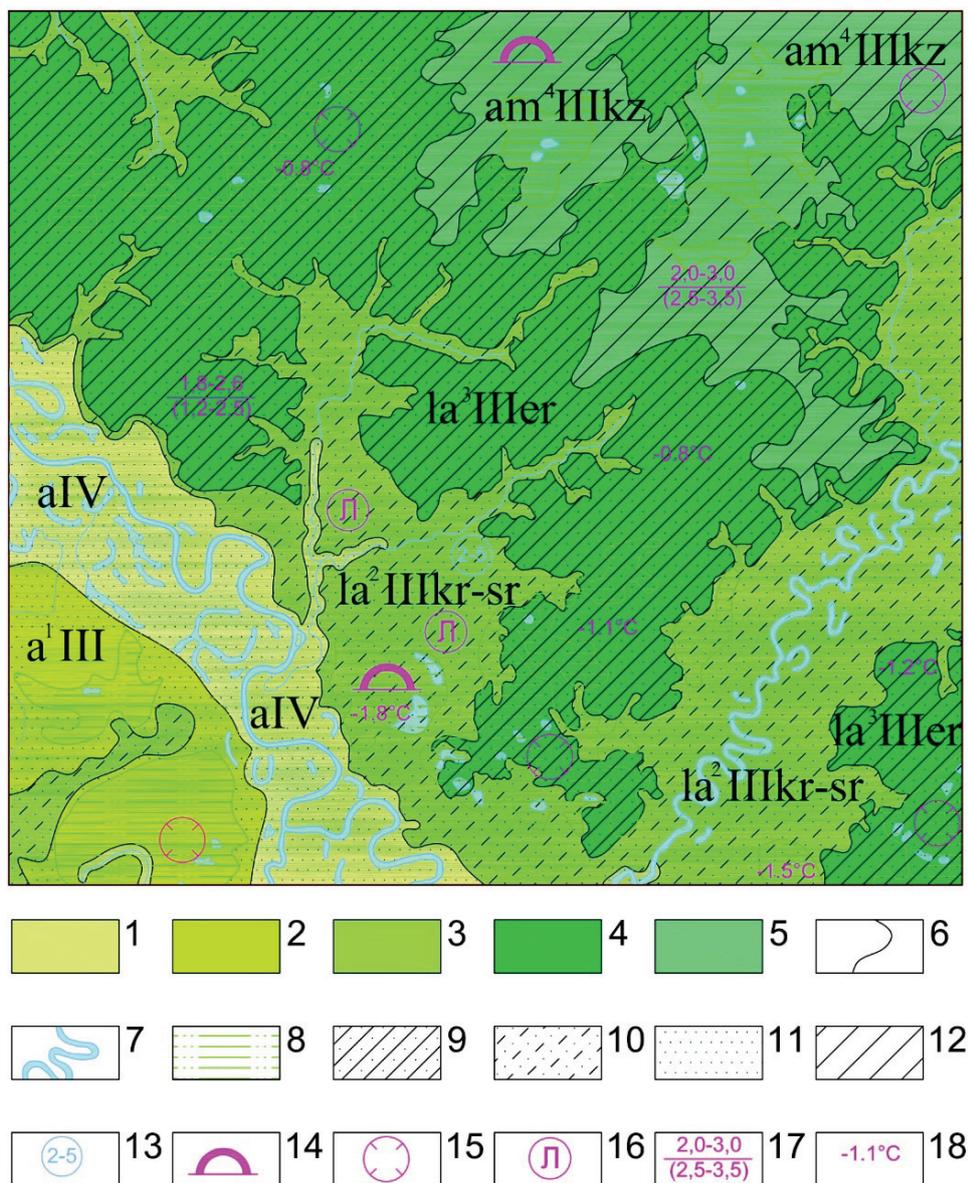
д/д



е/е

**Рис. 1.** Экзогенные геологические процессы (фото С.Ю. Кукушкина): разрушение береговой линии: а) р. Малая Хадырьяха; б) р. Нгарка-Саловояха, в месте пересечения с трубопроводом; в) активация линейной эрозии; г) эрозия почв и формирование вторичных осоково-пушицевых сообществ; д) нарушение поверхностного стока и подтопление территории из-за строительства дороги; е) развитие термокарстовых явлений [14]

**Fig. 1.** Exogenic geological processes (photos were made by S.Yu. Kukushkin): the destruction of the shoreline of small rivers: a) Malaya Khadyryakha; b) Ngarka-Salovoyakha, at the intersection with the pipeline; c) activation of linear erosion; d) soil erosion and formation of secondary sedge-cotton grass biocenosis; g) violation of the surface runoff and flooding due to a road construction; e) development of thermokarst phenomena [14]



**Рис. 2.** Фрагмент карты инженерно-геологических условий. Масштаб 1:100000. Условные обозначения: 1 – современные аллювиальные отложения поймы; 2 – аллювиальные отложения первой надпойменной террасы ( $a^{III}sr-H$ , верхний неоплейстоцен сартанский горизонт – голоцен); 3 – озерно-аллювиальные отложения второй надпойменной террасы ( $la^{III}kr-sr$ , каргинский горизонт); 4 – озерно-аллювиальные отложения третьей надпойменной террасы ( $la^{III}er$ , ермаковский горизонт); 5 – аллювиально-морские отложения четвертой террасы ( $am^{III}kz$  казанцевский горизонт); 6 – границы между стратиграфо-генетическими комплексами; 7 – гидрография; 8 – районы развития болот, мощность торфа более 0,5 м; 9 – суглинки, с прослоями песков, супесей; 10 – супеси, с прослоями суглинков, песков; 11 – преимущественно песчаные грунты; 12 – преимущественно глинистые грунты, с прослоями песков; 13 – глубина залегания подземных вод; 14 – морозное пучение; 15 – термокарст; 16 – участки распространения льдистых пород (льдистость за счет видимых включений  $i_i=0,2-0,4$ ); 17 – глубины сезонного оттаивания/промерзания (в скобках); 18 – среднегодовая температура ММП, °С

**Fig. 2.** Fragment of the engineering-geological map. Scale 1:100000. Legend: 1 – the floodplain alluvium; 2 – alluvial deposits of the first terrace ( $a^{III}sr-H$ ); 3 – lacustrine-alluvial sediments of the second terrace ( $la^{III}kr-sr$ , Karginy horizon); 4 – lacustrine-alluvial sediments of the third terrace ( $la^{III}er$ , Ermakovsky horizon); 5 – alluvial-marine deposits of the fourth terrace ( $am^{III}kz$  Kazantsevsky horizon); 6 – boundaries between genetic stratigraphic sequences; 7 – hydrography features; 8 – areas of development of wetlands, thickness of peat more than 0,5 m; 9 – loam with interbedded sand, loamy sand; 10 – sandy loam, with layers of loam, sand; 11 – mainly sandy soils; 12 – mainly clay soils, with interbedded sands; 13 – depth of groundwater; 14 – frost heave; 15 – thermokarst; 16 – areas of distribution of icy rocks (volume content of ice at the expense of ice prolayers  $i_i=0,2-0,4$ ); 17 – depth of seasonal thawing/freezing (in parentheses); 18 – mean annual temperature of the permafrost soil mass, °С

ванию [14]. Процессы заболачивания связаны с рядом природных факторов данного региона, развитию которых способствует плоский слаборасчлененный рельеф, малая глубина эрозионного вреза большинства рек, их замедленный сток, превышение осадков над испарением, наличие многолетней мерзлоты (рис. 1).

По совокупности природных условий (распространение многолетнемерзлых грунтов, развитие болот) категория сложности инженерно-геологических условий участка изысканий – III (сложная) [15, 16].

#### Инженерно-геокриологическое картирование территории

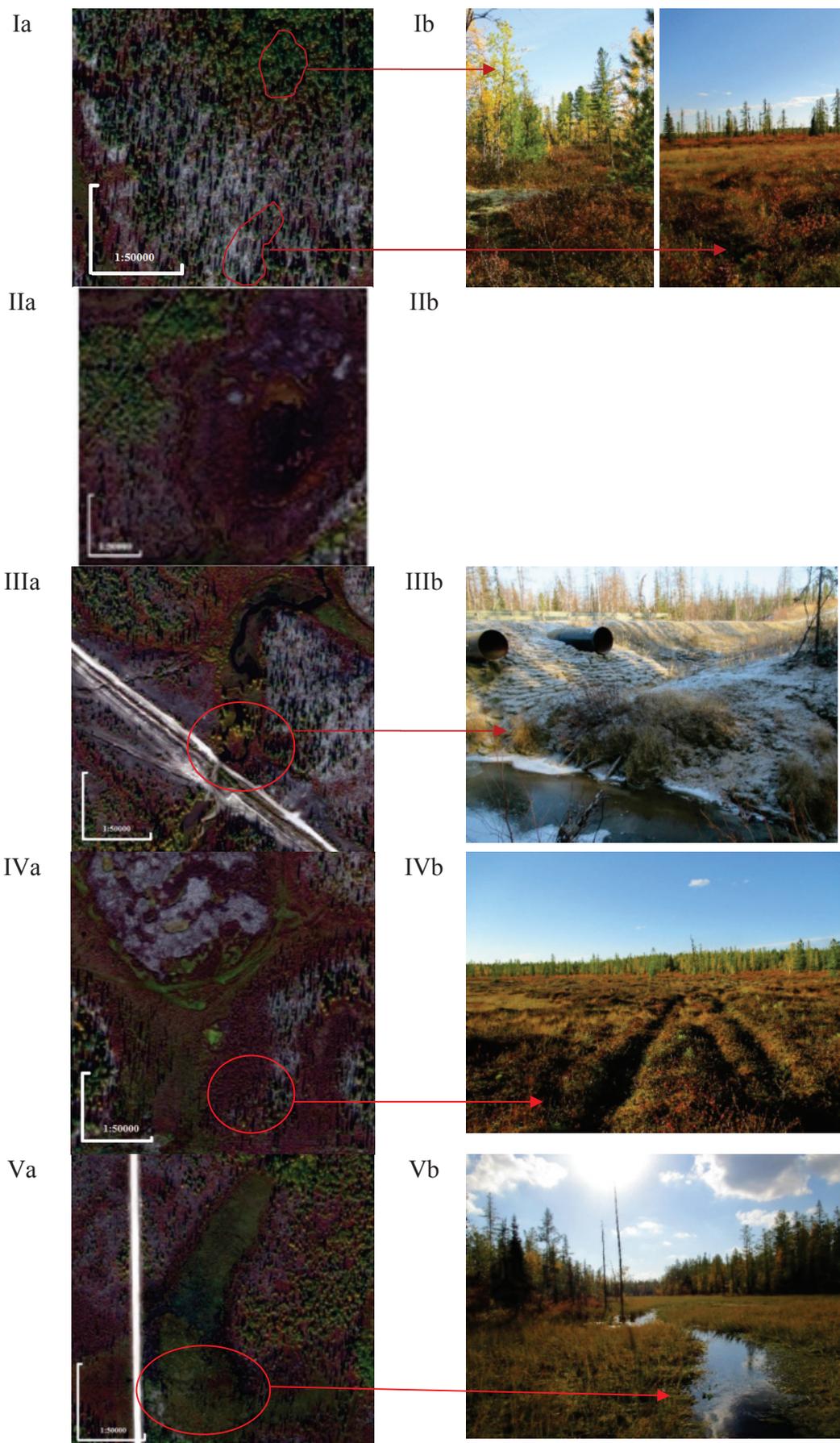
Инженерно-геологическому картированию различных регионов, в частности Западной Сибири, посвящены работы Е.М. Сергеева, С.Б. Ершовой (1972), В.Т. Трофимова (1977, 1983, 1985), Г.А. Голодковской (1981, 1989), А.С. Герасимовой (1980, 1987), Г.А. Сулакшиной (1974, 1984), Е.С. Цоцур (1974), Т.Я. Емельяновой (1984), Л.А. Строковой [17–20]. В их работах предложены принципы, позволяющие в пределах крупного района учесть закономерности распределения региональных и зональных факторов инженерно-геологических условий территории. Такой подход позволяет обособить различные по размерам площади, которые отличаются направленностью геологического развития в плейстоцен-четвертичное время, направленностью неотектонических движений, что обуславливает генетико-возрастные особенности рельефа, геологического строения, мерзлотных и гидрогеологических условий, а в их совокупности инженерно-геологические особенности. Поскольку территория характеризуется прерывистым по площади и разрезу распространением многолетнемерзлых пород [21–29], основным методом учета инженерно-геокриологических условий при районировании стал ландшафтно-индикационный метод. В процессе картирования характеристики участков экстраполировались с учетом выявленных закономерностей на основе анализа и дешифрирования топокарт, аэрофото- и космоснимков по комплексу характерных признаков в зависимости от масштаба районирования. Дешифрирование космоснимков с выделением участков проявления опасных экзогенных геологических процессов обусловлено потребностью минимизации рисков воздействия опасных геокриологических процессов, наблюдаемых при освоении месторождений углеводородов.

На рис. 2 представлен фрагмент карты инженерно-геологических условий территории месторождения. Легенда к карте разработана с учетом геоструктурных, инженерно-геологических и геокриологических условий территории. Первый блок легенды содержит информацию о стратиграфо-генетических комплексах четвертичных отложений (первого от поверхности горизонта), их мощности и составе. Их отображению на карте отведено основное изобразительное средство – цвет и его оттенки. Второй блок легенды отведен составу пород, который показан штриховкой. Третий блок легенды посвящен изображению гидрогеологических условий, наиболее распространенным параметром которых является глубина залегания грунтовых вод. Следующий блок легенды посвящен экзогенным процессам и образованиям. На карте они показаны на участках, непосредственно зафиксированных при инженерно-геокриологическом исследовании трассы в процессе полевых работ. Процессы на карте даются немасштабными общепринятыми значками. Пятый блок легенды отведен показу геокриологической обстановки фиолетовым цветом, как одному из важнейших факторов, определяющих специфику инженерно-геологических условий территории и оказывающих существенное влияние на устойчивость инженерных сооружений. На карте показаны глубины сезонного оттаивания и промерзания (в скобках) пород и льдистость пород, учитывая ее значение при выборе технических решений устройства сооружений. При этом льдистыми считаются супесчано-суглинистые отложения и торф с льдистостью за счет ледяных включений ( $I_i$  – по ГОСТ 25100–2011), равной 0,2–0,4 и пески с  $I_i=0,1–0,2$  ( $W_{tot}=0,25–0,3$ ).

Районирование территории трассы газопровода выполнено на основе ландшафтной дифференциации территории по типам местности, отличающимся степенью и характером расчленения рельефа, особенностями распространения ММГ. Выделены следующие типы местностей: А (озерно-болотный) – плоские нерасчлененные заболоченные и заозеренные участки в центральных и тыловых частях равнин и террас, сложенные с поверхности мерзлыми грунтами; Б (хасырейный) – плоские слабо расчлененные ложбины стока, заболоченные участки равнин с обилием спущенных озер (хасыреев) с заглубленной кровлей ММГ или тальми грунтами; В (приречный-дренированный) – плоские, слабо наклоненные к базису эрозии краевые части равнин и террас (бровки склонов долин), сло-

**Рис. 3.** Дешифровочные признаки геологических процессов: а) космоснимки территории; б) фотографии обследованных участков: I – залесенные участки и редколесья; II – участки проявления термокарста; III – участки активизации эрозионных процессов; IV – торфяники; V – болота

**Fig. 3.** Interpretive signs of engineering-geological processes: a) satellite imagery of the area; b) photographs of sections: I – forested areas and woodlands; II – areas of thermokarst manifestations; III – areas of erosion intensification; IV – peatlands; V – swamps



женные талыми песчаными грунтами; Г (холмисто-увалистый) – расчлененные поверхности наиболее древних равнин, реже останцы древних отложений среди молодых осадков, сложенные мерзлыми глинистыми грунтами; Д (линейно-грядовый) – участки равнин с частым чередованием низких гряд, сложенных распученными глинистыми породами палеогена и заболоченных межгрядовых понижений, сложенные мерзлыми глинистыми грунтами и супесчаными грунтами; Е (техногенные грунты) – песчаные насыпи автодорог и отсыпки. По результатам дешифрирования космоснимков и инженерно-геологических изысканий выполнена экспертная оценка пораженности территории негативными инженерно-геологическими процессами (в баллах) в зависимости от типа местности (таблица). Баллы распределены следующим образом: 0 – негативные процессы практически отсутствуют по площади; 1 – присутствует местами или локально по площади; 2 – распространены по всей площади.

**Таблица.** Оценка пораженности территории негативными инженерно-геологическими процессами по типам местности

**Table.** Assessment of the territory damage by negative engineering-geological processes by terrain types

Типы местности Terrain type	Инженерно-геологические процессы Engineering-geological processes												Сумма баллов Total points			
	Заболачивание Bogging			Эрозия Erosion			Термоэрозия Thermal erosion			Криогенное пучение Frost heaving				Термокарст Thermokarst		
	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2		0	1	2
Озерно-болотный Lake-marsh																6
Хасырейный Drained lakes																4
Природно-дренированный Naturally drained																1
Техногенные грунты Man-made soils																3

На рис. 3 представлены дешифровочные признаки геологических процессов: на рис. 3.І – территория леса и редколесья, на рис. 3.ІІ представлена начальная стадия термокарста, на рис. 3.ІІІ представлен эрозионный процесс около автодорога вблизи р. Нюдя-Саловояха (техногенные грунты) и показана защита посредством сливных труб, торфяники, на рис. 3.ІV представлено болото.

Наиболее сложным является тип местности А (5 % территории), представленный пойменными и заболоченными участками (6 баллов); 16 % территории характеризуются условиями средней сложности для освоения (4 балла, тип местности Б – хасырейный); простыми для освоения являются типы местности Е (3 балла) и В (1 балл), соответственно 30 и 39 % протяженности трассы.

Основная часть трассы проходит по дренированному типу местности – В. Данный тип характеризуется преимущественно талыми глинистыми грунтами в верхней части разреза, т. е. в зоне заложения трубопровода. На возвышенных участках в средней части разреза появляются линзы супесей и песков, нижняя часть чаще песчанистая; в понижениях рельефа на поверхность выходят пески и супеси. Мерзлые грунты встречаются локально. Общая протяженность мерзлых грунтов по трассе – 1073,4 м, или 7 %, от общей длины участка – 16,066 км.

Неблагоприятными для строительства сооружений и прокладки трубопровода являются типы местности: А (озерно-болотный) и Б (хасырейный). Данные типы характеризуются широким распространением заболоченных участков (мощность торфа 1,2–2,5 м), сложенных глинистыми грунтами с отсутствием поверхностного стока. Общая протяженность составляет 3354,7 м, или 21 %, трассы. Типы Г, Д по трассе трубопроводов не встречены.

### Заключение

1. Изучение инженерно-геологических условий месторождения показало, что территория относится к сложной (III) категории. По категории опасности природных процессов территория месторождения относится к опасной по пучению, подтоплению и затоплению, умеренно опасной по сейсмичности. По совокупности проявления природных процессов относится к категории «опасная».
2. Составленная карта инженерно-геологических условий содержит комплексную характеристику геолого-геоморфологических, геокриологических и грунтовых условий исследуемой территории. Карта является основой для разработки карты районирования по условиям строительного освоения. Описаны участки с различной сложностью условий для освоения. Наличие мерзлых, нередко льдистых грунтов, торфов, опасных геологических процессов требует применения комплекса инженерных мероприятий, направленных на предотвращение и снижение их негативных воздействий на инженерные сооружения
3. Рекомендовано размещать площадки строительства и трассы линейных сооружений на хорошо дренированных суходольных участках распространения талых грунтов. На территории месторождения современная тенденция развития толщи ММГ в пределах древних элементов рельефа – на водоразделах характеризуется стабильным состоянием. На молодых элементах рельефа (долинные комплексы крупных рек) происходит активное промерзание талых грунтов, приводящее к появлению новообразованной мерзлоты – «перелетков», или к поднятию кровли ММГ на насыпных площадках строительства.

Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (средства ВИУ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты / В.Т. Трофимов, Ю.Б. Баду, Ю.К. Васильчук, П.И. Кашперук, В.Г. Фирсов. – М.: Наука, 1987. – 219 с.
2. Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г. О роли подхода при инженерно-геологическом районировании // Геозкология. – 1995. – № 1. – С. 86–95.
3. Голодковская Г.А. Принципы инженерно-геологической типизации месторождений полезных ископаемых // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – Вып. 5. – С. 355–369.
4. Дроздов Д.С., Дубровин В.А. Геозкологические проблемы нефтегазового недропользования в российской Арктике // Криосфера земли. – 2016. – Т. XX. – № 4. – С. 16–27.
5. Сулакшина Г.А., Васенева В.А., Цоцур Е.С. Инженерно-геологические условия строительства в районе Советского нефтяного месторождения // Известия Томского политехнического института. – 1975. – Т. 237. – С. 50–54.
6. Титков С.Н. Инженерно-геокриологическое картографирование при инженерно-геологических изысканиях для строительства магистральных трубопроводов в криолитозоне // Инженерные изыскания. – 2014. – № 4. – С. 42–48.
7. Инженерно-геологическое обеспечение технико-экономического обоснования строительства трансконтинентальных нефтепроводов / Н.В. Иванова, И.Л. Кузнецова, Ф.М. Ривкин, С.Е. Суходольский, И.В. Чехина // Криосфера Земли. – 2003. – Т. 7. – № 4. – С. 65–75.
8. Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 454 с.
9. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-43 – Новый Уренгой. Объяснительная записка / Ю.В. Брадучан, Е.П. Василенко, А.С. Воронин, Т.Е. Горелина и др. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 320 с.
10. Бочкарев В.С., Боярских Г.К., Нестеров И.И. Тектоническое строение Западно-Сибирской равнины // Тр. ВНИГНИ. – М.: Недра, 1980. – Вып. 218. – С.133–157.
11. Новиков Д.А. Геолого-гидрогеологические условия Берегового нефтегазоконденсатного месторождения // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 8. – С. 211–215.
12. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий для подготовки проектной и рабочей документации. – Тюмень: ООО «ТюменьПромИзыскания», 2017. – 266 с.
13. Мельников Е.С. Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции. – Новосибирск: Изд-во «Наука», Сибирское отделение, 1983. – 199 с.
14. Кукушкин С.Ю. Индикаторы антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы при освоении нефтегазоконденсатных месторождений севера Западной Сибири: дис. ... канд. геогр. наук. – СПб., 2016. – 200 с.
15. СП 11–105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. 2: Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. – М.: Госстрой России, 2000. – 94 с.
16. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. – М., 2018. – 56 с.
17. Stroková L.A. Methods of estimating surface settlement during driving of urban tunnels // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2010. – V. 47. – № 3. – P. 92–95.
18. Пургина Д.В., Строкова Л.А., Кузеванов К.И. Моделирование гидрогеологических условий для обоснования противооползневых мероприятий на участке набережной реки Камы в городе Пермь // Известия Томского политехнического университета. – 2016. – № 1. – Т. 327. – С. 116–127.
19. Stroková L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting In Land Subsidence while Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
20. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства участка газопровода «Сила Сибири» на участке Чаинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – № 4. – Т. 326. – С. 41–55.
21. Geodatabase and WebGIS project for long-term permafrost monitoring at the Vaskiny Dachi research station, Yamal, Russia / Y. Dvornikov, M. Leibman, B. Heim et al. // Polarforschung. – 2016. – V. 85 (2). – P. 107–115.
22. Active-layer thickness estimation from X-band SAR backscatter intensity / B. Widhalm, A. Bartsch, M. Leibman, A. Khomutov // The Cryosphere. – 2017. – № 11. – P. 483–496.
23. Circumpolar Mapping of Ground-Fast Lake Ice / A. Bartsch, G. Pointner, M.O. Leibman, Yu.A. Dvornikov, A.V. Khomutov, A.M. Trofaier // Frontiers in Earth Science. – 2017. – V. 5. – № 12. – P. 1–16.
24. Activation of Cryogenic Earth Flows and Formation of Thermocirques on Central Yamal as a result of Climate Fluctuations / A. Khomutov, M. Leibman, Yu. Dvornikov, A. Gubarkov, D. Mullanurov, R. Khairullin // Advancing Culture of Living with Landslides. Proceedings of World Landslide Forum / Eds. K. Mikoš, V. Vilimek, Y. Yin, K. Sassa. – Ljubljana, Slovenia, May 29 – June 2, 2017. – Ljubljana: Springer International Publishing AG, 2017. – V. 5. – P. 209–216.
25. Слагаева Е.А., Ермак А.А. Дешифрирование экзогенных процессов типичных тундр полуострова Ямал на примере территории района среднего течения реки Юрибей // Вестник Тюменского государственного университета. – 2014. – № 4. – P. 28–38.
26. Трофимов В.Т., Красилова Н.С. Инженерно-геологические карты. – М.: КДУ, 2018. – 383 с.
27. Методика мерзлотной съемки / под ред. В.А. Кудрявцева. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 358 с.
28. Методы региональных инженерно-геокриологических исследований для равнинных территорий (ВСЕГИНГЕО). – М.: Недра, 1986. – 207 с.
29. Гафаров Н.А. и др. Использование космической информации в газовой промышленности. – М.: ООО «Газпром экспо», 2010. – 132 с.

Поступила 16.03.2018 г.

## Информация об авторах

**Строкова Л.А.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Пургина Д.В.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Галева Э.И.**, магистрант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Курчатова А.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, директор Субарктического научно-учебного полигона ТюмНЦ СО РАН – ТюмГНГУ.

UDK 624.131

## EVALUATION OF ENGINEERING–GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS OF THE BEREGOVOE OIL AND GAS CONDENSATE FIELD

**Lyudmila A. Strokova**<sup>1</sup>,  
strokova@sibmail.com

**Darya V. Purgina**<sup>1</sup>,  
purgina\_darya@mail.ru

**Elmira I. Galeeva**<sup>1</sup>,  
holikaholika55@mail.ru

**Anna N. Kurchatova**<sup>2</sup>,  
kanni@igig.tgngu.tyumen.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Subarctic scientific training range, Tyumen industrial University,  
56, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to assess the existing engineering geological conditions, processes, and hazards, as well as the risks and impacts related to them with respect to the intended use of the site of the Beregovoe Field of Purovsky District, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. A necessary preliminary step in development of the project is the analysis of engineering-geological data of the construction site.

**The main aim** of the research is to create the engineering-geological map of the deposit for assessing the situation and forecasting the changes engineering geological conditions according to the results of the performed geotechnical investigations.

**Objects** of researches are surface features and subsurface earth materials for design and construction of the Beregovoe field exploration.

**Methods:** the analysis of engineering-geological surveys, detailed lithological-genetic analysis of the territory, taking into account the regularities of the spatial variability of the main indicators of engineering-geological conditions (composition of soils, their temperature, distribution of permafrost and engineering-geological processes).

**Results.** The authors identified six types of areas: A (lakes and marshes); B (drained lake); C (riverside); D (hilly ridge); E (linear ridge) and F (man-made soils). The results of the field works and laboratory investigations of geotechnical properties of soils allowed detailing a preliminary assessment of the engineering-geocryological conditions. The main part of the route passes through riparian areas C. The most unfavorable for construction of facilities and pipeline are terrain types: A (found locally in the lowlands, represented by marshes with a capacity of peat to 2,2 m) and B (has wide distribution, represented by wetlands, folded clay soils with no surface runoff). The types D and E are not met on the route. We recommend placing the linear structures of pipelines on well-drained upland sites spread thawed soils.

### Key words:

Soil, permafrost, dangerous cryogenic processes, engineering-geocryological mapping, engineering-geological conditions.

The research was carried out at Tomsk Polytechnic University within the Program of Enhancing Competitiveness of Tomsk Polytechnic University (VIU funds).

### REFERENCES

1. Trofimov V.T., Badu Yu.B., Vasilchuk Yu.K., Kashperjuk P.I., Firsov V.G. *Geokriologicheskoe rayonirovanie Zapadno-Sibirskoy plity* [Geocryological zoning of the West Siberian plate]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 219 p.
2. Trofimov V.T., Ziling D.G. O roli podkhoda pri inzhenerno-geologicheskoy rayonirovani [On the role of the approach to engineering-geological zoning]. *Geoecology*, 1995, vol. 1, pp. 86–95.
3. Golodkovskaya G.A. Printsipy inzhenerno-geologicheskoy tipizatsii mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Principles of engineering-geological typification of mineral deposits]. *Voprosy inzhenernoy geologii i gruntovedeniya* [Geology and soil science]. Moscow, Moscow State University Publ. house, 1983. Vol. 5, pp. 355–369.
4. Drozdov D.S., Dubrovin V.A. Geocological problems of oil and gas subsoil use in the Russian Arctic. *Earth's cryosphere*, 2016, vol. XX, no. 4, pp. 14–25.
5. Sulakshina G.A., Vaseneva V.A., Cocur E.S. Engineering-geological conditions of construction in the area of the Soviet oil fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1975, vol. 237, pp. 50–54. In Rus.
6. Titkov S.N. Engineering-geocryological mapping, geotechnical investigation for construction of trunk pipelines in the permafrost zone. *Engineering surveying*, 2014, vol. 4. pp. 42–48. In Rus.
7. Ivanova N.V., Kuznetsova I.L., Rivkin F.M., Sukhodolsky S.E., Chekina V.I. Engineering-geological provision of feasibility study for construction of transcontinental pipelines. *Earth's cryosphere*, 2003, vol. 7, no. 4, pp. 65–75. In Rus.
8. *Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir* [Geocryology of the USSR. Western Siberia]. Ed. by E.D. Ershov. Moscow, Nedra Publ., 1989. 454 p.
9. Braduchan Yu.V., Vasilenko E.P. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (trete po-*

- kolenie*). *Seriya Zapadno-Sibirskaya. List Q-43 – Novy Urengoy* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). A Series of West-Siberian. Sheet Q-43-New Urengoy]. St-Petersburg, Cartographic factory VSEGEI Publ., 2015. 320 p.
10. Bochkarev V.S., Boyarskikh G.K., Nesterov I.I. *Tektonicheskoe stroenie Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Tectonic structure of the West Siberian plain]. Moscow, VNIGNI Publ., 1980. Vol. 218, pp. 133–157.
  11. Novikov D.A. Geological and hydrogeological conditions of Beregovoe oil and gas condensate field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 8, pp. 211–215. In Rus.
  12. *Tekhnicheskii otchet po rezul'tatam inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy dlya podgotovki proektnoy i rabochey dokumentatsii* [Technical report on the results of engineering-geological surveys for preparation of project and working documentation]. Tyumen, TyumenPromIzyskaniya Publ., 2017. 266 p.
  13. Melnikov E.S. *Geokriologicheskie usloviya Zapadno-Sibirskoy gazonosnoy provintsii* [Permafrost conditions of the West Siberian gas-bearing province]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 1983. 199 p.
  14. Kukushkin S.Yu. *Indikator antropogennoy nagruzki na prirodno-territorialnye kompleksy pri osvoenii neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy severa Zapadnoy Sibiri*. Dis. Kand. nauk [Indicators of anthropogenic load on natural-territorial complexes in development of oil and gas deposits in the North of Western Siberia. Cand. Dis.]. St-Peterburg, 2016. 200 p.
  15. *SP 11–105–97. Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva. Ch. 2: Pravila proizvodstva rabot v rayonakh razvitiya opasnykh geologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh protsessov* [Set of rules 11–105–97. Engineering-geological surveys for construction. P. 2: Rules of works in the area of development of hazardous geological and engineering-geological processes]. Moscow, Gosstroy Rossii Publ., 2000. 94 p.
  16. *SP 115.13330.2016. Geofizika opasnykh prirodnykh vozdeystviy* [Set of rules 115.13330.2016. Geophysics of hazardous natural impacts]. Moscow, 2018. 56 p.
  17. Strokova L.A. Methods of estimating surface settlement during driving of urban tunnels *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2010, vol. 47, no. 3, pp. 92–95.
  18. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling hydrogeological conditions for antilandslide measures justification on the plot of the Kama river embankment in Perm. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 116–127. In Rus.
  19. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting In Land Subsidence While Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
  20. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Natural features of construction of the main gas pipeline «The Power of Siberia» on a site Chayandinskoye oil and gas field – Lensk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55. In Rus.
  21. Dvornikov Y., Leibman M., Heim B. Geodatabase and WebGIS project for long-term permafrost monitoring at the Vaskiny Dachi research station, Yamal, Russia. *Polarforschung*, 2016, vol. 85, no. 2, pp. 107–115.
  22. Widhalm B., Bartsch A., Leibman M., Khomutov A. Active-layer thickness estimation from X-band SAR backscatter intensity. *The Cryosphere*, 2017, no. 11, pp. 483–496.
  23. Bartsch A., Pointner G., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., Khomutov A.V., Trofaier A.M. Circumpolar Mapping of Ground-Fast Lake Ice. *Frontiers in Earth Science*, 2017, vol. 5, article 12, pp. 1–16.
  24. Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of Cryogenic Earth Flows and Formation of Thermocirques on Central Yamal as a Result of Climate Fluctuations. *Advancing Culture of Living with Landslides. Proceedings of World Landslide Forum*. Eds. K. Mikoš, V. Vilímek, Y. Yin, K. Sassa. Ljubljana, Slovenia, May 29 – June 2, 2017. Ljubljana, Springer International Publishing AG, 2017. Vol. 5, pp. 209–216.
  25. Slogoda E.A., Ermak A.A. Interpretation of exogenous processes in typical tundra of the Yamal peninsula (case study of the district in the middle Yuribey river). *Bulletin of Tyumen state University*, 2014, vol. 4, pp. 28–38. In Rus.
  26. Trofimov V.T., Krasilova N.S. *Inzhenerno-geologicheskie karty* [Engineering geological maps]. Moscow, KDU Publ., 2018. 383 p.
  27. *Metodika merzlotnoy semki* [Methodology of permafrost survey]. Ed. by V.A. Kudryavtsev. Moscow, Moscow State University Publ., 1979. 358 p.
  28. *Metody regionalnykh inzhenerno-geokriologicheskikh issledovaniy dlya ravninnykh territoriy* [Methods of regional engineering-geocryological research for lowland areas, VSEGINGEO]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 207 p.
  29. Gafarov N.A. *Ispolzovanie kosmicheskoy informatsii v gazovoy promyshlennosti* [Use of space information in the gas industry]. Moscow, Gazprom Expo Publ., 2010. 132 p.

Received: 16 March 2018.

#### Information about the authors

**Lyudmila A. Strokova**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Darya V. Purgina**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Elmira I. Galeeva**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Anna N. Kurchatova**, Cand. Sc., executive officer, Subarctic scientific training range, Tyumen Industrial University.

УДК 622.276.6

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ РАДИАЛЬНОГО БУРЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ ПЕРМСКОГО КРАЯ

Кочнев Александр Александрович<sup>1</sup>,  
sashakoch93@gmail.com

Зотиков Владимир Иванович<sup>1</sup>,  
vladimirzotikov@yandex.ru

Галкин Сергей Владиславович<sup>1</sup>,  
doc\_galkin@mail.ru

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

**Актуальность.** С целью стабилизации добычи нефти на месторождениях Пермского края, активно используются методы повышения нефтеотдачи. Среди мероприятий, направленных на увеличение продуктивности скважин, наибольшее применение получили соляно-кислотные обработки, гидроразрыв пласта, радиальное бурение. Для вовлечения в разработку не дренируемых участков в настоящее время применяют бурение боковых стволов, многоствольное бурение и различные виды гидроразрыва пласта. Однако подобные операции в связи с их высокой стоимостью не всегда экономически оправданы. Технология радиального бурения является менее затратной альтернативой указанным мероприятиям. Метод радиального бурения при правильном подборе скважин-кандидатов может оказаться наиболее эффективным. При успешном его применении можно задействовать не дренируемые пропластки, увеличив долю извлекаемых запасов. Эффективность радиального бурения определяется геолого-технологическими условиями скважин, вместе с тем в настоящее время нет четких критериев оценки условий применения данного метода. Анализ эффективности радиального бурения с разработкой рекомендаций к применению может значительно повысить практическую эффективность данного метода.

**Цель:** выявление геологических, гидродинамических и технологических критериев для успешного применения радиального бурения на месторождениях Пермского края.

**Объект:** нефтедобывающие скважины месторождений Пермского края, на которых проведены операции по радиальному бурению.

**Методика** исследования основана на использовании известных методов математической статистики.

**Результаты.** Проведен анализ эффективности технологии радиального бурения по Пермскому краю. Создана общая база по скважинам с радиальным бурением, в которую включены геологические, гидродинамические и технологические параметры. Выделены параметры, которые оказывают наиболее значимое влияние на успешность проведения мероприятия. Разработаны палетки для прогноза среднесуточного прироста дебита нефти от технологии радиального бурения на территории Пермского края.

### Ключевые слова:

Радиальное бурение, соляно-кислотная обработка скважин, нефтедобыча,  $t$ -критерий Стьюдента, дебит, методы повышения нефтеотдачи пласта.

### Введение

Большинство эксплуатационных объектов нефтяных месторождений Пермского края сегодня находится на третьей стадии разработки с падающей добычей (66 %). Остаточные запасы залежей при этом приурочены преимущественно к низкопроницаемым коллекторам, дренирование флюидов в которых затруднено. Для поддержания темпов добычи для таких эксплуатационных объектов применяются методы повышения нефтеотдачи пласта (ПНП). В Пермском крае среди геолого-технических мероприятий (ГТМ), направленных на увеличение продуктивности скважин, наибольшее применение получили соляно-кислотные обработки (СКО), гидроразрыв пласта (ГРП), радиальное бурение (РБ). В работе [1] приведены осредненные годовые показатели эффективности ГТМ последних лет, согласно которым для технологии СКО эффективность составляла от 38 до 48 %, для ГРП – от 38 до 49 %, для РБ – от 42 до 78 %. Эффективность ГТМ в работе [1] оценивалась как достиже-

ние запланированного дебита по нефти. Перечисленные выше технологии могут рассматриваться как конкурирующие при выборе ГТМ на скважинах. Выбор технологии должен базироваться на анализе ее эффективности в конкретных геолого-технологических условиях разработки.

К настоящему времени в Пермском крае за относительно короткий срок (около 10 лет) технология РБ заняла значительную нишу для скважин с падающей добычей, которые в конце своего срока службы дают очень малый дебит. При этом подбор скважин-кандидатов осуществляется согласно следующим основным требованиям: обводненность ниже 40 %, пластовое давление выше давления насыщения, дебит нефти ниже 10 т/сут. Радиальные каналы закладываются в направлении наибольшей плотности остаточных запасов.

Для Ножовской и Осинской групп месторождений технология РБ является основной, среди рассмотренных ГТМ. РБ может рассматриваться как альтернатива ГРП для скважин с более низкими

требованиями по качеству цемента или состояния эксплуатационной колонны. Кроме этого, технология РБ значительно более дешева в сравнение с ГРП [2], что особенно важно для скважин с небольшой нефтенасыщенной толщиной. Необходимо заметить, что в условиях старого фонда скважин с каждым годом все сложнее подобрать подходящие скважины для ГРП, что делает технологию РБ актуальной в перспективе [3].

Радиальное бурение является разработкой компании Rad Tech International Inc, первые опытно-промышленные работы технологии датируются концом 70-х гг. Принцип работы РБ заключается в том, что на нужную глубину спускается инструмент для фрезерования обсадной колонны, затем гибкую фрезу вынимают и спускают гибкую насосно-компрессорную трубу с гидромониторной насадкой. Насосами подается жидкость под большим давлением, и за счет гидромониторного воздействия намывается радиальный канал [4]. Время проходки составляет около 20 минут, длина канала не более 100 м, количество радиальных каналов не ограничено, но чаще от 2 до 4 штук. После бурения радиальные каналы промываются кислотными составами для прочистки от кольматации.

Данный метод не только интенсифицирует добычу, но и повышает степень нефтеизвлечения запасов, вовлекая в добычу неработающие пропластки [5, 6]. При этом радиальные каналы могут увеличивать производительность скважин в 3–4 раза. Согласно опыту работ [7–10], технология РБ в большей степени эффективна в условиях высоковязких нефтей, для которых наиболее вероятно образование застойных зон в малопроницаемых интервалах геологического разреза. В идеале технология создания радиальных глубокопроникающих каналов фильтрации позволяет многократно увеличить площадь фильтрации флюидов к стволу скважины. Согласно данным работы [11], РБ может рассматриваться, в том числе, как альтернатива бурению боковых стволов со сверхмалыми радиусами.

Существует мнение, что эффективность радиального бурения напрямую зависит от эффективности кислотной обработки, проведенной после РБ. Однако в работах [12, 13] для территории исследования по результатам статистического анализа установлено, что метод РБ позволяет достичь большего прироста дебита нефти, чем СКО.

В настоящее время для месторождений Пермского края отмечен некоторый спад эффективности РБ. Кроме этого, нет четких критериев применимости данного метода. Необходимо более детально подходить к выбору скважин, учитывая геолого-технологические особенности разработки объектов [14]. Международный опыт выявления оптимальных геолого-технологических параметров для технологии РБ рассмотрен в работах [15–17].

### Анализ эффективности технологии радиального бурения

Несмотря на положительную в целом эффективность внедрения РБ в Пермском крае, необходимо заметить, что в период резкого увеличения количества мероприятий РБ доля ГТМ, признанных успешными, заметно снижалась (до 42 %). При более строгом планировании мероприятий РБ с уменьшением их количества годовые показатели успешности увеличились до 68–78 %. Все это показывает необходимость тщательного выбора объектов для реализации технологии РБ и комплексного анализа эффективности метода. Результатом этого будет выделение оптимальных геолого-технологических условий его внедрения. Отдельной задачей является оценка динамики темпов снижения дебитов нефти и времени технологического эффекта от РБ.

По состоянию на 01.01.2017 г. на месторождениях Пермского края проведено 590 операций РБ на 538 скважинах (рис. 1).

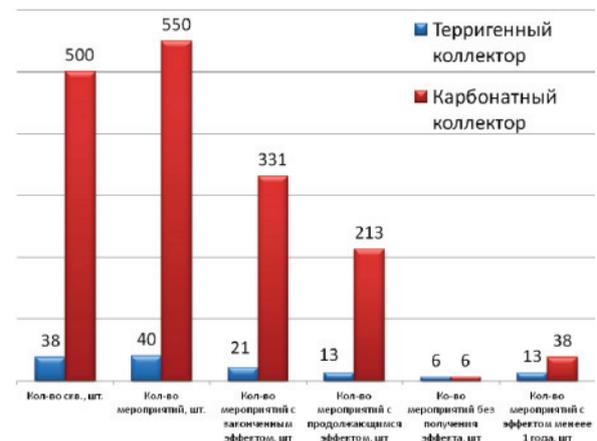


Рис. 1. Общая характеристика применения РБ

Fig. 1. General characteristics of the radial drilling (RD) application

Из рис. 1 видно, что число операций РБ в карбонатном коллекторе (550 штук) на порядок превышает их количество в терригенном (40 штук). В целом все осредненные показатели эффективности значительно выше для карбонатных коллекторов. Средняя дополнительная добыча нефти составила 4573 т на скважину в карбонатных против 3555 т в терригенных коллекторах. Причем для терригенных коллекторов эффект от РБ продолжался менее 1 года в трети мероприятий, а в 15 % ГТМ эффект составил менее 2 т.

Для карбонатных коллекторов доля ГТМ с эффектом менее 1 года составила 7 %, а доля отрицательных результатов составила лишь 1 %. Помимо большей наработки технологии, основной причиной большей эффективности РБ в карбонатном разрезе является ее комплексирование с кислотной обработкой. В терригенных коллекторах тех-

нология РБ во всех случаях не дополнялась СКО. Также среди возможных причин снижения эффективности метода в терригенном разрезе можно выделить набухание глин, кольматацию каналов, эффект Жамена, а также часто высокую степень выработки запасов в момент реализации РБ.

Разная эффективность и технология проведения ГТМ определяет необходимость отдельного изучения карбонатных и терригенных коллекторов при анализе эффективности РБ.

При анализе дополнительной добычи нефти ( $Q_{\text{доп}}$ ) и времени эффекта ( $T_{\text{ГТМ}}$ ) от ГТМ необходимо отдельно изучать скважины с закончившимся и с не закончившимся эффектом. Так, для скважин с закончившимся эффектом общая величина  $Q_{\text{доп}}$  составила 891,1 тыс. т против 1675 тыс. т для скважин с не закончившимся эффектом. Средняя продолжительность эффекта по скважинам с закончившимся эффектом составила 818 для карбонатных и 667 суток для терригенных пластов. По скважинам с не законченным эффектом среднее время эффекта (даже несмотря на то, что он еще не закончен) составляет 1522 и 1070 суток для карбонатных и терригенных объектов. Таким образом, именно скважины с незаконченным эффектом имеют наибольший эффект от ГТМ. Их недоучет приведет не только к потере важной информации, но и к систематическому занижению истинной эффективности метода. С учетом этого, для скважин с незаконченным эффектом использовалась вся фактическая информация, для оценки их показателей на поздних этапах использовался линейный тренд снижения добычи нефти.

#### Оценка влияния геологических и гидродинамических параметров на эффективность радиального бурения

Для статистического анализа использовались следующие параметры скважин: нефтенасыщенная толщина ( $h_n$ , м); пористость ( $K_n$ , %); начальная нефтенасыщенность ( $K_{н, \text{д.ед.}}$ ); проницаемость по ГДИ ( $k_{\text{гди}}$ , мкм<sup>2</sup>); коэффициент песчаности ( $K_{\text{песч}}$ , д.ед.); коэффициент расчлененности ( $K_{\text{расч}}$ , ед.); вязкость и плотность нефти в пластовых условиях ( $\mu$ , мПа·с;  $\rho_n$ , г/см<sup>3</sup>); объемный коэффициент нефти ( $b$ , д.ед.); содержание парафина в нефти (ПР, %); средняя газонасыщенность ( $G$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>); гидропроводность призабойной зоны пласта (ПЗП), ( $\epsilon_{\text{пзп}}$ , мкм<sup>2</sup>·см/мПа·с); гидропроводность удаленной зоны пласта (УЗП) ( $\epsilon_{\text{узп}}$ , мкм<sup>2</sup>·см/мПа·с); коэффициент проницаемости ПЗП ( $k_{\text{пзп}}$ , мкм<sup>2</sup>); коэффициент проницаемости УЗП ( $k_{\text{узп}}$ , мкм<sup>2</sup>); пьезопроводность ( $\chi$ , см<sup>2</sup>·с); пластовое давление ( $P_{\text{пл}}$ , МПа); забойное давление ( $P_{\text{заб}}$ , МПа); давление насыщения ( $P_{\text{нас}}$ , МПа); средняя толщина единичного нефтенасыщенного пропластка ( $h_{\text{пр}}$ , м, рассчитывалась как отношение  $h_n$  к количеству нефтенасыщенных пропластков); скин-фактор скважины ( $S$ ).

Первоначально для установления зависимостей между геологическими и технологическими параметрами использовался корреляционный ана-

лиз. Однако статистически значимых коэффициентов корреляции установить не удалось. Самый высокий коэффициент корреляции отмечен между средним приростом за первый год и остаточной плотностью запасов ( $r=0,52$ ). Зависимость показывает, что чем больше плотность извлекаемых запасов на скважину, тем больший прирост от радиального бурения за первый год. Для оценки влияния геолого-технологических параметров на эффективность РБ проведена проверка гипотезы о равенстве средних значений в двух выборках с помощью  $t$ -критерия Стьюдента. Под показателями эффективности принимались: суммарная дополнительная добыча нефти от РБ, среднесуточный прирост дебита, продолжительность эффекта и максимальный дебит нефти после РБ.

**Таблица 1.** Влияние геологических факторов на параметры добычи нефти для скважин с карбонатным коллектором

**Table 1.** Influence of geological factors on oil production parameters for wells with carbonate reservoir

Дополнительная добыча нефти, т Additional oil production, t	<2200	>2200	$t$ -критерий $t$ -value	$p$	$N_1$	$N_2$
$K_n$ , %	13,8	14,1	-1,8	0,06	270	264
$K_{\text{песч}}$ , д.ед. (u.f)	0,37	0,38	-1,7	0,09	275	271
$\mu$ , мПа·с (mPa·s)	16,6	20,2	-2,0	<b>0,04</b>	275	271
$\rho_n$ , г/см <sup>3</sup> (g/sm <sup>3</sup> )	0,85	0,86	-1,7	0,07	274	271
$b$ , д.ед. (u.f)	1,08	1,07	1,8	0,07	275	271
$G$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	42,2	36,6	1,9	<b>0,05</b>	274	271
Среднесуточный прирост, т/сут Growth factor, t/day	<2,7	>2,7	$t$ -критерий $t$ -value	$p$	$N_1$	$N_2$
$K_n$ , д.ед. (u.f)	0,741	0,754	-2,7	<b>&lt;0,01</b>	278	256
$K_{\text{расч}}$ , ед. (u)	6,5	7,3	-2,2	<b>0,02</b>	279	261
$\mu$ , мПа·с (mPa·s)	17,0	19,9	-1,7	0,08	279	261
ПР, %	3,4	3,5	-1,7	0,07	278	261
$P_{\text{нас}}$ , МПа (MPa)	9,0	9,5	-2,8	<b>&lt;0,01</b>	279	260
Продолжительность эффекта от РБ, сут Duration of the effect of RD, day	<870	>870	$t$ -критерий $t$ -value	$p$	$N_1$	$N_2$
$K_n$ , %	13,7	14,1	-2,1	<b>0,03</b>	264	270
$K_{\text{песч}}$ , д.ед. (u.f)	0,3	0,4	-2,0	<b>0,04</b>	269	277
$\rho_n$ , г/см <sup>3</sup> (g/sm <sup>3</sup> )	0,8	0,9	-1,8	0,06	268	277
$b$ , д.ед. (u.f)	1,1	1,1	2,0	<b>0,04</b>	269	277
ПР, %	3,4	3,5	-1,8	0,07	268	277
$G$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	41,8	37,2	1,6	0,10	268	277
Мак дебит нефти после РБ, т/сут Max oil production rate after RD, t/day	<10	>10	$t$ -критерий $t$ -value	$p$	$N_1$	$N_2$
$h_n$ , м (m)	5,8	7,8	-4,1	<b>&lt;0,01</b>	281	261
$K_n$ , д.ед. (u.f)	0,74	0,75	-1,5	0,10	282	258
$K_{\text{расч}}$ , ед. (u)	6,3	7,6	-3,6	<b>&lt;0,01</b>	283	263
$P_{\text{нас}}$ , МПа (MPa)	9,0	9,5	-2,8	<b>&lt;0,01</b>	283	262

**Таблица 2.** Влияние гидродинамических факторов на параметры добычи нефти для скважин с карбонатным коллектором

**Table 2.** Influence of hydrodynamic factors on oil production parameters for wells with carbonate reservoir

Дополнительная добыча нефти, т Additional oil production, t	<2480	>2480	t-критерий t-value	<i>p</i>	<i>N</i> <sub>1</sub>	<i>N</i> <sub>2</sub>
$\epsilon_{плн}$ , мкм <sup>2</sup> ·см/(МПа·с)	1,2	2,0	-2,3	<b>&lt;0,01</b>		
$\chi$ , см <sup>2</sup> ·с (см <sup>2</sup> ·с)	120,5	213,0	-1,8	<b>0,07</b>	171	171
<i>P</i> <sub>заб</sub> , МПа (МПа)	4,5	5,2	-2,4	<b>0,02</b>		
скин-фактор <i>S</i>	-2,8	-1,7	-3,1	<b>&lt;0,01</b>		
Среднесуточный эффект, т/сут Growth factor, t/day	< 2,7	> 2,7	t-критерий t-value	<i>p</i>	<i>N</i> <sub>1</sub>	<i>N</i> <sub>2</sub>
$\epsilon_{эпл}$ , мкм <sup>2</sup> ·см/МПа·с (mkm <sup>2</sup> ·sm/mPa·s)	0,9	2,3	-3,6	<b>&lt;0,01</b>	177	165
<i>K</i> <sub>прод</sub> , м <sup>3</sup> /сут/МПа (m <sup>3</sup> /d/MPa)	1,2	2,0	-2,7	<b>&lt;0,01</b>	120	135
<i>k</i> <sub>эпл</sub> , мкм <sup>2</sup> (mkm <sup>2</sup> )	0,027	0,061	-1,9	<b>0,06</b>	176	163
$\chi$ , см <sup>2</sup> ·с (см <sup>2</sup> ·с)	86,9	252,4	-3,2	<b>&lt;0,01</b>	177	165
<i>P</i> <sub>плн</sub> , МПа (МПа)	10,3	11,2	-2,5	<b>0,01</b>	177	164
<i>P</i> <sub>заб</sub> , МПа (МПа)	4,2	5,6	-5,1	<b>&lt;0,01</b>	177	165
скин-фактор <i>S</i>	-2,8	-1,7	-3,4	<b>&lt;0,01</b>	177	165
Продолжительность эффекта, сут Duration of the effect of RD, day	<900	>900	t-критерий t-value	<i>p</i>	<i>N</i> <sub>1</sub>	<i>N</i> <sub>2</sub>
<i>k</i> <sub>плн</sub> , мкм <sup>2</sup> (mkm <sup>2</sup> )	0,068	0,039	1,8	<b>0,07</b>	66	73
<i>P</i> <sub>плн</sub> , МПа (МПа)	10,3	11,1	-2,0	<b>0,04</b>	169	172
скин-фактор <i>S</i>	-2,6	-1,8	-2,2	<b>0,02</b>	170	172
Мак дебит нефти, т/сут Max oil production rate after RD, t/day	<10	>10	t-критерий t-value	<i>p</i>	<i>N</i> <sub>1</sub>	<i>N</i> <sub>2</sub>
$\epsilon_{эпл}$ , мкм <sup>2</sup> ·см/МПа·с (mkm <sup>2</sup> ·sm/mPa·s)	0,9	2,2	-3,5	<b>&lt;0,01</b>	161	181
<i>K</i> <sub>прод</sub> , м <sup>3</sup> /сут/МПа (m <sup>3</sup> /d/MPa)	1,1	2,1	-3,4	<b>&lt;0,01</b>	114	141
$\chi$ , см <sup>2</sup> ·с (см <sup>2</sup> ·с)	86,3	238,4	-2,9	<b>&lt;0,01</b>	161	181
<i>P</i> <sub>плн</sub> , МПа (МПа)	10,3	11,1	-2,0	<b>0,04</b>	161	180
<i>P</i> <sub>заб</sub> , МПа (МПа)	4,2	5,4	-4,5	<b>&lt;0,01</b>	161	181

В табл. 1–3 приведены результаты расчета *t*-критерия. Жирным шрифтом для показателей выделены значения с достигаемым уровнем значимости *p* ниже 0,05, при котором с вероятностью более 95 % можно утверждать о различиях в рассмотренных выборках. В этом случае исследуемый параметр оказывает статистически значимое (неслучайное) влияние на различия показателей в выборках. Курсивом выделены значения с *p* в диапазоне от 0,05 до 0,10, при которых влияние также существует, но несколько ниже. Символами *N*<sub>1</sub> и *N*<sub>2</sub> в табл. 1–3 обозначены объемы выборки соответственно для первой и второй групп, *t*-value – значение *t*-критерия. Все скважины и соответствующие им параметры разделены на две примерно равные

выборки по одному из показателей эффективности. Статистически незначимые результаты в таблицах не приведены.

**Таблица 3.** Влияние геологических факторов на продолжительность эффекта для скважин с терригенным коллектором

**Table 3.** Influence of geological factors on duration of the effect for wells with a terrigenous reservoir

Продолжительность эффекта от РБ, сут Duration of the effect of RD, day	<180	>180	t-критерий t-value	<i>p</i>	<i>N</i> <sub>1</sub>	<i>N</i> <sub>2</sub>
<i>K</i> <sub>нр</sub> , %	17,5	15,2	2,1	0,05	17	20
<i>K</i> <sub>нр</sub> , д.ед. (u.f)	0,840	0,786	1,5	0,12	19	21
<i>k</i> <sub>плн</sub> , мкм <sup>2</sup> (mkm <sup>2</sup> )	0,333	0,210	1,8	0,07	19	21
<i>K</i> <sub>расч</sub> , ед. (u)	5,7	3,6	2,8	<0,01	18	21
<i>b</i> , д.ед. (u.f)	1,1	1,2	-1,8	0,06	19	21
<i>h</i> <sub>нр</sub> , м (m)	0,9	1,8	-2,2	0,03	19	21

Обобщая результаты проведенного статистического анализа, можно сделать следующие выводы:

- Наиболее значимое влияние на технологическую эффективность РБ оказывают:
    - нефтенасыщенная толщина;
    - вязкость нефти;
    - расчлененность;
    - коэффициент песчаности;
    - пористость;
    - проницаемость УЗП;
    - гидропроводность УЗП;
    - скин-эффект;
    - пьезопроводность;
    - коэффициент продуктивности;
    - средняя толщина единичного нефтенасыщенного пропластка.
  - По скважинам с карбонатным коллектором (табл. 1) можно сделать выводы, что прирост дополнительной добычи от РБ в целом выше при лучших коллекторских свойствах пород (*K*<sub>плн</sub>, *K*<sub>песч</sub>), в более расчлененном разрезе, а также для менее газонасыщенных (то есть потенциально более вязких) нефтей. Среднесуточный прирост добычи нефти выше при больших нефтенасыщенных толщинах и в более расчлененном разрезе. Продолжительность эффекта выше при лучших коллекторских свойствах залежи (*K*<sub>плн</sub>, *K*<sub>песч</sub>, *h*<sub>нр</sub>) и больших вязкостях нефти. Чем больше нефтенасыщенные толщины, расчлененность разреза, а также выше давление насыщения, тем выше значения максимального дебита нефти после РБ.
- В целом, обобщая выше сказанное, для карбонатных залежей технология РБ более эффективна в условиях высокой расчлененности разреза и более вязких нефтей. Именно при таких условиях наиболее вероятно вовлечение в дренирование дополнительных ранее застойных пропластков. При этом лучшие ФЕС коллекторов (*K*<sub>плн</sub>, *K*<sub>песч</sub>, *h*<sub>нр</sub>), характеризуя потенциал работы скважины, также

способствуют повышению эффективности технологии.

Объем дополнительной добычи (табл. 2) выше при более высоких значениях продуктивности и гидропроводности ПЗП, пьезопроводности пласта, потенциала забойного давления, при относительно ухудшенном состоянии ПЗП. Статистически значимое влияние на среднесуточный прирост оказывают все гидродинамические параметры. Чем больше энергетический потенциал залежи (высокие  $P_{пл}$ ,  $P_{заб}$ ) и относительно хуже состояние ПЗП, тем больший технологический эффект наблюдается от применения технологии РБ.

Продолжительность эффекта выше при более высоких забойных и пластовых давлениях, в условиях относительно ухудшенных ПЗП (параметр  $S$ ). Чем выше значения гидродинамических параметров и давлений, тем выше значение максимального дебита нефти после РБ.

3. По скважинам с **терригенным коллектором** (табл. 3) можно сделать вывод, что статистически значимое влияние геологических параметров установлено только на продолжительность эффекта от РБ. Время эффекта технологии РБ в терригенных коллекторах больше при худших коллекторских свойствах пород ( $K_n$ ,  $K_n$ ,  $k_{гид}$ ), при меньшей расчлененности разреза и большей толщине единичных пропластков.

Для скважин с терригенным коллектором данные по гидродинамическим параметрам пласта есть лишь по 11 скважинам, поэтому статистический анализ по ним не является корректным. В целом для оценки эффективности РБ в условиях терригенного коллектора на настоящий момент мало фактического материала.

4. Влияние геологических и гидродинамических параметров более статистически значимо в карбонатных коллекторах, чем в терригенных. Основной причиной этого является то, что бурение радиального канала в карбонатных коллекторах всегда сопровождается СКО, при этом высокая расчлененность карбонатного разреза способствует при РБ вовлечению в дренирование новых пропластков. В связи с тем, что эффективность СКО в терригенных коллекторах значительно ниже, для них кислотные обработки на изученном фонде скважин с РБ не проводились. Кроме этого, снижению продуктивности скважин в терригенном коллекторе способствуют осыпи канала, а также набухание глин при гидромониторном воздействии.

#### **Оценка влияния технологических параметров на эффективность технологии радиального бурения**

В отчетности нефтедобывающих предприятий к технологии РБ, в том числе, относят мероприятия, проводимые в новом интервале перфорации. Очевидно, что при этом к работе приобщаются пропластки с наиболее высокими остаточными запасами. Соответственно в этом случае эффект будет обусловлен не столько РБ, сколько увеличением ох-

вата пласта вытеснением нефти по толщине. Для подтверждения этого скважины были разделены на группы с проведением РБ в старом и новом интервале перфорации. В результате для рассмотренных групп установлены статистически значимые различия.

По максимальному дебиту после РБ средние значения различаются на 2,2 т/сут (11,4 и 13,6 т/сут соответственно) при  $p=0,03$ . По времени работы с эффектом различия в средних значениях 239 суток (средние значения 1028 и 1267 сут) при  $p=0,02$ . Также установлены значимые различия (4303,7 против 5724,3 тонн) по величинам дополнительной добычи ( $p=0,14$ ). Таким образом, работы в новом интервале характеризуются ощутимо большим эффектом, ввиду чего при оценке эффективности РБ такие скважины надо исключать из анализа. Это же относится к скважинам с дополнительным дострелом пропластков, при котором эффект в основном будет определяться увеличением работающей толщины пласта. В целом необходимо заметить, что дострелы интервалов перфорации не относятся к тематике данной работы, а при статистическом анализе их необходимо вычленять и исключать из обучающей выборки.

Очевидно, что значительное влияние на эффективность любого мероприятия на скважине должны оказывать предыдущие ГТМ. Для таких скважин часть потенциального прироста уже получено от предыдущих ГТМ, что закономерно снижает эффект и должно учитываться при планировании мероприятий. Для карбонатных объектов в Пермском крае длительное время основным методом ПНП являлась соляно-кислотная обработка. Анализ влияния проведенных ранее СКО на эффективность РБ проводился за период с 1997 г. по настоящее время. Все скважины с технологией РБ были разделены на группы: с ранее проведенной ( $N_1=111$ ) и без СКО ( $N_2=219$ ).

В результате установлено, что по скважинам с ранее проведенной СКО эффект от РБ по показателям дополнительной добычи (2192,2 против 2957,8 т) и среднесуточному приросту (2,5 т/сут против 3,1 т/сут) значительно ниже. Этот факт необходимо учитывать при проектировании РБ на скважинах, а также при прогнозных расчетах экономической эффективности. С учетом этого основной для анализа эффективности технологии РБ принималась выборка скважин, для которых данное ГТМ является первым (219 скважин). Скважины с повторными ГТМ исключались из статистического анализа, для таких скважин предлагается вводить понижающую поправку в технологических показателях эффекта.

#### **Разработка методики прогноза эффекта от технологии РБ**

С целью прогнозирования эффекта от технологии РБ для скважин с карбонатным коллектором построены палетки динамики темпа падения прироста дебита. Необходимо заметить, что карбона-

тные коллекторы для территории исследования весьма неоднородны как по своим структурным, так и фильтрационно-емкостным свойствам. Анализ показывает целесообразность разделения статистической выборки на три группы в зависимости от возраста: башкирского, турнейского и фаменского. Эффективность технологии РБ оценивалась отдельно для выделенных групп карбонатных коллекторов.

Коллекторы башкирского возраста преимущественно представляют собой биоморфно-водорослевые, фораминиферовые разности известняков. Высокоперспективные на наличие углеводородов земли комплекса приурочены к рифогенным зонам Камско-Кинельской системы прогибов в южной половине территории и в Соликамской депрессии. Коллекторы относятся к поровому типу, пористость представлена внутрiformенными и межформенными пустотами. Поры в основном крупные, в разрезе круглые, открытые [18].

Залежи турнейского комплекса приурочены к структурам облекания рифогенных сооружений или к тектоногенным поднятиям на юге Пермского края. Формирование коллекторов происходило преимущественно в условиях мелкого моря с устойчивым медленным опусканием дна морского бассейна, в процессе которого происходило накопление слоистой толщи карбонатных осадков. Комплекс сложен слоистыми известняками и доломитами с включением гипсов и ангидритов.

Залежи фаменских отложений представляют собой скопления пористых и кавернозных коллекторов в теле позднедевонских рифовых сооружений Соликамской депрессии. На коллекторские свойства фаменских отложений в большой мере оказывают влияние трещиноватость и кавернозность пород [19, 20]. При этом на одной и той же залежи могут быть встречены интервалы и с поро-

вым, и с трещинным типом коллектора, что определяется литолого-фациальными условиями осадконакопления [21].

На рис. 2–4 отдельно для залежей пластов Бш, Т и Фм построены палетки динамики среднесуточного прироста дебита от РБ во времени. При этом для каждого типа залежей вся выборка разбита на классы по показателю «общая дополнительная добыча от РБ». По всем скважинам в каждом классе взято среднее значение прироста дебита по годам эффекта начиная с года проведения мероприятия. В результате построена линия падения среднесуточного прироста дебита по годам. На основании значений начальных приростов ГТМ можно прогнозировать среднесуточный прирост по годам, время эффекта и дополнительную добычу. При этом предлагается использовать следующий алгоритм. Значение начального прироста откладывается на палетке, и проводится конгруэнтная линия падения эффекта без пересечений с существующими линиями. Палетки по объектам представлены на рис. 2–4.

На основании рис. 2–4 можно сделать вывод, что для залежей рифового типа пласта Фм (рис. 4) эффект, как правило, наиболее значителен в первый год, но имеет высокий темп падения и наименее продолжителен во времени (не более 8 лет). Для залежей пластов Бш (рис. 2) и Т (рис. 3) время эффекта может достигать 11 лет. Для турнейских залежей снижение эффекта характеризуется наименьшим темпом падения добычи. Соответственно при одинаковом начальном приросте для залежей пласта Т общая дополнительная добыча ожидается выше. С помощью представленных палеток можно прогнозировать во времени приросты добычи нефти, что позволяет оценить экономическую эффективность метода.

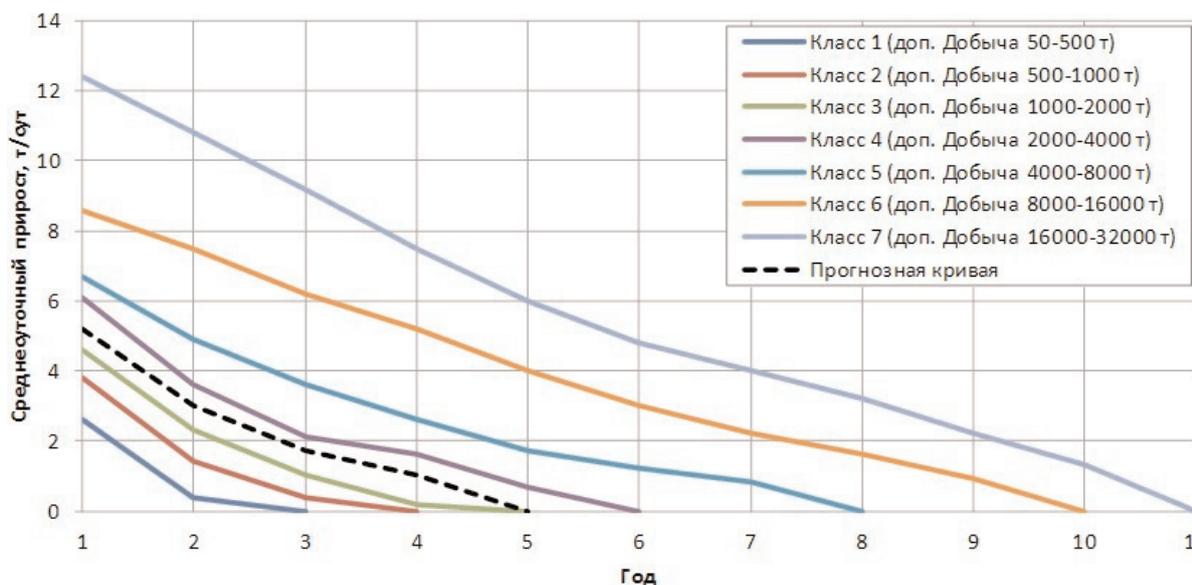


Рис. 2. Палетка прогноза среднесуточного прироста нефти. Объект Бш

Fig. 2. Schedule of oil average daily growth forecast. The object Bs

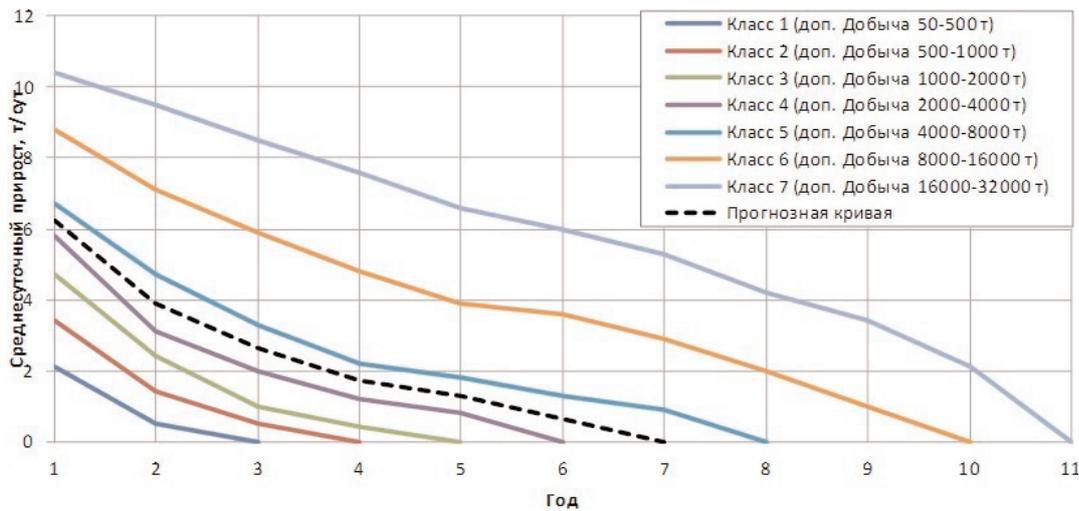


Рис. 3. Палетка прогноза среднесуточного прироста нефти. Объект Т

Fig. 3. Schedule of oil average daily growth forecast. The object T

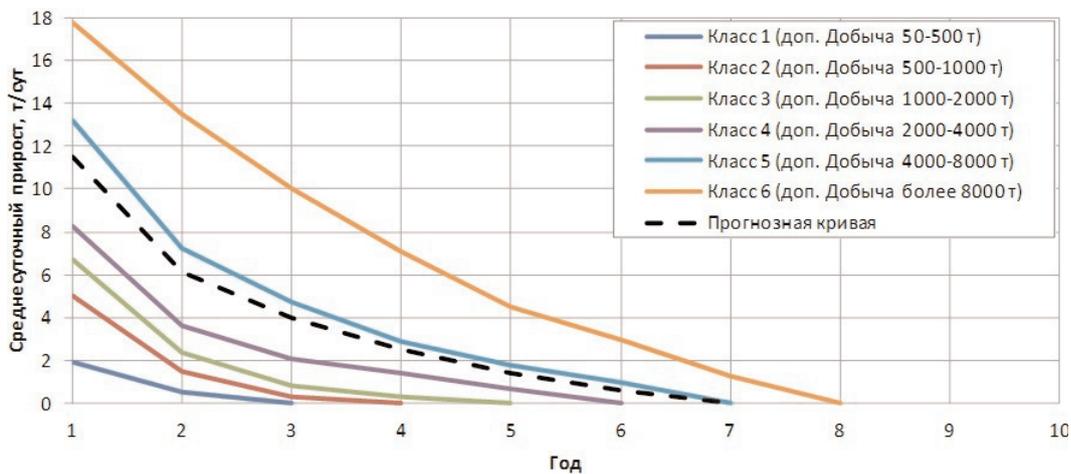


Рис. 4. Палетка прогноза среднесуточного прироста нефти. Объект Фм

Fig. 4. Schedule of oil average daily growth forecast. The object Fm

### Заключение

В ходе исследований создана общая база, включающая все скважины, на которых проводилась технология РБ, а также соответствующие им геологические, гидродинамические и технологические параметры. Проведен анализ эффективности технологии для месторождений Пермского края. Выявлены возможные причины низкой эффективности технологии, а также геологические, гидродинамические и технологические параметры, которые оказывают наибольшее влияние на показатели технологической эффективности радиального бурения для скважин с карбонатным типом коллектора.

Установлено, что для карбонатных коллекторов технология РБ более эффективна в условиях высокой расчлененности разреза, при повышенных вязкостях нефти и лучших ФЕС коллекторов ( $K_{п}$ ,  $K_{песч}$ ,  $h_{пр}$ ). Технология РБ эффективна в условиях скважин с ухудшенным состоянием ПЗП, так как направлена именно на решение данной проблемы. Также положительно влияют на потенциа-

льный эффект от технологии высокие гидродинамические показатели УЗП и энергетический потенциал залежи (высокие  $P_{пл}$ ).

В терригенном коллекторе установлено влияние геологических параметров только на время эффекта, которое выше при худших коллекторских свойствах пород ( $K_{п}$ ,  $K_{п}$ ,  $k_{рлн}$ ), при меньшей расчлененности разреза и большей толщине единичных пропластков.

Проведена оценка технологических особенностей на эффективность РБ. Установлена необходимость исключения из анализа мероприятий, проводимых в новых интервалах перфорации и при дострелах пластов. Установлено влияние проведенных ранее СКО на эффективность последующего проведения РБ.

Для залежей пластов Бш, Т, Фм построены палетки динамики среднесуточного прироста дебита от РБ во времени, позволяющие оценить вероятное время эффекта и спрогнозировать конечную дополнительную добычу от РБ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ проведения геолого-технических мероприятий по увеличению продуктивности добывающих скважин на нефтяных месторождениях Пермского края / П.Ю. Илюшин, Р.М. Рахимзянов, Д.Ю. Соловьев, И.Ю. Колычев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – Т. 14. – № 15. – С. 81–89.
2. Павельева О.Н., Попова Ж.С. Анализ эффективности применения усовершенствованной технологии бурения глубоких радиальных каналов на Вахитовском месторождении // Геология и нефтегазовость Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации): материалы десятой международной научно-технической конференции (посвященной 60-летию Тюменского индустриального университета). – Тюмень, 2016. – С. 112–115.
3. Сабитов Р.Р., Швечиков Е.Д. Модель принятия решений на основе линейной регрессии для планирования повторного ГПП объекта ЮВ 1 Нивагальского месторождения // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 3. – С. 122–127.
4. Maximum drillable length of the radial horizontal micro-hole drilled with multiple high-pressure water jets / Huanpeng Chi, Gensheng Li, Zhongwei Huang, Shouceng Tian, Xianzhi Song // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – V. 26. – 2015. – P. 1042–1049.
5. A numerical simulator developed for modeling permeability control for enhanced oil recovery / T. Brantson, B. Ju, Y. Yang, J. Chi // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 159. – P. 360–375.
6. Иванов В.А. Система разработки малопродуктивного зонально-неоднородного нефтяного пласта // НТЖ Нефтепромысловое дело. – 2012. – № 8. – С. 5–11.
7. Field production results with the ultrashort radius radial system in unconsolidated sandstone formations / W. Dickinson, R. Dickinson, J. Nees, E. Dickinson, H. Dykstra // Proc. of the 5<sup>th</sup> UNITAR International Conference on Heavy Crude and Tar Sands. – Caracas, Venezuela, 1991. – V. II. – P. 307–326.
8. Dickinson W., Dykstra H., Nodlund R. Coiled-tubing radials placed by water-jet drilling: Field results, theory and practice // SPE. – 1993. – № 26348. – P. 343–355.
9. Dickinson W., Dykstra H., Nees J.M. The Ultrashort Radius Radial System Applied to Thermal Recovery of Heavy Oil // SPE. – 1992. – № 24087. – P. 56–59.
10. Dickinson W., Dickinson R. Horizontal Radial Drilling System // SPE. – 1985. – № 13949. – P. 36–39.
11. Бурение глубоких радиальных каналов. Вскрытие продуктивных пластов низкопроницаемых коллекторов / Н. Демяненко, А. Серебренников, П. Повжик, М. Галай, Д. Третьяков, С. Ключков // Oil and Gas Journal. – 2016. – № 7. – С. 52–56.
12. Распопов А.В., Кондратьев С.А., Новокрещенных Д.В. Влияние геолого-физических условий на эффективность бурения радиальных каналов в околоскважинную зону пласта // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 3. – С. 78–79.
13. Новокрещенных Д.В., Распопов А.В. Перспективы развития технологий радиального вскрытия пласта на месторождениях Пермского края // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 54–57.
14. Мухаметшин В.В. Устранение неопределенностей при решении задач воздействия на призабойную зону скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 40–50.
15. Elliott S. Coiled-tubing method drills radial laterals to improve oil production from a depleted reservoir // World Oil. – 2011. – V. 232. – № 10. – С. 57–64.
16. Kohar J.P., Gogoi S. Radial drilling technique for improving recovery from existing oil fields // International journal of scientific & technology research. – 2014. – V. 3. – Iss. 11. – P. 159–161.
17. Effects of the wellbore parameters of radial horizontal micro-holes on the gas reservoir production rate / Huanpeng Chi, Gensheng Li, Zhongwei Huang, Shouceng Tian, Xianzhi Song // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2015. – V. 24. – P. 518–525.
18. Estimation of heterogeneity of oil & gas field carbonate reservoirs by means of computer simulation of core x-ray tomography data / A.A. Efimov, S.V. Galkin, I.V. Savitckii, V.I. Galkin // Ecology, Environment and Conservation. – 2015. – V. 21 (Nov. Suppl.). – P. 79–85.
19. Галкин В.И., Пономарева И.Н. Изучение фильтрационно-емкостных свойств трещиновато-поровых коллекторов турнейско-фаменских объектов месторождений Соликамской депрессии // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 11. – С. 88–91.
20. Определение параметров трещиноватости пород на основе комплексного анализа данных изучения керна, гидродинамических и геофизических исследований скважин / С.С. Черепанов, И.Н. Пономарева, А.А. Ерофеев, С.В. Галкин // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 94–96.
21. Черепанов С.С. Комплексное изучение трещиноватости карбонатных залежей методом Уоррена-Рута с использованием данных сейсмического анализа (на примере турне-фаменской залежи Озерного месторождения) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – Т. 14. – № 14. – С. 6–12.

Поступила 11.04.2018 г.

## Информация об авторах

**Кочнев А.А.**, аспирант, ассистент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Зотиков В.И.**, доцент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Галкин С.В.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, декан горно-нефтяного факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276.6

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF GEOLOGICAL-TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE EFFECTIVENESS OF RADIAL DRILLING TECHNOLOGY ON THE EXAMPLE OF OPERATIONAL OBJECTS IN PERM REGION

**Alexander A. Kochnev<sup>1</sup>,**  
sashakoch93@gmail.com

**Vladimir I. Zotikov<sup>1</sup>,**  
vladimirzotikov@yandex.ru

**Sergey V. Galkin<sup>1</sup>,**  
doc\_galkin@mail.ru

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

**The relevance.** Oil production at the fields in Perm region is falling, it is necessary to use actively the methods for improving oil recovery. There are many methods, among them: acid treatments, hydraulic fracturing, fracturing, radial drilling. To engage non-drained areas in exploration, the sidetracking, multi-hole drilling and various types of fracturing are increasingly used now. However, such operations are quite expensive and not always efficient. The technology of radial drilling is a much cheaper alternative to these measures. The method of radial drilling with proper selection of wells-candidates may be very effective. If it is successfully used, it is possible to use non-drainable interlayers, thereby increasing the recoverable reserves. Radial drilling is not effective at all wells, as there are still no clear criteria for its successful application of radial drilling. The analysis of the technology effectiveness with the development of recommendations for use can significantly improve the success of radial drilling.

**The main aim** of the research is identification of geological, hydrodynamic and technological parameters for successful application of radial drilling in the fields of Perm region.

**Object** of research is oil-producing wells of the Perm region deposits where radial drilling operations were carried out.

**Method** of the research is based on the use of known methods of mathematical statistics.

**Results.** The authors have analyzed the radial drilling effectiveness in Perm region. A common base for radial drilling was developed. It includes geological, hydrodynamic and technological parameters. The parameters that have the strongest influence on the success of the event are singled out. The authors developed the recommendations for the use of this technology in Perm region.

### Key words:

Radial drilling, acidizing of wells, oil production, Student's t-test, production rate, methods of enhanced oil recovery.

### REFERENCES

- Ilyushin P.Yu., Rakhimzyanov R.M., Soloviev D.Yu., Kolychev I.Yu. Analysis of geological and technical measures to increase the productivity of production wells in the oil fields of the Perm Territory. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology, Oil and gas and mining*, 2015, vol. 14, no. 15, pp. 81–89. In Rus.
- Pavelieva O.N., Popova Zh.S. analiz effektivnosti primeneniya usovershenstvovannoy tekhnologii bureniya glubokikh radialnykh kanalov no Vakhitovskom mestorozhdenii [Analysis of the effectiveness of application of advanced deep-radial channel drilling technology at the Vakhitovskoye deposit]. *Geologiya i neftegazonosnost Zapodno-Sibirskogo megabasseyina (opyt, innovatsii)*. Materialy desyatoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (posvyashchenoy shestidesyatiletuyu Tyumenskogo industrialnogo universiteta) [Geology and oil and gas content of the West Siberian megabasin (experience, innovations). Materials of the tenth international scientific and technical conference (dedicated to the 60<sup>th</sup> anniversary of the Tyumen Industrial University)]. Tyumen, 2016. pp. 112–115.
- Sabitov RR, Shvchikov E.D. Model of decision-making on the basis of linear regression for planning of repeated fracturing of object SE 1 of the Nivagalsky deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 3, pp. 122–127. In Rus.
- Huanpeng Chi, Gensheng Li, Zhongwei Huang, Shouceng Tian, Xi-anzhi Song Maximum drillable length of the radial horizontal micro-hole drilled with multiple high-pressure water jets. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 26, pp. 1042–1049.
- Brantson T., Ju B., Yang Y., Chi J. A numerical simulator developed for modeling permeability control for enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 159, pp. 360–375.
- Ivanov V.A. System development of a low-productivity zonal-inhomogeneous oil reservoir. *Oilfield business*, 2012, no. 8, pp. 5–11. In Rus.
- Dickinson W., Dickinson R., Nees J., Dickinson E., Dykstra H. Field production results with the ultrashort radius radial system in unconsolidated sandstone formations. *Proc. of the 5<sup>th</sup> UNITAR International Conference on Heavy Crude and Tar Sands*. Caracas, Venezuela, 1991. Vol. II, pp. 307–326.
- Dickinson W., Dykstra H., Nodlund R., Coiled-tubing radials placed by water-jet drilling: Field results, theory and practice. *SPE*, 1993, no. 26348, pp. 343–355.
- Dickinson W., Dykstra H., Nees J.M. The Ultrashort Radius Radial System Applied to the Thermal Recovery of Heavy Oil. *SPE*, 1992, no. 24087, pp. 56–59.
- Dickinson W., Dickinson R. Horizontal Radial Drilling System. *SPE*, 1985, no. 13949, pp. 36–39.
- Demyanenko N., Serebrennikov A., Povzhik P., Galai M., Tretyakov D., Klochkov S. Drilling of deep radial canals. Opening of productive layers of low-permeability reservoirs. *Oil and Gas Journal*, 2016, no. 7, pp. 52–56. In Rus.
- Raspopov A.V., Kondratiev S.A., Novokreshcheny D.V. Influence of geological and physical conditions on the efficiency of drilling radial canals in the near-wellbore zone of the reservoir. *Oil Industry*, 2012, no. 3, pp. 78–79. In Rus.

13. Novokreshchenny D.V., Raspopov A.V. Perspectives of development of technologies of radial opening of a layer on deposits of the Perm edge. *Oil industry*, 2014, no. 3, pp. 54–57. In Rus.
14. Mukhametshin V.V. Elimination of uncertainties in solving the problems of impact on the bottomhole well zone. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 40–50.
15. Elliott S. Coiled-tubing method drills radial laterals to improve oil production from a depleted reservoir. *World Oil*, 2011, vol. 232, no. 10, pp. 57–64.
16. Kohar J.P., Gogoi S. Radial drilling technique for improving recovery from existing oil fields. *International journal of scientific & technology research*, 2014, vol. 3, Iss. 11, pp. 159–161.
17. Huanpeng Chi, Gensheng Li, Zhongwei Huang, Shouceng Tian, Xianzhi Song. Effects of the wellbore parameters of radial horizontal micro-holes on the gas reservoir production rate. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 24, pp. 518–525.
18. Efimov A.A., Galkin S.V., Savitekii I.V., Galkin V.I. Estimation of heterogeneity of oil and gas field carbonate reservoirs by means of computer simulation of core x-ray tomography data. *Ecology, Environment and Conservation*, 2015, vol. 21 (Nov. Suppl.), pp. 79–85.
19. Galkin V.I., Ponomareva I.N. Study of the filtration-capacitive properties of the fractured-pore collectors of the Tournaisian-Famennian deposits of the Solikamsk depression deposits. *Oil Industry*, 2016, no. 11, pp. 88–91. In Rus.
20. Cherepanov S.S., Ponomareva I.N., Erofeev A.A., Galkin S.V. Determination of fracture parameters of rocks on the basis of complex analysis of core data, hydrodynamic and geophysical studies of wells. *Oil Industry*, 2014, no. 2, pp. 94–96. In Rus.
21. Cherepanov S.S. A comprehensive study of the fracturing of carbonate deposits by the method of Warren-Rut using seismic analysis data (on the example of the tour-Fama deposit of the Ozernoe deposit). *Vestnik of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2015, no. 14, pp. 6–12. In Rus.

Received: 11 April 2018.

#### Information about the authors

**Alexander A. Kochnev**, graduate student, assistant, Perm National Research Polytechnic University.

**Vladimir I. Zotikov**, associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Sergey V. Galkin**, Dr. Sc., professor, Dean of the Mining and Petroleum Department, Perm National Research Polytechnic University.

УДК: 631.438.2; 544.034.24

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОБЛУЧЕННОГО ГРАФИТА УРАН-ГРАФИТОВЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Павлюк Александр Олегович<sup>1</sup>,  
seversknet@rambler.ru

Беспала Евгений Владимирович<sup>1</sup>,  
bespala\_evgeny@mail.ru

Котляревский Сергей Геннадьевич<sup>1</sup>,  
skotkyarevkiy@rambler.ru

Волкова Анна Генриховна<sup>2</sup>,  
anna.agv@yandex.ru

Захарова Елена Васильевна<sup>2</sup>,  
zevchem@rambler.ru

<sup>1</sup> АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов»,  
Россия, 636000, г. Северск, ул. Автодорога 13, 179а.

<sup>2</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук,  
Россия, 119071, г. Москва, пр. Ленинский, 31, корп. 4.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных методов дезактивации облученного графита уран-графитовых ядерных реакторов с целью снижения потенциальной опасности для дальнейшего захоронения.

**Цель:** разработка метода электрохимической дезактивации графитовых радиоактивных отходов в химически агрессивных средах и определение оптимальных параметров ведения процесса.

**Методы:** экспериментальные исследования процесса электрохимической обработки облученного графита в различных электролитах и при различных условиях.

**Результаты.** Показана принципиальная возможность электрохимической обработки графитовых радиоактивных отходов. Представлена конструкция электролизера для проведения процесса обработки и описана методика проведения эксперимента. Проанализированы электродные процессы и определены факторы, влияющие на эффективность электрохимической дезактивации. Представлены зависимости скорости разрушения графитовых анодов от плотности тока и различных концентраций кислот. Определено, что наибольшая скорость разрушения электродов наблюдается в концентрированной азотной кислоте. Экспериментально были получены зависимости, отражающие степень очистки графитовых РАО по радионуклидам  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134+137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в зависимости от состава электролита. Выявлено, что максимальная степень дезактивации облученного ядерного графита при плотности тока 0,01 А/см<sup>2</sup> и температуре электролита (16–20) °С достигается в азотной кислоте с добавлением 0,2 М NaF. Проведен сравнительный анализ результатов экспериментов химической и электрохимической обработки графитовых радиоактивных отходов. Показано, что электрохимическая дезактивация графита позволяет снизить активность графита по  $^{60}\text{Co}$  в 2–10 раз и по  $^{137}\text{Cs}$  в 7–100 раз. При этом в процессе дезактивации не образуется газообразных продуктов реакции, которые необходимо улавливать, создавая ещё большее количество вторичных радиоактивных отходов.

### Ключевые слова:

Реакторный графит, электрохимическая обработка, радионуклид, уран-графитовый реактор, дезактивация.

### Введение

В настоящее время в мире накоплено более 250000 т графитовых радиоактивных отходов (РАО). Ранее выявлено, что активность таких РАО определяется активационными радионуклидами ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и др.), продуктами деления ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Eu}$  и др.) и трансураниевыми элементами ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  и др.) [1–5]. Для решения проблемы графитовых РАО в РФ рассматриваются варианты их размещения в приповерхностных пунктах захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО) и в пункте глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) в Нижне-Канском массиве. В соответствии с ФЗ Российской Федерации «Об обращении с радиоактив-

ными отходами...» (от 11.07.2011 № 190-ФЗ) и Постановлением Правительства Российской Федерации № 1069 от 19.10.2012 «О критериях отнесения...» удаляемые графитовые РАО, отнесенные к 3 или 4 классу, могут быть захоронены в ППЗРО. При отнесении облученного графита к 1 и 2 классу удаляемых РАО (энергетические реакторы типа АМБ и др.) возникает необходимость его захоронения в ПГЗРО [6]. Графит промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР), являющийся ядерным наследием, может быть отнесен к особым (не удаляемым) РАО, что позволяет реализовать вариант «захоронение на месте» [7, 8].

Стоимость обращения с облученным ядерным графитом существенно зависит от способа его захо-

ронения, который определяется классом РАО. Граница между 2 и 3 классами РАО по величине бета-излучающих радионуклидов с периодом полураспада более 31 года составляет  $10^4$  Бк/г и трансуранических радионуклидов  $10^2$  Бк/г. Изменение класса графитовых РАО со 2-го на 3-й путем снижения активности графита позволит уйти от наиболее затратного и технически трудно реализуемого способа захоронения в глубоких геологических формациях и реализовать более предпочтительный с точки зрения вопросов экономики и технологически более простой способ приповерхностного захоронения при обеспечении необходимого уровня безопасности для населения. Поэтому существует экономическая целесообразность в поиске путей изменения класса графитовых отходов путем переработки или дезактивации.

В настоящее время разрабатываются и тестируются различные методы воздействия на облученный реакторный графит, к которым можно отнести: прямое сжигание в окислительной среде [9–11], пиролиз [12, 13], плазменную обработку [14, 15] и др. При этом применение таких методов для очистки графита приводит к образованию радиоактивных газообразных продуктов, что создает сложности при последующем обращении с газообразными вторичными РАО. В связи с этим в работе был апробирован метод электрохимической дезактивации, исключающий перевод облученного графита в газовую фазу.

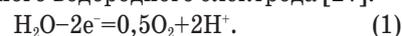
В атомной промышленности для дезактивации металлических поверхностей используется электролитическая очистка [16, 17]. В этом случае происходит концентрирование загрязнителей в растворе электролита, что исключает образование опасных газообразных продуктов реакции. Ранее предпринимались попытки адаптировать известные методы электрохимической дезактивации к проблеме обращения с облученным ядерным графитом [18], но исследования на реальных образцах облученного графита не проводились.

Целью настоящей работы является исследование процесса электрохимической обработки облученного ядерного графита уран-графитового реактора. Для оценки перспективности метода на настоящем этапе выполнялось определение степени дезактивации по относительно легко измеряемым радионуклидам ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ), которые существенно влияют на общую активность графита и в значительной мере сосредоточены в приповерхностном слое графита. Как показали исследования, в этом слое графита также могут находиться более высокие концентрации  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  [19]. Причем  $^{36}\text{Cl}$  может оказывать существенное влияние на обоснование безопасности пункта захоронения РАО [20–23].

Удаление радионуклидов, сосредоточенных на поверхности, также может привести к снижению потенциальной опасности графитовых радиоактивных отходов [24–26].

### Электродные процессы при обработке облученного графита

Дезактивация облученного ядерного графита методом электролиза заключается, в первую очередь, в удалении загрязнённого поверхностного слоя. Это обусловлено поверхностным загрязнением образцов, включая поверхность пор. Известно, что разрушение графита происходит при использовании его в качестве анодов в электрохимической промышленности. При электролизе графит разрушается не в результате электрохимического процесса, например процесса окисления ионов хлора, а вследствие выделения кислорода на аноде по реакции (1), потенциал которой равен 1,23 В относительно нормального водородного электрода [27]:



Износ анодов возникает не только как следствие окисления углерода, но и из-за осыпания графитовой массы после того, как нарушается структура поверхностных слоев. Процесс разрушения анодов развивается главным образом в глубине пор. Проникновению электролита в глубь пор способствует увеличение смачиваемости поверхности при возрастании анодного потенциала [28]. В порах из-за развитой поверхности и низкой плотности тока создаются благоприятные условия для выделения кислорода, и в результате факторы, влияющие на интенсивность выделения кислорода при электролизе, способствуют разрушению графитового анода.

При исследовании возможности интенсификации процессов электрохимического получения хлора и хлоратов было обнаружено [29], что существует некоторый предельный анодный потенциал, названный «критическим», выше которого наблюдается резкое возрастание износа графитовых анодов. Это явление целесообразно использовать для дезактивации облученного ядерного графита.

Рассматривая механизм разрушения графитовых анодов, следует учитывать, что увеличение износа в закритической области обусловлено сочетанием двух факторов: достижением критического потенциала, выше которого энергетическое состояние анодной поверхности создает условия для образования оксидных фаз, и наличием возможности разряда кислородосодержащих анионов или воды, являющихся источником кислорода, необходимого для окисления анода. При отсутствии хотя бы одного из этих условий увеличение износа не наступает.

В работе [30] описано повышение износа графита при проведении электролиза при температурах выше 40 °С.

Электрохимическая дезактивация при поляризации поверхности в растворах электрическим током является в настоящее время наиболее эффективным способом очистки от радиоактивных изотопов, позволяющим проводить очистку в растворах кислот и их солей при нормальных температу-

рах. Эффективность такой обработки основана на изменении в процессе поляризации валентности поверхностных атомов и ионов, за счет чего происходит образование на поверхности новых соединений с более высокой реакционной способностью, обладающих повышенной растворимостью в дезактивирующих растворах.

Наиболее подходящими электролитами для максимального выделения на электродах кислорода и водорода при электролизе являются кислородосодержащие неорганические кислоты, такие как: азотная, хлорная, серная и фосфорная.

Для определения оптимальных параметров процесса дезактивации облученного ядерного графита была разработана экспериментальная установка (рис. 1). Расходуемые электроды – 1, выполненные из облученного графита уран-графитового реактора (рис. 2), размещались в различных секциях электролизера – 2, который с торцов был снабжен патрубком подачи – 3 и патрубком отвода – 4 дезактивирующего раствора – 5 (электролита). При этом катод – 2 и анод в электролизере – 2 чередовались по всей его длине, а секции были разделены ионообменными мембранами – 6. Расходуемые электроды – 1 через изоляторы – 7, расположенные в массивной крышке – 8 электролизера – 2 посредством проводов – 9 соединялись с источником тока – 10.

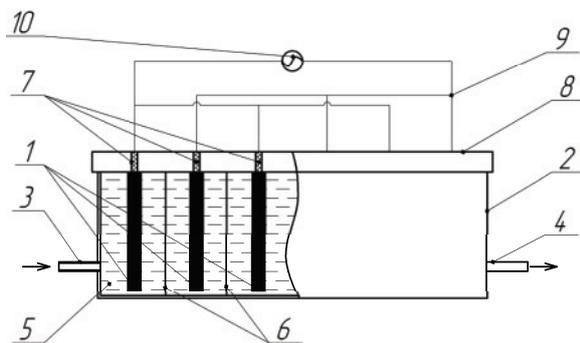


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для электрохимической обработки облученного графита

Fig. 1. Scheme of the experimental installation for electrochemical treatment of irradiated graphite



Рис. 2. Внешний вид электрода из облученного графита

Fig. 2. Appearance of the electrode from irradiated graphite

Как показали эксперименты (табл. 1), скорость разрушения графита в 8 М серной и фосфорной кислот оказалась наименьшей и равной 0,12 и 0,06 г/(см<sup>2</sup>·ч) соответственно. Самые высокие скорости разрушения графита в аналогичных условиях были получены в хлорной кислоте

0,72 г/(см<sup>2</sup>·ч). Однако в процессе окисления графита хлорная кислота разлагалась до ионов хлора, которые являются коррозионно-агрессивными по отношению к стали, являющейся конструкционным материалом для изготовления электролизных ванн. Таким образом, только азотная кислота являлась наиболее подходящим электролитом для разрушения графита при его анодной поляризации. При достаточно высокой скорости разрушения графита кислота коррозионно не агрессивна по отношению к высоколегированной стали марки 02X8H22C6 (ЭП794). Способы очистки поверхности данной марки стали от радионуклидов с использованием растворов азотной кислоты широко известны и применяются в промышленности [21]. Скорости разрушения графита в 4–8 и 14,3 М растворах азотной кислоты достаточно близкие и составляют, соответственно, 0,26–0,32 и 0,42 г/(см<sup>2</sup>·ч) при плотности тока 0,2 А/см<sup>2</sup>.

Таблица 1. Скорость разрушения графита (г/(см<sup>2</sup>·ч)) в растворах кислот в процессе электролиза при плотности анодного тока 0,2 А/см<sup>2</sup>

Table 1. Rate of graphite destruction (g/(cm<sup>2</sup>·h)) in acid solutions during electrolysis at an anodic current density of 0,2 A/cm<sup>2</sup>

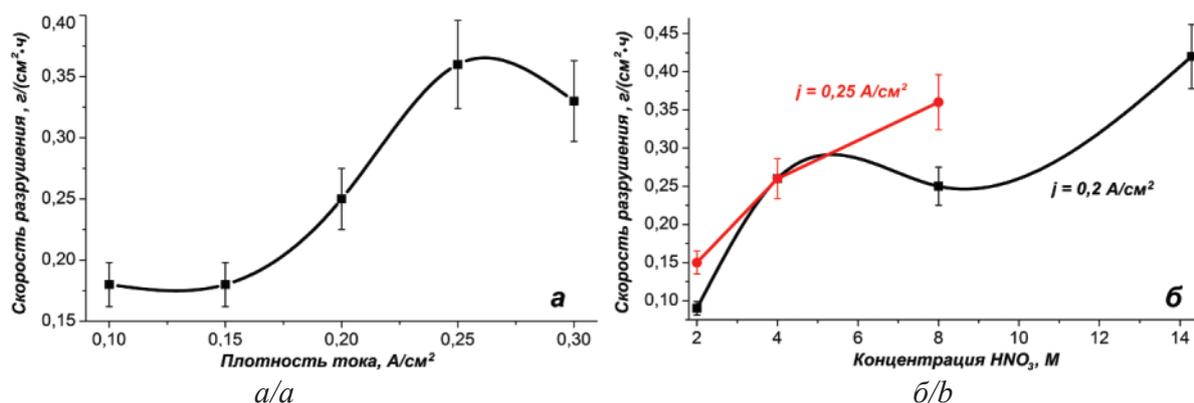
Кислота Acid	Концентрация (М)/Concentration (M)			
	2	4	8	14,3
HNO <sub>3</sub>	0,09	0,26	0,32	0,42
HClO <sub>4</sub>	0,23	0,7	0,72	–
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	–	0,05	0,12	–
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	–	–	0,06	–

При увеличении плотности тока от 0,15 до 0,25 А/см<sup>2</sup> скорость разрушения графита сначала увеличивалась (максимум при плотности тока 0,25 А/см<sup>2</sup>), а затем уменьшалась (рис. 3). Начиная с 0,15 А/см<sup>2</sup> и выше, режим электролиза становился неустойчивым из-за бурного выделения газа на электродах.

При снижении плотности тока до 0,2 А/см<sup>2</sup> или концентрации азотной кислоты ниже 4 М наблюдалось уменьшение скорости разрушения графита.

Введение в раствор кислот дополнительных реагентов, способных разлагаться на электродах интенсивнее, чем ионы воды, то есть имеющих менее положительный потенциал разрядов ионов (в случае анодной поляризации), чем потенциал выделения кислорода, приводило к расходованию подаваемого анодного тока на разрушение этих реагентов. При этом изменялась скорость разрушения графита: от нуля до некоторой величины, не превышающей величину скорости разрушения графита в растворе кислоты, не содержащем посторонних реагентов.

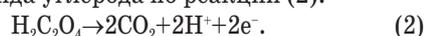
Результаты экспериментов, приведенные в табл. 2, показали, что введение щавелевой кислоты Н<sub>2</sub>С<sub>2</sub>О<sub>4</sub> 0,22 М в 4 М HNO<sub>3</sub> приводит к уменьшению скорости разрушения графита с 0,26 до



**Рис. 3.** Скорость разрушения облученного графита в азотной кислоте в зависимости от: а) плотности тока в 8 М HNO<sub>3</sub>; б) концентрации HNO<sub>3</sub> при различных плотностях тока

**Fig. 3.** Rate of destruction of irradiated graphite in nitric acid, depending on: a) current density in 8 M HNO<sub>3</sub>; b) concentrations of HNO<sub>3</sub> at different current densities

0,19 г/(см<sup>2</sup>·ч) из-за ее разложения на аноде с выделением диоксида углерода по реакции (2):



Нормальный окислительно-восстановительный потенциал этой реакции, равный 0,49 В, имеет более отрицательное значение, чем потенциал выделения кислорода из воды, равный 1,229 В. В щавелевой кислоте (0,89 М) протекала только анодная реакция ее разрушения с выделением диоксида углерода. Вследствие отсутствия на аноде выделения кислорода разрушение графита происходило относительно медленно.

**Таблица 2.** Скорость разрушения графита (г/(см<sup>2</sup>·ч)) в азотной кислоте в присутствии различных добавок при электролитической обработке и разных плотностях тока

**Table 2.** Rate of graphite destruction (g/(cm<sup>2</sup>·h)) in nitric acid in the presence of various additives during electrolytic treatment and different current densities

Состав электролита Electrolyte composition	Плотность тока (А/см <sup>2</sup> ) Current Density (A/cm <sup>2</sup> )	
	0,15	0,20
8 М HNO <sub>3</sub> +0,2 М NaF	0,19	0,26
4 М HNO <sub>3</sub> +0,22 М H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	0,19
0,89 М H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0	–
4 М HNO <sub>3</sub> +2,94 М H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	–	0
8 М HNO <sub>3</sub> +0,025 М H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	–	0,23
8 М HNO <sub>3</sub> +0,05 М H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	–	0,22
8 М HNO <sub>3</sub> +0,1 М H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	–	0,24
HNO <sub>3</sub> :H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =1:1	–	0,24
HNO <sub>3</sub> :HClO <sub>4</sub> =3:1	–	0,25
HNO <sub>3</sub> :HClO <sub>4</sub> =1:1	–	0,7

В случае, когда в раствор 4 М азотной кислоты вводили 2,94 М пероксида водорода H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, нормальный окислительно-восстановительный потенциал которой равен 0,68 В, скорость разрушения графита падала до нулевых значений. Однако по мере разложения пероксида водорода в процессе

электролиза (примерно через 30 минут обработки) вновь наблюдалось разрушение графита со скоростью 0,12 г/(см<sup>2</sup>·ч). При повторном добавлении H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> разрушение графита прекращалось.

Введение в кислоты реагентов, не разрушающихся при потенциалах выделения кислорода (1,65–1,69) В (с учетом перенапряжения), например, как ионы фтора, нормальный потенциал выделения которого в виде газообразного фтора равен 2,87 В, практически не приводило к изменению скорости разрушения графита. Например, при проведении электролиза в 8 М HNO<sub>3</sub> с добавкой 0,2 М фторида натрия NaF и без нее скорость разрушения графита оставалась на уровне (0,26–0,32) г/(см<sup>2</sup>·ч) (табл. 1).

#### Экспериментальное исследование процесса дезактивации облученного графита электрохимическим методом

Поверхностная дезактивация ядерного графита и дезактивация его с одновременным разрушением электрода проводилась на образцах, изготовленных из графитовых блоков и втулок уран-графитового ядерного реактора с водяным охлаждением. Образцы изготовлялись из графита, находящегося на поверхности (таблетки 1Б, 2, 3, 7, 8, 9) и внутри (таблетки 4, 5 и 6) графитовых элементов. При этом образцы, вырезанные из блоков, имели индекс «Б», все остальные – без индекса. Начальные уровни загрязнения приведены в табл. 3.

Загрязненность графита, как следует из данных табл. 3, определялась в основном изотопами <sup>60</sup>Со и <sup>137</sup>Сs. Радионуклид <sup>60</sup>Со в графите образовывался в основном за счет активации микропримесей, находящихся в объеме графита. Кроме того, кобальт, как и цезий, накапливался на поверхностях втулок после протечек теплоносителя в активную зону, с последующей диффузией нуклидов в объем графита, что подтверждается наличием объемного загрязнения образцов цезием. В исследованных образцах втулок практически не было зафиксировано присутствие α-излучателей.

**Таблица 3.** Исходная активность образцов облученного графита

**Table 3.** Initial activity of samples of irradiated graphite

Образец Specimen	Начальная загрязненность, Бк/г Initial activity concentration, Bq/g					
	Общая Total	По радионуклидам/Radionuclides				
		<sup>60</sup> Co	<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>154</sup> Eu	<sup>241</sup> Am
1Б	13 860	12 434	267	1117	21	21
2	14 398	3475	273	10 650	–	–
3	12 606	4389	187	8030	–	–
4	1079	580	–	499	–	–
5	1666	1051	–	315	–	–
6	2016	1719	–	296	–	–
7	1146	797	30	319	–	–
8	2186	1712	15	459	–	–
9	1698	1319	3	376	–	–

Электрохимическая обработка проводилась при анодной поляризации графита в азотнокислых растворах. При этом плотность тока составляла порядка 0,01 А/см<sup>2</sup> при поверхностной дезактивации и 0,2 А/см<sup>2</sup> – при дезактивации с одновременным разрушением графита до порошкообразного состояния. Данные по электрохимической дезактивации графита при плотности тока 0,01 А/см<sup>2</sup> приведены в табл. 4. В табл. 5 представлены данные, полученные при химической дезактивации графита из втулок, отобранных вдали от аварийных ячеек.

**Таблица 4.** Результаты электрохимической дезактивации образцов облученного графита 1Б, 8 и 6 при  $j=0,01$  А/см<sup>2</sup>, (16–20) °С, продолжительность процесса 2 ч

**Table 4.** Results of electrochemical decontamination of samples of irradiated graphite 1Б, 8 and 6 at  $j=0,01$  А/см<sup>2</sup>, (16–20) °С, the duration of the process is 2 h

Обработка Treatment	Состав раствора Solution structure	Обр. Spe.	Остаточная загрязненность, % Residual contamination, %				
			Residual contamination, %				
			<sup>60</sup> Co	<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>154</sup> Eu	<sup>241</sup> Am
1	1 М ННО <sub>3</sub>	1Б	40	100	100	86	100
2	аналогично № 1	8	29	65	67	–	–
3	similarly to no. 1	6	15	–	39	–	–
4	8 М ННО <sub>3</sub>	1Б	38	100	100	73	65
5	аналогично № 4	8	24	41	57	–	–
6	similarly to no. 4	6	12	–	8	–	–
7	8 М ННО <sub>3</sub> + 0,2 М NaF	8	23	37	49	–	–
8	аналогично № 7	6	11	–	1,4	–	–

Каждый образец в процессе химической и электрохимической дезактивации последовательно обрабатывался в различных режимах, указанных в таблицах. Сравнение результатов проводилось после заключительных обработок.

Загрязнение кобальта на образцах, отобранных с поверхности втулок, в первом случае (электрохимическая дезактивация) снижалось до 23 % (табл. 4, обработка 7). На внутренних образцах

керна в первом случае остаточная загрязненность кобальта составляла 11 % (табл. 4, обработка 8), во втором – 72 % (табл. 5, опыт 5, № 2).

Остаточная активность <sup>134</sup>Cs и <sup>137</sup>Cs поверхностных образцов втулок составляла в случае электрохимической дезактивации (37–49) %, химической дезактивации – до (9–29) %. После электрохимической обработки внутренних образцов керна остаточная активность <sup>137</sup>Cs уменьшалась до 1,4 % (табл. 4, обработка 8), после химической дезактивации – до 31 % (табл. 5, опыт 5, № 2).

Сравнение полученных данных позволяет считать, что оба способа дезактивации имеют приблизительно одинаковую эффективность, хотя на внутренней поверхности образцов <sup>60</sup>Co и <sup>137</sup>Cs удалялись интенсивней при электрохимической дезактивации.

Электролиз при высоких плотностях тока порядка 0,2 А/см<sup>2</sup> приводил к разрушению графитового анода до порошкообразного состояния, что способствовало дополнительной дезактивации образующегося порошка. В качестве электролита использовалась 8 М ННО<sub>3</sub>, коррозионно не агрессивная по отношению к высоколегированной стали марки 02Х8Н22С6 (ЭП794). Фактически этот электролит может работать длительное время после корректировки, что приводит к образованию минимально возможного объема жидки РАО.

**Таблица 5.** Результаты химической дезактивации образцов облученного графита 2, 4 и 9 при 95 °С, продолжительность процесса 2 ч

**Table 5.** Results of chemical decontamination of samples of irradiated graphite 2, 4 and 9 at 95 °С, duration is 2 h

Опыт Exp.	Состав раствора Composition of solution	Обр. Spe.	Остаточная загрязненность, % Residual contamination, %		
			Residual contamination, %		
			<sup>60</sup> Co	<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs
1	8 М ННО <sub>3</sub>	2	79	25	23
		4	59	–	23
		9	16	16	9
2	8 М ННО <sub>3</sub>	2	80	58	61
		4	61	–	51
		9	11	12	11
3	6 М НСl	2	81	38	45
		4	56	–	40
		9	12	15	14
4	6 М НСl	2	77	78	35
		4	56	–	42
		9	12	13	13
5	8 М ННО <sub>3</sub> +0,2 М HF	2	72	52	31
		4	49	–	29
		9	9,6	12	9

Количество исследуемых добавок в азотную кислоту с целью увеличения ее дезактивирующей способности и скорости разрушения графита ограничилось введением NaF и других кислородосодержащих кислот, не разрушающихся при высоких анодных потенциалах. Введение других добавок, как показали предварительные опыты, приводило к их разрушению под действием подаваемого анодного тока, а как следствие этого – к уменьше-

нию количества выделяющегося кислорода, и соответственно, – к снижению скорости разрушения графита.

Данные по дезактивации графита при увеличении плотности тока в процессе электрохимического разрушения графитового анода приведены в табл. 6.

**Таблица 6.** Результаты дезактивации облученного графита в процессе электрохимического разрушения при плотности тока 0,2 А/см<sup>2</sup>

**Table 6.** Results of decontamination of irradiated graphite at electrochemical destruction at a current density of 0,2 A/cm<sup>2</sup>

Опыт Эпр.	Об- разец Spe.	Состав электролита Electrolyte composition	Остаточная загрязненность, % Residual contamination, %				
			<sup>60</sup> Co	<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>154</sup> Eu	<sup>241</sup> Am
1	1Б	8 М HNO <sub>3</sub>	7	13	14	17	1
2	7	8 М HNO <sub>3</sub>	27	6,4	10	–	–
3	2	8 М HNO <sub>3</sub> +0,1 М H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	22	12	10	–	–
4	9	8 М HNO <sub>3</sub> +0,1 М H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	19	7,7	9,8	–	–
5	3	8 М HNO <sub>3</sub> +0,2 М NaF	9,2	10	5,5	–	–
6	4	8 М HNO <sub>3</sub>	42	–	14	–	–
7	5	8 М HNO <sub>3</sub> +0,2 М NaF	26	–	0,8	–	–

Из данных, представленных в табл. 6, следует, что введение в азотную кислоту таких добавок, как серная и фосфорная кислоты (до 0,1 М), не приводило к увеличению степени дезактивации порошка графита, полученного при разрушении поверхностных образцов графитовых втулок (опыты 2–4). В присутствии NaF (опыт 5) остаточная активность <sup>137</sup>Cs практически оставалась на том же уровне (~10 %), при этом остаточная загрязненность по <sup>60</sup>Co снижалась по сравнению с азотнокислыми растворами, не содержащими ионов фтора, с 19–27 до 9 %, по <sup>137</sup>Cs – с 10 до 5,5 %.

При разрушении внутренних образцов из кернов втулок (табл. 6, опыты 6, 7) остаточная загрязненность по <sup>60</sup>Co составляла 42 %, а по <sup>137</sup>Cs – 14 %; <sup>134</sup>Cs в таких образцах отсутствовал. Введение в раствор азотной кислоты фторида натрия 0,2 М по-

зволяло снизить остаточную загрязненность по <sup>60</sup>Co до 26 %, а по <sup>137</sup>Cs до 0,8 %.

В табл. 6 также приведены результаты по дезактивации, полученные при разрушении образца, изготовленного из графитового блока (опыт 1). Остаточная активность <sup>60</sup>Co в этом случае снижалась до 7, <sup>137</sup>Cs – до 14 %. Присутствующий на таких образцах <sup>241</sup>Am в основном переходил в раствор азотной кислоты, и его остаточная загрязненность на графите составляла всего 1 %, а <sup>154</sup>Eu не превышала 17 %.

### Заключение

Таким образом, электрохимическая дезактивация графита позволяет снизить количество радионуклидов <sup>60</sup>Co в 2–10 раз и <sup>137</sup>Cs в 7–100 раз. При этом в процессе дезактивации не образуются газообразных продуктов реакции, которые необходимо улавливать, создавая ещё большее количество вторичных РАО.

Значительное снижение мощности поглощенной дозы гамма-излучения и разрушение графита до порошкообразного состояния путем электрохимической обработки без образования при этом радиоактивной пыли позволяет получить отходы графита в компактном виде, удобном для длительного хранения и последующего захоронения. Образующиеся при этом жидкие РАО, представляющие собой соединения азотной кислоты и радионуклидов, могут быть разделены методом дистилляции или путем добавления реагентов с целью осаждения радиоактивных веществ. Это также исключает образование газообразных продуктов реакции, что существенно повышает безопасность известных методов.

Так как способ позволяет существенно снизить концентрацию продуктов деления и трансурановых элементов, то вероятно, исследованный процесс может быть адаптирован для снижения потенциальной опасности графитовых РАО путем удаления наиболее активных долгоживущих радионуклидов <sup>36</sup>Cl и <sup>14</sup>C, находящихся на поверхности. Также возможно снижение класса графитовых РАО, извлеченных из аварийных ячеек.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wood C. Graphite Decommissioning Options for Graphite Treatment, Recycling, or Disposal, including a discussion of Safety-Related Issues. – Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2006. – 156 p.
2. Experimental study on the content and distribution of key nuclides in an irradiated graphite sphere of HTR-10 / H. Li, X. Liu, F. Xie, F. Jia // Nuclear engineering and design. – 2017. – V. 323. – P. 39–45.
3. Kim H.R. The radioactivity estimation of <sup>14</sup>C and <sup>3</sup>H in graphite waste sample of the KRR-2 // Applied Radiation and Isotopes. – 2013. – V. 79. – P. 109–113.
4. Actinides in irradiated graphite of RBMK-1500 reactor / R. Plukiene, A. Plukis, V. Barkauskas, A. Gudelis, R. Gvozdaite, G. Duskasas, V. Remeikis // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – V. 277. – P. 95–105.
5. Source term analysis of the irradiated graphite in the core of HTR-10 / X. Liu, X. Huang, F. Xie, F. Jia, X. Feng, H. Li // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2017. – P. 1–7.
6. Трехмерное численное моделирование теплового состояния пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве горных пород / Н.И. Дробышевский, Е.В. Моисеенко, Р.А. Бутов, Ю.Н. Токарев // Радиоактивные отходы. – 2017. – № 1. – С. 65–74.
7. Experience of on-site disposal of production uranium-graphite nuclear reactor / A.O. Pavliuk, S.G. Kotlyarevskiy, E.V. Beshpala, E.V. Zakharova, V.M. Ermolaev, A.G. Volkova // Journal of Environmental Radioactivity. – 2018. – V. 184–185. – P. 22–31.
8. Чубреев Д.О., Кузнецов Г.В. Использование глинистых материалов для создания барьера безопасности выводимого из эксплуатации реактора АД // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 83–87.

9. Technology and facility for incinerating irradiated reactor graphite / V.A. Kashcheev, A.O. Ustinov, S.A. Yakunin, V.S. Zagumenov, A.O. Pavlyuk, S.G. Kotlyarevskiy, E.V. Bepala // Atomic Energy. – 2017. – V. 122. – № 4. – P. 252–256.
10. Dunzik-Gougar M.L., Smith T.E. Removal of carbon-14 from irradiated graphite // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – V. 451. – P. 328–335.
11. Li J., Dunzik-Gouga M.L., Wang J. Recent advances in the treatment of irradiated graphite: A review // Annals of Nuclear Energy. – 2017. – V. 110. – P. 140–147.
12. New advances on the thermal behaviour of chlorine in nuclear graphite / A. Blondel, N. Moncoffre, N. Toulhoat, N. Bererd, G. Sibermann, P. Sainsot, J.-N. Rouzaud, D. Deldicque // Carbon. – 2014. – V. 73. – P. 413–420.
13. Thermal treatment of neutron-irradiated nuclear graphite / D. Vulpius, K. Baginski, B. Kraus, B. Thomauske // Nuclear Engineering and Design. – 2013. – V. 265. – P. 294–309.
14. Bepala E., Novoselov I., Ushakov I. Heat transfer during evaporation of cesium from graphite surface in an argon environment // MATEC Web of Conferences. – 2016. – V. 72. – P. 1–5. DOI: 10.1051/mateconf/20167201011.
15. Heat and mass transfer in cesium evaporation from graphite surface in argon / E.V. Bepala, V.F. Myshkin, A.O. Pavlyuk, I.Yu. Novoselov // Atomic Energy. – 2017. – V. 122. – № 6. – P. 400–405.
16. Decontamination of radioactive concrete / A.Yu. Yurchenko, Yu.V. Karlin, A.N. Nikolaev, O.K. Karnila, A.S. Barinov // Atomic Energy. – 2009. – V. 106. – № 3. – P. 225–230.
17. Зимон А.Д., Пикалов В.К. Дезактивация. – М.: ИздАТ, 1994. – 336 с.
18. Головачев М.Г., Лисовских В.Г. Аспекты экологически приемлемой технологии переработки графитовых радиоактивных отходов // Проблемы радиозащиты и пограничных дисциплин. – 2010. – Вып. 14. – С. 314–326.
19. О форме нахождения и характере связи <sup>14</sup>C в облученном графите уран-графитовых ядерных реакторов / Е.В. Беспала, А.О. Павлюк, В.С. Загуменнов, С.Г. Котляревский // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 116–126.
20. Modeling the migration of fallout radionuclides to quantify the contemporary transfer of fine particles in Luvisol profiles under different land uses and farming practices / M. Jagercikova, O. Evrard, J. Balesdent, I. Lefevre, S. Cornu // Soil & Tillage Research. – 2014. – V. 140. – P. 82–97.
21. Hendry M.J., Wassenaar L.I., Kotzer T. Chloride and chlorine isotopes (<sup>36</sup>Cl and <sup>37</sup>Cl) as tracers of solute migration in a thick, clay-rich aquitard system // Water resource research. – 2000. – V. 36. – № 1. – P. 285–296.
22. Crooks V.E., Quigley R.M. Saline leachate migration through clay: a comparative laboratory and field investigation // Can. Geotech. J. – 1984. – V. 21. – P. 349–362.
23. Conceptual and numerical models of solute diffusion around a HLW repository in clay / J. Samper, A. Naves, C. Lu, Y. Li, B. Fritz, A. Clement // Physical and Chemistry of the Earth. – 2011. – V. 36. – P. 1714–1720.
24. Анализ возможности снижения потенциальной опасности графитовых радиоактивных отходов при термической обработке / А.О. Павлюк, С.Г. Котляревский, Е.В. Беспала, А.Г. Волкова, Е.В. Захарова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 8. – С. 24–32.
25. Fachinger J., von Lensa W., Podruzhina T. Decontamination of nuclear graphite // Nuclear Engineering and Design. – 2008. – V. 238. – P. 3086–3091.
26. Chi S.-H., Kim G.G. Effect of air flow rate on the oxidation of NBG-18 and NBG-25 nuclear graphite // Journal of Nuclear Materials. – 2017. – V. 491. – P. 37–42.
27. Зарецкий С.А., Сучков В.Н., Животинский П.Б. Электрохимическая технология неорганических веществ и химические источники тока. – М.: Высшая школа, 1980. – 423 с.
28. Electrocatalysis and electrode surface properties / A. Frumkin, N. Polianovskaya, I. Bagotskaya, N. Grigoryev // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 1971. – V. 33. – № 2. – P. 319–328.
29. A mechanistic model for carbon dioxide corrosion of mild steel in the presence of protective iron carbonate films. P. 1: Theory and verification / M. Nordsveen, S. Nestic, R. Nyborg, A. Stangeland // Corrosion. – 2003. – V. 59. – № 4. – P. 443–456.
30. Немов В.А. Моделирование диффузионно-контролируемого массопереноса в системе электрод-раствор при потенциостатической поляризации межфазной поверхности. Общие и частные крайние условия // Вестник ТОГУ. – 2014. – № 1 (32). – С. 27–36.

Поступила 14.04.2018 г.

#### Информация об авторах

**Павлюк А.О.**, кандидат физико-математических наук, руководитель группы Научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов».

**Беспала Е.В.**, кандидат физико-математических наук, инженер-физик группы Научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов».

**Котляревский С.Г.**, ведущий инженер группы Научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов».

**Волкова А.Г.**, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории экологических проблем обращения с радиоактивными и токсичными отходами Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук.

**Захарова Е.В.**, кандидат химических наук, заведующая лабораторией экологических проблем обращения с радиоактивными и токсичными отходами Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук.

UDC: 631.438.2; 544.034.24

## ELECTROCHEMICAL TREATMENT OF IRRADIATED GRAPHITE OF URANIUM–GRAPHITE NUCLEAR REACTORS

**Alexander O. Pavlyuk<sup>1</sup>,**  
seversknet@rambler.ru

**Evgeny V. Bepala<sup>1</sup>,**  
bepala\_evgeny@mail.ru

**Sergey G. Kotlyarevskiy<sup>1</sup>,**  
skotkyarevkiy@rambler.ru

**Anna G. Volkova<sup>2</sup>,**  
anna.agv@yandex.ru

**Elena V. Zakharova<sup>2</sup>,**  
zevchem@rambler.ru

<sup>1</sup> Pilot and Demonstration Center for Uranium-Graphite Nuclear Reactor Decommissioning,  
179a, Avtodoroga 13 street, Seversk, 63600, Russia.

<sup>2</sup> A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS,  
31, Leninskiy avenue, Moscow, 119071, Russia.

**The relevance** of the discussed issue is caused by the need in developing the effective methods for treatment of irradiated graphite of uranium-graphite nuclear reactors in order to reduce the potential danger for further burial in geological formations.

**The main aim** of the study is to develop a method for electrochemical decontamination of graphite radioactive waste in chemically aggressive media and to determine the significant parameters of the process management.

**The methods:** experimental studies of electrochemical treatment of irradiated graphite in various electrolytes and under various conditions.

**The results.** The principal possibility of electrochemical treatment of graphite radioactive waste is shown in the article. The paper introduces the design of the electrolytic cell for carrying out processing and describes the experimental procedure. The authors have analyzed the electrode processes and identified the factors affecting the electrochemical deactivation efficiency. The dependences of graphite anode destruction rate on the current density and various concentrations of acids are introduced. It was determined that the highest rate of electrode destruction is observed in concentrated hydrochloric acid. The dependence of the removal efficiency of <sup>60</sup>Co, <sup>134+137</sup>Cs, <sup>154</sup>Eu, <sup>241</sup>Am on composition of the electrolyte was experimentally obtained. It was found that the maximum degree of decontamination of irradiated nuclear graphite at current density of 0,01 A/cm<sup>2</sup> and an electrolyte temperature (16–20) °C is achieved in nitric acid with the addition of 0,2 M NaF. The authors carried out the comparative analysis of the experimental results in chemical and electrochemical treatment of graphite radioactive waste. It was shown that electrochemical decontamination of graphite allows reducing the amount of radionuclides <sup>60</sup>Co by 2–10 times and <sup>137</sup>Cs by 7–100 times. At the same time, at decontamination, no gaseous reaction products that need to be captured, creating a large amount of secondary radioactive waste, occur.

### Key words:

Reactor graphite, electrochemical treatment, radionuclide, uranium-graphite reactor, decontamination.

### REFERENCES

- Wood C. *Graphite Decommissioning Options for Graphite Treatment, Recycling, or Disposal, including a discussion of Safety-Related Issues*. Palo Alto, Electric Power Research Institute Publ., 2006. 156 p.
- Li H., Liu X., Xie F., Jia F. Experimental study on the content and distribution of key nuclides in an irradiated graphite sphere of HTR-10. *Nuclear engineering and design*, 2017, vol. 323, pp. 39–45.
- Kim H.R. The radioactivity estimation of <sup>14</sup>C and <sup>3</sup>H in graphite waste sample of the KRR-2. *Applied Radiation and Isotopes*, 2013, vol. 79, pp. 109–113.
- Plukiene R., Plukis A., Barkauskas V., Gudelis A., Gvozdaite R., Duskesas G., Remeikis V. Actinides in irradiated graphite of RBMK-1500 reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, vol. 277, pp. 95–105.
- Liu X., Huang X., Xie F., Jia F., Feng X., Li H. Source term analysis of the irradiated graphite in the core of HTR-10. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2017, pp. 1–7.
- Drobyshevskiy N.I., Moiseenko E.V., Butov R.A., Tokarev Yu.N. Three-dimensional numerical modeling of the thermal state of the point of deep burial of radioactive waste in the Nizhnekanskiy massif of rocks. *Radioaktivnyye otkhody*, 2017, no. 1, pp. 65–74. In Rus.
- Pavlyuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bepala E.V., Zakharova E.V., Ermolaev V.M., Volkova A.G. Experience of on-site disposal of production uranium-graphite nuclear reactor. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, vol. 184–185, pp. 22–31.
- Chubreev D.O., Kuznetsov G.V. Using clay materials for developing safety barrier of decommissioning AD reactor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 2, pp. 83–87. In Rus.
- Kashcheev V.A., Ustinov O.A., Yakunin S.A., Zagumennov V.S., Pavlyuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bepala E.V. Technology and facility for incinerating irradiated reactor graphite. *Atomic Energy*, 2017, vol. 122, no. 4, pp. 252–256.
- Dunzik-Gougar M.L., Smith T.E. Removal of carbon-14 from irradiated graphite. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, vol. 451, pp. 328–335.

11. Li J., Dunzik-Gouga M.L., Wang J. Recent advances in the treatment of irradiated graphite: A review. *Annals of Nuclear Energy*, 2017, vol. 110, pp. 140–147.
12. Blondel A., Moncoffre N., Toulhoat N., Bererd N., Sibermann G., Sainsot P., Rouzaud J.-N., Deldicque D. New advances on the thermal behaviour of chlorine in nuclear graphite. *Carbon*, 2014, vol. 73, pp. 413–420.
13. Vulpius D., Baginski K., Kraus B., Thomauske B. Thermal treatment of neutron-irradiated nuclear graphite. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, vol. 265, pp. 294–309.
14. Bepala E., Novoselov I., Ushakov I. Heat transfer during evaporation of cesium from graphite surface in an argon environment. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 72, pp. 1–5.
15. Bepala E.V., Myshkin V.F., Pavlyuk A.O., Novoselov I.Yu. Heat and mass transfer in cesium evaporation from graphite surface in argon. *Atomic Energy*, 2017, vol. 122, no. 6, pp. 400–405.
16. Yurchenko A.Yu., Karlin Yu.V., Nikolaev A.N., Karnila O.K., Barinov A.S. Decontamination of radioactive concrete. *Atomic Energy*, 2009, vol. 106, no. 3, pp. 225–230.
17. Zimon A.D., Pikalov V.K. *Dezaktivatsiya* [Decontamination]. Moscow, Izdat Publ., 1994. 336 p.
18. Golovachev M.G., Lisovskikh V.G. Aspects of environmentally acceptable technology for processing graphite radioactive waste. *Problemy radioekologii i pogranichnykh distsiplin*, 2010, vol. 14, pp. 314–326. In Rus.
19. Bepala E.V., Pavlyuk A.O., Zagumenov V.S., Kotlyarevsky S.G. About chemical form and binding energy of <sup>14</sup>C in irradiated graphite of uranium-graphite nuclear reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2017, no. 4, pp. 116–126. In Rus.
20. Jagercikova M., Evraud O., Balesdent J., Lefevre I., Cornu S. Modeling the migration of fallout radionuclides to quantify the contemporary transfer of fine particles in Luvisol profiles under different land uses and farming practices. *Soil & Tillage Research*, 2014, vol. 140, pp. 82–97.
21. Hendry M.J., Wassenaar L.L., Kotzer T. Chloride and chlorine isotopes (<sup>36</sup>Cl and <sup>37</sup>Cl) as tracers of solute migration in a thick, clay-rich aquitard system. *Water resource research*, 2000, vol. 36, no. 1, pp. 285–296.
22. Crooks V.E., Quigley R.M. Saline leachate migration through clay: a comparative laboratory and field investigation. *Can. Geotech. J.*, 1984, vol. 21, pp. 349–362.
23. Samper J., Naves A., Lu C., Li Y., Fritz B., Clement A. Conceptual and numerical models of solute diffusion around a HLW repository in clay. *Physical and Chemistry of the Earth*, 2011, vol. 36, pp. 1714–1720.
24. Pavlyuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bepala E.V., Volkova A.G., Zakharova E.V. Analysis of capability of reducing potential hazard of radioactive waste under thermal treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 8, pp. 24–32. In Rus.
25. Fachinger J., von Lensa W., Podruhina T. Decontamination of nuclear graphite. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, vol. 238, pp. 3086–3091.
26. Chi S.-H., Kim G.G. Effect of air flow rate on the oxidation of NBG-18 and NBG-25 nuclear graphite. *Journal of Nuclear Materials*, 2017, vol. 491, pp. 37–42.
27. Zaretskiy S.A., Suchkov V.N., Zhivotinskiy P.B. *Elektrokhimicheskaya tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv i khimicheskikh istochnikov toka* [Electrochemical technology of inorganic substances and chemical sources of current]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 423 p.
28. Frumkin A., Polianovskaya N., Bagotskaya I., Grigoryev N. Electrocatalysis and electrode surface properties. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 1971, vol. 33, no. 2, pp. 319–328.
29. Nordsveen M., Nescic S., Nyborg R., Stangeland A. A mechanistic model for carbon dioxide corrosion of mild steel in the presence of protective iron carbonate films. P. 1: Theory and verification. *Corrosion*, 2003, vol. 59, no. 4, pp. 443–456.
30. Nemov V.A. Modeling of diffusion-controlled mass transfer in the electrode-solution system during potentiostatic polarization of the interphase surface. General and private boundary conditions. *Vestnik TOGU*, 2014, no. 1 (32), pp. 27–36. In Rus.

*Received: 14 April 2018.*

#### Information about the authors

**Alexander O. Pavlyuk**, Cand. Sc., head of the group, Pilot and Demonstration Center for Uranium-Graphite Nuclear Reactor Decommissioning.

**Evgeniy V. Bepala**, Cand. Sc., physics engineer, Pilot and Demonstration Center for Uranium-Graphite Nuclear Reactor Decommissioning.

**Sergey G. Kotlyarevskiy**, leading engineer, Pilot and Demonstration Center for Uranium-Graphite Nuclear Reactor Decommissioning.

**Anna G. Volkova**, Cand. Sc., researcher, A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS.

**Elena V. Zakharova**, Cand. Sc., head of the laboratory, A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS.

УДК 556.314:551.762.3(571.1)

## НЕФТЕГАЗОВАЯ ГИДРОГЕОХИМИЯ ДОЮРСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЮЖНЫХ РАЙОНОВ ОБЬ-ИРТЫШСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Новиков Дмитрий Анатольевич<sup>1,2</sup>,

NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Рыжкова Светлана Владимировна<sup>1,2</sup>,

RizhkovaSV@ipgg.sbras.ru

Дульцев Федор Федорович<sup>1</sup>,

DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Черных Анатолий Витальевич<sup>1</sup>,

ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Сесь Ксения Валерьевна<sup>1</sup>,

SesKV@ipgg.sbras.ru

Ефимцев Николай Андреевич<sup>2</sup>,

EfimtsevNA@ipgg.sbras.ru

Шохин Андрей Евгеньевич<sup>2</sup>,

ShokhinAE@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

**Актуальность** исследования состоит в решении фундаментальных и прикладных вопросов гидрогеологии и гидрогеохимии доюрского основания Западно-Сибирского артезианского бассейна и имеет большое значение для изучения земной коры платформ и складчатых поясов в целом. Уникальность и сложность объекта заключается в том, что Западно-Сибирский бассейн – самый крупный участок молодой платформы, под чехлом которого сочленяются разновозрастные, геодинамически и гидрогеологически разнообразными комплексы. Научных обобщений имеющегося фактического материала не проводилось более 30 лет! Кроме того, актуальность исследований заключается в практической плоскости – оценке современного состояния водонапорных систем доюрских комплексов, разработке гидрогеологических критериев их нефтегазоносности и уточнении направления поисков и разведки углеводородов в доюрском основании Западной Сибири.

**Цель работы:** выявить особенности химического и газового состава подземных вод и рассолов доюрских комплексов, установить возможные генетические типы подземных вод и рассолов и их пространственное распространение; оценить степень метаморфизации рассолов в сравнении с рядом гидрогеохимических эталонов Сибири.

**Методы:** основываясь на методических приемах В.А. Сулина, А.А. Карцева, С.Л. Шварцева, Н.М. Кругликова, В.В. Нелюбина, О.Н. Яковлева, В.М. Матусевича и других исследователей выявить особенности геохимии подземных вод и рассолов, установить генетический облик подземных вод и рассолов, используя «генетические» коэффициенты, отражающие отношения различных макро- и микрокомпонентов в их составе:  $rNa/rCl$ ,  $Cl/Br$ ,  $Ca/Cl$ ,  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$ ,  $V/Br$ ,  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ ,  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$  и другие. Применяя интегрированный показатель метаморфизации рассолов ( $S$ ) по С.Л. Шварцеву и отношения  $Ca/Cl$ ,  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ ,  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$ , оценить степень метаморфизации рассолов.

**Результаты.** Приводятся результаты исследования геохимии подземных вод и рассолов доюрских отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья. Установлено, что в исследуемом регионе развиты подземные воды и рассолы с величиной общей минерализации от 4 до 100 г/дм<sup>3</sup>  $Cl-Na$ ,  $Cl-Na-Ca$  и  $Cl-HCO_3-Na$  состава при доминировании первых. Проведя ретроспективу гидрогеологической истории и детальный анализ гидрогеохимических данных, можно предположить доминирование в разрезе седиментогенных рассолов и наличие литогенных (термодегидратационных), древних инфильтрогенных и конденсатогенных вод. Совместное рассмотрение  $rNa/rCl$ ,  $Ca/Cl$ ,  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ ,  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$  отношений с интегрированным показателем метаморфизации рассолов  $S$  подтверждает, что в изучаемом районе рассолы находятся на начальной стадии метаморфизации химического состава.

### Ключевые слова:

Нефтегазовая гидрогеохимия, рассол, генетический тип, степень метаморфизации, Обь-Иртышское междуречье, Западная Сибирь.

### Введение

С началом ширококомасштабных нефтегазопоисковых работ на юрские и меловые отложения в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции

(ЗСНГП) в 1960-х гг. в своих работах Ф.Г. Гурари, В.Н. Казаринов, М.К. Касьянов, Ю.К. Миронов, И.И. Нестеров, Л.И. Ровнин, Н.Н. Ростовцев, М.Я. Рудкевич, А.А. Трофимук, Ю.Г. Эрвье и дру-

гие рассматривали доюрские комплексы в качестве резерва для будущих открытий [1–5]. В последние годы в связи с высокой степенью геолого-геофизической изученности антиклинального фонда структур мезозойского осадочного чехла значительно возрос интерес недропользователей к этому объекту, что подкрепляется открытием в его границах более 70 залежей нефти и газа [6–10].

Следует отметить, что до настоящего времени гидрогеология и гидрогеохимия доюрских комплексов Западной Сибири остается практически не изученной. Последнее обобщение, где были приведены схематичные данные по доюрским комплексам Западно-Сибирского артезианского бассейна (ЗСАБ), было выполнено в 1985 г. и принадлежит Н.М. Кругликову, В.В. Нелюбину и О.Н. Яковлеву [11]. Позже, в разных научных коллективах Москвы, Новосибирска, Тюмени, Томска, в большей степени в Сибирской научной гидрогеохимической школе вышли в свет работы В.М. Матусевича, А.А. Карцева, С.Л. Шварцева, Н.П. Запывалова, А.Р. Курчикова, Д.А. Новикова и других, затрагивающие отдельные вопросы гидрогеологии и гидрогеохимии доюрских комплексов ряда районов ЗСАБ (Приуральская нефтегазоносная область, южные районы полуострова Ямал, Надым-Тазовское междуречье, Предъенисейская нефтегазоносная субпровинция и другие) [12–26]. Гидрогеология и гидрогеохимия доюрских отложений изучается во многих странах мира, что в основном связано с их промышленной нефтегазоносностью. Наиболее интересные с точки зрения обобщения и полноты представления гидрогеохимического материала публикации вышли в последние годы по Иллинойскому, Мичиганскому, Бофорт-Маккензи, Северо-Аляскинскому и другим бассейнам [27–44]. В этой связи новые сведения и обобщения по гидрогеологии и гидрогеохимии доюрских комплексов ЗСАБ представляют несомненный научный интерес.

#### **Объект, материалы и методы исследований**

Район исследований охватывает северо-западную часть Новосибирской области и граничные районы Томской и Омской областей, входящих в состав Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Доюрские комплексы на территории Новосибирской области вскрыты 129 скважинами на 51 локальном поднятии (рис. 1). Изученность глубоким бурением рассматриваемой территории крайне неравномерна. Наибольшая ее плотность характеризует северо-восточные районы. Установлено погружение их кровли с юга на север. В среднем глубины залегания доюрских комплексов составляют 2700–3000 м (Сергеевская, Чековская, Малоичская площади). Максимально изучен бурением разрез доюрских комплексов на Малоичской площади. В скважине № 4 проходка составила более 1700 м.

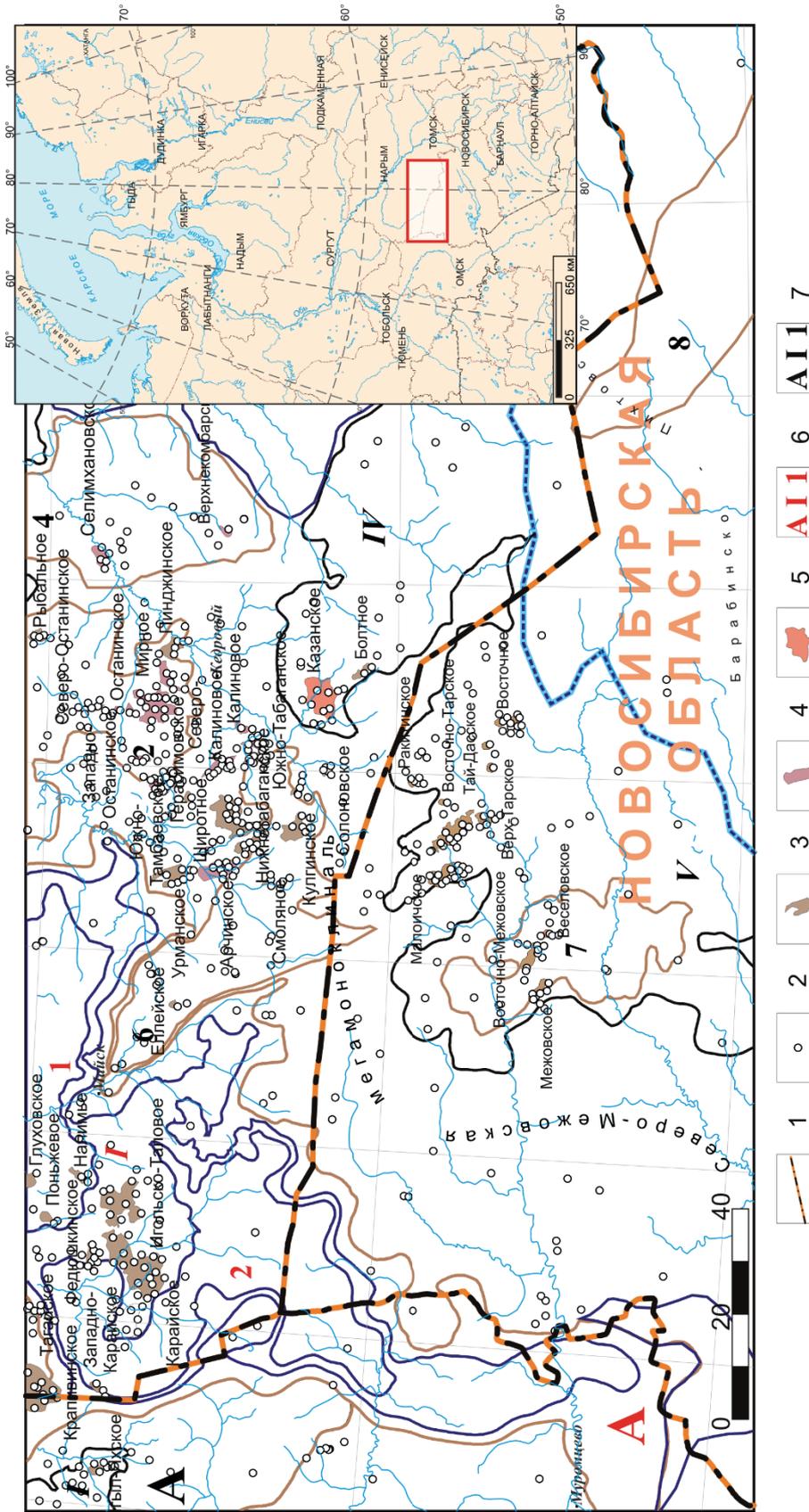
Докембрийские и кембрийские образования в исследуемом районе, а также ордовикские, силу-

рийские и нижнекаменноугольные (морские) отложения не изучены бурением [45]. Наиболее полно здесь представлены породы девонского возраста. Датировки отложений девонской, каменноугольной и пермской систем обоснованы палеонтологическими данными. Выявлены тела интрузивных пород преимущественно кислого состава [46], наиболее крупным из которых является Межовский гранитоидный массив. На его склонах происходит постепенное выклинивание юрских отложений [47]. На Межовской площади на гранитах залегают нижнемеловые глины. Ультраосновные и основные интрузивные тела среднепалеозойского возраста, а также пластовые тела и дайки ранне-среднетриасовых долеритов, габбро и габбро-долеритов развиты преимущественно в западной части района исследований.

Следует отметить, что на доюрскую поверхность выходят породы разнообразные как по литологическому составу, так и возрасту. На северо-западе Новосибирской области установлено два типа разреза: вулканогенно-осадочный и преимущественно карбонатный. Первый из них развит на территории Туйско-Барабинского структурно-фациального района в западной части изучаемой территории, а второй – Нюрольского в восточной [45]. Особенность эффузивно-терригенной последовательности пород заключается в направленности изменения во времени состава вулканитов от средне-основных к средне-кислым [46]. Вулканиты среднего состава туйской толщey установлены в разрезах скважин Красногорская-1 и Пахомовская-1. Средне-кислые вулканиты, слагающие теверизскую толщey и условно датированные поздним карбоном – ранней пермью, вскрыты скважинами Бочкаревская-2, Витинская-1, Пустоваловская-1, Сергеевская-5 и 6, Тай-Дасская-3, Тебисская-1 и 2, Чековская-1 и 2 и другими. В пределах новосибирского фрагмента Нюрольского структурно-фациального района развиты в основном девонские рифогенные известняки. Однако на небольших участках здесь фиксируются и вулканиты верхнего палеозоя, а также тонкотерригенные породы нижнего девона [45].

Таким образом, материалы бурения параметрических, поисковых и разведочных скважин глубокого бурения, сейсмические данные и геологическая интерпретация аномальных магнитных и гравитационных полей свидетельствуют о том, что фундамент северной части Новосибирской области сложен метаморфическими, магматическими и осадочными породами. Карбонатные толщey представляют собой тектонические складчатые покровы, а осадочные породы верхнего палеозоя и эффузивно-осадочные породы нижнего-среднего триаса слагают орогенные толщey [48].

Детальный анализ геологических особенностей доюрских комплексов, их вещественного состава, датировок возраста водовмещающих пород, основанных на палеонтологических данных, комплексных каротажных диаграмм ГИС, результатов испы-



**Рис. 1.** Обзорная карта района исследований: 1 – административные границы, 2 – скважины, 3 – нефтяные, 4 – нефтегазоконденсатные, 5 – газоконденсатные и газовые; Тектонические элементы: 6 – отрицательные, 7 – положительные. Названия тектонических элементов приведены на карте [47]: **Отрицательные:** А – Колтогорско-Нюрольский жемчужный бассейн, 1 – Южно-Нюрольская мезовпадина, 2 – Южно-Нюрольская мезовпадина, 3 – Бакчарская мезовпадина, 5 – Кыштовский наклонный мезопрогиб; **Положительные:** А – Верхневасюганская антеклиза, 1 – Верхнедемьянский мегавал, 11 – Парабельский наклонный мегавал, 11 – Калгачский наклонный мегавал, 11 – Межовский структурный мегаам, 1 – Колпашевский мезовал, 2 – Пудинское куполовидное мезоподняние, 4 – Горелоярское куполовидное мезоподняние, 6 – Лавровский наклонный мезовал, 7 – Западно-Межовское куполовидное мезоподняние, 8 – Верхнегегарский мезовыступ

**Fig. 1.** Location of the studied area within West Siberia: 1 – administrative boundaries, 2 – fields, 3 – oil, 4 – oil-gas-condensate and condensate, 5 – gas-condensate and condensate; Tectonic elements: 6 – Negative; 7 – Positive. Names of tectonic elements are given on the map [47]: **Negative:** A – Koltohorsko-Nyurolsky Trench, 1 – Nyurol megadepression, 1 – Centralno-Nyurol megadepression, 2 – Yuzhno-Nyurol mesodepression, 3 – Bakchar mesodepression, 5 – Kyshtov inclined mesodownfold; **Positive:** A – Verkhnevasyuganskaya antecline, 1 – Verkhnedemyanskiy megaswell, 11 – Parabelskiy inclined megaswell, 11 – Kalpashskiy inclined megaswell, 2 – Pudinское dome-shaped mesozouplift, 4 – Goreloyarskoye dome-shaped mesozouplift, 6 – Lavrovskiy inclined mesozouplift, 7 – Western Mezhovskiy dome-shaped mesozouplift, 8 – Verkhnegegarskiy mezobulge

тания и гидрогеохимического опробования скважин позволил впервые разделить имеющийся массив данных на две гидрогеохимические выборки: 1) подземные воды, распространенные в пределах магматических и метаморфических формаций, и 2) подземные воды и рассолы, распространенные в осадочных, преимущественно карбонатных породах. Всего с учетом территории Новосибирской и граничных районов Томской и Омской областей к первой выборке было отнесено 202 пробы, а ко второй – 131. Для сравнительного анализа степени метаморфизации рассолов нами были привлечены гидрогеохимические данные по доюрским комплексам Предъенисейского осадочного бассейна (122 пробы), прилегающим районам Сибирской платформы (189 проб), Нордвикскому солянокупольному району Анабаро-Хатангского бассейна (97 проб) и структурам горно-складчатого обрамления (94 пробы). Всего электронная база данных для настоящей работы представлена записями по 835 пробам подземных вод и рассолов.

Основываясь на методических приемах В.А. Сулина, А.А. Карцева, С.Л. Шварцева, Н.М. Кругликова, В.В. Нелюбина, О.Н. Яковлева,

В.М. Матусевича и других исследователей, были выявлены особенности геохимии подземных вод и рассолов. С применением «генетических» коэффициентов ( $r_{Na/rCl}$ ,  $Cl/Br$ ,  $Ca/Cl$ ,  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$ ,  $V/Br$ ,  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ ,  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$  и другие) предварительно выявлен генетический тип подземных вод и рассолов. Интегрированный показатель метаморфизации рассолов (S) по С.Л. Шварцеву [49] и отношения  $Ca/Cl$ ,  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ ,  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$  позволили оценить степень метаморфизации рассолов. По величине S выполнен сравнительный анализ рассолов осадочных бассейнов Сибири.

### Результаты и их обсуждение

Химический состав

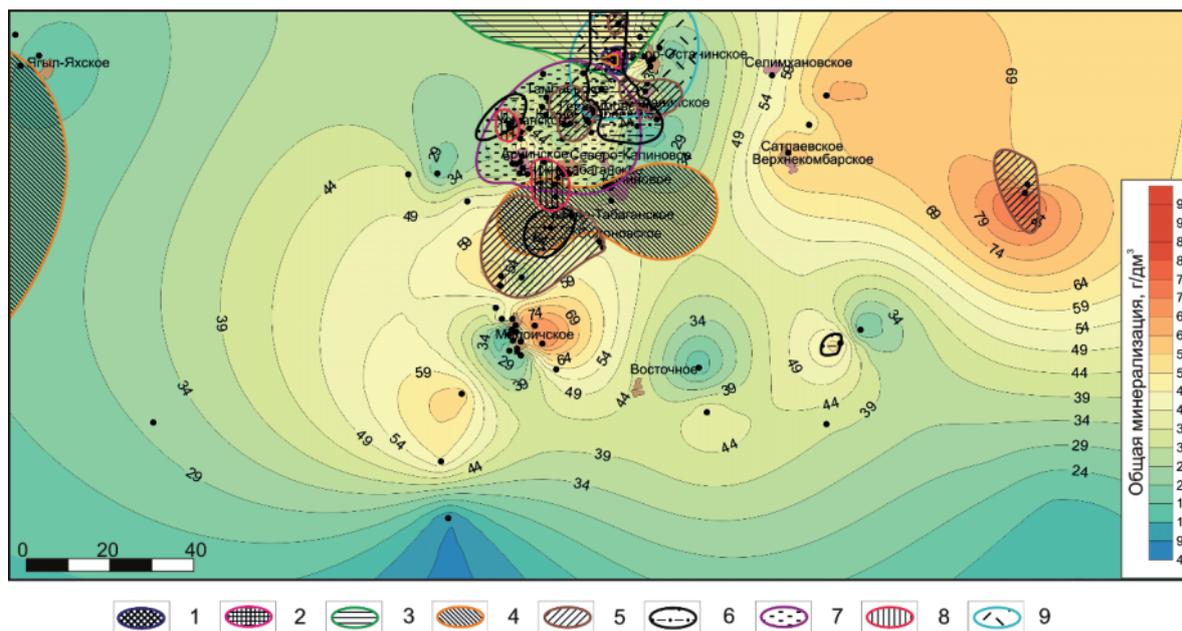
Сложность геологических условий доюрских комплексов нашла свое отражение в гидрогеохимических особенностях вод различной солености и состава в зависимости от вещественного состава водовмещающих отложений (табл. 1). Как видно из этой таблицы, общая минерализация пластовых вод изменяется в широких пределах: от 8,62 до 100 г/дм<sup>3</sup>. Слабые рассолы хлоридного натриевого состава с минерализацией до 99,19 г/дм<sup>3</sup> выявля-

**Таблица 1.** Типовые анализы подземных вод и рассолов доюрских комплексов южных районов Обь-Иртышского междуречья  
**Table 1.** Typical analyzes of underground water and brines of the pre-Jurassic complexes in the south regions of the Ob-Irtysh interfluvium

№ п.п. Sample №	Площадь, № скв. Area, well number	Интервал, м Interval, m	Возраст Age	pH	Элементы, мг/дм <sup>3</sup> Components, mg/dm <sup>3</sup>											M, г/дм <sup>3</sup> TDS, g/dm <sup>3</sup>
					Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Na+K	Ca	Mg	Br	SiO <sub>2</sub>	B	I		
Магматические и метаморфические формации/Magmatic and metamorphic formations																
1	Буйновская, 1/Buinovskaya, 1	2534–2660	P	6,4	3416	1830	340	2892	80	48	8,4	*	6,2	0,7	8,62	
2	Ягыл-Яхская, 8/Yagyl-Yakhskaya, 8	2478–2798	Pz <sub>2</sub>	7,0	4721	1037	21	3010	208	38	14,2	40	9,9	1,5	9,10	
3	Нижне-Табганская, 17 Nizhne-Tabaganskaya, 17	3110–3121	C <sub>1</sub>	7,7	6390	275	140	3906	352	0	30	33	*	5,7	11,13	
4	Нижне-Табганская, 17 Nizhne-Tabaganskaya, 17	2998–3003	C <sub>1</sub>	6,9	9714	171	15	5590	481	122	*	16	*	*	16,11	
5	Нижне-Табганская, 9 Nizhne-Tabaganskaya, 9	3050–3068	C <sub>1</sub>	8,5	12673	653	328	8300	291	7	54,5	*	*	*	22,31	
6	Нижне-Табганская, 17 Nizhne-Tabaganskaya, 17	3030–3042	C <sub>1</sub>	7,3	13685	525	91	8490	433	68	*	32	*	*	23,32	
7	Кулайская, 1/Kulayskaya, 1	2350–2436	T	7,4	13490	1068	10	8389	597	26	53,3	160	15,3	4,6	23,81	
8	Сергеевская, 4/Sergeevskaya, 4	2890–2915	T	6,6	17331	1281	0	10895	562	97	66,5	60	12,5	12,2	30,32	
9	Горело-Ярская, 5/Gorelo-Yarskaya, 5	2720–2835	P–T	6,7	19074	613	0	10872	1307	122	63,9	28	*	3	32,08	
Осадочные формации/Sedimentsry formations																
10	Верхне-Кенгская, 1/Verkhne-Kengskaya, 1	2614–2616	D <sub>3</sub>	6,2	24480	622	0	13165	2004	340	98,4	16,6	2,1	5,6	40,73	
11	Солоновская, 43/Solonovskaya, 43	3056–3076	D <sub>3</sub> –C <sub>1</sub>	5,8	27868	500	40	15860	1816	157	114	13,5	4	24,4	46,40	
12	Хылькинская, 1/Khylkinskaya, 1	3068–3076	D <sub>1-2</sub>	7,1	33412	732	15	18012	2448	547	133	22,3	1,5	8,6	55,33	
13	Солоновская, 44/Solonovskaya, 44	3036–3043	D <sub>3</sub> –C <sub>1</sub>	6,8	31950	488	46	18800	1440	288	117	9,8	0,9	1,3	53,14	
14	Тамбаевская, 3/Tambaevskaya, 3	3840–3860	D <sub>3</sub>	6,9	31950	702	10	18810	1635	175	142,6	2,5	20	21,7	53,47	
15	Малоичская, 2/Maloichskaya, 2	2876–3000	D <sub>1-2</sub>	5,8	34250	207	13	19890	2035	39	134,4	*	6,3	9,4	56,58	
16	Арчинская, 45/Archinskaya, 45	3093–3102	D <sub>1-2</sub>	7,6	38860	763	17	23024	1583	353	163	7	2,5	26,3	64,80	
17	Герасимовская, 2/Gerasimovskaya, 2	2957–2997	D <sub>2-3</sub>	6,4	39405	793	0	21905	2520	510	175,6	*	24,6	13	65,35	
18	Малоичская, 8/Maloichskaya, 8	2785–2804	D <sub>3</sub>	5,8	39760	976	0	20702	4358	240	106,8	92	14,2	12,2	66,26	
19	Верх-Тарская, 13/Verkh-Tarskaya, 13	2709–2776	D <sub>1-2</sub>	6,9	49203	720	8	28523	2734	279	194,5	*	11,5	13,4	81,69	
20	Крыловская, 1/Krylovskaya, 1	2888–2910	P	6,4	60280	49	0	35220	3206	97	320	*	13,5	7,2	99,19	
Гидрогеохимический фон/Hydrogeochemical background				6,5	25596	700	55	14813	1505	178	110,6	38,1	9,7	10,0	43,0	

Примечание: «\*» – нет сведений.

Note: \* – lack of data.



**Рис. 2.** Гидрогеохимическая карта доюрских комплексов южных районов Обь-Иртышского междуречья. Гидрогеохимические аномалии по содержанию (мг/дм<sup>3</sup>): 1 – I>25, 2 – Br>150, 3 – B>30, 4 – SiO<sub>2</sub>>100, 5 – Rb>1, 6 – Sr>450, 7 – Zn>2, 8 – Mn>2, 9 – Li>7. Остальные условные обозначения см. рис. 1

**Fig. 2.** Hydrogeochemical map of the pre-Jurassic complexes of the south part of the Ob-Irtys interfluve. For legend, see Fig. 1. Hydrogeochemical anomalies (in mg/dm<sup>3</sup>): 1 – I>25, 2 – Br>150, 3 – B>30, 4 – SiO<sub>2</sub>>100, 5 – Rb>1, 6 – Sr>450, 7 – Zn>2, 8 – Mn>2, 9 – Li>7

ны на Крыловской площади в северо-восточных районах изучаемой территории и до 81,69 г/дм<sup>3</sup> на Верх-Тарской и Малоичской площадях в центральных (рис. 2). На западе и юге преобладают хлоридные натриевые воды с минерализацией, не превышающей 30 г/дм<sup>3</sup>. На остальной территории доминируют воды с величиной общей минерализации 30–60 г/дм<sup>3</sup>. Доминируют в основном Cl Na воды (по С.А. Щукареву), встречаются проявления вод Cl Na-Ca, Cl-HCO<sub>3</sub> состава на Арчинской и Малоичской площадях соответственно.

Отмечается закономерный рост основных солеобразующих компонентов с увеличением общей минерализации подземных вод. Статистический анализ гидрогеохимических данных позволил установить характеристики гидрогеохимического фона и аномалий. Фоновые воды доюрских комплексов характеризуются хлоридным натриевым составом с величиной общей минерализации 40–45 г/дм<sup>3</sup>. Содержание HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> не превышает 700 мг/дм<sup>3</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 55 мг/дм<sup>3</sup>, Na<sup>+</sup> – 14,8 г/дм<sup>3</sup>, Г – не более 10,0 мг/дм<sup>3</sup>, брома не выше 110,6 мг/дм<sup>3</sup> и т. д. (табл. 1). В пределах доюрских комплексов выявлены и околтурены девять типов гидрогеохимических аномалий по содержанию (мг/дм<sup>3</sup>) (рис. 2). Большинство аномалий приурочено к локальным поднятиям с выявленными залежами углеводородов. Так, среди «традиционных» микрокомпонентов наибольшие концентрации йода 37,0 мг/дм<sup>3</sup> установлены в карбонатах верхнего девона в интервале 3116–3159 м в скважине № 2 Сельвейкинской площади; брома – более

250 мг/дм<sup>3</sup> выявлены на Герасимовской и Крыловской площадях; бора – более 40 мг/дм<sup>3</sup> встречаются в рассолах на Малоичской, Урманской и Тамбаевской площадях.

Среди щелочных элементов наибольшие концентрации рубидия выше 1 мг/дм<sup>3</sup> выявлены на Калганакской, Западно-Останинской, Герасимовской, Южно-Тамбаевской, Широной, Кулгинской, Солонювской и Заречной площадях. Содержание лития более 7 мг/дм<sup>3</sup> выявлены на Северо-Останинском, Останинском и Герасимовском месторождениях, а также на Сельвейкинской и Калганакской площадях. Среди щелочноземельных элементов аномальные значения Sr отмечены в рассолах на Урманском и Западно-Останинском месторождениях, а также на Кулгинской, Мирной и Сельвейкинской площадях. В зону повышенных концентраций по цинку попадают рассолы ряда месторождений Чузикско-Чизапской зоны нефтегазонакопления: Тамбаевское, Герасимовское, Южно-Тамбаевское, Урманское, Арчинское, Северо-Калиновое, Нижне-Табаганское. Наибольшие концентрации марганца отмечены в водах Нижне-Табаганского и Урманского месторождений. В целом все выявленные гидрогеохимические аномалии приурочены к центральным и северным районам исследуемого региона.

Одним из ключевых соединений, контролирующей стадию взаимодействия в системе вода – горная порода, является кремнезем [50]. Ранее нами установлено, что в зоне катагенеза его концентрации более 60–80 мг/дм<sup>3</sup> приводят к насыщению

подземных вод относительно альбита и даже микроклина [51]. В исследуемом регионе аномальные концентрации  $\text{SiO}_2$  выше  $100 \text{ мг/дм}^3$  выявлены на Сельвейкинской и Урманской, Кулгинской, Калиновой и Смоляной площадях, а также на Кулайской площади в отложениях триаса, где его содержания составляют  $160 \text{ мг/дм}^3$  (табл. 1).

Таким образом, в пределах южных районов Обь-Иртышского междуречья доминируют рассолы хлоридного натриевого состава с величиной общей минерализации  $50\text{--}70 \text{ г/дм}^3$ , что можно объяснить отсутствием галогенных формаций в геологическом разрезе, которые широко развиты в пределах расположенной восточнее древней Сибирской платформы [52–54] и в Анабаро-Хатангском бассейне [25]. В восточном направлении происходит закономерная смена бессолевого геологического разреза молодой Западно-Сибирской плиты на соленосный в Предъенисейском осадочном бассейне [18], а в прилегающих районах древней Сибирской платформы суммарная мощность солей нередко достигает  $400 \text{ м}$  и более [55].

Генетические типы подземных вод и рассолов

Согласно классическим работам В.А. Сулина, А.А. Карцева, С.Л. Шварцева, Н.М. Кругликова, В.В. Нелюбина, О.Н. Яковлева, В.М. Матусевича и других исследователей, генетический тип воды можно установить, используя «генетические» коэффициенты, отражающие отношения различных макро- и микрокомпонентов в ее составе:  $r\text{Na}/r\text{Cl}$ ,  $\text{Cl}/\text{Br}$ ,  $\text{Ca}/\text{Cl}$ ,  $r(\text{HCO}_3 + \text{CO}_3)/r(\text{Ca} + \text{Mg})$ ,  $\text{V}/\text{Br}$ ,  $\text{Br}/\text{Cl} \cdot 10^{-3}$ ,  $\text{Sr}/\text{Cl} \cdot 10^{-3}$  и другие [11–13, 15–18, 24, 25, 49].

Проведя ретроспективу геологической истории изучаемой территории и детальный анализ гидрогеохимических данных (табл. 2, рис. 3), можно предположить наличие трех основных генетических типов подземных вод и рассолов: 1) седиментогенных, 2) литогенных (термодегидратационных) и древних инфильтрогенных, 3) конденсатогенных. Наибольшим разнообразием химического состава и вариацией всех генетических коэффициентов отличаются конденсатогенные воды. Помимо низкой величины их общей минерализации, которая составляет до  $10 \text{ г/дм}^3$ , они отличаются высокой газонасыщенностью – до  $2,0 \text{ л/л}$  и более. Эти воды выявлены на локальных участках близ водонефтяных (ВНК) или газоводяных (ГВК) контактов на большинстве изученных месторождений (Ягыл-Яхское, Малоичское, Восточно-Межовское, Северо-Останинское и другие). Они характеризуются высоким отношением  $\text{V}/\text{Br} > 0,7$  и  $r(\text{HCO}_3 + \text{CO}_3)/r(\text{Ca} + \text{Mg}) > 1,0$ , а  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  и  $\text{Cl}/\text{Br}$  коэффициенты варьируют от  $0,90$  до  $1,31$  и от  $280$  до  $406,7$  соответственно. Литогенные (на глубинах свыше  $2 \text{ км}$ ) и древние инфильтрогенные воды отличаются от предыдущего типа более высокими значениями солености вод ( $10\text{--}35 \text{ г/дм}^3$ ) и более низкими значениями перечисленных выше коэффициентов. Седиментогенные воды, являющиеся

признаками высокой степени гидрогеологической закрытости недр, зон затрудненного и весьма затрудненного водообмена, в которых создаются условия наиболее благоприятные для процессов миграции и аккумуляции нефти и газа, характеризуются величиной общей минерализации более  $25\text{--}30 \text{ г/дм}^3$ , более низкими по сравнению с предыдущими типами значениями коэффициента метаморфизации вод  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  (в среднем  $0,87$ ) и  $\text{Cl}/\text{Br}$  коэффициента (в среднем  $256$ ).

**Таблица 2.** Генетическая характеристика подземных вод и рассолов доюрских комплексов южных районов Обь-Иртышского междуречья

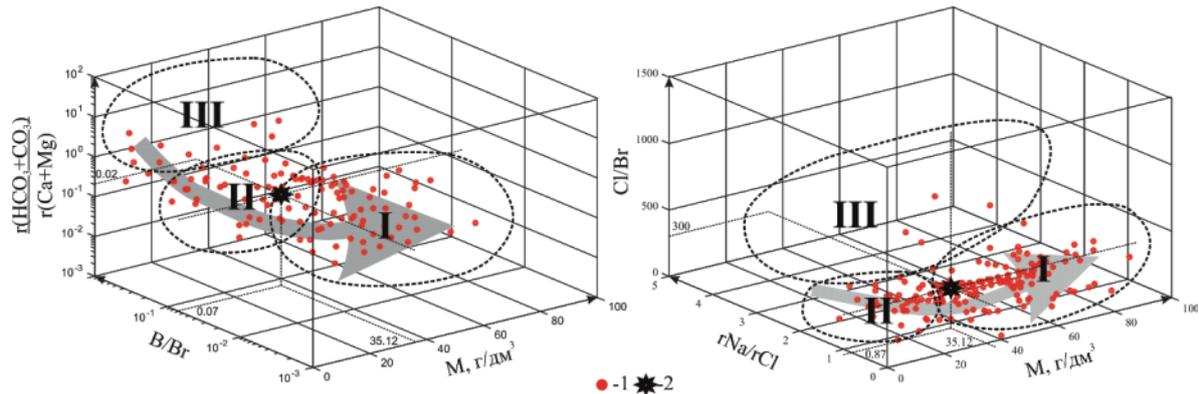
**Table 2.** Groundwater and brines genetic characteristic of the pre-Jurassic complexes of the south part of the Ob-Irtysh interfluvium

№ п.п. Sample №	$r\text{Na}/r\text{Cl}$	$\text{Cl}/\text{Br}$	$\text{Ca}/\text{Cl}$	$\text{V}/\text{Br}$	$r(\text{HCO}_3 + \text{CO}_3)/r(\text{Ca} + \text{Mg})$	$\text{Br}/\text{Cl} \cdot 10^{-3}$	$\text{Sr}/\text{Cl} \cdot 10^{-3}$	S	Генетический тип <sup>xx</sup> Genetic type <sup>xx</sup>
Магматические и метаморфические формации Magmatic and metamorphic formations									
1	1,31	406,7	0,02	0,74	3,77	2,46	*	81,89	III
2	0,98	332,5	0,04	0,70	1,26	3,01	*	100,17	III
3	0,94	213,0	0,06	*	0,26	4,69	*	156,35	II
4	0,89	*	0,05	*	0,08	*	*	*	II
5	1,01	232,5	0,02	*	0,71	4,30	0,28	143,21	II
6	0,96	*	0,03	*	0,32	*	*	*	II
7	0,96	253,1	0,04	0,29	0,55	3,95	*	131,58	II
8	0,97	260,6	0,03	0,19	0,58	3,84	*	127,78	II
9	0,88	298,5	0,07	*	0,13	3,35	*	111,57	I
Осадочные формации/Sedimentary formations									
10	0,83	248,8	0,08	0,02	0,08	4,02	*	133,87	I
11	0,88	244,5	0,07	0,04	0,08	4,09	9,47	136,23	I
12	0,83	251,2	0,07	0,01	0,07	3,98	*	132,57	I
13	0,91	273,1	0,05	0,01	0,08	3,66	8,04	121,95	I
14	0,91	224,1	0,05	0,14	0,12	4,46	5,10	148,64	I
15	0,90	254,8	0,06	0,05	0,03	3,92	*	130,68	I
16	0,91	238,4	0,04	0,02	0,12	4,19	*	139,69	I
17	0,86	224,4	0,06	0,14	0,08	4,46	15,84	148,41	I
18	0,80	372,3	0,11	0,13	0,07	2,69	*	89,47	I
19	0,89	253,0	0,06	0,06	0,07	3,95	*	131,65	I
20	0,90	188,4	0,05	0,04	0,00	5,31	*	176,79	I

Примечание: «\*» – нет сведений; \* – № соответствует пробе в табл. 1; xx – название генетического типа подземных вод и рассолов соответствует рис. 3.

Note: \* – lack of data; \* – sample number from table 1; xx – for groundwater and brines genetic type see Fig. 3.

Проведенные исследования в комплексе со статистическими методами и палеогидрогеологическими реконструкциями позволили оконтурить области распространения установленных генетических типов подземных вод в пределах доюрских комплексов. Древние инфильтрогенные воды доминируют в южных и северо-восточных районах исследуемого региона, что связано с близостью окраины ЗСАБ (рис. 4). Литогенные воды распространены преимущественно в западных районах на глубинах более  $2 \text{ км}$ , где проявлены процессы



**Рис. 3.** Схема генетических типов подземных вод и рассолов в пределах доюрских комплексов южных районов Обь-Иртышского междуречья: 1 – точки изученных проб; 2 – точка морской воды. Генетический тип подземных вод и рассолов: I – седиментогенный, II – литогенный, древний инфильтрогенный, III – конденсатогенный

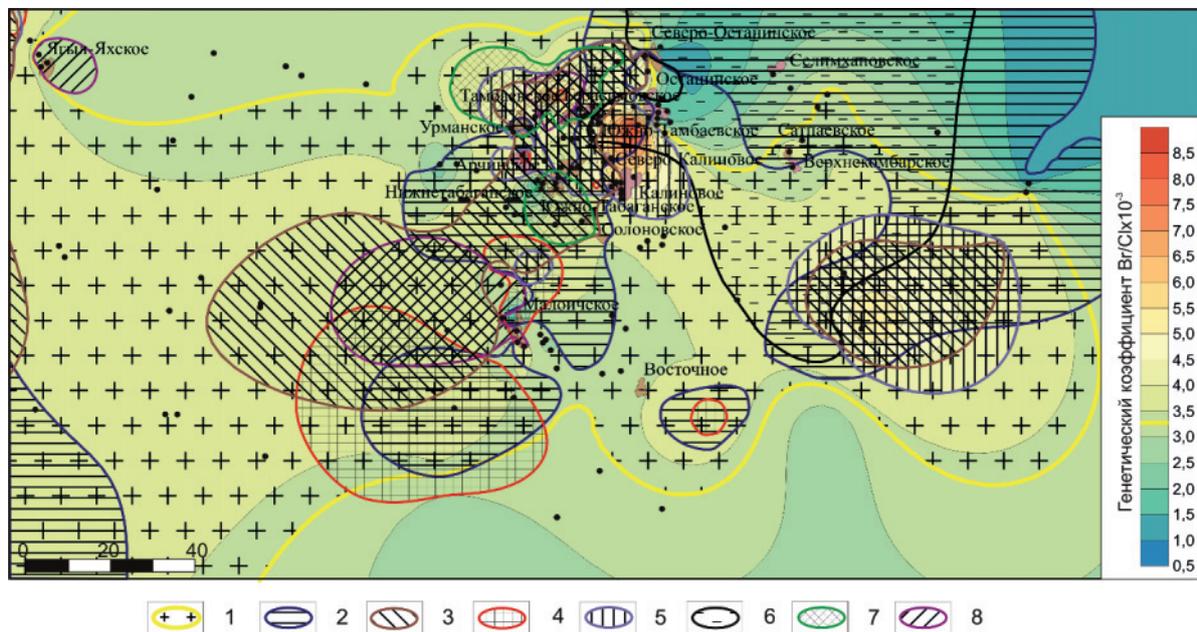
**Fig. 3.** Scheme of groundwater and brines genetic types of the study area: 1 – data points, 2 – sea-water point. Genetic type: I – sedimentogenic, II – lithogenic, ancient infiltrogenic, III – condensation

термодегидратации глинистых минералов. Седиментогенные воды и слабые рассолы установлены нами на большей части исследуемой территории, что хорошо видно по отношениям  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ ,  $rNa/rCl$ ,  $Cl/Br$ ,  $Ca/Cl$ , и  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$ . Конденсатогенные воды выявлены в приконтурных зонах залежей углеводородов на Ягыл-Яхском (нефтяная залежь в пласте М), Малоичском (нефтяные залежи в пластах  $M_0$  и М), Нижнетабаганском (нефтяные залежи в пластах  $M_1$  ( $M_{1-10}$ )), Южно-Табаган-

ском (нефтяные залежи в пластах  $M_1^1$ ,  $M_1^2$  и  $M_1^3$ ) и других месторождениях.

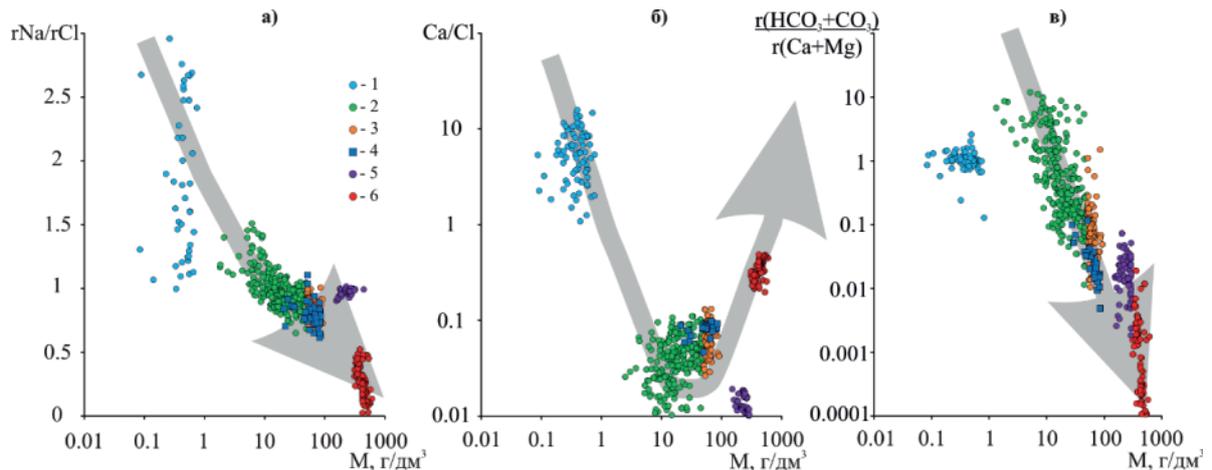
Степень метаморфизации

Все генетические типы подземных вод и рассолов метаморфизованы в разных направлениях. Для сравнения уровня метаморфизации нами был применен интегрированный показатель метаморфизации рассолов (S) по С.Л. Шварцеву [49], который используется в подобных исследованиях по



**Рис. 4.** Карта распространения генетических типов подземных вод в пределах доюрских комплексов южных районов Обь-Иртышского междуречья. Область распространения преимущественно седиментогенных вод – 1; зоны развития: седиментогенных вод по коэффициентам: 2 –  $rNa/rCl$ , 3 –  $Cl/Br$ , 4 –  $Ca/Cl$ , 5 –  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ , 6 –  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$ ; конденсатогенных вод по: 7 –  $B/Br$ , 8 –  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$ . На остальной территории доминируют древние инфильтрогенные и литогенные воды (на глубинах более 2 км). Остальные условные обозначения см. рис. 1

**Fig. 4.** Distribution of genetic types of groundwater of the study area. 1 – area of predominantly sedimentogenic waters (by coefficients): 2 –  $rNa/rCl$ , 3 –  $Cl/Br$ , 4 –  $Ca/Cl$ , 5 –  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ , 6 –  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$ ; condensate waters (by coefficients): 7 –  $B/Br$ , 8 –  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$ . Ancient infiltrogenic and lithogenic waters (at depths of more than 2 km) dominate in the rest of the territory



**Рис. 5.** Зависимость  $rNa/rCl$  (а),  $Ca/Cl$  (б) и  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$  (в) отношений с общей минерализацией подземных вод и рассолов в пределах доюрских комплексов Сибири. Изученные воды: 1 – горно-складчатого обрамления; 2 – зон распространения магматических и метаморфических формаций (район исследований); 3 – зон распространения осадочных формаций (район исследований); 4 – Предъенисейского осадочного бассейна; 5 – солянокупольных структур Анабаро-Хатангского бассейна; 6 – Сибирской платформы. Стрелкой показано направление метаморфизации подземных вод и рассолов

**Fig. 5.** The  $rNa/rCl$  (a),  $Ca/Cl$  (б) and  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$  (в) ratios relationships with total mineralization of groundwater and brines within the pre-Jurassic complexes of Siberia. The studied waters: 1 – mountain-folded framing; 2 – zones of magmatic and metamorphic formations distribution (Western Siberia); 3 – zones of sedimentary formations distribution (Western Siberia); 4 – Fore-Yenisey sedimentary basin; 5 – salt-dome structures of the Anabar-Khatanga basin; 6 – the Siberian platform. The arrow shows the direction of metamorphism of groundwater and brines

регионам с наличием в гидрогеологическом разрезе рассолов. Степень метаморфизации подземных вод и рассолов во многом определяется по отношениям  $Ca/Cl$ ,  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ ,  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$ , поскольку суть метаморфизации наиболее ярко проявляется в увеличении после их захоронения содержаний в них  $Ca$ ,  $Sr$  и  $Br$ .

Сравнительный анализ геохимических особенностей подземных вод и рассолов доюрских комплексов Сибири показал, что по  $rNa/rCl$ ,  $Ca/Cl$  и  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$  отношениям все изученные воды обособляются в несколько групп (рис. 5). Первая включает пресные инфильтрационные воды горно-складчатого обрамления, которые характеризуются величиной общей минерализации до  $1 \text{ г/дм}^3$  и преимущественно гидрокарбонатным кальциевым составом и отношениями  $rNa/rCl$ ,  $Ca/Cl$  и  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg) > 1$ .

Вторая группа объединяет современные инфильтрационные рассолы выщелачивания каменной соли в пределах Нордвикского солянокупольного района на Нордвикской, Южно-Тиганской и Илья-Кожевниковской структурах Анабаро-Хатангского бассейна с величиной общей минерализации  $153\text{--}312 \text{ г/дм}^3$  хлоридного натриевого состава [56]. Отношение  $rNa/rCl$  составляет  $0,90\text{--}1,01$ ;  $Ca/Cl$  до  $0,02$ ,  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$  от следов до  $0,07$ , а интегрированный показатель метаморфизации рассолов  $S$  закономерно находится около  $0$  (рис. 6).

В третью группу следует объединить подземные воды и рассолы доюрских комплексов Западной Сибири. Установлены особенности геохимии

подземных вод и рассолов и распределения основных коэффициентов в зависимости от состава вмещающих пород. Так, наиболее низкая минерализация до  $35 \text{ г/дм}^3$  и высокие  $rNa/rCl$  и  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$  отношения характерны для вод, распространенных в пределах магматических и метаморфических формаций, они же отличаются наименьшими значениями  $Ca/Cl$ . Рассолы, распространенные в осадочных, преимущественно карбонатных породах, характеризуются минерализацией от  $35\text{--}40$  до  $100 \text{ г/дм}^3$  хлоридным натриевым и хлоридным натриево-кальциевым составом. Отношение  $rNa/rCl$  колеблется от  $0,5$  до  $0,94$ ;  $Ca/Cl$  от  $0,04$  до  $0,13$ , а  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$  составляет  $0,01\text{--}0,11$ . Таким образом, подтверждается сделанный нами ранее вывод о том, что подземные воды и рассолы Западной Сибири находятся на начальной стадии метаморфизации химического состава [25]. Рассолы венд-кембрийских отложений Предъенисейского осадочного бассейна имеют схожие характеристики, при этом наблюдается незначительный сдвиг в направлении сверхкрепких рассолов Сибирской платформы, ввиду переходного типа гидрогеологической структуры этого района между Западно-Сибирским и Тунгусским артезианскими бассейнами, что отмечалось нами ранее [18, 57–61].

К четвертой, заключительной, группе относятся сверхкрепкие рассолы Сибирской платформы с величиной общей минерализации от  $324$  до  $563 \text{ г/дм}^3$  хлоридного кальциевого состава. Они характеризуются значениями отношения  $rNa/rCl < 0,5$ ;  $Ca/Cl$  от  $0,22$  до  $0,47$ , и  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg) < 0,07$ .

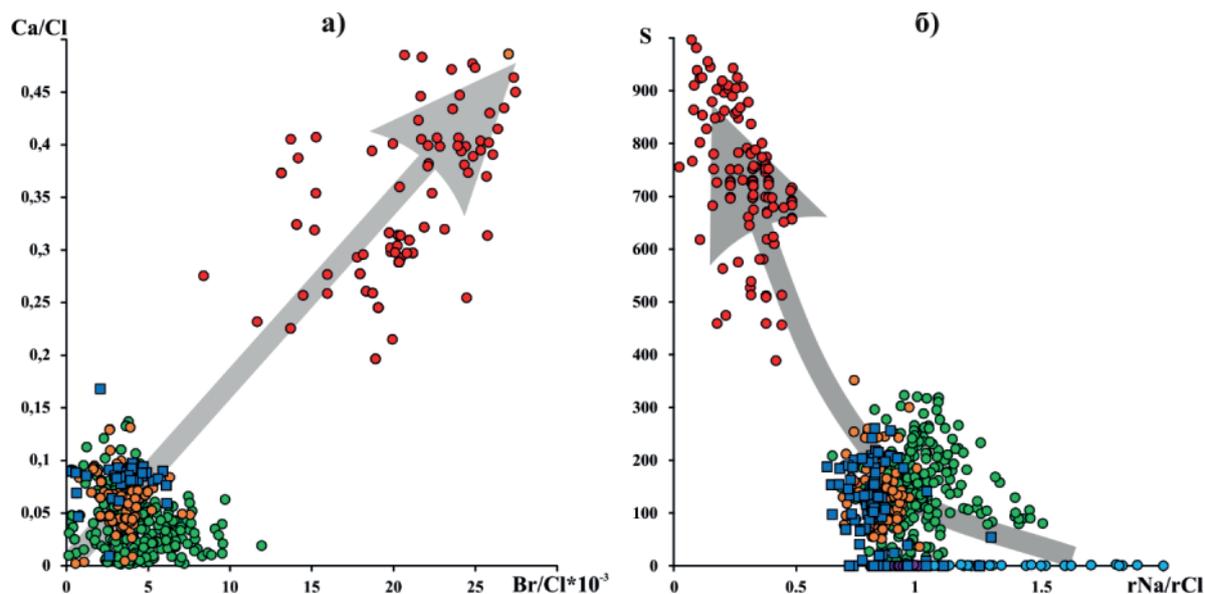


Рис. 6. Расположение точек исследуемых рассолов на диаграммах  $Ca/Cl$ – $Br/Cl \cdot 10^{-3}$  (а) и  $S$ – $rNa/rCl$  (б). Условные обозначения см. рис. 5

Fig. 6. Points location of the investigated brines on the diagrams of  $Ca/Cl$  to  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$  (a) and  $S$  to  $rNa/rCl$  (б). For legend, see Fig. 5

Степень их метаморфизации наивысшая по основным отношениям, включая интегрированный показатель метаморфизации рассолов ( $S$ ), который составляет более 400.

Таким образом, уровень метаморфизации химического состава подземных вод и рассолов Сибири растет в направлении от районов распространения солянокупольных структур к территориям с магматическими и метаморфическими формациями в основании мезозойско-кайнозойского осадочного чехла. Далее следуют области развития осадочных формаций преимущественно девонского возраста, представленных карбонатными породами, и заключительным звеном в этой цепи выступают сверхкрепкие хлоридные кальциевые рассолы. Совместное рассмотрение  $rNa/rCl$ ,  $Ca/Cl$ ,  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$  коэффициентов с интегрированным показателем  $S$  подтверждает правильность сделанных выводов

#### Заключение

В доюрских отложениях южных районов Обь-Иртышского междуречья развиты преимущественно хлоридные натриевые воды и рассолы с общей минерализацией от 8 до 100 г/дм<sup>3</sup>, при величине минерализации фоновых вод 40–45 г/дм<sup>3</sup>. Доминируют в изучаемом регионе рассолы хлоридного натриевого состава с величиной общей минерализации 50–70 г/дм<sup>3</sup>, метаморфизованные в той степени, которая характерна для бессолевого отложения. На основе анализа геологической истории изучаемой территории и гидрогеохимических данных установлено наличие в разрезе доюрских пород трех основных генетических типов подземных вод и рассо-

лов: 1) седиментогенных, 2) литогенных (термодегидратационных) и древних инфильтрационных, 3) конденсатогенных. В южных и северо-восточных районах исследуемого региона доминируют древние инфильтрационные воды. Литогенные воды установлены преимущественно в западных районах в области развития вулканогенно-осадочных пород, где проявлены процессы термодегидратации глинистых минералов. Седиментогенные воды и слабые рассолы развиты на большей части исследуемой территории. Конденсатогенные воды выявлены в приконтурных зонах залежей углеводородов. Сравнительный анализ геохимических особенностей подземных вод и рассолов доюрских комплексов Сибири показал, что по  $rNa/rCl$ ,  $Ca/Cl$ ,  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$  и другим отношениям доюрские рассолы южных районов Обь-Иртышского междуречья находятся на начальной стадии метаморфизации химического состава.

Исследования проводились при финансовой поддержке Проекта IX.131.3.2. «Геохимия, генезис и механизмы формирования состава подземных вод арктических районов осадочных бассейнов Сибири», Программы IX.131.3. «Эволюция гидрогеологических систем осадочных бассейнов Сибири», Приоритетного направления IX.131. «Геология месторождений углеводородного сырья, фундаментальные проблемы геологии и геохимии нефти и газа, научные основы формирования сырьевой базы традиционных и нетрадиционных источников углеводородного сырья», Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук Российской Федерации на 2013–2020 годы, Российского Фонда Фундаментальных исследований и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 17–45–540086-р\_а и № 17–45–543249-р\_мол\_а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочкарев В.С. Строение фундамента Западно-Сибирской плиты и некоторые общие вопросы тектоники платформенных областей // Проблемы тектоники нефтегазоносных областей Сибири: Тр. ЗапСибНИГНИ. – 1977. – Вып. 125. – С. 5–12.
2. Геология нефти и газа Западной Сибири / А.Э. Конторович, И.И. Нестеров, Ф.К. Салманов, В.С. Сурков, А.А. Трофимук, Ю.Г. Эрвье. – М.: Недра, 1975. – 680 с.
3. Конторович А.Э., Стасова О.Ф. Геохимия юрских и палеозойских нефтей юго-восточных районов Западно-Сибирской плиты // Проблемы геологии и нефтегазоносности доюрских отложений Западно-Сибирской плиты: Тр. СНИИГГиМСа. – 1977. – Вып. 255. – С. 46–62.
4. Порфилов В.П., Ключко В.П. Геологические аспекты нефтегазоносности фундамента (на примере Западной Сибири) // Особенности глубинного строения земной коры. – Киев: Наукова думка, 1982. – С. 5–15.
5. Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. – М.: Недра, 1981. – 143 с.
6. Абросимова О.О., Рыжкова С.В. Некоторые особенности ловушек, коллекторов и залежей углеводородов в доюрских породах Западной Сибири // Геология нефти и газа. – 1997. – № 3. – С. 22–25.
7. Воронов В.Н., Коркунов В.К., Ивашкина Д.А. Палеозойские рифогенные постройки – новые нефтегазоносные объекты Ямала // Геология нефти и газа. – 1997. – № 6. – С. 4–9.
8. Гиршгорн Л.Ш., Кабалык В.Г., Соседков В.С. Окраины Сибири как объекты нефтегазопоисковых работ // Геология нефти и газа. – 1988. – № 4. – С. 7–12.
9. Максимов С.П., Самолетов М.В., Немченко Н.Н., Клемина Л.Н., Копеев В.Д. Палеозойский карбонатный комплекс – перспективный объект поисков залежей УВ на Ямале // Геология нефти и газа. – 1987. – № 10. – С. 30–36.
10. Фомин А.Н. Катагенез и перспективы нефтегазоносности палеозойских отложений Среднего Приобья // Геология и геофизика. – 1994. – Т. 35. – № 11. – С. 63–70.
11. Кругликов Н.М., Нелюбин В.В., Яковлев О.Н. Гидрогеология Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и особенности формирования залежей углеводородов. – Л.: Недра, 1985. – 279 с.
12. Карцев А.А., Абукова Л.А. Нефтегазовая гидрогеология на современном этапе // Известия вузов. Нефть и газ. – 1998. – № 4. – С. 12–17.
13. Шварцев С.Л., Новиков Д.А. Природа вертикальной гидрогеохимической зональности нефтегазоносных отложений (на примере Надым-Газовского междуречья, Западная Сибирь) // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 8. – С. 1008–1020.
14. Запывалов Н.П., Богатырева О.А. Гидродинамика рифогенных массивов среднего палеозоя (на примере Пермского Приуралья и юга Западной Сибири) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2005. – № 5. – С. 8–19.
15. Новиков Д.А. Геолого-гидрогеологические условия палеозойского фундамента Новопортовского нефтегазоконденсатного месторождения // Известия вузов. Нефть и газ. – 2005. – № 5. – С. 14–20.
16. Новиков Д.А., Лепокуров А.В. Гидрогеологические условия нефтегазоносных отложений на структурах южной части Ямало-Карской депрессии // Геология нефти и газа. – 2005. – № 5. – С. 21–30.
17. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф. Гидрогеологические условия нефтегазоносных отложений Березовского нефтегазоносного района (Западная Сибирь) // Известия вузов. Геология и разведка. – 2009. – № 5. – С. 45–56.
18. Новиков Д.А., Шварцев С.Л. Гидрогеологические условия Предьенисейской нефтегазоносной субпровинции // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 10. – С. 1131–1143.
19. Захаров С.Б., Новиков Д.А. Особенности водных ореолов рассеяния углеводородных залежей в пределах палеозойского комплекса Томской области // Известия вузов. Нефть и газ. – 2010. – № 3. – С. 9–17.
20. Матусевич В.М., Рыльков А.В., Абдрашитова Р.Н. Литогидрогеохимия – методологическая основа наращивания ресурсной базы углеводородов // Известия вузов. Нефть и газ. – 2011. – № 5. – С. 10–17.
21. Матусевич В.М., Абдрашитова Р.Н. Геодинамическая концепция в современной гидрогеологии (на примере Западно-Сибирского мегабассейна) // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4–5. – С. 1157–1160.
22. Матусевич В.М., Абдрашитова Р.Н. Гидрогеологическое поле зоны сочленения Урала и Западной Сибири // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–3. – С. 590–596.
23. Новиков Д.А. Оценка современного состояния нефтегазоносной системы по результатам изучения водно-газовых равновесий (на примере палеозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири) // Отечественная геология. – 2015. – № 3. – С. 7–32.
24. Novikov D.A., Sukhorukova A.F. Hydrogeology of petroleum deposits in the northwestern margin of the West Siberian Artesian Basin // Arabian Journal of Geosciences. – 2015. – V. 8. – № 10. – P. 8703–8719.
25. Novikov D.A., Saraev M.M. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Shiyu Kantan Yu Kaifa/Petroleum Exploration and Development. – 2017. – V. 44. – № 5. – P. 737–744.
26. Дульцев Ф.Ф., Новиков Д.А. Геотермическая зональность Предьенисейского осадочного бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 11. – С. 6–15.
27. Connolly C.A., Walter L.M., Baadsgaard H. Origin and evolution of formation waters, Alberta Basin, Western Canada Sedimentary Basin: I: Chemistry // Applied Geochemistry. – 1990. – № 5 (4). – P. 375–395.
28. Grasby S.E., Chen Z., Dewing K. Formation water geochemistry of the Sverdrup Basin: Implications for hydrocarbon development in the High Arctic // Applied Geochemistry. – 2012. – V. 27. – № 8. – P. 1623–1632.
29. Hitchon B., Sauveplane C.M., Underschlutz J.R. Hydrogeology, geopressures and hydrocarbon occurrences, Beaufort-Mackenzie Basin // Bulletin of Canadian Petroleum Geology. – 1990. – № 38 (2). – P. 215–235.
30. Paleohydrogeology of the Cretaceous sediments of the Williston Basin using stable isotopes of water / M.J. Hendry, S.L. Barbour, K. Novakowski, L.I. Wassenaar // Water resources research. – 2013. – V. 49. – № 8. – P. 4580–4592.
31. Formation waters from Cambrian-age strata, Illinois Basin, USA: Constraints on their origin and evolution / S.V. Panno, K.C. Hackley, R.A. Locke, I.G. Krupac, B. Wimmer, A. Iranmanesh, W.R. Kelly // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2013. – V. 122. – P. 184–197.
32. Iampen H.T., Rostrom B.J. Hydrogeochemistry of pre-Mississippian brines, Williston Basin, Canada–USA // Journal of Geochemical Exploration. – 2000. – V. 69–70. – P. 29–35.
33. Panno S.V., Askari Z., Kelly W.R. Recharge and Groundwater Flow within an Intracratonic Basin, Midwestern United States // Groundwater. – 2018. – V. 56. – № 1. – P. 32–45.
34. Synthetic saline-aqueous and hydrocarbon fluid inclusions trapped in calcite at temperatures and pressures relevant to hydrocarbon basins: a reconnaissance study / Y. Chen, M. Steele-MacInnis, Y. Ge, Z. Zhou, Y. Zhou // Marine and Petroleum Geology. – 2016. – № 76. – P. 88–97.
35. Identification and quantification of regional brine and road salt sources in watersheds along the New York/Pennsylvania border,

- USA / J.D. Johnson, J.R. Graney, R.C. Capo, B.W. Stewart // *Applied Geochemistry*. – 2015. – № 60. – P. 37–50.
36. Tikhomirov V. Paragenesis of fluids under evaporates in the Volga-Ural Basin // *Marine and Petroleum Geology*. – 2015. – № 64. – P. 334–346.
37. Al-Hajeri M.M., Bowden S.A. Application of formation water geochemistry to assess seal integrity of the Gotnia Formation, Kuwait // *Arab J Geosci*. – 2017. – V. 10. – № 56. – P. 10.
38. Geochemical characteristics of water-dissolved gases and implications on gas origin of Sinian to Cambrian reservoirs of Anyue gas field in Sichuan Basin, China / S. Qin, F. Li, Z. Zhou, G. Zhou // *Marine and Petroleum Geology*. – 2018. – № 89. – P. 83–90.
39. Gupta I., Wilson A.M., Rostron B.J. Cl/Br compositions as indicators of the origin of brines: Hydrogeologic simulations of the Alberta Basin, Canada // *Bulletin of the Geological Society of America*. – 2012. – № 124 (1–2). – P. 200–212.
40. Organic geochemical identification of reservoir oil-gas-water layers in the Junggar Basin, NW China / M. Wu, J. Cao, X. Wang, Y. Tang, B. Xiang, B. Wang // *Marine and Petroleum Geology*. – 2014. – № 57. – P. 594–602.
41. Comparison of fluid geochemistry and microbiology of multiple organic-rich reservoirs in the Illinois Basin, USA: Evidence for controls on methanogenesis and microbial transport / M.E. Schlegel, J.C. McIntosh, B.L. Bates, M.F. Kirk, A.M. Martini // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2011. – № 75. – P. 1903–1919.
42. Fluid evolution in the Dabei Gas Field of the Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China: Implications for fault-related fluid flow / X. Guo, K. Liu, C. Jia, Y. Song, M. Zhao, Q. Zhuo, X. Lu // *Marine and Petroleum Geology*. – 2016. – № 78. – P. 1–16.
43. McIntosh J.C., Walter L.M. Paleowaters in Silurian-Devonian carbonate aquifers: Geochemical evolution of groundwater in the Great Lakes region since the Late Pleistocene // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2006. – № 70. – P. 2454–2479.
44. Demir I., Seyler B. Chemical composition and geologic history of saline waters in Aux Vases and Cypress Formations, Illinois Basin // *Aquatic Geochemistry*. – 1999. – V. 5. – № 3. – P. 281–311.
45. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Палеозой Западной Сибири / Е.А. Елкин, В.И. Краснов, Н.К. Бахарев, Е.В. Белова, В.Н. Дубатовол, Н.Г. Изох, А.Г. Клец, А.Э. Конторович, Л.Г. Перегоедов, Н.В. Сенников, И.Г. Тимохина, В.Г. Хромых. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «Гео», 2001. – 163 с.
46. Палеозойские фацциальные мегазоны в структуре фундамента Западно-Сибирской геосинеклизы / Е.А. Елкин, А.Э. Конторович, Н.К. Бахарев, С.Ю. Беляев, А.И. Варламов, Н.Г. Изох, А.В. Каныгин, В.А. Каштанов, Н.П. Кирда, А.Г. Клец, В.А. Конторович, В.И. Краснов, В.А. Кривин, С.А. Моисеев, О.Т. Обут, С.В. Сараев, Н.В. Сенников, В.М. Тищенко, Ю.Ф. Филиппов, А.В. Хоменко, В.Г. Хромых // *Геология и геофизика*. – 2007. – Т. 48. – № 6. – С. 633–650.
47. Тектоническое строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое / В.А. Конторович, С.Ю. Беляев, А.Э. Конторович, В.О. Красавчиков, А.А. Конторович, О.И. Супруненко // *Геология и геофизика*. – 2001. – Т. 42. – № 11–12. – С. 1832–1845.
48. Геология и полезные ископаемые России. Западная Сибирь. В шести томах. Т. 2 // Гл. ред. В.П. Орлов. Ред. 2-го тома: А.Э. Конторович, В.С. Сурков. – СПб.: Изд-во «ВСЕГЕИ», 2000. – 477 с.
49. Шварцев С.Л. Химический состав и изотопы стронция рассолов Тунгусского бассейна в связи с проблемой их формирования // *Геохимия*. – 2000. – № 11. – С. 1170–1184.
50. Шварцев С.Л. Взаимодействие воды с алюмосиликатными горными породами. Обзор // *Геология и геофизика*. – 1991. – № 12. – С. 16–50.
51. Новиков Д.А. Гидрогеохимия процессов катагенетического преобразования осадочных пород нефтегазоносных отложений арктических районов Западно-Сибирского мегабассейна // *Известия ВУЗов. Нефть и газ*. – 2016. – № 6. – С. 19–25.
52. Букаты М.Б. Гидрогеологическое строение западной части Сибирской платформы (в связи с поисками, разведкой и разработкой месторождений нефти и газа) // *Геология и геофизика*. – 2009. – Т. 50. – № 11. – С. 1201–1217.
53. Особенности геохимической эволюции хлоридных кальциевых рассолов Оленекского криоартезианского бассейна в позднем кайнозое / С.В. Алексеев, Л.П. Алексеева, С.Л. Шварцев, Н.С. Трифионов, Е.С. Сидкина // *Геохимия*. – 2017. – № 5. – С. 429–444.
54. Novikov D.A., Trifonov N.S. Hydrogeologic Implications of Industrial Effluent Disposal of the Yurubcheno-Tokhomo Field (Siberian Craton, Russia) // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2016. – V. 9. – № 1. – P. 1–14.
55. Novikov D.A. Distribution of Cambrian salts in the western Siberian Craton (Yurubcheno-Tokhomo field, Russia) // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2017. – V. 10. – № 1. – P. 1–8.
56. Черных А.В., Новиков Д.А. Палеогидрогеология Анабаро-Хатангского бассейна // *Известия Вузов. Нефть и газ*. – 2018. – № 4. – С. 27–33.
57. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. Geochemistry of brines in Vendian deposits of the Siberian platform // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – № 193 (1). – 012052. – 7 p.
58. Novikov D.A. Genetic classification of subsurface waters and brines of Arctic regions of Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – № 193 (1). – 012049. – 8 p.
59. Дульцев Ф.Ф., Новиков Д.А., Черных А.В., Рыжкова С.В. Водные ореолы рассеяния палеозойских залежей углеводородов в пределах южных районов Обь-Иртышского междуречья // *Подземные воды Востока России: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием)*. – Новосибирск: ИПЦ НГУ. – 2018. – С. 183–189.
60. Дульцев Ф.Ф., Новиков Д.А. Особенности гидрогеохимии доюрских комплексов Предъенисейского осадочного бассейна // *Подземные воды Востока России: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием)*. – Новосибирск: ИПЦ НГУ. – 2018. – С. 190–197.
61. Новиков Д.А., Черных А.В., Юрчик И.И., Дульцев Ф.Ф., Хилько В.А. Гидрогеохимия терригенного комплекса венда Сибирской платформы // *Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы третьей Всероссийской научной конференции с международным участием*. – Улан-Уде: БНЦ СО РАН, 2018. – С. 456–460.

Поступила 24.04.2018 г.

#### **Информация об авторах**

**Новиков Д.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

**Рыжкова С.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии нефти и газа Западной Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук; ассистент кафедры геологии месторождений нефти и газа Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

**Дульцев Ф.Ф.**, младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

**Черных А.В.**, младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

**Сесь К.В.**, младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

**Ефимцев Н.А.**, магистрант кафедры геологии месторождений нефти и газа Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

**Шохин А.Е.**, бакалавр кафедры геологии месторождений нефти и газа Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

UDC 556.314:551.762.3(571.1)

## OIL AND GAS HYDROGEOCHEMISTRY OF THE PRE-JURASSIC DEPOSITS IN THE SOUTHERN AREAS OF OB-IRTYSH INTERFLUVES

**Dmitry A. Novikov**<sup>1,2</sup>,  
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

**Svetlana V. Ryzhkova**<sup>1,2</sup>,  
RizhkovaSV@ipgg.sbras.ru

**Fedor F. Dultsev**<sup>1</sup>,  
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

**Anatoliy V. Chernykh**<sup>1</sup>,  
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

**Ksenia V. Ses**<sup>1</sup>,  
SesKV@ipgg.sbras.ru

**Nikolay A. Efimtsev**<sup>2</sup>,  
EfimtsevNA@ipgg.sbras.ru

**Andrey E. Shokhin**<sup>2</sup>,  
ShokhinAE@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Novosibirsk State University,  
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research is in solving the fundamental and applied problems of hydrogeology and hydrogeochemistry of the pre-Jurassic basement of the West Siberian artesian basin and is of great importance for studying the crust of the platforms and folded belts in general. The uniqueness and complexity of the facility lies in the fact that the West Siberian basin is the largest section of the young platform, under the cover of which the complexes with different age and different geodynamical and hydrogeological characteristics are articulated. Scientific generalizations of the available factual data have not been conducted for more than 30 years! In addition, the relevance of the research is to assess the current state of the water-pressure systems of the pre-Jurassic complexes, and in developing the hydrogeological criteria for their oil and gas content and refinement of the search and exploration of hydrocarbons in the pre-Jurassic base of Western Siberia.

**The aim** of the research is to reveal chemical and gas compound of groundwaters and brines of the pre-Jurassic complexes, to establish the possible genetic types of groundwaters and brines and their spatial distribution; to assess the metamorphic degree of brines in comparison with a hydrogeochemical standards of Siberia.

**Methods:** using the methods of V.A. Sulin, A.A. Kartsev, S.L. Shvartsev, N.M. Kruglikov, V.V. Nelyubin, O.N. Yakovlev, V.M. Matushevich and other researchers to identify the features of geochemistry of groundwater and brines, to establish the genetic type of groundwater and brines, by using the ratio-coefficient of macro- and micro-compounds such as:  $Na/rCl$ ,  $Cl/Br$ ,  $Ca/Cl$ ,  $r(HCO_3+CO_3)/r(Ca+Mg)$ ,  $B/Br$ ,  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ ,  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$  and others. Using the integrated-coefficient  $S$  (by S.L. Shvartsev) and ratio of  $Ca/Cl$ ,  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ ,  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$  to estimate the degree of metamorphism of brines.

**Results.** The paper introduces the geochemical studies of groundwaters and brines of the pre-Jurassic sediments in the southern regions of the Ob-Irtysh interfluvium. It is established that underground waters and brines with a total mineralization of 4 to 100 g/dm<sup>3</sup> of Cl-Na, Cl-Na-Ca and Cl-HCO<sub>3</sub>-Na composition are developed in the region, with dominance of the first type. Carrying out a retrospective of hydrogeological history and a detailed analysis of hydrogeochemical data it is possible to assume the dominance of sedimentogenic brines in the section and the presence of lithogenic (thermodegradation), ancient infiltrogenic and condensate waters. A combined consideration of the ratio-coefficient ( $rNa/rCl$ ,  $Ca/Cl$ ,  $Br/Cl \cdot 10^{-3}$ ,  $Sr/Cl \cdot 10^{-3}$ ) with the integrated indicator of brines metamorphism ( $S$ ) confirms that in this area the brines are at the initial stage of metamorphism of the chemical composition.

### Key words:

Oil and gas hydrogeochemistry, brine, genetic type, metamorphism degree, Ob-Irtysh interfluvium, Western Siberia.

The research was financially supported by the project IX.131.3.2. «Geochemistry, genesis and mechanisms of formation of underground water composition in the Arctic regions of the sediment basins in Siberia», program IX.131.3. «Evolution of hydrogeological systems of sediment basins in Siberia», priority area IX.131. «Geology of hydrocarbon raw material fields, fundamental issues in geology and geochemistry of oil and gas, scientific bases for formation of raw material base of conventional and unconventional sources of hydrocarbon raw materials», Program of fundamental scientific researches of the State science academies of the Russian Federation for 2013–2020, Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Novosibirsk region within the scientific project no. 17–45–540086 and no. 17–45–543249.

## REFERENCES

- Bochkarev V.S. Stroeniye fundamenta Zapadno-Sibirskoy plity i nekotorye obshchie voprosy tektoniki platformnykh oblastey [The structure of the basement of the West Siberian plate and some general questions of the tectonics of platform regions]. *Problemy tektoniki neftegazonosnykh oblastey Sibiri: Tr. ZapSibNIGNI*, 1977, no. 125, pp. 5–12.
- Kontorovich A.E., Nesterov I.I., Salmanov F.K., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Ervye Yu.G. *Geologiya nefti i gaza Zapadnoy Sibiri* [Geology of oil and gas in Western Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 680 p.
- Kontorovich A.E., Stasova O.F. Geokhimiya yurskikh i paleozoy-skikh neftey yugo-vostochnykh rayonov Zapadno-Sibirskoy plity [Geochemistry of Jurassic and Paleozoic oils of the southeastern regions of the West Siberian plate]. *Problemy geologii i neftegazonosnosti doyrskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy plity: Tr. SNI-IGGIMSa*, 1977, no. 255, pp. 46–62.
- Porfilev V.P., Klochko V.P. Geologicheskie aspekty neftegazonosnosti fundamenta (na primere Zapadnoy Sibiri) [Geological aspects of oil and gas bearing basement (on the example of Western Siberia)]. *Osobennosti glubinnogo stroeniya zemnoy kory* [Features of deep crustal structure]. Kiyev, Naukova dumka Publ., 1982. pp. 5–15.
- Surkov V.S., Zhero O.G. *Fundament i razvitie platformnogo chekhla Zapadno-Sibirskoy plity* [Foundation and development of the platform cover of the West Siberian plate]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 143 p.
- Abrosimova O.O., Ryzhkova S.V. Some features of traps, reservoirs and hydrocarbon deposits in the pre-Jurassic rocks of Western Siberia. *Oil and gas geology*, 1997, no. 3, pp. 22–25. In Rus.
- Voronov V.N., Korkunov V.K., Ivashkeeva D.A. Paleozoic reef building – new oil and gas prospecting facilities of Yamal. *Oil and gas geology*, 1997, no. 6, pp. 4–9. In Rus.
- Girshgorn L.Sh., Kabalyk V.G., Sosedkov V.S. Okrainy Sibiri kak obyekty neftegazoposkovykh rabot [Outskirts of Siberia as objects of oil and gas exploration]. *Geologia nefti i gasa*, 1988, no. 4, pp. 7–12.
- Maksimov S.P., Samoletov M.V., Nemchenko N.N., Klenina L.N., Kopeev V.D. Paleozoy-skiy karbonatny kompleks – perspektivnyy obyekts poiskov zalezhey UV na Yamale [The Paleozoic carbonate complex is a promising object for the search for hydrocarbon deposits in the Yamal]. *Geologia nefti i gasa*, 1987, no. 10, pp. 30–36.
- Fomin A.N. Katagenez i perspektivy neftegazonosnosti paleozoy-skikh otlozheniy Srednego Priobya [Katagenesis and prospects of oil and gas content of Paleozoic deposits of the Middle Ob region]. *Geologia i Geophisica*, 1994, vol. 35, no. 11, pp. 63–70.
- Kruglikov N.M., Nelyubin V.V., Yakovlev O.N. *Gidrogeologiya Zapadno-Sibirskogo neftegazonosnogo basseyna i osobennosti formirovaniya zalezhey uglevodorodov* [Hydrogeology of the West Siberian oil and gas bearing basin and features of formation of hydrocarbon deposits]. Leningrad, Nedra Publ., 1985. 279 p.
- Kartsev A.A., Abukova L.A. Neftegazovaya gidrogeologiya na sovremennom etape [Oil and gas hydrogeology at the present stage]. *Izvestia vusov. Neft i gas*, 1998, no. 4, pp. 12–17.
- Shvartsev S.L., Novikov D.A. The nature of the vertical hydrogeochemical zonation of oil and gas bearing deposits (on the example of the Nadym-Tazov interfluvium, Western Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2004, vol. 45, no. 8, pp. 1008–1020. In Rus.
- Zapivalov N.P., Bogatyreva O.A. Hydrodynamics of Reefogenic Massifs of the Middle Paleozoic (on the Example of Perm Urals and South of Western Siberia). *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2005, no. 5, pp. 8–19. In Rus.
- Novikov D.A. Geological and hydrogeological conditions of the Paleozoic basement of the Novoportovskoe oil and gas condensate field. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2005, no. 5, pp. 14–20. In Rus.
- Novikov D.A., Lepokurov A.V. Hydrogeological conditions of oil and gas bearing deposits on the structures of the southern part of the Yamal-Kara depression. *Oil and gas geology*, 2005, no. 5, pp. 21–30. In Rus.
- Novikov D.A., Sukhorukova A.F. Hydrogeological conditions of oil and gas bearing deposits of the Berezovsky oil and gas bearing region (Western Siberia). *Proceedings of Higher Schools. Geology and Exploration*, 2009, no. 5, pp. 45–56. In Rus.
- Novikov D.A., Shvartsev S.L. Hydrogeological conditions of the Predeniseisk oil and gas bearing subprovince. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 10, pp. 1131–1143. In Rus.
- Zakharov S.B., Novikov D.A. Peculiarities of aquatic haloes in the dispersion of hydrocarbon deposits within the Paleozoic complex of the Tomsk region. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2010, no. 3, pp. 9–17. In Rus.
- Matusevich V.M., Rylkov A.V., Abdrashitova R.N. Lithohidrogeokhimiya is the methodological basis for increasing the resource base of hydrocarbons. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2011, no. 5, pp. 10–17. In Rus.
- Matusevich V.M., Abdrashitova R.N. Geodynamic concept in modern hydrogeology (on the example of the West Siberian megabasin). *Fundamental research*, 2013, no. 4–5, pp. 1157–1160. In Rus.
- Matusevich V.M., Abdrashitova R.N. Hydrogeological field of the junction zone of the Urals and Western Siberia. *Fundamental research*, 2014, no. 9–3, pp. 590–596. In Rus.
- Novikov D.A. Estimation of the current state of the oil and gas bearing system based on the results of studying water-gas equilibria (on the example of the Paleozoic deposits of the southeastern regions of Western Siberia). *Otechestvennaya geologiya*, 2015, no. 3, pp. 7–32. In Rus.
- Novikov D.A., Sukhorukova A.F. Hydrogeology of petroleum deposits in the northwestern margin of the West Siberian Artesian Basin. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, vol. 8, no. 10, pp. 8703–8719.
- Novikov D.A., Saraev M.M. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, vol. 44, no. 5, pp. 737–744.
- Dultsev F.F., Novikov D.A. Geothermal zoning of the Predenisey sedimentary basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 6–15. In Rus.
- Connolly C.A., Walter L.M., Baadsgaard H. Origin and evolution of formation waters, Alberta Basin, Western Canada Sedimentary Basin: I. Chemistry. *Applied Geochemistry*, 1990, no. 5 (4), pp. 375–395.
- Grasby S.E., Chen Z., Dewing K. Formation water geochemistry of the Sverdrup Basin: Implications for hydrocarbon development in the High Arctic. *Applied Geochemistry*, 2012, vol. 27, no. 8, pp. 1623–1632.
- Hitchon B., Sauveplane C.M., Underschlutz J.R. Hydrogeology, geopressures and hydrocarbon occurrences, Beaufort-Mackenzie Basin. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1990, no. 38 (2), pp. 215–235.
- Hendry M.J., Barbour S.L., Novakowski K., Wassenaar L.I. Paleohydrogeology of the Cretaceous sediments of the Williston Basin using stable isotopes of water. *Water resources research*, 2013, vol. 49, no. 8, pp. 4580–4592.
- Panno S.V., Hackley K.C., Locke R.A., Krapac I.G., Wimmer B., Iranmanesh A., Kelly W.R. Formation waters from Cambrian-age strata, Illinois Basin, USA: Constraints on their origin and evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, vol. 122, pp. 184–197.
- Iampen H.T., Rostrom B.J. Hydrogeochemistry of pre-Mississippian brines, Williston Basin, Canada–USA. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, vol. 69–70, pp. 29–35.

33. Panno S.V., Askari Z., Kelly W.R. Recharge and Groundwater Flow within an Intracratonic Basin, Midwestern United States. *Groundwater*, 2018, vol. 56, no. 1, pp. 32–45.
34. Chen Y., Steele-MacInnis M., Ge Y., Zhou Z., Zhou Y. Synthetic saline-aqueous and hydrocarbon fluid inclusions trapped in calcite at temperatures and pressures relevant to hydrocarbon basins: A reconnaissance study. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, no. 76, pp. 88–97.
35. Johnson J.D., Graney J.R., Capo R.C., Stewart B.W. Identification and quantification of regional brine and road salt sources in watersheds along the New York/Pennsylvania border, USA. *Applied Geochemistry*, 2015, no. 60, pp. 37–50.
36. Tikhomirov V. Paragenesis of fluids under evaporates in the Volga-Ural Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, no. 64, pp. 334–346.
37. Al-Hajeri M.M., Bowden S.A. Application of formation water geochemistry to assess seal integrity of the Gotnia Formation, Kuwait. *Arab J Geosci*, 2017, vol. 10, no. 56, 10 p.
38. Qin S., Li F., Zhou Z., Zhou G. Geochemical characteristics of water-dissolved gases and implications on gas origin of Sinian to Cambrian reservoirs of Anyue gas field in Sichuan Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, no. 89, pp. 83–90.
39. Gupta I., Wilson A.M., Rostron B.J. Cl/Br compositions as indicators of the origin of brines: Hydrogeologic simulations of the Alberta Basin, Canada. *Bulletin of the Geological Society of America*, 2012, no. 124 (1–2), pp. 200–212.
40. Wu M., Cao J., Wang X., Tang Y., Xiang B., Wang B. Organic geochemical identification of reservoir oil-gas-water layers in the Junggar Basin, NW China. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, no. 57, pp. 594–602.
41. Schlegel M.E., McIntosh J.C., Bates B.L., Kirk M.F., Martini A.M. Comparison of fluid geochemistry and microbiology of multiple organic-rich reservoirs in the Illinois Basin, USA: Evidence for controls on methanogenesis and microbial transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, no. 75, pp. 1903–1919.
42. Guo X., Liu K., Jia C., Song Y., Zhao M., Zhuo Q., Lu X. Fluid evolution in the Dabai Gas Field of the Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China: Implications for fault-related fluid flow. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, no. 78, pp. 1–16.
43. McIntosh J.C., Walter L.M. Paleowaters in Silurian-Devonian carbonate aquifers: Geochemical evolution of groundwater in the Great Lakes region since the Late Pleistocene. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, no. 70, pp. 2454–2479.
44. Demir I., Seyler B. Chemical composition and geologic history of saline waters in Aux Vases and Cypress Formations, Illinois Basin. *Aquatic Geochemistry*, 1999, vol. 5, no. 3, pp. 281–311.
45. Elkin E.A., Krasnov V.I., Bakharev N.K., Belova E.V., Dubatolov V.N., Izokh N.G., Klets A.G., Kontorovich A.E., Peregodov L.G., Sennikov N.V., Timokhina I.G., *Khromykh V.G. Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Paleozoy Zapadnoy Sibiri* [Stratigraphy of oil and gas bearing basins of Siberia. Paleozoic of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2001. 163 p.
46. Elkin E.A., Kontorovich A.E., Bakharev N.K., Belyaev S.Yu., Varlamov A.I., Izokh N.G., Kanygin A.V., Kashtanov V.A., Kirida N.P., Klets A.G., Kontorovich V.A., Krasnov V.I., Krivin V.A., Moiseev S.A., Obut O.T., Saraev S.V., Sennikov N.V., Tishchenko V.M., Filippov Yu.F., Khomenko A.V., Khromykh V.G. Paleozoic facies megazones in the structure of the basement of the West Siberian geosyncline. *Russian Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 6, pp. 633–650. In Rus.
47. Kontorovich V.A., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.E., Krasavchikov V.O., Kontorovich A.A., Suprunenko O.I. Tectonic structure and history of development of the West Siberian geosyncline in the Mesozoic and Cenozoic. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, no. 11–12, pp. 1832–1845. In Rus.
48. *Geologiya i poleznye iskopayemye Rossii. Zapadnaya Sibir. T. 2* [Geology and minerals of Russia. Western Siberia. Vol. 2]. Ed. by V.P. Orlov. Eds. Of the 2<sup>nd</sup> vol. A.E. Kontorovich, V.S. Surkov. St-Petersburg, VSEGEI Publ., 2000. 477 p.
49. Shvartsev S.L. Chemical composition and isotopes of strontium brines of the Tunguska basin in connection with the problem of their formation. *Geochemistry International*, 2000, no. 11, pp. 1170–1184. In Rus.
50. Shvartsev S.L. Vzaimodeystvie vody s alyumosilikatnymi gornymi porodami. Obzor [Interaction of water with aluminosilicate rocks. Review]. *Geologia i Geofisika*, 1991, no. 12, pp. 16–50.
51. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the processes of catagenetic transformation of sedimentary rocks of oil and gas bearing deposits in the Arctic regions of the West Siberian megabasin. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2016, no. 6, pp. 19–25. In Rus.
52. Bukaty M.B. Hydrogeological structure of the western part of the Siberian platform (in connection with the search, exploration and development of oil and gas fields). *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 11, pp. 1201–1217. In Rus.
53. Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Shvartsev S.L., Trifonov N.S., Sidkina E.S. Peculiarities of the geochemical evolution of chloride calcium brines of the Olenek cryo-artesian basin in the Late Cenozoic. *Geochemistry International*, 2017, no. 5, pp. 429–444. In Rus.
54. Novikov D.A., Trifonov N.S. Hydrogeologic Implications of Industrial Effluent Disposal of the Yurubcheno-Tokhomo Field (Siberian Craton, Russia). *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, vol. 9, no. 1, pp. 1–14.
55. Novikov D.A., Distribution of Cambrian salts in the western Siberian Craton (Yurubcheno-Tokhomo field, Russia). *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 1–8.
56. Chernykh A.V., Novikov D.A. Paleohydrogeology of the Anabaro-Khatanga basin. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2018, no. 4, pp. 27–33. In Rus.
57. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. Geochemistry of brines in Vendian deposits of the Siberian platform. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, no. 193 (1), 012052, 7 P.
58. Novikov D.A. Genetic classification of subsurface waters and brines of Arctic regions of Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, no. 193 (1), 012049, 8 P.
59. Dultsev F.F., Novikov D.A., Chernykh A.V., Ryzhkova S.V. Vodnyye oreoly rasseyaniya paleozoyskikh zalezhey uglevodorodov v predelakh yuzhnykh rayonov Ob-Irtyshskogo mezhdurechya [Water dispersion halos of Paleozoic hydrocarbon deposits within the southern regions of the Ob-Irtysh interfluvial]. *Podzemnye vody Vostoka Rossii: Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XXII Soveshchanie po podzemnym vodam Sibiri i Dalnego Vostoka s mezhdunarodnym uchastiem)* [Underground waters of the East of Russia. Proc. of the All-Russian meeting on underground waters of the East of Russia (XXII meeting on underground waters of Siberia and the far East with International participation)]. Novosibirsk, IPTS NGU. 2018. pp. 183–189.
60. Dultsev F.F., Novikov D.A. Osobennosti gidrogeokhimii doyruskikh kompleksov Predyeniyskogo osadochnogo basseyna [Features of the hydrogeochemistry of the pre-Jurassic complexes of the Pre-Yenisei sedimentary basin]. *Podzemnye vody Vostoka Rossii: Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XXII Soveshchanie po podzemnym vodam Sibiri i Dalnego Vostoka s mezhdunarodnym uchastiem)* [Underground waters of the East of Russia. Proc. of the All-Russian meeting on underground waters of the East of Russia (XXII meeting on underground waters of Siberia and the far East with International participation)]. Novosibirsk, IPTS NGU, 2018. pp. 190–197.
61. Novikov D.A., Chernykh A.V., Yurchik I.I., Dultsev F.F., Khilko V.A. Hidrogeokhimiya terrigenogo kompleksa venda Sibir-

skey platformy [Hydrogeochemistry of the terrigenous complex of the Vendian of the Siberian platform]. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami: Materialy tret'yey Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunar. Uchastiyem* [Geological evolution of water-rock interaction.

Proc. of the third All-Russian scientific conference with International Participation]. Ulan-Ude, BSC SB RAS. 2018, pp. 456–460.

*Received: 24 April 2018.*

#### **Information about the authors**

**Dmitry A. Novikov**, Cand. Sc., head of the laboratory of sedimentary basins hydrogeology of Siberia, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

**Svetlana V. Ryzhkova**, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; assistant, Novosibirsk State University.

**Fedor F. Dultsev**, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Anatoliy V. Chernykh**, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Ksenia V. Ses**, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Nikolay A. Efimtsev**, master's student, Novosibirsk State University.

**Andrey E. Shokhin**, student, Novosibirsk State University.

УДК 550.424:622.343.5:622'17

## ОЦЕНКА КИСЛОТООБРАЗУЮЩЕГО/КИСЛОТОНЕЙТРАЛИЗУЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛОВ ОТВАЛЬНЫХ ПОРОД И ПОДВИЖНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗДОЛИНСКОГО РУДНОГО УЗЛА (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)

**Бортникова Светлана Борисовна<sup>1</sup>,**  
bortnikovasb@ipgg.sbras.ru

**Силантьева Наталья Валерьевна<sup>2</sup>,**  
silantevanv@polyus.com

**Запольский Александр Николаевич<sup>2</sup>,**  
zapolskiyan@polyus.com

**Юркевич Наталия Викторовна<sup>1</sup>,**  
yurkevichnv@ipgg.sbras.ru

**Саева Ольга Петровна<sup>1</sup>,**  
saevaop@ipgg.sbras.ru

**Шевко Артём Яковлевич<sup>3</sup>,**  
sp@igm.nsc.ru

**Шуваева Ольга Васильевна<sup>4</sup>,**  
olga@niic.nsc.ru

**Еделев Алексей Викторович<sup>1</sup>,**  
edelevav@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>2</sup> ООО «Красноярское ГРП»,  
Россия, 660077, г. Красноярск, ул. Красной Гвардии, 24.

<sup>3</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>4</sup> Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 3.

**Актуальность** работы продиктована выносом потенциально токсичных металлов и металлоидов в окружающую среду из отвальных пород и хвостохранилищ.

**Цель работы:** создание комплексной методики прогнозной оценки состава дренажных потоков из отвальных пород, определение кислотопродуцирующего и кислотонейтрализующего потенциалов вещества с учётом минеральных форм – источников токсичных элементов в дренажных потоках на примере Раздолинского рудного узла.

**Методы.** Химический состав отвальных пород и формирующихся стоков определяли методами РФА, ИСП-АЭС, потенциометрии и классической аналитической химии. Прогноз кислотности стоков осуществлялся расчётом кислотонейтрализующего и кислотопродуцирующего потенциалов. Для повышения достоверности оценки появления кислых стоков дополнительно был определен нейтрализующий потенциал вещества отвалов и хвостохранилищ по методу Собака. Пероксидный эксперимент был проведён для оценки состава стоков при окислении отвальных пород и разрушении минеральной матрицы.

**Результаты.** Представлены результаты исследования потенциальной опасности стоков из складированных отвальных пород, образующихся при разработке золоторудных месторождений Раздолинского рудного узла. Оценка соотношения кислотопродуцирующего и кислотонейтрализующего потенциалов показала, что стоки из отвалов при взаимодействии сезонных потоков с веществом пород будут нейтральными-слабощелочными вследствие высокого содержания карбонатов и низкого количества сульфидов. В пероксидном эксперименте, моделирующем развитие процессов на отдалённую перспективу, среда большинства растворов также осталась нейтральной-субщелочной. Концентрации металлов в стоках будут на безопасном уровне – ниже ПДК<sub>рвн</sub>. Однако в воде стоков определены превышения над нормировочными показателями для анионогенных элементов: As, Sb, V, которые остаются подвижными как в кислой, так и в щелочной среде. По результатам исследований даны рекомендации для контроля токсичных элементов в стоках.

### **Ключевые слова:**

Отвальные породы, дренажный поток, металлы, мышьяк, прогноз кислотности, кислотонейтрализующий потенциал.

## Введение

Потоки кислого и нейтрального дренажа из отвальных пород и хвостохранилищ – широко обсуждаемая в мире проблема [1–4] вследствие выноса высокого количества металлов и металлоидов в окружающую среду [5–10], образования контрастных ореолов рассеяния токсичных компонентов [11, 12] и негативного воздействия на окружающую среду, биоту, человека [13–16]. В последние годы в практике экологических экспертиз возможных последствий воздействия дренажных потоков на природные компоненты всё шире используются методы прогнозных оценок подвижности токсичных компонентов при взаимодействии сезонных потоков (дождевых и снеготалых вод) с веществом отвалов [17–22]. Для этого разработаны геохимические эксперименты, направленные на получение количественного описания процессов выщелачивания элементов из породной матрицы, их подвижности в водной среде, опасности стоков для поверхностных водоёмов, водотоков, почв [23–25]. Одним из способов прогноза кислотности стоков является расчёт кислотопродукующего (КНП) и кислотопродуцирующего потенциалов (КПП) вещества отвальных пород и хвостохранилищ [25]:

$$\text{КПП} = 31,25X_s,$$

где КПП – кислотопродуцирующий потенциал данной породы;  $X_s$  – содержание серы в пробе в процентах (это выражение верно при допущении, что сульфидные минералы представлены в основном пиритом);

$$\text{КНП} = 10X_{\text{CaCO}_3},$$

где КНП – кислотонейтрализующий потенциал данной породы;  $X_{\text{CaCO}_3}$  – содержание карбоната кальция в пробе в процентах (это выражение верно при допущении, что карбонаты представлены в основном кальцитом).

Разность между КПП и КНП выражается фактическим нейтрализующим потенциалом (ФНП),  $\text{ФНП} = \text{КНП} - \text{КПП}$  [26], величина которого даёт представление о результирующей кислотности будущих стоков. По [27] непродукующим считается вещество с  $\text{ФНП} > 20$  кг  $\text{CaCO}_3/\text{т}$ . Кислотопродуцирующим считается вещество с  $\text{ФНП} < -20$  кг  $\text{CaCO}_3/\text{т}$ . Соответственно, область неопределённости лежит в интервале  $-20$  кг  $\text{CaCO}_3/\text{т} < \text{ФНП} < 20$  кг  $\text{CaCO}_3/\text{т}$ .

Для повышения достоверности оценки появления кислых стоков в данной работе предложено дополнительно определять нейтрализующий потенциал вещества отвалов и хвостохранилищ по методу [24]. Использование пероксидного эксперимента [28] позволяет оценить состав стоков при окислении отвальных пород и разрушении минеральной матрицы.

Целью данной работы было создание комплексной методики прогнозной оценки состава дренажных потоков из отвальных пород, определение кислотопродуцирующего и кислотонейтрализующего потенциалов вещества с учётом минеральных форм – источников токсичных элементов в дре-

нажных потоках, на примере Раздолинского рудного узла.

## Объект исследования

Объектом исследования являются отвальные породы Раздолинского рудного узла (Красноярский край).

В геологическом строении Раздолинского рудного узла принимают участие отложения сухопитской серии нижнего (кординская свита  $R_1kd$ ) и среднего (горбилковская  $R_2gr$ , удерейская  $R_2ud$  свиты) рифея, а также верхнего отдела неогена (кирнаевская свита  $N_2kr$ ) и четвертичной системы (верхний и современный отделы) [29]. Породы представлены темно-серыми углеродистыми филлитами, алеврофиллитами, кварцитами, алевропесчаниками, кварц-сланцевыми сланцами, доломитами, доломитизированными известняками. Отмечаются вулканокластические разности – от туфосланцев до туфогравелитов. Типичными породами пачки являются хлорит-серицитовые филлитовидные сланцы. Наряду с хлорит-серицитовыми филлитами, в породах верхней пачки выделяются и чисто серицитовые разности филлитовидных сланцев, а также углеродистые филлиты. В центральной части Раздолинской площади располагается субмеридионально ориентированная цепочка тел метаморфизованных пород ультраосновного и основного состава, относимых к двум комплексам: попутнинскому  $ivR_1pp$  и исаковскому ( $v\beta R_1is$ ) [29].

Широко проявлены различные наложенные гидротермально-метасоматические процессы: карбонатизация, окварцевание, углеродизация, турмалинизация, сульфидизация, листовитизация, березитизация, что и определяет геохимический состав вмещающих пород. Рудная минерализация представлена пиритом (до 2–5 %), арсенопиритом (до 1–2 %), герсдорфитом, блеклыми рудами, халькопиритом, пирротинном. Основными породообразующими минералами руды являются кварц, карбонаты, черные слюдястые минеральные агрегаты, пропитанные углеродистым веществом [29].

Для исследования была составлена коллекция из 50 проб вмещающих пород и бедных руд, предназначенных для складирования в отвалы при разработке месторождений.

## Методы

Оксиды силикатной группы

Пробы отвальных пород и бедных руд были раздроблены, тщательно гомогенизированы многократным перемешиванием, расквартованы, одна часть была истерта до –200 меш для последующих анализов. Характеристика химического состава пород проводилась на основании определения оксидов силикатной группы, примесных элементов, форм серы (общая, сульфидная, сульфатная),  $\text{CO}_2$  и содержания микроэлементов.

Анализируемая проба была высушена при 105 °С в течение 1 часа, затем прокалена при 1000 °С в

течение 2,5 часов, после чего смешена с флюсом (66,67 % тетрабората лития; 32,83 % метабората лития и 0,5 % лития бромистого) в соотношении 1:9 (общий вес смеси составляет 5 г). Смесь плавилась в платиновых тиглях в индукционной печи Lifumat-2,0-Ox (Linn High Therm GmbH). Полученные таким образом стекла анализировались на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation). Для построения градуировочных графиков использовались стандартные образцы состава горных пород. Погрешность определения не превышала таковую для второй категории точности по [30].

Концентрации потенциально токсичных примесных элементов

Определение элементного состава пород проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой ИСП-АЭС на спектрометре «iCap 6500 Duo» («Thermo Scientific», США), ИНХ СО РАН.

Для разложения проб применяли растворы  $\text{HNO}_3$  (осч),  $\text{HCl}$  (осч),  $\text{H}_2\text{O}_2$  (осч) («Реахим», Россия) и  $\text{HF}$  (осч) («Реактив», Россия). В качестве образцов сравнения были использованы многоэлементные аттестованные смеси (МЭС) производства ООО НПП «Скат» (Россия). Растворение анализируемых образцов проводили в автоклавах HP-500 из поли-тетра-фтор-алкокси-этилена в микроволновой печи Mars-5 и Multiwave Pro. Суммарные величины погрешностей определения Ag, Ba, Fe, Sb, Te, Ti и Mo не превышали значений 0,25, а для остальных элементов – 0,20 (относительное стандартное отклонение).

Содержания серы сульфидной, сульфатной и кальцита

Первым этапом в пробах были определены содержания форм серы (общей, сульфидной, сульфатной) и  $\text{CaCO}_3$  для расчета величины КПП/КНП.

Содержание серы сульфидной рассчитывалось как разница  $S_{\text{общ}} - S_{\text{сульфатная}}$  [31]. Навеска образца спекалась в муфеле при 800 °C со смесью ЭШКА (200 г  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и 400 г  $\text{MgO}$ ). Спек переводился в горячий раствор и кипятился 5 мин, после фильтрования подкислялся раствором  $\text{HCl}$ . После добавления раствора  $\text{BaCl}_2$  получали осадок  $\text{BaSO}_4$ , который взвешивали и определяли содержание общей серы [32].

Содержание сульфатной серы определялось из навески 0,5 гр, которая кипятилась в 10%-м растворе  $\text{HCl}$ . Раствор фильтровали, добавляли  $\text{BaCl}_2$ , и затем весовым методом определяли содержание  $S_{\text{сульфатной}}$ .

Количество  $\text{CaCO}_3$  для расчета КНП было определено по концентрации диоксида углерода в пробах. Содержание  $\text{CO}_2$  определялось путем разложения карбонатов (кальцит, доломит, анкерит) из навески пробы 0,5 гр. в охлаждаемом растворе  $\text{HCl}$  (1:4), поглощения выделившегося диоксида углерода раствором гидроксида натрия, осаждения карбонат-иона раствором  $\text{BaCl}_2$  и последующим

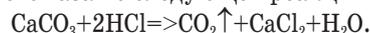
титрованием свободных гидроксид-ионов раствором  $\text{HCl}$  по фенолфталеину [30, 33].

Содержание диоксида углерода рассчитывалось по разности между объемами соляной кислоты, пошедшими на титрование раствора гидроксида натрия до и после поглощения им диоксида углерода. Для контроля правильности анализа использовали государственные стандартные образцы, аттестованные на содержание диоксида углерода в интервале 0,1–47 мас. %

Расчёт кислотонейтрализующего потенциала по методу Собека [24]

Количество нейтрализующих соединений, присутствующих в исследуемом веществе, определялось с помощью обработки пробы известным количеством стандартизированной соляной кислоты, добавляемой с избытком. Для увеличения глубины протекания реакции смесь нагревалась. Затем было оценено остаточное количество кислоты.

Первоначально для исследуемого вещества был установлен «уровень шипения (Fizz Rating)». Его определение заключалось в помещении небольшого количества измельченной пробы (приблизительно 0,5 г) в керамическую чашечку и добавлении одной-двух капель раствора  $\text{HCl}$  (1:3, что соответствует приблизительно 8 % или ~2 моль/л). Затем оценивалась интенсивность выделения газа или слышимого «шипения (fizz)». Этот процесс связан с разложением карбонатов и выделением углекислого газа по следующей реакции:



Чем сильнее «шипение» – выделение углекислого газа, тем выше содержание карбонатов и тем больше предполагается нейтрализующий потенциал породы. По интенсивности (или уровню) «шипения» затем выбирается количество и концентрация добавляемой кислоты при определении кислотонейтрализующего потенциала (табл. 1).

**Таблица 1.** Используемые для анализа количество и нормальность кислоты  $\text{HCl}$  в зависимости от уровня шипения.

**Table 1.** Amount and normality of  $\text{HCl}$  acid used for analysis depending on fizz level

Интенсивность шипения Fizz intensity	$\text{HCl}$	
	Объем, мл Volume, ml	Нормальность Normality
Нет/Absent	–	–
Легкая/Mild	25	0,1
Средняя/Middle	20	0,5
Сильная/Strong	40	0,5

Для анализа к пробе вещества (2 г, фракция <0,25 мм) добавлялся раствор кислоты выбранного объема и концентрации. Смесь оставлялась на 1 час при комнатной температуре, затем добавлялась дистиллированная вода до общего объема 125 мл, и проба нагревалась до кипения (но не ки-

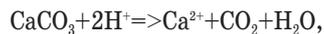
пятилась). После остывания полученный раствор фильтровался через бумажный фильтр «синяя лента», из фильтрата отбиралась аликвота и оттитровывалась до  $\text{pH}=7$  раствором  $\text{NaOH}$  соответствующей концентрации (такой же, как концентрация кислоты). Обязательно анализировалась холостая проба для каждой партии образцов.

Расчет КНП проводился следующим образом.

$$\text{КНП} = [\text{C}(\text{HCl}) \times V(\text{HCl}) - \text{C}(\text{NaOH}) \times V(\text{NaOH})] \times 100 \times 0,5 / m, \quad (1)$$

где  $\{\text{C}(\text{HCl})(\text{моль/л}) \times V(\text{HCl})(\text{л})\}$  – количество соляной кислоты (в молях), добавленное к пробе;  $\{\text{C}(\text{NaOH})(\text{моль/л}) \times V(\text{NaOH})(\text{л})\}$  – количество щелочи (в молях), потраченное на титрование пробы, чтобы значение  $\text{pH}$  раствора стало нейтральным, т. е. присутствующая в растворе кислота и щелочь скомпенсировали друг друга;  $\{\text{C}(\text{HCl}) \times V(\text{HCl}) - \text{C}(\text{NaOH}) \times V(\text{NaOH})\}$  – количество кислоты, потраченное на реакции с нейтрализующими минералами.  $100 \text{ г/моль}$  – молярная масса  $\text{CaCO}_3$ , используемая для пересчета молей в граммы;  $m$  – масса пробы, кг.

Поскольку пересчет ведётся на количество  $\text{CaCO}_3$  и принимается, что одна молекула  $\text{CaCO}_3$  нейтрализует два катиона водорода, в соответствии с реакцией:



для пересчета количества молей катионов водорода в количество молей  $\text{CaCO}_3$  в формуле (1) добавляется коэффициент 0,5.

#### Пероксидный эксперимент

Раствор 30 %  $\text{H}_2\text{O}_2$  был разбавлен дистиллированной водой в соотношении 1:1 при комнатной температуре для получения раствора 15 %  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Значение  $\text{pH}$  полученного раствора 15 % перекиси было измерено перед использованием и составило 5,4 ед., поэтому к перекиси был добавлен раствор  $\text{NaOH}$  по каплям до  $\text{pH}=7$ . К навеске 2 г пробы было добавлено 200 мл раствора перекиси, колба закрывалась стеклом и помещалась в вытяжной шкаф на время, необходимое для прохождения всех реакций. После реакции колба помещалась на горячую плиту и постепенно нагревалась до  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  до тех пор, пока не прекращалось «вскипание». К пробе была добавлена дистиллированная вода для получения конечного объема 200 мл. В растворе измерялось значение  $\text{pH}$ . Твердый остаток был отделен от раствора при помощи центрифугирования при 7000 оборотах в минуту в течение 30 минут. В растворах определялись физико-химические параметры и содержание макро- и микроэлементов.

Определение физико-химических параметров и концентраций основных ионов в водных пробах

Значения  $\text{pH}/\text{Eh}$  растворов измеряли потенциометрическим методом на портативном приборе фирмы «HANNA» HI 9025C с применением стеклянного комбинированного электрода и комбинированного платинового электрода с одноключевым хлорсеребряным электродом сравнения

$\text{Ag}/\text{AgCl}$ . Точность измерений составляет  $\pm 0,01 \text{ pH}$  и  $\pm 0,2 \text{ мВ Eh}$ .

Определение удельной электропроводности в водных пробах производилось с помощью портативного кондуктометра  $\text{WTW Cond315i}$  с автоматической термокомпенсацией и датчиком  $\text{Tetra-Con 325}$ .

Концентрации гидрокарбонатных и карбонатных ионов в пробах определялись титриметрическим методом по методике для природных вод [34]. Ошибка измерений составляет 15 %.

Концентрация сульфат-иона в пробах определялась турбидиметрическим методом [35]. Ошибка измерений составляет 10 %. Для измерения оптической плотности использовался спектрофотометр ПЭ-5400.

Определение концентраций нитрит-иона в пробах проводилось фотометрическим методом (с реактивом Грисса) [36] на спектрофотометре ПЭ-5400. Ошибка измерения 10 %.

Массовые концентрации хлоридов, нитрат-иона, аммония в водах определялись на приборе ЭКСПЕРТ-001 («Эжоникс», Москва) по стандартным методикам выполнения измерений потенциометрическим методом [37–39].

#### Используемые нормировочные значения

При анализе состава растворов были использованы следующие нормировочные значения: предельно допустимые концентрации химических веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения ( $\text{ПДК}_{\text{рвн}}$ ) [40], а также усреднённые и максимальные концентрации химических элементов в поверхностных и подземных водах Раздолинского рудного узла, информация о которых была получена при опробовании поверхностных и подземных вод данного района (табл. 2). Водотоки (р. Рыбная, руч. Моисеевский, Гусельников, Сорочий) охарактеризованы по 56 пробам, отобранным в различные сезоны 2009–2017 гг. Подземные воды были опробованы из 101 скважины (121 проба).

При использовании значений фоновых концентраций элементов в водах рудного узла мы исходили из того очевидного положения, что невозможно ожидать в стоках с отвалов более низкие концентрации элементов, чем в естественных водных объектах на данной территории.

#### Результаты и обсуждение

##### Основной силикатный состав

По содержанию и соотношению петрогенных компонентов породы Раздолинского рудного узла отчетливо разбиваются на 3 группы (табл. 3, рис. 1). В первую группу входят метаультрабазиты, которые содержат 15–20 мас. %  $\text{MgO}$ . К этой же группе пород относятся часть метасоматитов и бедных руд. Во второй группе содержание  $\text{MgO}$  составляет 4–7 мас. %

Сюда входят диабазы и часть метасоматитов. Все остальные породы относятся к третьей группе, большинство разновидностей – сланцы кварц-серпичитовые,

углеродистые, окварцованные. Здесь содержание MgO не превышает 3 мас. %. Точки составов этих трёх групп пород образуют отдельные поля на диаграммах MgO–SiO<sub>2</sub>, MgO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>. Низкие содержания SiO<sub>2</sub> в первых двух группах обусловлены, кроме генетической принадлежности к основным и ультраосновным породам, также сильной измененностью (карбонатизацией) и, как следствие, высокими потерями при прокаливании.

**Таблица 2** Предельно допустимые концентрации элементов в водах водоёмов рыбохозяйственного назначения (ПДК<sub>рхн</sub>) и фоновые концентрации элементов в поверхностных и подземных водах Раздолинского рудного узла: фон<sub>ср.</sub> – усреднённые значения; фон<sub>макс.</sub> – максимальные значения; SO<sub>4</sub> – Mn в мг/л; Ba – V в мкг/л

**Table 2.** Maximum allowable concentrations of elements in waters of fishery reservoirs (MPC<sub>i</sub>) and background concentrations of elements in surface and groundwater of the Razdolinsky ore cluster: BG<sub>ав</sub> is the average meaning; BG<sub>макс</sub> is the maximum meaning; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – Mn in mg/L; Ba – V in µg/L

Элементы Elements	ПДК <sub>рхн</sub> MPC <sub>f</sub>	Фон <sub>ср.</sub> BG <sub>ав</sub>	Фон <sub>макс.</sub> BG <sub>макс</sub>	Элементы Elements	ПДК <sub>рхн</sub> MPC <sub>f</sub>	Фон <sub>ср.</sub> BG <sub>ав</sub>	Фон <sub>макс.</sub> BG <sub>макс</sub>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	100	16	330	Sr	400	152	440
Cl <sup>-</sup>	300	8,5	72	Cu	1	1,4	20
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	40	1,8	39	Zn	10	11	210
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,08	0,07	0,6	Pb	6	1,4	10
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,2	0,11	0,58	Cd	5	0,02	0,27
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,5	0,15	2,2	Co	10	2,2	37
Ca <sup>2+</sup>	180	22	94	Cr	70	2,1	7,1
Mg <sup>2+</sup>	40	8,1	31	Ni	10	4,9	550
Na <sup>+</sup>	120	9,3	50	As	50	97	550
K <sup>+</sup>	50	1,4	5,9	Sb		17	370
Fe	0,1	0,71	7,7	Mo	1	1	23
Al	0,04	0,31	3,9	Li	80	3,5	23
Si		9,6	68	Hg	0,1	0,56	3
Mn	0,05	0,18	2,7	Ti	60	20	130
Ba	740	210	930	V	1	1,3	12

**Таблица 3.** Статистические параметры содержания оксидов силикатной группы для разных типов отвальных пород, мас. %.

**Table 3.** Statistical parameters of silicate group oxide content for different types of dump rocks, wt. %

Компоненты Components	Среднее Average	Мин Min	Макс Max	Ст. откл. St. dev.	Среднее Average	Мин Min	Макс Max	Ст. откл. St. dev.	Среднее Average	Мин Min	Макс Max	Ст. откл. St. dev.
	Группа I – метаультрабазиты, метасоматиты Group I – meta-ultrabasites, metasomatites				Группа II – диабазы, метасоматиты, бедные руды Group II – diabase, metasomatites, poor ores				Группа III – сланцы, метасоматиты, бедные руды Group III – shales, metasomatites, poor ores			
SiO <sub>2</sub>	33,33	24,61	39,26	5,84	48,26	35,65	68,28	11,16	59,09	51,12	67,26	4,21
TiO <sub>2</sub>	0,56	0,31	0,74	0,14	1,09	0,77	1,43	0,28	0,93	0,22	1,27	0,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,75	5,23	9,22	1,37	11,72	9,16	14,68	2,35	17,68	6,33	21,85	3,12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,12	7,92	11,14	1,10	13,39	6,14	18,62	4,35	8,26	4,81	12,46	1,86
MnO	0,19	0,16	0,24	0,03	0,22	0,04	0,32	0,10	0,11	0,01	0,34	0,07
MgO	17,86	14,51	20,06	1,90	5,21	3,50	7,34	1,35	1,36	0,00	2,75	0,66
CaO	9,91	6,86	16,75	3,72	7,04	0,16	18,26	6,75	1,05	0,12	5,51	1,42
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,06	0,13	0,05	3,29	1,63	4,37	1,24	1,21	0,34	3,24	0,64
K <sub>2</sub> O	0,12	0,01	0,61	0,22	0,21	0,03	0,82	0,31	3,30	0,14	5,20	0,91
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04	0,02	0,05	0,01	0,07	0,02	0,11	0,03	0,11	0,04	0,27	0,05
LOI	18,47	12,15	26,76	5,19	6,97	3,00	16,07	4,67	0,06	0,01	0,08	0,01

#### Микроэлементный состав

В химическом составе отвальных пород проявляется высокая контрастность в содержании элементов, обусловленная их привносом–выносом в процессе метасоматической переработки. В настоящем исследовании акцент делается на потенциально токсичные элементы: Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Co, As, Sb, Te, Se. Для обсуждения содержания элементов в породах предлагается использовать среднее содержание элементов в земной коре для различных типов пород: кислых, средних, основных, ультраосновных [41]. Сравнение с кларковыми значениями несет определённую долю условности, т. к. околорудно изменённые породы в значительной степени утратили свой первоначальный состав, но процессы перераспределения элементов, их выноса и концентрирования достаточно наглядно проявляются при сопоставлении с соответствующими кларками.

Все типы исследуемых пород обогащены элементами рудной ассоциации: металлами Cu, Zn, Pb, Cd, Ag и анионогенами As, Sb, Se, Te (табл. 4). Особо заметный привнос установлен для серебра и анионогенных элементов, которые накапливаются во вмещающих породах до уровня, превышающего кларковый на 2–5 порядков. При этом породы I группы (метаультрабазиты и метасоматиты по ним) заметно обеднены элементами, характерными для ультраосновных пород: Cr, Co, Ni, которые, видимо, интенсивно выносились из пород при метасоматозе в результате преобразования оливинов, пироксенов, хромшпинелидов, что подтверждается пониженными содержаниями в них MgO по сравнению с типичными ультрабазитами (табл. 3).

Среди металлов наибольший разброс содержания у Pb и Cd, разница между минимальными и максимальными концентрациями составляет более, чем три порядка (рис. 2). Остальные металлы (Cu, Zn, Cr, Co, Ni) распределены более равномерно

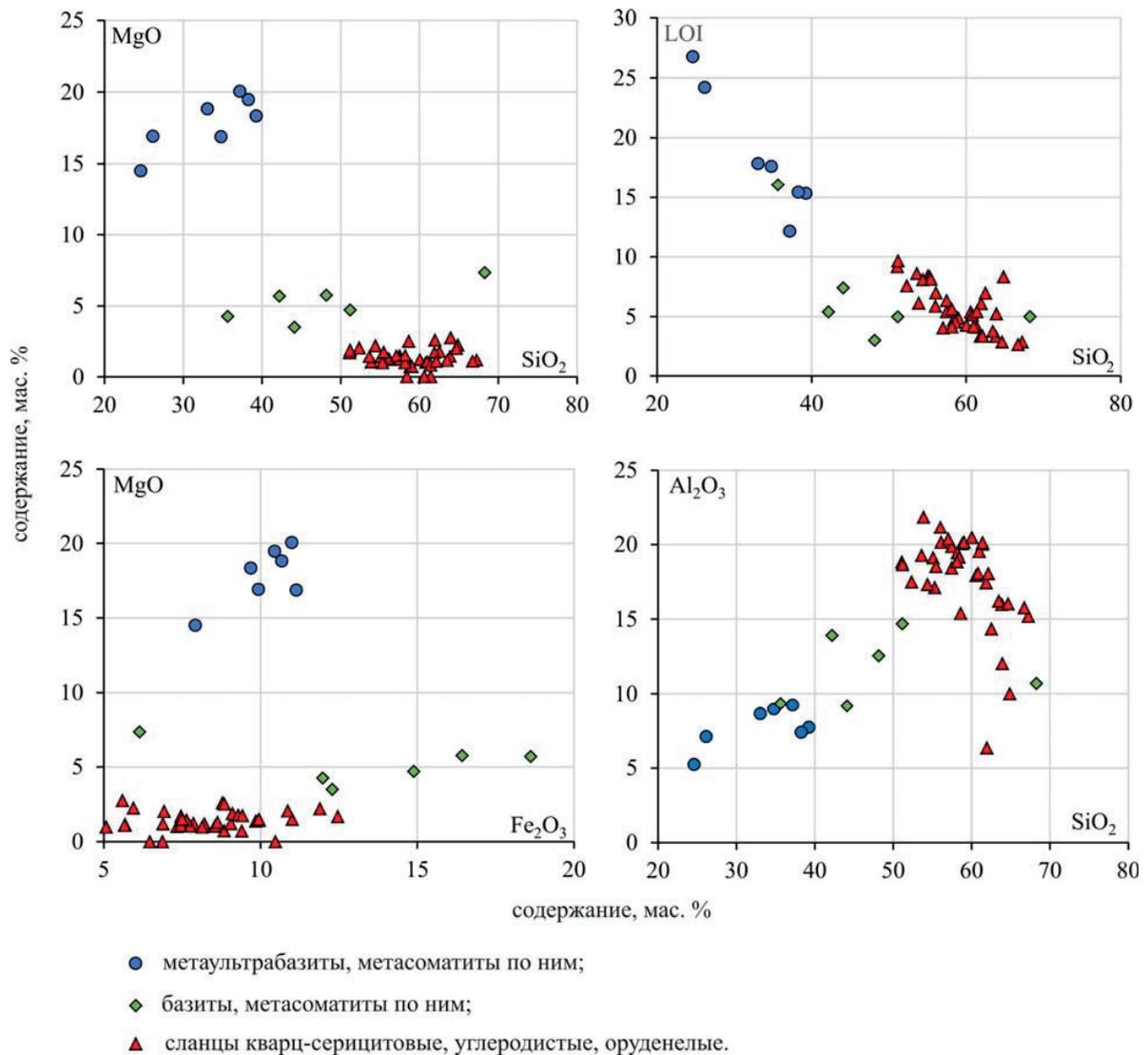


Рис. 1. Вариации содержаний компонентов в отвальных породах Раздолинского рудного узла, мас. %.

Fig. 1. Variation in concentrations of chemical elements in tailings of Razdolninsky ores, wt. %

но. В группе анионогенных элементов (As, Sb, Se, Te, V, Mo) наибольший контраст у мышьяка и молибдена.

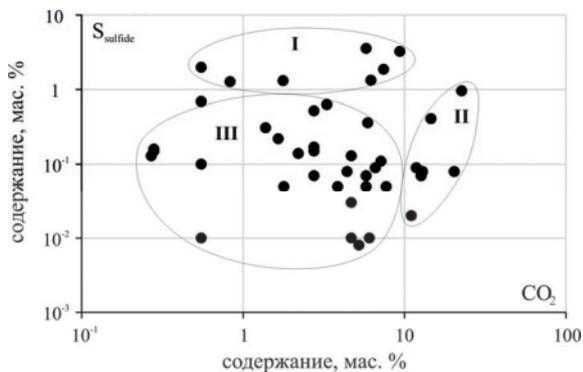


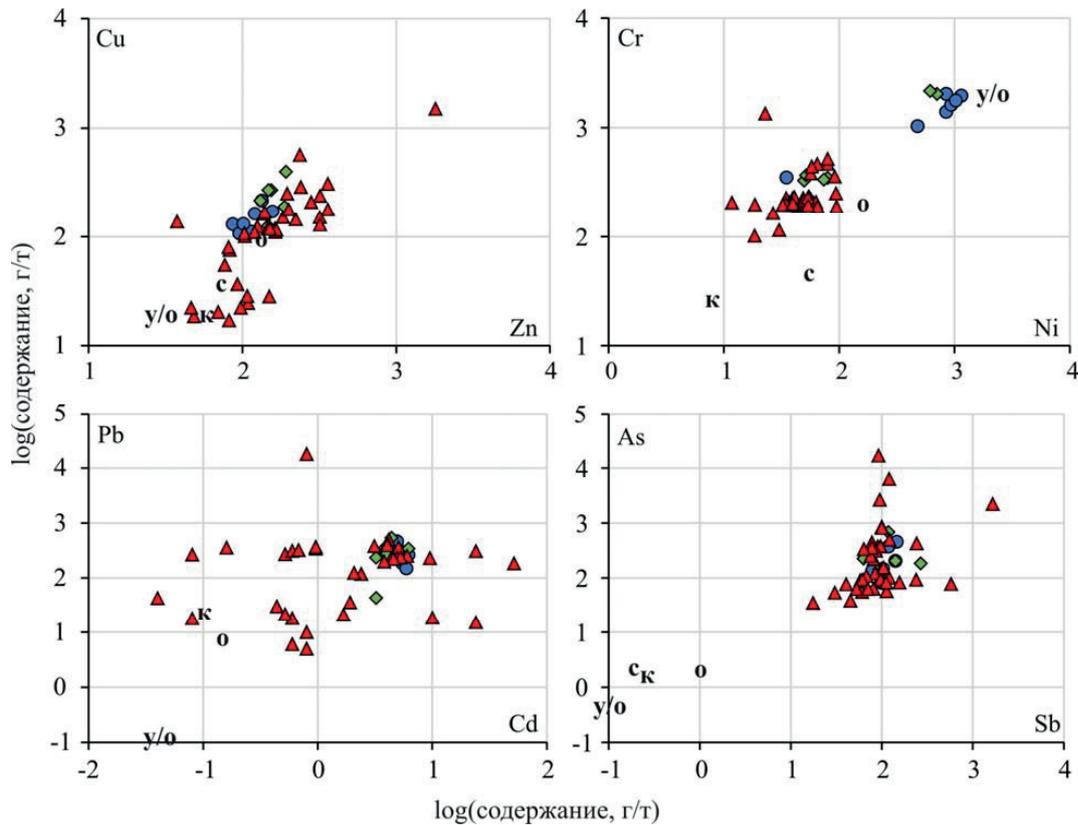
Рис. 3. Соотношение содержания серы сульфидной и  $CO_2$  в отвальных породах, мас. %.

Fig. 3. Ratio of the contents of sulphide sulfur and  $CO_2$  in the waste rock, wt. %.

Сера сульфатная, сульфидная, карбонаты

Содержание серы во всех пробах определяется практически полностью её сульфидной формой. Её содержание колеблется от 0,008 до 3,56 мас. %, в то время как  $CO_2$  – от <0,01 до 23 мас. % (табл. 5, рис. 3). Пробы с относительно высоким содержанием сульфидов (>1 %) составляют 14 % от всей выборки (группа I). При этом только в двух из них содержание  $CO_2$  тоже низкое (<1 %).

В карбонатизированных пробах (группа II), в которых  $CO_2 > 10$  % содержание сульфидной серы не превышает 1 %. В большинстве проб (группа III) при довольно высоком количестве карбонатов ( $CO_2$  изменяется в диапазоне 1–10 %) содержание сульфидной серы сравнительно низкое – <1 %. Отметим, что в выборке присутствуют различия пород, в которых отсутствуют карбонаты (6 проб). Но в этих же пробах и содержание серы невысоко – до 0,17 %, что означает отсутствие либо незначительную долю потенциальных кислотообразователей,



**Рис. 2.** Распределение элементов в отвальных породах. Условные обозначения см на рис. 1. Буквами показаны кларковые содержания в кислых (κ), средних (c), основных (o), ультраосновных (y/o) породах

**Fig. 2.** Distribution of elements in dump rocks. For conventions see Fig. 1. Letters show clark contents in acid (κ), medium (c), basic (o), ultrabasic (y/o) rocks

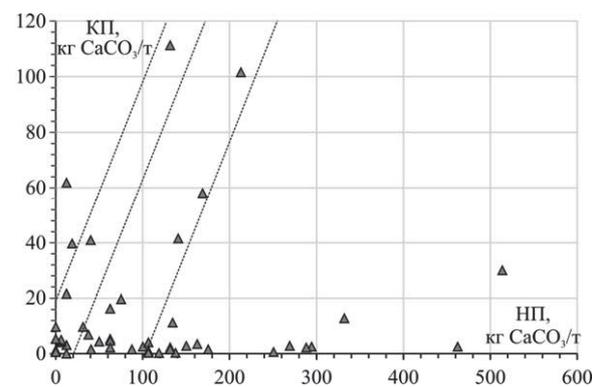
для нейтрализации которых необходимы карбонаты. Из этих результатов можно сделать предварительный вывод о том, что отвальные породы представлены разностями, обладающими высоким кислотонейтрализующим потенциалом по соотношению сульфиды/карбонаты.

Кислотонейтрализующий потенциал по расчетному методу

Для выборки изучаемых отвальных пород только две пробы имеют фактический нейтрализующий потенциал  $< -20$  кг  $\text{CaCO}_3/\text{т}$ , что означает высокую кислотопродуцирующую способность этих проб. Это сланцы кварц-серицитовые с содержанием  $\text{CO}_2$  ниже 1 % и относительно высокими содержаниями  $S_{\text{sulfide}}$ : 2 и 1,27 % соответственно. Тридцать три пробы (66 % от всей выборки) не кислотопродуцирующие. Следует подчеркнуть, что 20 проб из не кислотопродуцирующих разностей (это сланцы кварц-серицитовые, диабаз, метальтрабиты, метасоматиты, сланцы углеродистые) обладают очень высокой нейтрализующей способностью, их фактический нейтрализационный потенциал (ФНП) превышает 100 кг  $\text{CaCO}_3/\text{т}$ . Значения ФНП 15 проб лежат в зоне неопределенности ( $20 > \text{ФНП} > -20$  кг  $\text{CaCO}_3/\text{т}$ ), рис. 4.

Результаты расчётов ФНП отвальных пород Раздолинского рудного узла свидетельствуют о том, что основная масса пород не будет давать ки-

слых стоков, ни в настоящее время, ни в будущем. Потенциальная возможность образовывать кислые стоки у небольшой доли пород с низким ФНП будет компенсироваться высокой кислотонейтрализующей способностью всего отвала.



**Рис. 4.** Соотношение кислотопродуцирующего и кислотонейтрализующего потенциалов в пробах отвальных пород. Наклонные пунктирные линии разделяют диапазоны значений ФНП (КНП-КПП):  $< -20$ ,  $-20 \dots 20$ ,  $> 20$ ,  $> 100$

**Fig. 4.** Ratio of acid-producing and acid-neutralizing potentials in samples of waste rock. The oblique dotted lines divide the ranges of FNP (ANP-APP) values:  $< -20$ ,  $-20 \dots 20$ ,  $> 20$ ,  $> 100$

**Таблица 4.** Содержание примесных элементов в разных типах отвальных пород, г/т

**Table 4.** Content of impurity elements in different types of dump rocks, g/t

Элемент Element	Средн Average	Мин Min	Макс Max	Ст. откл St. dev	Кларк у/о Clark u/o	Средн Average	Мин Min	Макс Max	Ст. откл St. dev	Кларк о Clark basic	Средн Average	Мин Min	Макс Max	Ст. откл St. dev	Кларк кисл Clark acid	Кларк средн Clark medium
Cu	150	110	220	39	20	250	130	400	93	100	170	17	1500	249	20	35
Zn	120	87	160	24	30	160	130	190	24	130	210	38	1800	280	60	72
Pb	270	150	470	100	0,10	300	43	540	160	8,0	680	5,0	18 000	2900	20	15
Cd	5,3	4,0	6,2	0,73	0,05	4,2	3,2	6,2	1,3	0,19	5,1	н.о.	52	10	0,10	–
Ag	200	130	260	53	0,05	290	110	400	110	0,10	210	60	490	85	0,05	0,07
Cr	1450	350	2000	590	2000	930	330	2200	910	200	270	100	1300	205	25	50
Co	78	36	110	28	200	74	33	110	27	45	35	11	120	21	5,0	10
Ni	760	35	1150	380	2000	260	50	710	310	160	49	12	95	21	8,0	55
As	210	80	460	150	0,50	260	115	690	210	2,0	960	35	17 000	2940	1,5	2,4
Sb	110	78	150	24	0,10	130	63	270	73	1,0	150	18	1700	270	0,26	0,20
Se	49	27	77	17	0,05	28	9,0	64	20	0,05	51	7,0	120	31	0,05	0,05
Te	37	27	62	12	0,001	45	27	63	14	0,001	33	16	59	10	0,001	0,001
V	190	120	260	54	40	410	250	540	120	200	170	37	440	86	40	100
Mo	9,4	5,9	24	6,7	0,2	6,9	5,8	9,4	1,4	1,4	19	н.о.	300	49	1,0	0,90
Li	22	2,0	37	13	0,5	38	2,0	160	62	15	41	5,4	85	21	40	20
Rb	150	130	170	13	2,0	150	130	180	18	45	190	120	380	42	200	100
Sr	210	25	410	116	10	70	7	157	51	44	180	17	740	172	300	80

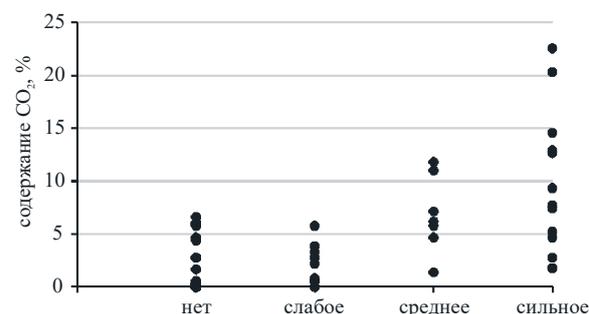
Кислотонейтрализующий потенциал по методу [24]

Восемь проб вмещающих пород (диабазы, метасоматиты, метасоматиты, метасоматиты) и пять образцов бедных руд характеризуются сильным выделением газа до бурного вскипания, а в семи образцах наблюдается газовыделение средней интенсивности (три пробы бедных руд и четыре пробы вмещающих пород (метасоматиты (2), метасоматиты, сланцы кварц-серицитовые). В целом отмечено, что для сланцев характерна слабая интенсивность «шипения» или его отсутствие, а для метасоматитов и метасоматитов – средняя или сильная интенсивность «шипения», обусловленная наличием карбонатов.

В веществе с сильным «шипением» содержание  $\text{CO}_2$  установлено от 1,8 до 23 %, со средней величиной – 9,5 %, а для проб со средним «шипением» – от 1,4 до 12 % со средним содержанием 6,9 % (рис. 5). Для десяти проб было отмечено слабое «шипение» ( $\text{CO}_2$  от <0,01 до 5,8 % при среднем 2,0 %), а 20 проб вещества вообще не дают реакции на добавление кислоты ( $\text{CO}_2$  от <0,01 до 6,6 % при среднем 2,1 %). Представленные данные свидетельствуют, что интенсивность шипения не всегда строго связана с содержанием карбонатов, так как они присутствуют в виде разных минералов (кальцит, доломит, магнезит и др.), скорости реакции которых с кислотой существенно различаются (уменьшаются в ряду кальцит–доломит–магнезит [32]). Так что в тех пробах, где установлено существенное содержание углерода в форме карбонатов и одновременно низкая интенсивность «шипения» при тестовой реакции с соляной кислотой, по-видимому, мала концентрация кальцита, но присутствуют другие карбонатные минералы.

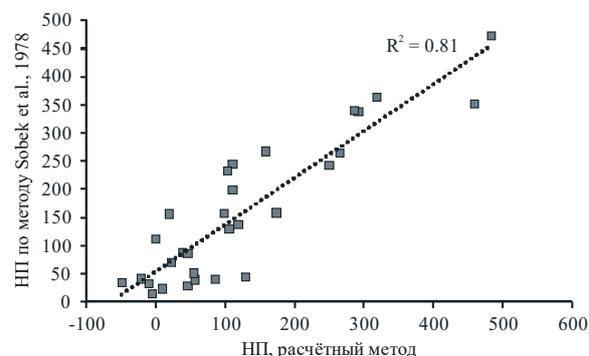
Определённый по методу Собека нейтрализующий потенциал также довольно высок: в 17 пробах

он превышает 100 кг  $\text{CaCO}_3$  на 1 т породы. В девяти пробах определён относительно низкий нейтрализующий потенциал (<50 кг  $\text{CaCO}_3/\text{т}$ ).



**Рис. 5.** Зависимость интенсивности «шипения» проб пород и бедных руд от содержания  $\text{CO}_2$

**Fig. 5.** Dependence of the «fizz» intensity of rock samples and poor ores on  $\text{CO}_2$  content



**Рис. 6.** Соотношение значений нейтрализующих потенциалов отвальных пород и бедных руд, определённых разными методами

**Fig. 6.** Ratio of neutralizing potentials of waste rocks and poor ores, determined by different methods

Сравнение двух методов (расчётного и метода Собека) определения нейтрализующего потенциала показывает хорошую сходимость (рис. 6), хотя по некоторым пробам отмечаются отклонения как в ту, так и в другую сторону. Это связано с допущениями того, что вся сульфидная сера в расчётном методе принимается как пиритная, а в данном случае это не так. То же – в отношении карбонатов.

Всё вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что вещество отвальных пород и бедных руд Раздолинского рудного узла обладает высокой способностью к нейтрализации кислоты, образующейся при окислении и гидролизе сульфидных минералов.

**Таблица 5.** Статистические параметры состава экспериментальных растворов (интенсивное окисление), электропроводность (ЭП) в мкСм/см, Eh в мВ, содержание  $\text{HCO}_3^-$ –Al в мг/л, Mn–V в мкг/л

**Table 5.** Statistical parameters of composition of experimental solutions (intensive oxidation), Electrical Conductivity (EC) in  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Eh in mV, content of  $\text{HCO}_3^-$ –Al in mg/L, Mn–V in  $\mu\text{g}/\text{L}$

Элементы Elements	Среднее Average	Мин Min	Макс Max	Ст. откл St. dev.
ЭП/ЕС	241	94	1306	188
pH	7,77	2,75	9,03	1,13
Eh	424	352	665	61
$\text{HCO}_3^-$	93	<0,1	160	41
$\text{CO}_3^{2-}$	2,1	<0,1	6,0	1,9
$\text{SO}_4^{2-}$	49	1,0	500	91
$\text{NO}_3^-$	1,7	0,33	4,1	1,1
$\text{NO}_2^-$	0,71	0,11	2,1	0,40
$\text{NH}_4^+$	0,38	0,085	1,3	0,24
$\text{Cl}^-$	0,42	0,035	1,8	0,27
$\text{Ca}^{2+}$	12	0,50	80	17
$\text{Mg}^{2+}$	6,7	0,20	35	6,8
$\text{Na}^+$	33	2,7	56	7,1
$\text{K}^+$	4,9	0,23	16	3,5
Si	6,5	1,0	35	7,4
Fe	1,6	0,085	26	4,4
Al	0,42	0,029	10	1,4
Mn	260	2,3	4000	740
Ba	33	5,3	150	31
Rb	17	<5,0	44	13
Sr	130	4,0	610	140
Cu	17	<1,0	240	47
Zn	150	<1,0	2100	380
Pb	12	1,1	150	24
Cd	0	<0,5	2,0	0,48
Co	33	<0,1	370	88
Cr	52	3,3	710	110
Ni	43	<1,0	680	130
As	110	<5,0	2000	310
Sb	65	<1,0	341	83
Se	10	<2,0	36	7,5
Te	3,8	<0,2	14	4,7
Mo	8,0	<1,0	54	12
Hg	1,0	<0,05	5,2	1,0
Ti	10	0,52	76	15
V	25	0,19	400	57

#### Минералогия

Как следует из результатов рентгеноструктурного анализа и изучения полированных препаратов, наиболее распространённые сульфидные минералы в исследуемых породах – пирит и пирротин. Реже встречаются арсенопирит, сфалерит, халькопирит, единичные зерна тетраэдрита, пентландита, минералов ряда кобальтин-герсдорфит, станина в виде вростков в основные сульфиды (рис. 7).

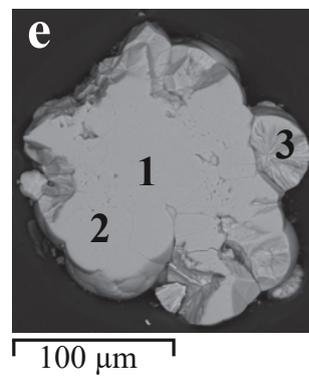
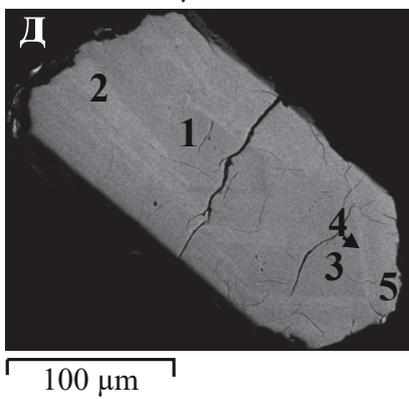
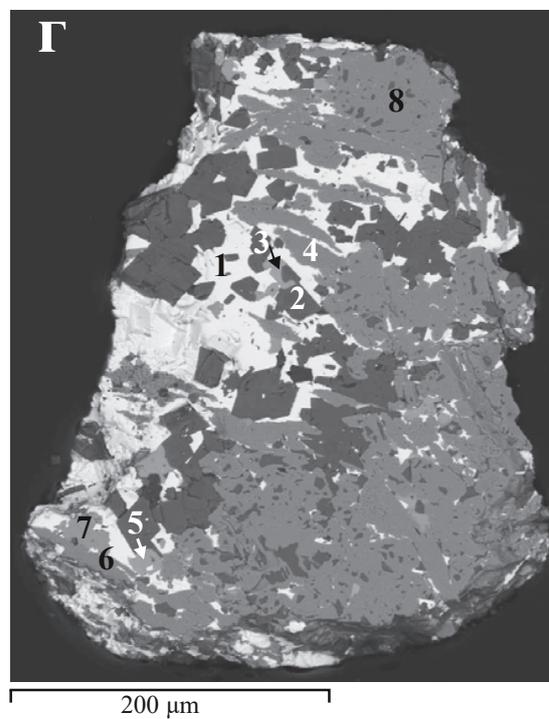
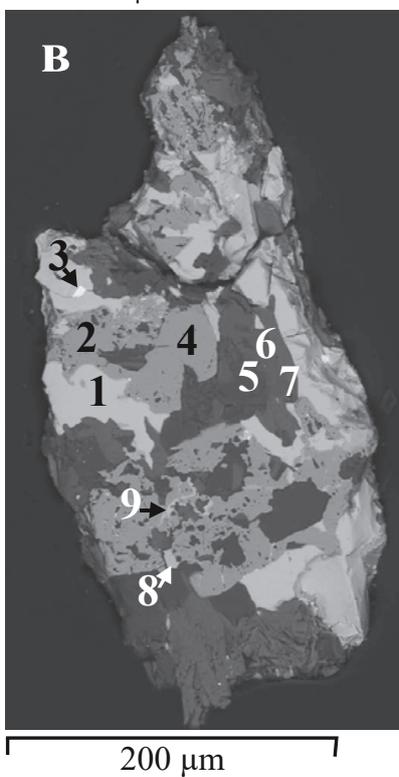
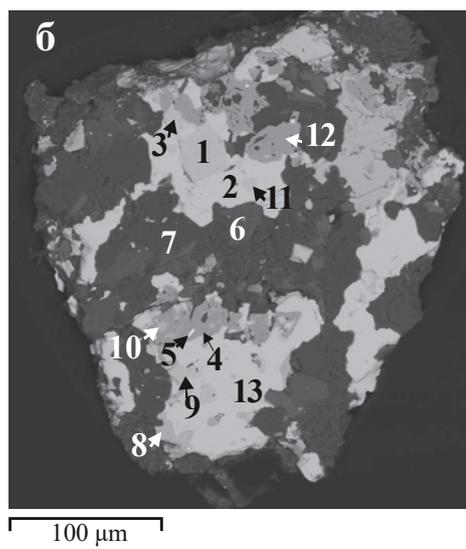
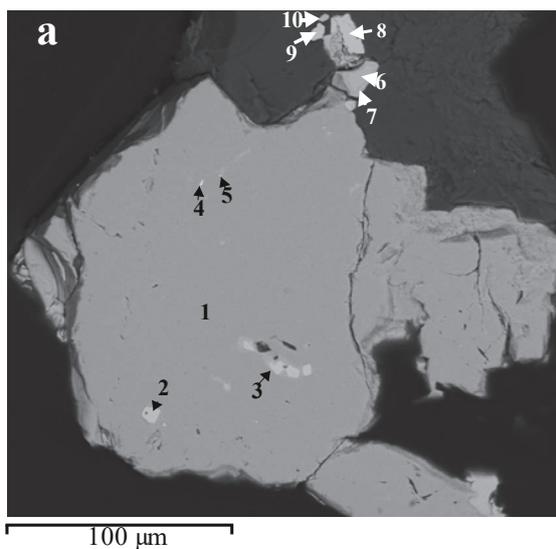
#### Растворы пероксидного эксперимента

Значения pH практически всех растворов соответствуют слабо щелочной – щелочной области, за исключением трёх проб (сланцы кварц-серицитовые, метасоматиты), в которых среда растворов после интенсивного окисления стала кислой (табл. 5, рис. 8). В этих же растворах электропроводность заметно выше средней по выборке. Отметим, что по соотношению содержаний сульфидной серы и  $\text{CO}_2$ , обсуждаемому выше (рис. 3), эти породы были выделены в группу I (относительно высокое количество сульфидов и низкое карбонатов), что определило низкий нейтрализационный потенциал, а следовательно, – возможность кислотообразования.

В целом щелочная среда большинства растворов после окисления проб подтверждает сделанные ранее выводы о высокой нейтрализующей способности отвальных пород. Кроме того, высокие значения pH водной среды способствуют снижению подвижности металлов.

Однако присутствие в околорудных метасоматитах сульфидов, сульфосолей, арсенидов определяет состав образующихся дренажных вод. Превышение над нормативными показателями (предельно допустимые концентрации химических веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения, ПДК<sub>рхн</sub> [40]) отмечено для ряда элементов (рис. 9).

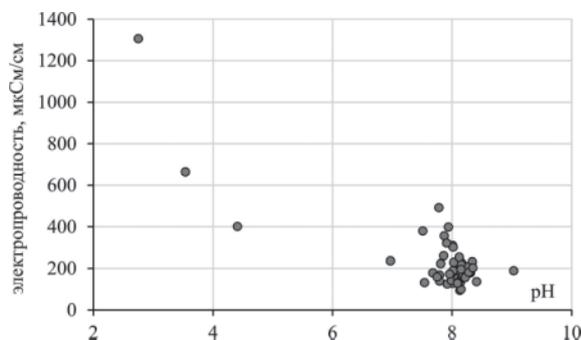
Концентрации Fe и Al практически во всех растворах пероксидного эксперимента превышают соответствующие ПДК. Но фон рудного поля (усреднённые значения для поверхностных и подземных вод) довольно близок к средним значениям в растворах, а максимальные фоновые концентрации превышены в двух пробах по железу (разности, в которых появилась кислая среда – сланцы кварц-серицитовые и метасоматиты) и в одной – по алюминию (бедные руды). Следует отметить, что кларк гидросферы по Al составляет 0,16 мг/л [42], в то время как ПДК<sub>рхн</sub>(Al)=0,04 мг/л, т. е. в 4 раза ниже, чем среднее содержание в незагрязнённых речных водах. Несмотря на то, что в большинстве проб превышены ПДК по Cu и Zn, фоновые их концентрации также находятся на уровне, выше ПДК, а максимальные фоновые значения – существенно выше. Так же, как с Al, кларк меди в гидросфере (0,007 мг/л) выше, чем ПДК<sub>рхн</sub> (0,001 мг/л). В трёх пробах из всей выборки (те же



**Рис. 7.** Минеральные формы нахождения элементов в отвальных породах: а) зерно пирита с примесью Ni (т. 1) в сростании с пентландитом в виде небольших зерен (т. 6, 7, 10) и тонкой жилки (т. 5), содержит очень тонкое зерно галенита (т. 4) и вросстки минералов твердого раствора кобальтин-герсдорфит (т. 2, 3, 8, 9); б) многофазное сростание сульфидов, сульфосолей и сульфоарсенидов в кварц-карбонатной жиле (т. 6, 7). Выделения кобальтина-герсдорфита (т. 1, 3, 9, 11) в тетраэдрите (т. 2, 13), находящемся в сростании с пиритом (т. 4, 12). В пирите – тонкая иголка галенита (т. 5). Сфалерит (т. 10) образует округлые зерна в пирите и окаймляет тетраэдрит (т. 8); в) сростание пирита (т. 2, 4) с тетраэдри- том (т. 1) в кварц-карбонат-хлоритовой массе (т. 5, 6, 7). Тетраэдрит содержит небольшое зерно галенита (т. 3). Тетра- эдрит (т. 9) выполняет трещину в тонкозернистом пирите с выделениями кобальтина (т. 8); г) пирит (т. 4, 6, 8) в ср- стании с галенитом (т. 1) и сидеритом (т. 2). Сфалерит (т. 3, 5) и халькопирит (т. 7) образуют выделения на границах сростаний пирита с галенитом; д) зональное зерно арсенопирита. Зональность обусловлена закономерным распреде- ление примеси сурьмы; е) сростание гетита, содержащего примеси сурьмы и мышьяка (т. 1, 2), с радиально-лучистым агрегатом сидерита (т. 3), также содержащего примеси мышьяка

**Fig. 7.** Mineral forms of elements in dump rocks: a) pyrite grain with impurity of Ni (p. 1) in intergrowth with pentlandite in the form of small grains (p. 6, 7, 10) and thin veins (p. 5), contains a very fine grains of galena (p. 4) and intergrowth of a solid solution of cobaltite-gersdorfite (pp. 2, 3, 8, 9); б) multiphase intergrowth of sulphides, sulfosalts and sulfoarsenides in a quartz-carbonate vein. Grains of cobaltite-gersdorfite (pp. 1, 3, 9, 11) in tetrahedrite (pp. 2, 13) in intergrowth with pyrite (p. 4, 12). In pyrite – a thin needle of galena (p. 5). Sphalerite (p. 10) forms rounded grains in pyrite and fringes tetrahedrite (p. 8); в) inter- growth of pyrite (pp. 2, 4) with tetrahedrite (p. 1) in the quartz-carbonate-chlorite mass (pp. 5, 6, 7). Tetrahedrite contains a small grain of galena (p. 3). Tetrahedrite (p. 9) performs a crack in fine-grained pyrite with cobaltite grains (p. 8); г) pyrite (pp. 4, 6, 8) in intergrowth with galena (p. 1) and siderite (p. 2). Sphalerite (pp. 3, 5) and chalcopyrite (p. 7) form a grains at the boundaries of the intergrowth of pyrite with galena; д) zoned grain of arsenopyrite. Zoning is due to the regular distribu- tion of antimony impurities; е) intergrowth of goethite containing impurities of antimony and arsenic (pp. 1, 2) with a radial- radiant siderite aggregate (p. 3), also containing arsenic impurities

кислые растворы) концентрации этих металлов намного превышают фоновые. Высокий коэффициент корреляции между медью и цинком в растворах ( $r=0,92$ ) обусловлен единой рудной ассоциацией сфалерита и халькопирита и, соответственно, близким поведением основных минералообразующих металлов.



**Рис. 8.** Разброс значений pH и электропроводности в растворах пероксидного эксперимента

**Fig. 8.** Variation in pH and electrical conductivity in peroxide solutions

Свинец довольно активно переходит в раствор при окислении минеральной матрицы, в 15 пробах его концентрации превышают ПДК и фоновые значения. Галенит, присутствуя в виде мельчайших зерен в пирите, видимо, легко разрушается при локальном повышении кислотности, и свинец остается в растворе даже при его последующей нейтрализации. Распределение кобальта в пробах подобно распределению свинца: коэффициент корреляции между этими элементами  $r=0,69$ , что также связано с единой минеральной ассоциацией галенита и кобальтина-герсдорфита. Повышенные содержания Cr обнаружены главным образом в растворах, взаимодействовавших с основными и

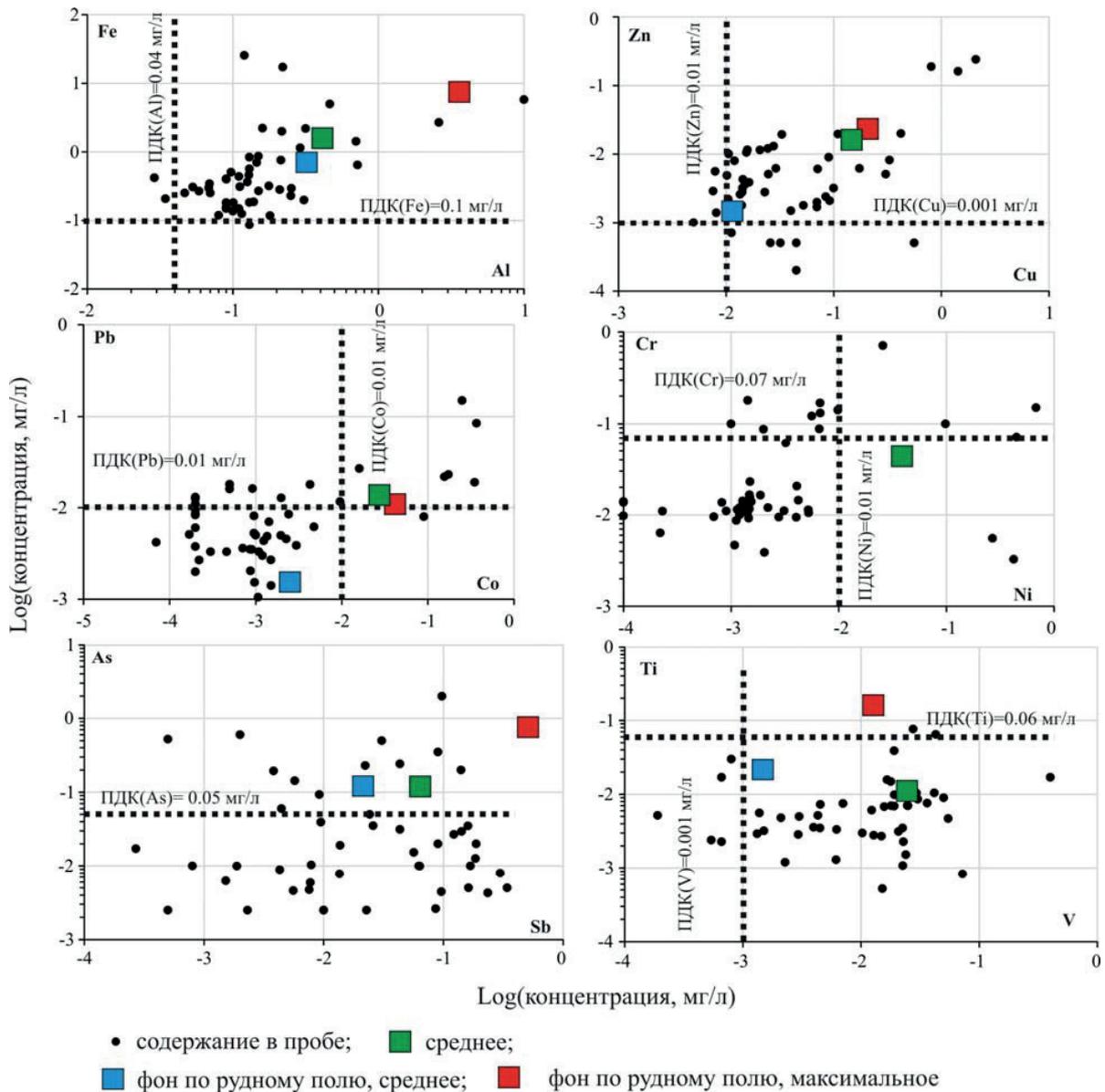
ультраосновными породами: диабазами, метаультрабазитами, в которых источниками этого элемента могут служить хромшпинелид (Cr – 32,6 %) и гранат (Cr – 4,7 %).

Концентрации аниогенных элементов As и Sb в растворах, хотя и превышают значения ПДК<sub>рхн</sub> по As (по Sb ПДК<sub>рхн</sub> не установлен) в ряде проб, находятся на уровне фоновых содержаний, и лишь в одной пробе (метаультрабазит) установлено аномально высокое значение по мышьяку – 2 мг/л. Отметим, что связь между этими геохимически близкими элементами отсутствует.

Зависимость уровня концентраций элементов от кислотности/щелочности среды неоднозначна. В целом концентрации металлов (Cu, Zn, Pb) снижаются с ростом pH (рис. 10), хотя и в щелочной области содержания довольно высоки. Для элементов, проявляющих аниогенные свойства (Cr, As, Sb), такой тенденции не отмечается. Можно утверждать, что Cr и Sb при снижении кислотности даже увеличивают свою подвижность, в то время как концентрации As изменяются вне зависимости от значений pH растворов. Возможность миграции в нейтральных и щелочных водных потоках для мышьяка и сурьмы неоднократно отмечалась ранее [43–45].

#### Закключение

Вмещающие породы и бедные руды Раздолинского рудного узла, предназначенные для складирования, по силикатному составу представлены широким диапазоном от ультрабазитов до сланцев и их метасоматически переработанных разновидностей. Это указывает на представительность выборки и возможность экстраполяции полученных в данной работе результатов на весь спектр возможных отвальных пород, образующихся при разработке месторождений, входящих в его состав. В микро-



**Рис. 9.** Концентрации элементов в растворах пероксидного эксперимента, сравнение с фоновыми значениями по рудному полю и нормативами ПДК<sub>рн</sub>

**Fig. 9.** Concentrations of elements in solutions of the peroxide experiment, comparison with background values for the ore field and MPC norms

элементном составе отвальных пород отмечаются повышенные концентрации свинца и аниогенных элементов (As, Sb, Se, Te) в большинстве проб. Концентрации меди и цинка лишь в небольшом количестве проб из выборки превышают кларковые значения.

На основании определения кислотообразующей и кислотонейтрализующей способности пород расчётным методом и методом Sobek et al. [24] установлено, что породы и бедные руды обладают высоким кислотонейтрализующим потенциалом в связи с присутствием значительных количеств карбонатизированных разностей и слабой сульфидацией околорудных метасоматитов. Получен-

ные данные однозначно свидетельствуют о крайне малой вероятности появления кислых стоков с отвалов, представленных исследуемыми породами и бедными рудами.

По данным пероксидного эксперимента при окислении минеральной матрицы основную опасность в стоках, кроме основных породообразующих элементов (Fe, Al), могут представлять аниогенные элементы: As, Sb, Se, Te. Однако сравнение с фоновыми концентрациями также свидетельствует о том, что серьёзную опасность в будущих стоках могут представлять металлы: Cd, Cu, Zn, Co, Pb. С ростом значений pH подвижность металлов снижается, в то время как чёткой зависим-

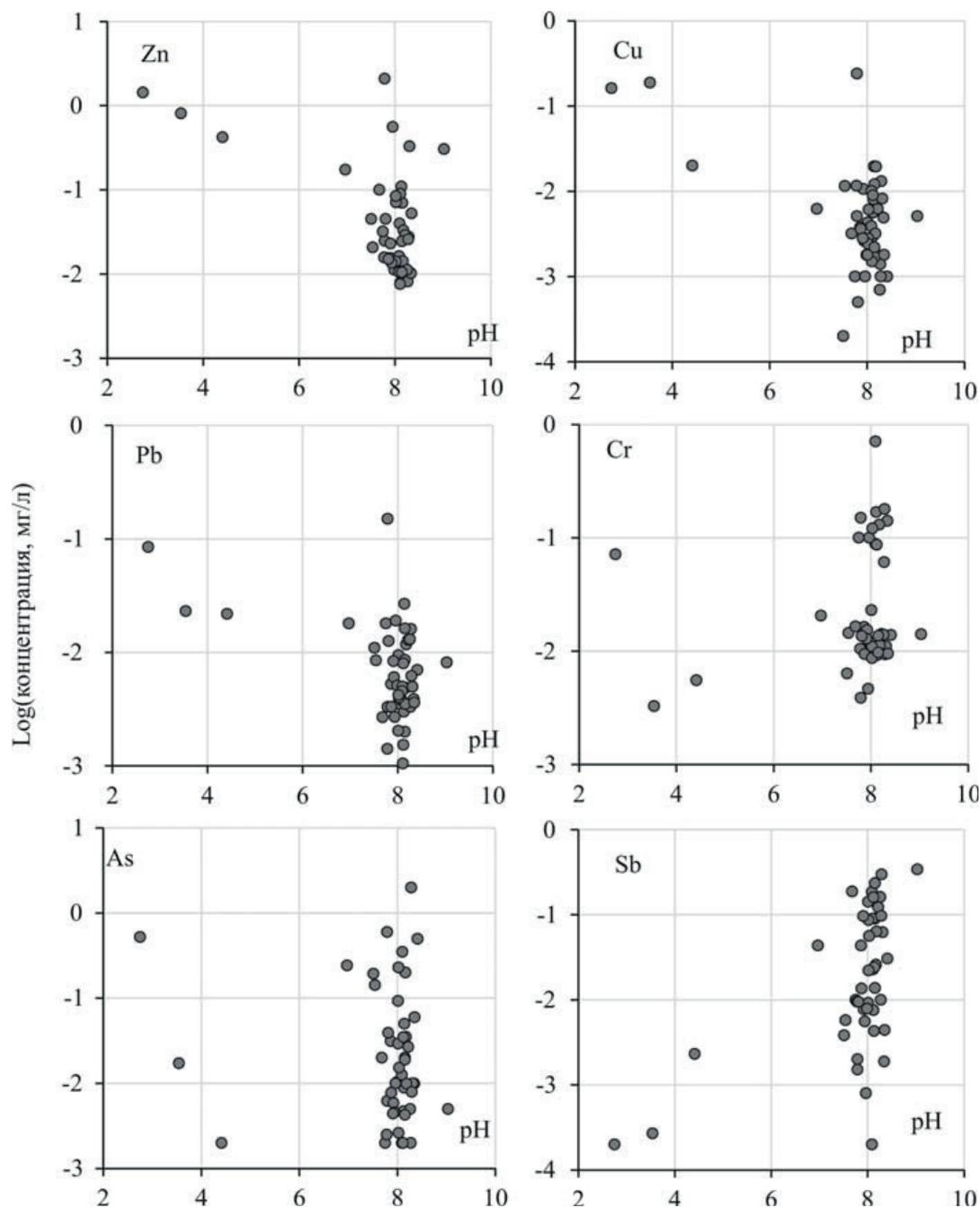


Рис. 10. Зависимость концентраций элементов в растворах пероксидного эксперимента от кислотности среды

Fig. 10. Dependence of the concentrations of elements in solutions of the peroxide experiment on the acidity

сти концентраций хрома, мышьяка, сурьмы от кислотности водной среды не отмечается. В некоторых случаях с ростом щелочности растворов подвижность хрома и сурьмы даже увеличивается, мобильность мышьяка в исследуемых породах наименее предсказуема.

Источниками металлов и анионогенных элементов в стоках являются сульфидные минералы: пирит, пирротин, сфалерит, галенит, халькопи-

рит, арсениды и сульфоарсениды: хлоантит, кобальтин-герсдорфит, сульфосоли: тетраэдрит.

Работа была выполнена в рамках проекта XI.138.3.1 ИНГГ СО РАН, при финансовой поддержке ООО «Красноярское ГРП» и РФФИ (грант № 17-05-00056). Авторы благодарят редактора журнала д.т.н., доц. А.С. Глазырина, д.г.-м.н., проф. С.И. Арбузова и к.г.-м.н. О.Е. Лепокурову за ценные замечания и пожелания, которые значительно улучшили текст статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lottermoser B.G. Mine wastes (second edition): Characterization, treatment, environmental impacts. – New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007. – 304 p.
2. Mine Drainage Generation and Control Options / X. Wei, C.M. Rodak, S. Zhang, Y. Han, F.A. Wolfe // *Water Environment Research*. – 2016. – V. 88. – № 10. – P. 1409–1432.
3. Mine Drainage: Research and Development / X. Wei, S. Zhang, Y. Han, F.A. Wolfe // *Water Environment Research*. – 2017. – V. 89. – № 10. – P. 1384–1402.
4. Kefeni K., Msagati T.A.M., Mamba B.B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: a review // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – V. 151. – P. 475–493.
5. Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update // *Applied Geochemistry*. – 2015. – V. 57. – P. 3–16.
6. Distribution and migration of heavy metals in soil and crops affected by acid mine drainage: Public health implications in Guangdong Province, China / J. Liao, Z. Wen, X. Ru, J. Chen, H. Wu, C. Wei // *Ecotoxicology and environmental safety*. – 2016. – V. 124. – P. 460–469.
7. Cumulative impacts of dissolved ionic metals on the chemical characteristics of river water affected by alkaline mine drainage from the Kuala Lipis gold mine, Pahang, Malaysia / A.F. Abu Bakar, I. Yusoff, T.F. Ng, M.A. Ashraf // *Chemistry and Ecology*. – 2015. – V. 31. – № 1. – P. 22–33.
8. Saglam E.S., Akcay M. Chemical and mineralogical changes of waste and tailings from the Murgul Cu deposit (Artvin, NE Turkey): implications for occurrence of acid mine drainage // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2016. – V. 23. – № 7. – P. 6584–6607.
9. Tiwari A.K., Singh P.K., Mahato M.K. Assessment of metal contamination in the mine water of the West Bokaro Coalfield, India // *Mine Water and the Environment*. – 2017. – V. 36. – № 4. – P. 532–541.
10. Mobility and fate of Thallium and other potentially harmful elements in drainage waters from a decommissioned Zn-Pb mine (North-Eastern Italian Alps) / E. Pavoni, S. Covelli, G. Adami, E. Baracchini, R. Cattelan, M. Crosera, E. Petranich // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2018. – V. 188. – P. 1–10.
11. Корнеева Т.В., Юркевич Н.В., Аминов П.Г. Геохимические особенности миграционных потоков в зоне влияния горнопромышленного техногенеза (г. Медногорск) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 2. – С. 85–94.
12. There is gold in the hills: predicting potential acid mine drainage events through the use of chemometrics / D. Cozzolino, S. Chandra, J. Roberts, A. Power, P. Rajapaksha, N. Ball, J. Chapman // *Science of The Total Environment*. – 2018. – V. 619. – P. 1464–1472.
13. Assessment and sources of heavy metals in surface sediments of Miyun Reservoir, Beijing / X. Zhu, H. Ji, Y. Chen, M. Qiao, L. Tang // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2013. – V. 185. – № 7. – P. 6049–6062.
14. Hydrological modeling of a watershed affected by acid mine drainage (Odiel River, SW Spain). Assessment of the pollutant contributing areas / L. Galvan, M. Olias, C.R. Canovas, A.M. Sarmiento, J.M. Nieto // *Journal of Hydrology*. – 2016. – V. 540. – P. 196–206.
15. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment / Z. Li, Z. Ma, T.J. van der Kuip, Z.W. Yuan, L. Huang // *Science of the Total Environment*. – 2014. – V. 468. – P. 843–853.
16. Биогеохимический мониторинг в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом микробиологических факторов трансформации минеральных компонентов / Рихванов Л.П., Абросимова Н.А., Барановская Н.В. и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 438 с.
17. Еделев А.В. Прогнозная оценка состава дренажных вод, взаимодействующих с сульфидсодержащим веществом // *Геология и геофизика*. – 2013. – Т. 54. – № 1. – С. 144–157.
18. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Присекина Н.А. Геохимическая оценка потенциальной опасности отвальных пород Ведугинского месторождения // *Геохимия*. – 2010. – № 3. – С. 58–73.
19. Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu–Mo deposit / N. Abrosimova, O. Gaskova, A. Loshkareva, A. Edelev, S. Bortnikova // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2015. – V. 157. – P. 1–14.
20. Pashkevich M., Petrova T.A. Technogenic impact of sulphide-containing wastes produced by ore mining and processing at the Ozernoe deposit: investigation and forecast // *Journal of Ecological Engineering*. – 2017. – V. 18. – № 6. – P. 127–133.
21. Development of a modified kinetic test using EDTA and citric acid for the prediction of contaminated neutral drainage / M.L. Michaud, B. Plante, B. Bussiere, M. Benzazoua, J. Leroux // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – V. 181. – P. 58–68.
22. Dold B. Acid rock drainage prediction: a critical review // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – V. 172. – P. 120–132.
23. US EPA (Environmental Protection Agency) Technical Document of Acid Mine Drainage Prediction. – Washington: Office of Solid Waste, Special Waste Branch, 1994. – 48 p.
24. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Mine Soils. Report 600/2–78–054 / A.A. Sobek, W.A. Schuller, J.R. Freeman, R.M. Smith. – Washington: US EPA, 1978. – 204 p.
25. Paktunc A.D. Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage // *Environmental Geology*. – 1999. – V. 39. – Iss. 2. – P. 103–112.
26. Ritcey G.M. Tailings management in gold plants // *Hydrometallurgy*. – 2005. – V. 78. – № 1–2. – P. 3–20.
27. Lengke M.F., Davis A., Bucknam C. Improving management of potentially acid generating waste rock // *Mine Water and Environment*. – 2010. – V. 29. – № 1. – P. 29–44.
28. ARD Test Handbook. AMIRA P387A Prediction and Kinetic Control of Acid Mine Drainage / R. Smart, B. Skinner, G. Levay, A. Gerson, J. Thomas, H. Sobieraj, R. Schumann, C. Weisener, P. Weber, S. Miller, W. Stewart. – Melbourne: AMIRA International, 2002. – 42 p.
29. Сердюк С.С., Кирилленко В.А. Геология и перспективы золотоносности южной части Южно-Енисейского рудного района // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2013. – V. 8. – P. 968–994.
30. ГОСТ 41–08–272–04. Управление качеством аналитической работы. Методы геологического контроля качества аналитических работ. – М.: ФГУП ВИМС, 2005. – 30 с.
31. Сера. Метод III категории. Химические методы. Инструкции № I-X, 2-X, 3-X. – М., 1986. – 12 с.
32. Книпович Ю.Н., Морачевский Ю.В. Анализ минерального сырья. – Л.: Госхимиздат, 1955. – 105 с.
33. Титриметрическое определение диоксида углерода. Методика III категории. Научный совет по аналитическим методам. Химические методы. Инструкция № 230-X. – М., 1986. – 9 с.
34. ПНД Ф 14.2.99–97 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации гидрокарбонатов в пробах природных вод титриметрическим методом. – М.: ГВАК, 1997. – 20 с.
35. ГОСТ 4389–72. Вода питьевая. Методы определения содержания сульфатов. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 9 с.
36. (ПНДФ 14.1:2:4.3–95) Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации анионных поверхностно-активных веществ в питьевых, поверхностных и

- сточных водах экстракционно-фотометрическим методом. – М.: ФБУ «ФЦАО», 1995. – 16 с.
37. РД 52.24.361–2008 Массовая концентрация хлоридов в водах. Методика выполнения измерений потенциометрическим методом с ионселективным электродом. – Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2008. – 26 с.
38. РД 52.24.367–2010 Массовая концентрация нитратов в водах. Методика выполнения измерений потенциометрическим методом с ионселективным электродом. – Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2010. – 25 с.
39. РД 52.24.394–2012 Массовая концентрация аммонийного азота в водах. Методика измерений потенциометрическим методом с ионселективными электродами. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2012. – 26 с.
40. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. – М.: Минюст РФ, 2003. – 468 с.
41. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
42. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора, её состав и эволюция / пер. с англ. Р.Н. Соболева, Л.Т. Соболевой. – М.: Мир, 1988. – 384 с.
43. Geochemical processes and mobilization of toxic metals and metalloids in an As-rich base metal waste pile in Zimapan, Central Mexico / M.A. Armienta, G. Villasenor, O. Cruz, N. Ceniceros, A. Aguayo, O. Morton // Applied Geochemistry. – 2012. – V. 27. – № 11. – P. 2225–2237.
44. Bortnikova S., Bessonova E., Gaskova O. Geochemistry of arsenic and metals in stored tailings of a Co–Ni arsenide-ore, Khovu-Aksy area, Russia // Applied Geochemistry. – 2012. – V. 27. – № 11. – P. 2238–2250.
45. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings / M.B.J. Lindsay, M.C. Moncur, J.G. Bain, J.L. Jambor, C.J. Ptacek, D.W. Blowes // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 57. – P. 157–177.

Поступила 09.04.2018 г.

#### Информация об авторах

**Бортникова С.Б.**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрохимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Силантьева Н.В.**, эколог ООО «Красноярское ГРП».

**Запольский А.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, гидрогеолог ООО «Красноярское ГРП».

**Юркевич Н.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрохимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия.

**Саева О.П.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геоэлектрохимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Шевко А.Я.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

**Шуцаева О.В.**, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник аналитической лаборатории Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН.

**Еделев А.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геоэлектрохимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 550.424:622.343.5:622'17

## ASSESSMENT OF ACID-BASE ACCOUNTING OF MINE WASTE ROCKS AND MOBILITY OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS OF THE RAZDOLINSKY ORE FIELD (KRASNOYARSK TERRITORY)

**Svetlana B. Bortnikova**<sup>1</sup>,  
bortnikovasb@ipgg.sbras.ru

**Natalya V. Silantyeva**<sup>2</sup>,  
silantevanv@polyus.com

**Aleksandr N. Zapolsky**<sup>2</sup>,  
zapolskiyan@polyus.com

**Nataliya V. Yurkevich**<sup>1</sup>,  
yurkevichnv@ipgg.sbras.ru

**Olga P. Saeva**<sup>1</sup>,  
aevaop@ipgg.sbras.ru

**Artem Ya. Shevko**<sup>3</sup>,  
sp@igm.nsc.ru

**Olga V. Shuvaeva**<sup>4</sup>,  
olga@niic.nsc.ru

**Aleksey V. Edelev**<sup>1</sup>,  
edelevav@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 3, Academician Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> «Krasnoyarskoe GRP», 24, Krasnoy Gvardii street, Krasnoyarsk, 660077, Russia.

<sup>3</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Academician Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>4</sup> Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, 3, Academician Lavrentyev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the work is dictated by the need to remove potentially toxic metals and metalloids into the environment from dumps and tailings.

**The aim** of the research is to develop an integrated method for predicting the composition of drainage flows from dump rocks, determining acid and neutralization potentials, taking into account mineral forms – sources of toxic elements in drainage flows for Razdolinsky ore field.

**Methods.** Chemical composition of waste rocks and forming wastewaters was determined by X-ray diffraction, ICP-AES, potentiometry and classical analytical methods. Effluent acidity was predicted by calculating the acid and neutralization potentials. The neutralization potential of the substance of dumps and tailings was additionally determined according to the Sobek method to increase the reliability of assessment of acidic effluent occurrence. A peroxide experiment was carried out to assess the effluent composition at oxidation of dump rocks and destruction of mineral matrix.

**Results.** This article presents the results of the potential danger assessment for mine waste rocks formed during the development of the Razdolinsky gold ore deposit. The calculation of the acid and neutralization potentials ratio showed that wastewater from dumps will be neutral or weakly alkaline during the interaction of seasonal flows with the rocks. The main reason is in high content of carbonates and low amounts of sulfides. The resulting solutions also remained neutral or subalkaline in a peroxide experiment that simulates the long-term processes. The concentrations of metals in the effluent will be at a safe level – below the MPC. However, concentrations of anionic elements As, Sb, and V in the effluent exceed the normalization indices, which indicates that they remain mobile in both acidic and alkaline conditions. The results of the study allowed us to make a recommendation to control the level of toxic elements in the effluents.

### **Key words:**

Mine waste rock, effluent, metals, arsenic, acidity prediction, acid neutralization potential.

The research was carried out within the project XI.138.3.1 IPGG SB RAS and financially supported by the «Krasnoyarsk GRP» and RFBR (grant no. 17–05–00056). The authors thankful to Aleksandr S. Glazyrin, Dr. Sc., Assoc. Prof., the editor of the journal, Olesya E. Lepokurova, Cand. Sc., and Sergey I. Arbuзов, Dr. Sc., professor, for useful comments, which made the paper better.

## REFERENCES

1. Lottermoser B.G. *Mine wastes (second edition): Characterization, treatment, environmental impacts*. New York, Springer Berlin Heidelberg, 2007. 304 p.
2. Wei X., Rodak C.M., Zhang S., Han Y., Wolfe F.A. Mine Drainage Generation and Control Options. *Water Environment Research*, 2016, vol. 88, no. 10, pp. 1409–1432.
3. Wei X., Zhang S., Han Y., Wolfe F.A. Mine Drainage: Research and Development. *Water Environment Research*, 2017, vol. 89, no. 10, pp. 1384–1402.
4. Kefeni K., Msagati T.A.M., Mamba B.B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: a review. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 151, pp. 475–493.
5. Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 3–16.
6. Liao J., Wen Z., Ru X., Chen J., Wu H., Wei, C. Distribution and migration of heavy metals in soil and crops affected by acid mine drainage: Public health implications in Guangdong Province, China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2016, vol. 124, pp. 460–469.
7. Abu Bakar A.F., Yusoff I., Ng T.F., Ashraf M.A. Cumulative impacts of dissolved ionic metals on the chemical characteristics of river water affected by alkaline mine drainage from the Kuala Lipis gold mine, Pahang, Malaysia. *Chemistry and Ecology*, 2015, vol. 31, no. 1, pp. 22–33.
8. Saglam E.S., Akcay M. Chemical and mineralogical changes of waste and tailings from the Murgul Cu deposit (Artvin, NE Turkey): implications for occurrence of acid mine drainage. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, no. 7, pp. 6584–6607.
9. Tiwari A.K., Singh P.K., Mahato M.K. Assessment of metal contamination in the mine water of the West Bokaro Coalfield, India. *Mine Water and the Environment*, 2017, pp. 1–10.
10. Pavoni E., Covelli S., Adami G., Baracchini E., Cattelan R., Crosara M., Petranich E. Mobility and fate of Thallium and other potentially harmful elements in drainage waters from a decommissioned Zn-Pb mine (North-Eastern Italian Alps). *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, vol. 188, pp. 1–10.
11. Korneeva T.V., Yurkevich N.V., Aminov P.G. Geochemical features of migration flows in the impact zone of mining technogenesis (Mednogorsk) // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 2, pp. 85–94. In Rus.
12. Cozzolino D., Chandra S., Roberts J., Power A., Rajapaksha P., Ball N., Chapman J. There is gold in the hills: predicting potential acid mine drainage events through the use of chemometrics. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 619, pp. 1464–1472.
13. Zhu X., Ji H., Chen Y., Qiao M., Tang L. Assessment and sources of heavy metals in surface sediments of Miyun Reservoir, Beijing. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, vol. 185, no. 7, pp. 6049–6062.
14. Galvan L., Olias M., Canovas C.R., Sarmiento A.M., Nieto J.M. Hydrological modeling of a watershed affected by acid mine drainage (Odiel River, SW Spain). Assessment of the pollutant contributing areas. *Journal of Hydrology*, 2016, vol. 540, pp. 196–206.
15. Li Z., Ma Z., Van der Kuijp T.J., Yuan Z.W., Huang L. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 468, pp. 843–853.
16. Rikhvanov L.P., Abrosimova N.A., Baranovskaya N.V. *Biogekhimicheskiy monitoring v rayonakh khvostokhranilishch gornodobyvayushchikh predpriyatii s uchetom mikrobiologicheskikh faktorov transformatsii mineralnykh komponentov* [Biogeochemical monitoring of mining tailings, taking into account microbiological factors of the mineral component transformation]. Novosibirsk, SB RAS Press, 2017. 438 p.
17. Edelev A.V. Composition of drainage mine waters interacting with sulfide-containing rock: a predictive estimation. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 1, pp. 110–119. In Rus.
18. Bortnikova S.B., Gaskova O.L., Prisekina N.A. Geochemical Estimation of the Potential Danger of Waste Rocks from the Vedugin-skoe Deposit. *Geochemistry International*, 2010, vol. 48, no. 3, pp. 280–294. In Rus.
19. Abrosimova N., Gaskova O., Loshkareva A., Edelev A., Bortnikova S. Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu–Mo deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 157, pp. 1–14.
20. Pashkevich M., Petrova T.A. Technogenic impact of sulphide-containing wastes produced by ore mining and processing at the Ozernoe deposit: investigation and forecast. *Journal of Ecological Engineering*, 2017, vol. 18, no. 6, pp. 127–133.
21. Michaud M.L., Plante B., Bussiere B., Benzaazoua M., Leroux J. Development of a modified kinetic test using EDTA and citric acid for the prediction of contaminated neutral drainage. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 181, pp. 58–68.
22. Dold B. Acid rock drainage prediction: a critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 172, pp. 120–132.
23. *US EPA (Environmental Protection Agency) Technical Document of Acid Mine Drainage Prediction*. Washington, Office of Solid Waste, Special Waste Branch, 1994. 48 p.
24. Sobek A.A., Schuller W.A., Freeman J.R., Smith R.M. *Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Mine Soils. Report 600/2-78-054*. Washington, US EPA, 1978. 204 p.
25. Paktunc A.D. Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage. *Environmental Geology*, 1999, vol. 39, Iss. 2, pp. 103–112.
26. Ritcey G.M. Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*, 2005, vol. 78, no. 1–2, pp. 3–20.
27. Lengke M.F., Davis A., Bucknam C. Improving management of potentially acid generating waste rock. *Mine Water and Environment*, 2010, vol. 29, no. 1, pp. 29–44.
28. Smart R., Skinner B., Levay G., Gerson A., Thomas J., Sobieraj H., Schumann R., Weisener C., Weber P., Miller S., Stewart W. *ARD Test Handbook. AMIRA P387A Prediction and Kinetic Control of Acid Mine Drainage*. Melbourne, AMIRA International, 2002. 42 p.
29. Serdyuk S.S., Kirilenko V.A. Geology and Prospects Zolotonosnosti South-Yenisei Mining District. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2013, vol. 8, pp. 968–994. In Rus.
30. *GOST 41-08-272-04. Upravlenie kachestvom analiticheskoy raboty. Metody geologicheskogo kontrolya kachestva analiticheskikh rabot* [State standard 41-08-272-04 Quality management of analytical works. Methods of geological quality control of analytical works]. Moscow, VIMS Publ., 2005. 30 p.
31. *Sera. Metod tretyey kategorii. Khimicheskie metody. Instruksia No I-H, 2-H, 3-H* [Sulfur. Method of III category. Chemical methods. Instruction No I-X, 2-X, 3-X]. Moscow, 1986. 12 p.
32. Knipovich Yu.N., Morachevsky Yu.V. *Analiz mineralnogo syr'ya* [Mineral analysis]. Leningrad, Goskhimizdat Publ., 1955. 105 p.
33. *Titrimetricheskoe opredelenie dioksida ugleroda. Metodika SH kategorii. Nauchnyy sovet po analiticheskim metodikam. Khimicheskie metody. Instruksiya № 230-H* [Titrimetric determination of carbon dioxide. Method III category. Scientific Council on Analytical Methods. Chemical methods. Instruction № 230-X]. Moscow, 1986. 9 p.
34. *PND F 14.2.99-97 Kolichestvennyy khimicheskiy analiz vod. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii gidrokarbonatov v probakh prirodnykh vod titrimetricheskim metodom* [Reference Document 14.2.99-97. Quantitative chemical analysis of water. Methods for measuring the mass concentration of bicarbo-

- nates in natural water samples by the titrimetric method]. Moscow, GUAK Publ., 1997. 20 p.
35. GOST 4389–72. *Voda pitevaya. Metody opredeleniya sodержaniya sulfatov* [State standard 4389–72. Drinking water. Methods for determination of sulfate content]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1974. 9 p.
  36. PNDF 14.1:2.4.3–95 *Kolichestvenny khimichesky analiz vod. Metodika izmereny massovoy kontsentratsii anionnykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv v pitevykh, poverkhnostnykh i stochnykh vodakh ekstraktsionno-fotometricheskim metodom* [Reference Document 14.1:2.4.3–95. Quantitative chemical analysis of water. Methods of measuring mass concentration of anionic surfactants in drinking, surface and waste waters by the extraction-photometric method]. Moscow, FCAO Publ., 1995. 16 p.
  37. RD 52.24.361–2008 *Massovaya kontsentratsiya khloridov v vodakh. Metodika vypolneniya izmereny potentsiometricheskim metodom s ionselektivnym elektrodom* [Reference Document 52.24.361–2008. Mass concentration of chlorides in waters. Methods for measuring by potentiometric method with ion-selective electrode]. Rostov-on-Don, Rosgidromet Publ., 2008. 26 p.
  38. RD 52.24.367–2010 *Massovaya kontsentratsiya nitratov v vodakh. Metodika vypolneniya izmereny potentsiometricheskim metodom s ionselektivnym elektrodom* [Reference Document 52.24.367–2010. Mass concentration of nitrates in waters. Methods for measuring by potentiometric method with ion-selective electrode]. Rostov-on-Don, Rosgidromet Publ., 2010. 25 p.
  39. RD 52.24.394–2012 *Massovaya kontsentratsiya ammoniynogo azota v vodakh. Metodika izmereny potentsiometricheskim metodom s ionselektivnymi elektrodami* [Reference Document 52.24.394–2012. Mass concentration of ammonium nitrogen in waters. Measurement technique by potentiometric method with ion-selective electrodes]. Rostov-on-Don, Rosgidromet Publ., 2012. 26 p.
  40. *Gigienicheskie normativy GN 2.1.5.1315–03. Predelno dopustimyye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh obektov khozyaystvenno-pitevogo i kulturno-bytovogo vodopolzovaniya* [Health Standards 2.1.5.1315–03. Maximum Permissible Concentrations (MPC) of Chemicals in the Water of Water Bodies of Drinking and Cultural-Household Water Use]. Moscow, Minyust RF Press, 2003. 468 p.
  41. Vinogradov A.P. Srednee sodержanie khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornykh porod zemnoy kory [Average content of chemical elements in the main types of rocks of the earth's crust]. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571.
  42. Taylor S.R., McLennan S.M. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Oxford, Blackwell, 1985. 312 p.
  43. Armienta M.A., Villasenor G., Cruz O., Cenicerros N., Aguayo A., Morton O. Geochemical processes and mobilization of toxic metals and metalloids in an As-rich base metal waste pile in Zimapan, Central Mexico. *Applied Geochemistry*, 2012, vol. 27, no. 11, pp. 2225–2237.
  44. Bortnikova S., Bessonova E., Gaskova O. Geochemistry of arsenic and metals in stored tailings of a Co–Ni arsenide-ore, Khovu-Aksy area, Russia. *Applied Geochemistry*, 2012, vol. 27, no. 11, pp. 2238–2250.
  45. Lindsay M.B.J., Moncur M.C., Bain J.G., Jambor J.L., Ptacek C.J., Blowes D.W. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 157–177.

Received: 9 April 2018.

#### Information about the authors

**Svetlana B. Bortnikova**, Dr. Sc., chief scientist, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Natalya V. Silantyeva**, ecologist, «Ktrasnoyarskoe GRP».

**Aleksandr N. Zapolsky**, Cand. Sc., hydrogeologist, «Ktrasnoyarskoe GRP».

**Nataliya V. Yurkevich**, Cand. Sc., chief scientist, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Olga P. Saeva**, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Artem Ya. Shevko**, Cand. Sc., chief scientist, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

**Olga V. Shuvaeva**, Dr. Sc., leading researcher, Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS.

**Aleksey V. Edelev**, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

УДК 532.329; 532.2.532

## ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТИ ОТ НАЧАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

Гималтдинов Ильяс Кадинович<sup>1</sup>,

iljas\_g@mail.ru

Левина Татьяна Михайловна<sup>1</sup>,

tattin76@mail.ru

Кучер Анастасия Михайловна<sup>2</sup>,

kucheram85@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

<sup>2</sup> Башкирский государственный университет,  
Россия, 453100, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 49.

**Актуальность.** Пузырьковые жидкости являются распространенной рабочей средой в ряде отраслей народного хозяйства. Одним из интереснейших процессов, происходящих в пузырьковой жидкости с взрывчатым газом внутри пузырьков, является пузырьковая детонация – распространение детонационных волн. Детонационные волны также могут распространяться в жидкости с пузырьками, частично состоящими из инертного газа. В этом случае наличие пузырьков с инертным газом является некоторым управляющим параметром для характеристик (амплитуды, протяженности, пределов распространения) детонационной волны. Кроме того, существуют экспериментальные данные о влиянии первоначального давления на характеристики волн пузырьковой детонации в многокомпонентной пузырьковой жидкости. Это обуславливает необходимость исследования детонационных волн в многокомпонентных пузырьковых системах при различных значениях начального давления.

**Цель исследования:** изучить динамику детонационных волн в пузырьковой жидкости, частично состоящую из пузырьков с неактивным (не горючим) газом при различных значениях начального давления.

**Объект:** детонационные волны в пузырьковой жидкости, содержащей пузырьки с взрывчатым (активным) и негорючим (неактивным) газом.

**Методика** исследования базируется на фундаментальных уравнениях механики многофазных сред, которые решаются численным методом.

**Результаты** исследования по выявлению особенностей распространения детонационных волн в многокомпонентной пузырьковой жидкости при различных начальных давлениях позволили сделать выводы и дать рекомендации. С уменьшением начального давления многокомпонентных пузырьковых сред скорость распространения детонационных волн снижается. Зависимость скорости детонационной волны в многокомпонентной пузырьковой жидкости от начального давления близка к линейной.

### Ключевые слова:

Нефтегазовое производство, взрывобезопасность, детонационные волны, пузырьковая жидкость, начальное давление.

### Введение

Детонационные процессы существуют в различных средах. Несмотря на различие физико-химических свойств систем, процесс детонации обладает общим признаком: детонация – самоподдерживающийся процесс [1–3]. Это связано с тем, что детонационный процесс протекает в средах, когда в них может возникать взрывное выделение энергии. Возможность существования волн детонации обеспечивается энерговыделением в среде.

Распространение детонационных волн в пузырьковых жидкостях – уникальное явление, т. к. в этом случае детонация инициируется и распространяется в среде с очень низкой калорийностью. При этом распространение детонационных волн в жидкостях с пузырьками, обладая схожими для всех взрывных процессов признаками, имеет ряд особенностей, проявляющихся в свойствах и структуре волн [4–11].

Получение высоких температур в газе, помещенном в жидкости в виде одного пузырька или пузырькового кластера, представляет как теорети-

ческий, так и практический интерес [12–14]. Исследованию динамики детонационной волны в многокомпонентной пузырьковой жидкости посвящена работа [15], где изучены особенности сжатия пузырьков с инертным газом детонационными волнами. Показано, что детонационные волны являются средством сжатия инертных пузырьков во всей области расчета, в то время как граничное давление может сжать пузырьки только около участков вблизи границы, через которую вносится возмущение.

Кроме этого, присутствие в жидкости наряду с пузырьками химически активного газа пузырьков химически неактивного газа уменьшает энергосодержание среды. Экспериментальному изучению детонационных волн в пузырьковых средах, частично состоящих из инертного газа, посвящена работа [16]. В этой работе исследованы структура, свойства и критические условия возбуждения волн пузырьковой детонации в таких средах. Кроме того, установлены основные закономерности действия волн пузырьковой детонации на пузырьки

с активным и инертным газом. Экспериментальному исследованию влияния изменения начального давления пузырьковых жидкостей на свойства детонационной волны в пузырьковой жидкости посвящены работы [17, 18]. В работе [19] теоретически изучено влияние первоначального давления в пузырьковой системе на характеристики (скорость, амплитуду и т. д.) детонационных волн.

В данной работе исследуется влияние первоначального давления в многокомпонентной пузырьковой системе, состоящей из пузырьков активного (горючего) и неактивного (негорючего) газа, на характеристики детонационных волн.

#### Постановка задачи и основные уравнения

Исследуем распространение волны в пузырьковой жидкости. Положим, что пузырьковая жидкость состоит из двух сортов пузырьков: активных (заполненных горючим газом, например ацетилено-кислородной смесью) и пассивных (заполненных негорючим газом, например воздухом). В пузырьках, содержащих взрывчатый газ, при достижении температуры воспламенения газа  $T_*$  происходит реакция, сопровождающаяся выделением тепла и увеличением температуры на величину  $\Delta T$ , которая соответствует калорийности газовой смеси. С учетом допущений, принятых выше, система уравнений, состоящая из уравнений сохранения масс, числа пузырьков, импульсов и давления газа в обоих типах пузырьках [14, 15, 20], имеет вид:

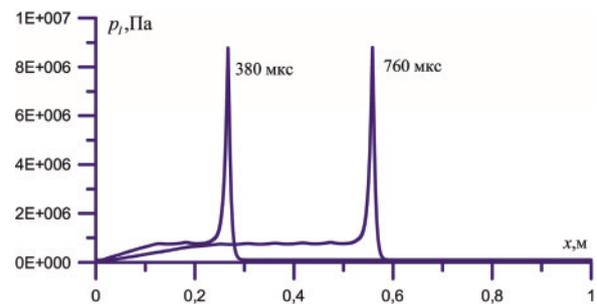
$$\begin{aligned} \frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{\partial v}{\partial x} &= 0 \quad (i = l, g), \quad \frac{dn_j}{dt} + n_j \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (j = 1, 2), \\ \rho_l^0 \frac{dv}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial x} &= 0, \\ \frac{dp_{gj}}{dt} &= -\frac{3\gamma_j p_{gj}}{a_j} w_j - \frac{3(\gamma_j - 1)}{a_j} q_j, \\ \frac{d}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x}, \\ w_j &= w_{Aj} + w_{Rj}, \\ a_j \frac{dw_{Rj}}{dt} + \frac{3}{2} w^2 + 4v_1 \frac{w_{Rj}}{a_j} &= \frac{p_{gj} - p_l}{\rho_l^0}, \quad w_{Aj} = \frac{p_{gj} - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_{gj}^{1/3}}, \\ p_l &= p_0 + C_l^2 (\rho_l^0 - \rho_{l0}^0), \quad p_{gj} = \rho_{gj}^0 B T_{gj}, \\ q_{gj} &= Nu_{gj} \lambda_{gj} \frac{T_{gj} - T_0}{2a_j}, \quad \frac{T_{gj}}{T_0} = \frac{p_{gj}}{p_0} \left( \frac{a_j}{a_{0j}} \right)^3, \\ Nu_{gj} &= \begin{cases} \sqrt{Pe_{gj}}, & Pe_{gj} \geq 100 \\ 10, & Pe_{gj} < 100, \end{cases} \\ Pe_{gj} &= 12(\gamma_{gj} - 1) \frac{T_0}{|T_{gj} - T_0|} \frac{a_j |w_j|}{\kappa_{gj}}, \\ \kappa_{gj} &= \frac{\lambda_{gj}}{c_{gj} \rho_{gj}}. \end{aligned}$$

Здесь все обозначения такие же, как в [15].

#### Результаты расчетов

В работах [18–20] отмечено, что характеристики детонационного процесса определяются только параметрами среды – характеристиками газовой фазы – дисперсностью пузырьков и их объемным содержанием, сортом газа внутри пузырьков, начальным давлением; характеристиками жидкости: вязкостью, скоростью звука и т. д. При этом структура волн пузырьковой детонации при изменении начального давления остается качественно идентичной [18].

На рис. 1 представлены эпюры давления при распространении детонационной волны в пузырьковой жидкости, состоящей из активных (содержащих горючий газ) и пассивных (заполненных негорючим газом) пузырьков.



**Рис. 1.** Эпюры давления при распространении волны детонации в пузырьковой жидкости с следующими параметрами:  $\rho_{l0}^0=1130$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_l=1700$  м/с,  $v_l=6,0$  мкм<sup>2</sup>/с,  $\alpha_{g01}=0,01$ ,  $\alpha_{g02}=0,001$ ,  $a_{g01}=1,0$  мм,  $a_{g02}=1,0$  мм,  $\rho_{g01}^0=1,26$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{g02}^0=1,2$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_{g1}=2,49 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $\lambda_{g2}=1,63 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $\gamma_1=1,35$ ,  $\gamma_2=1,4$ ,  $c_{g1}=1,14$  кДж/(кг·К),  $c_{g2}=1,0$  кДж/(кг·К),  $T_*=1000$  К,  $\Delta T=3200$ , нижние индексы 1 и 2 соответствуют параметрам взрывчатого (ацетилено-кислородная смесь  $C_2H_2+2,5O_2$ ) и инертного газа (воздух), жидкость – водоглицериновый раствор с объемной долей глицерина 0,5

**Fig 1.** Diagrams of pressure in propagation of a detonation wave in a bubble liquid with the following parameters:  $\rho_{l0}^0=1130$  kg/m<sup>3</sup>,  $C_l=1700$  m/s,  $v_l=6,05$  μm<sup>2</sup>/s,  $\alpha_{g01}=0,01$ ,  $\alpha_{g02}=0,001$ ,  $a_{g01}=1,0$  mm,  $a_{g02}=1,0$  mm,  $\rho_{g01}^0=1,26$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_{g02}^0=1,2$  kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda_{g1}=2,49 \cdot 10^{-2}$  W/(m·K),  $\lambda_{g2}=1,63 \cdot 10^{-2}$  W/(m·K),  $\gamma_1=1,35$ ,  $\gamma_2=1,4$ ,  $c_{g1}=1,14$  kJ/(kg·K),  $c_{g2}=1,0$  kJ/(kg·K),  $T_*=1000$  K,  $\Delta T=3200$  K, subscripts 1 and 2 correspond to the parameters of the explosive (acetylene-oxygen mixture  $C_2H_2+2,5O_2$ ) and inert gas (air), liquid-glycerol solution with water solution with a volume of glycerol 0,5 parts

Из рис. 1 видно, что к моменту 380 мкс в пузырьковой жидкости, частично состоящей из инертных пузырьков, формируется детонационная волна амплитудой около 9,0 МПа. Это значение приблизительно на 1,0 МПа меньше, чем для случая распространения волн в однокомпонентной пузырьковой системе, состоящей только из пузырьков с активным газом с объемным содержанием  $\alpha_{g0}=0,01$ . К моменту 760 мкс детонационный солитон распространяется, не меняя амплитуды и протяженности. Как видно из рис. 1, скорость распространения детонационной волны составляет около 789 м/с. Кроме того, за детонационным солитоном видны отдельные пульсации давления, связанные с

радиальной инерцией пузырьковой жидкости, из-за наличия пузырьков с неактивным газом.

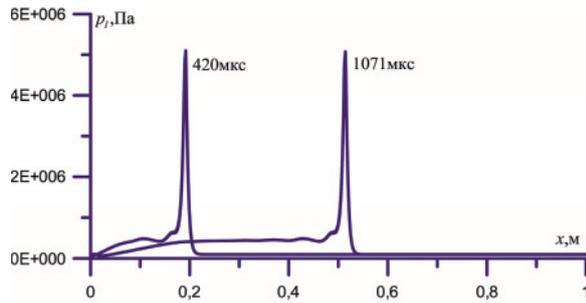


Рис. 2. Эпюры давления,  $\alpha_{g02}=0,01$ , остальные параметры как на рис. 1

Fig. 2. Diagrams of pressure,  $\alpha_{g02}=0,01$ , other parameters are the same as in Fig. 1

На рис. 2 представлено то же, что и на рис. 1, но в этом случае объемное содержание пузырьков неактивного газа в 10 раз больше, чем для случая, представленного на рис. 1. Из рис. 2 видно, что амплитуда детонационного солитона в моменты 420 и 1071 мкс составляет около 5,0 МПа, что почти в два раза меньше амплитуды детонационной волны для случая, когда объемное содержание неактивного газа в пузырьковой среде составляет  $\alpha_{g02}=0,001$ . Скорость детонационной волны при этом составляет около 600 м/с.

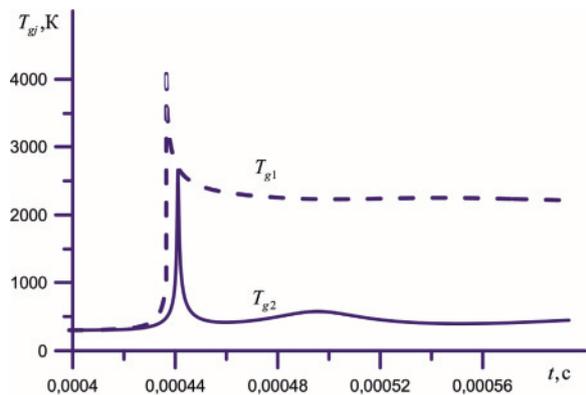


Рис. 3. Осциллограммы температуры газа в пассивных и активных пузырьках – сплошные и штриховые линии соответственно. Все параметры такие же, как на рис. 2

Fig. 3. Oscilloscope diagrams of gas temperature in passive and active bubbles – solid and dashed lines, respectively. All parameters are the same as in Fig. 2

Расчетные осциллограммы для датчика D1, расположенного на расстоянии 0,2 м от границы  $x=0$ , представлены на рис. 3. Здесь штриховая линия соответствует температуре газа в активных (взрывчатых) пузырьках, сплошная – температуре газа в инертных. Из рис. 3 видно, что температура газа во взрывчатых пузырьках достигает значения 4200 К, в дальнейшем происходит уменьшение этого значения до 2500 К. Температура воздуха в инертных пузырьках в момент максимального сжатия увеличивается до значения более 2500 К и потом снижается до равновесного значения.

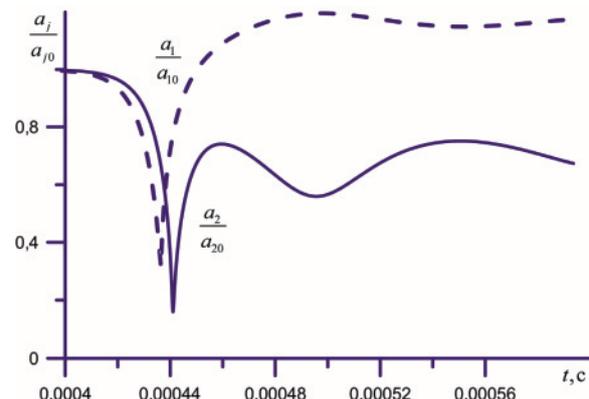


Рис. 4. Расчетные осциллограммы относительных радиусов активного (штриховые линии) и инертного (сплошные линии) пузырьков

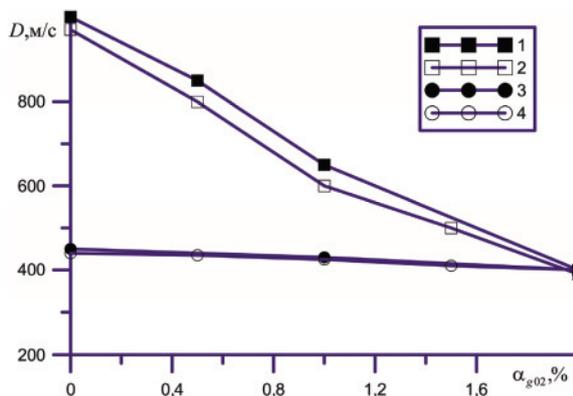
Fig. 4. Calculated oscillograms of the relative radii of the active (dashed lines) and inert (solid lines) bubbles

На рис. 4 представлены расчетные осциллограммы относительных радиусов активного и пассивного пузырьков. Из рис. 4 видно, что при уменьшении радиуса активного пузырька почти в 3 раза происходит взрыв газа внутри пузырька, и он начинает расширяться. Из осциллограммы для инертного пузырька следует, что его радиус уменьшается почти в 10 раз.

На рис. 5 приведены зависимости скорости распространения волны детонации  $D$  от концентрации химически неактивного газового компонента  $\alpha_{g02}$  пузырьковой жидкости, при этом суммарное объемное содержание газовых содержаний  $\alpha_{g0}=\alpha_{g01}+\alpha_{g02}$  является постоянной. Из рис. 5 видно, что расчетные значения скорости пузырьковой детонации достаточно близки к экспериментальным данным, т. е. математическая модель пузырьковой детонации, приведенная выше, достаточно хорошо описывает распространение детонационной волны в многокомпонентной пузырьковой жидкости по такому важному параметру пузырьковой детонации, как скорость детонационной волны.

Из рис. 5 видно, что общий вид зависимости  $D(\alpha_{g02})$  при различных свойствах жидкой фазы качественно сходный – наличие в системе пузырьков неактивного газа приводит к снижению скорости распространения волны детонации. Снижение скорости обусловлено потерей энергии детонационной волны вследствие неравновесного теплообмена между газом и жидкостью и потерями, связанными с акустическим излучением.

Таким образом, наличие в системе пузырьков неактивного газа выступает фактором, обуславливающим дополнительные к имеющимся потери энергии волны пузырьковой детонации. Увеличение концентрации активного газового компонента (при данной неизменной общей концентрации газовой фазы) ведет к повышению скорости распространения волны детонации; а если возрастает концентрация пузырьков химически неактивного газа, то скорость детонационной волны падает.



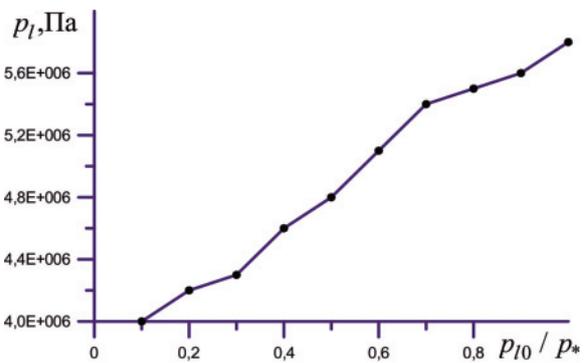
**Рис. 5.** Зависимость скорости волны пузырьковой детонации  $D$  в многокомпонентной пузырьковой жидкости от концентрации компонента неактивной газовой фазы  $\alpha_{g02}$ :  $\alpha_{g0} = \alpha_{g01} + \alpha_{g02} = 0,04$ ,  $a_{g01} = 1,25$  мм,  $a_{g02} = 1,25$  мм,  $\rho_{g01}^0 = 1,26$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{g02}^0 = 1,78$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_{g1} = 2,49 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $\lambda_{g2} = 1,63 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $\gamma_1 = 1,35$ ,  $\gamma_2 = 1,67$ ,  $c_{g1} = 1,14$  кДж/(кг·К),  $c_{g2} = 0,52$  кДж/(кг·К), линии 1 и 2 соответствуют экспериментальным данным и расчетным значениям, для следующих параметров системы: жидкость – водоглицериновый раствор с объемной долей глицерина 0,5, взрывчатый газ – ацетилено-кислородная смесь, неактивный газ – аргон (Ar), другие характеристики системы такие же, как на рис. 1. Линии 3 и 4 соответствуют экспериментальным данным и расчетным значениям в случае, когда в качестве жидкой фазы используется водоглицериновый раствор с объемной долей глицерина 0,25 со следующими параметрами:  $\rho_{i0}^0 = 1065$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_i = 1600$  м/с,  $\nu_i = 2,13$  мкм<sup>2</sup>/с

**Fig. 5.** Dependence of the velocity of the bubble detonation wave  $D$  in multicomponent bubble liquid on concentration of a component of the inactive gas phase  $\alpha_{g02}$ :  $\alpha_{g0} = \alpha_{g01} + \alpha_{g02} = 0,04$ ,  $a_{g01} = 1,25$  mm,  $a_{g02} = 1,25$  mm,  $\rho_{g01}^0 = 1,26$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_{g02}^0 = 1,78$  kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda_{g1} = 2,49 \cdot 10^{-2}$  W/(m·K),  $\lambda_{g2} = 1,63 \cdot 10^{-2}$  W/(m·K),  $\gamma_1 = 1,35$ ,  $\gamma_2 = 1,67$ ,  $c_{g1} = 1,14$  kJ/(kg·K),  $c_{g2} = 0,52$  kJ/(kg·K), lines 1 and 2 correspond to the experimental data and calculated values, liquid – water glycerine solution with a volume fraction of glycerin 0,5, explosive gas – acetylene-oxygen mixture, inactive gas – argon (Ar), the remaining parameters are the same as in Fig. 1. Lines 3 and 4 correspond to the experimental data and calculated values in the case when the liquid phase is a water glycerine solution with a volume fraction of glycerin 0,25 with the following parameters:  $\rho_{i0}^0 = 1065$  kg/m<sup>3</sup>,  $C_i = 1600$  m/s,  $\nu_i = 2,13$   $\mu\text{m}^2/\text{s}$

Исследование динамики детонационных волн в пузырьковых жидкостях связано с анализом возможного взрыва в таких системах. Из экспериментов известно [17, 18], что первоначальное давление влияет на характеристики (скорость и амплитуду) детонационных волн в пузырьковой жидкости, например, увеличение первоначального давления приводит к увеличению диапазона амплитуд давления, которые способны инициировать детонацию. Поэтому необходимо также теоретическое исследование влияния первоначального давления в пузырьковой системе на характеристики волн пузырьковой детонации.

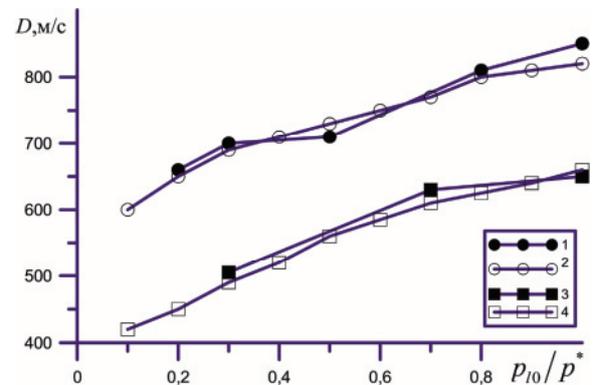
Зависимость давления детонационной волны от начального давления представлена на рис. 6. Видно, что с увеличением первоначального давления на один порядок с 0,01 до 0,1 МПа происходит воз-

растание пикового значения давления с 4,0 до 5,7 МПа. Отметим, что при понижении первоначального давления от атмосферного (0,1 МПа) до 2 кПа давление в детонационной волне снижается до 3,0 МПа, что согласуется с экспериментальными данными [18]. Расчеты показали, что длительность детонационных волн при изменении начального давления пузырьковой среды практически не меняется.



**Рис. 6.** Зависимости давления детонационных волн от начального давления  $p_{i0}/p_*$ ,  $p_*=0,1$  МПа, параметры системы такие же, как для рис. 2

**Fig. 6.** Dependences of detonation waves pressure on the initial pressure  $p_{i0}/p_*$ ,  $p_*=0,1$  MPa, the system parameters are the same as for Fig. 2



**Рис. 7.** Зависимости скорости детонационных волн  $D$  от начального давления  $p_{i0}/p_*$ . Точки 1 и 2 соответствуют  $\alpha_{g0} = \alpha_{g01} + \alpha_{g02} = 0,005 + 0,005 = 0,01$ , 3 и 4 –  $\alpha_{g0} = \alpha_{g01} + \alpha_{g02} = 0,01 + 0,01 = 0,02$ ,  $p_*=0,1$  МПа. Неактивный газ – неон ( $N_2$ ) ( $\rho_{g02}^0 = 1,25$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_{g2} = 2,4 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $\gamma_2 = 1,4$ ,  $c_{g2} = 1,04$  кДж/(кг·К)), другие характеристики системы такие же, как на рис. 5 (линии 1, 3 – эксперимент [18]; 2, 4 – расчет)

**Fig. 7.** Dependence of the velocity of detonation waves  $D$  on the initial pressure  $p_{i0}/p_*$ . Points 1 and 2 correspond to  $\alpha_{g0} = \alpha_{g01} + \alpha_{g02} = 0,005 + 0,005 = 0,01$ , 3 and 4 –  $\alpha_{g0} = \alpha_{g01} + \alpha_{g02} = 0,01 + 0,01 = 0,02$ ,  $p_*=0,1$  MPa. Inactive gas – neon ( $N_2$ ) ( $\rho_{g02}^0 = 1,25$  kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda_{g2} = 2,4 \cdot 10^{-2}$  W/(m·K),  $\gamma_2 = 1,4$ ,  $c_{g2} = 1,04$  kJ/(kg·K)), other characteristics of the system are the same as in Fig. 5 (lines 1, 3 – experiment [18], 2, 4 – calculation)

На рис. 7 представлена зависимость скорости детонационных волн от начального давления. Видно, что с уменьшением начального давления многокомпонентных пузырьковых сред скорость рас-

пространения детонационных волн снижается. Кроме того, можно утверждать, что зависимость скорости детонационной волны в многокомпонентной пузырьковой жидкости от начального давления близка к линейной.

#### Заключение

Зависимость параметров детонационных волн от начального давления многокомпонентных пузырьковых сред обусловлена уменьшением содержания энергии в таких средах. При уменьшении

начального давления многокомпонентной пузырьковой системы происходит снижение амплитуды и скорости детонационной волны. Таким образом, значение давления и концентрация пузырьков с инертным газом являются параметрами, с помощью которых можно управлять характеристиками (амплитудой и скоростью) детонационных волн.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности, номер для публикации 5.12863.2018/8.9. Работа также поддержана грантом РФФИ, номер проекта 17-41-020244.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in Oxyhydrogen Bubbled Liquids // Proc. 19<sup>th</sup> Intern. Symp. on Combustion. – Hafnia, 1982. – P. 675–683.
2. Sychev A.I., Pinaev A.V. Self-supported detonation in liquids with explosive gas bubbles // J. Appl. Mech. Techn. Physics. – 1986. – № 1. – P. 133–138.
3. Pinaev A.V., Sychev A.I. Influence of physical-chemical properties of gas and a liquid on parameters and a condition of existence of a wave of a detonation in systems a liquid-gas bubbles // Physics of Combustion and Explosion. – 1987. – V. 23. – № 6. – P. 76–84.
4. Сычев А.И. Трансформация детонационных волн на границе раздела пузырьковых сред // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81. – № 5. – С. 22–27.
5. Ljapidevskij V.J. About speed of a bubble detonations // Physics of Combustion and Explosion. – 1990. – V. 26. – № 4. – P. 137–140.
6. Gimaltdinov I.K., Arslanbekova R.R., Levina T.M. Features of the dynamics of postdetonation waves // Thermophysics and Aeromechanics. – 2016. – V. 23. – № 3. – P. 355–367.
7. Shagapov V.S., Vahitova N.K. Waves in a bubbly system at presence of chemical reactions in a gas phase // Physics of Combustion and Explosion. – 1989. – V. 25. – № 6. – P. 14–22.
8. Kedrinskij V.K. Hydrodynamics of explosion: experiment and models. – Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ., 2000. – 435 p.
9. Topolnikov A.S., Gimaltdinov I.K. Dynamics of detonation waves in a channel with variable cross section and filled with bubbly fluid // Thermophysics and Aeromechanics. – 2014. – V. 21. – № 4. – P. 489–498.
10. Zhdan S.A. A detonation of a column of chemically active bubble medium // Physics of Combustion and Explosion. – 2003. – V. 39. – № 4. – P. 107–112.
11. Dynamics of Detonation Waves in an Annular Layer of a Round Pipe / R. Bayazitova, I.K. Gimaltdinov, A.M. Kucher, V.Sh. Shagapov // Fluid Dynamics. – 2013. – V. 48. – № 2. – P. 201–210.
12. О термоядерных процессах в кавитирующих пузырьках / Р.И. Нигматулин, Р.Т. Ләхи, Р.П. Талейархан, К.Д. Вест, Р.С. Блок // Успехи физических наук. – 2014. – Т. 184. – № 9. – С. 947–960.
13. Theory of supercompression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fusion / R.I. Nigmatulin, I.Sh., Akhatov A.S. Topolnikov, R.Kh. Bolotnova, N.K. Vakhitova, R.T. Lahey Jr., R.P. Taleyarkhan // Physics of Fluids. – 2005. – V. 17. – № 10. – P. 107106(1)–107106(31).
14. Nigmatulin R.I. Dynamics of Multiphase Media: V. 1–2. – New York, United States: Hemisphere Publ. Corp., 1990. – 507 p.
15. Gimaltdinov I.K., Kucher A.M. Detonation waves in a multicomponent bubble liquid // High Temperature. – 2014. – V. 52. – № 3. – P. 411–416.
16. Сычев А.И. Детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых средах // Физика горения и взрыва. – 1993. – Т. 29. – № 1. – С. 110–117.
17. Сычев А.И. Влияние начального давления пузырьковых сред на характеристики волн детонации // Журнал технической физики. – 2015. – Т.85. – № 4. – С. 126–129.
18. Сычев А.И. Влияние начального давления многокомпонентных пузырьковых сред на характеристики волн детонации // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – № 5. – С. 15–19.
19. Гималтдинов И. К., Столповский М. В., Левина Т. М. Влияние начального давления на характеристики детонационной волны в пузырьковой жидкости // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2017. – № 5. – С. 52–66. URL: [http://ogbus.ru/issues/5\\_2017/ogbus\\_5\\_2017\\_p52-66\\_GimaltdinovIK\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/5_2017/ogbus_5_2017_p52-66_GimaltdinovIK_ru.pdf) (дата обращения 01.11.2018).
20. Гималтдинов И.К., Левина Т.М. Особенности динамики детонационных волн в пузырьковой жидкости при прохождении границы «водоглицериновый раствор – масло» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 8. – С. 55–63.

*Поступила 23.11.2018 г.*

#### Информация об авторах

**Гималтдинов И.К.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета, член-корреспондент Академии наук Республики Башкортостан.

**Левина Т.М.**, кандидат технических наук, заведующая кафедрой общенаучных дисциплин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Кучер А.М.**, преподаватель Башкирского государственного университета.

UDC 532.329; 532.2.532

## DEPENDENCE OF CHARACTERISTICS OF DETONATION WAVES IN MULTICOMPONENT BUBBLE LIQUID ON INITIAL PRESSURE

Ilias K. Gimaltdinov<sup>1</sup>,

iljas\_g@mail.ru

Tatyana M. Levina<sup>1</sup>,

tattin76@mail.ru

Anastasia M. Kucher<sup>2</sup>,

kucheram85@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

<sup>2</sup> Sterlitamak branch of Bashkir State University,  
49, Lenin avenue, Sterlitamak, 453100, Russia.

**Relevance.** Bubble liquids are a common working environment in a number of branches of the national economy. One of the most interesting processes is the propagation of detonation waves in a bubble liquid with a flammable gas inside the bubbles. Detonation waves can also propagate in a liquid with bubbles, partly consisting of inert gas. In this case, the presence of bubbles with inert gas is a certain control parameter for characteristics (amplitude, extent, propagation limits) of the detonation wave. In addition, there are experimental data on the influence of the initial pressure on the characteristics of bubble detonation waves in a multicomponent bubble liquid. This necessitates the investigation of detonation waves in multicomponent bubble systems for different values of the initial pressure.

**The aim** of the research is to study the dynamics of detonation waves in a bubble liquid, partially consisting of bubbles with inactive (non-flammable) gas at different initial pressures.

**The object** of research is detonation waves in a bubble liquid containing bubbles with an explosive (active) and non-flammable (inactive) gas.

**The research method** is based on the fundamental equations of the mechanics of multiphase media, which are solved numerically.

**The results** of investigations on revealing the features of the propagation of detonation waves in a multicomponent bubble liquid at various initial pressures allowed us to draw conclusions and give recommendations. As the initial pressure of multicomponent bubble media decreases, the velocity of propagation of detonation waves decreases. The dependence of the detonation wave velocity in a multicomponent bubble liquid on the initial pressure is close to linear.

### Key words:

Oil and gas production, explosion safety, detonation waves, bubble liquid, initial pressure.

The research was carried out within the State task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the field of research, release no. 5.12863.2018/8.9. The research was supported by the RFBR grant, project no. 17–41–020244.

### REFERENCES

- Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in Oxyhydrogen Bubbled Liquids. *Proc. 19<sup>th</sup> Intern. Symp. on Combustion*. Hafnia, 1982. pp. 675–683.
- Sychev A.I., Pinaev A.V. Self-supported detonation in liquids with explosive gas bubbles. *J. Appl. Mech. Techn. Physics*, 1986, no. 1. pp. 133–138.
- Pinaev A.V., Sychev A.I. Influence of physical-chemical properties of gas and a liquid on parameters and a condition of existence of a wave of a detonation in systems a liquid-gas bubbles. *Physics of Combustion and Explosion*, 1987, vol. 23, no. 6, pp. 76–84.
- Sychev A.I. Transformation of detonation waves at the interface between bubble media. *Technical Physics*, 2011, vol. 56, no. 5, pp. 611–615.
- Ljapidevskij V.J. About speed of a bubble detonations. *Physics of Combustion and Explosion*, 1990, vol. 26, no. 4, pp. 137–140.
- Gimaltdinov I.K., Arslanbekova R.R., and Levina T.M. Features of the dynamics of postdetonation waves. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 355–367.
- Shagapov V.S., Vahitova N.K. Waves in a bubble system in the presence of gas-phase chemical reactions. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1989, vol. 25, no. 6, pp. 669–677.
- Kedrinskij V.K. *Hydrodynamics of explosion: experiment and models*. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ., 2000. 435 p.
- Topolnikov A.S., Gimaltdinov I.K. Dynamics of detonation waves in a channel with variable cross section and filled with bubbly fluid. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 489–498.
- Zhdan S.A. A detonation of a column of chemically active bubble medium. *Physics of Combustion and Explosion*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 107–112.
- Bayazitova A.R., Gimaltdinov I.K., Kucher A.M., Shagapov V.Sh. Dynamics of Detonation Waves in an Annular Layer of a Round Pipe. *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, no. 2, pp. 201–210.
- Nigmatulin R.I., Lahey R.T., Block R.C., Taleyarkhan R.P., West C.D. *On thermonuclear processes in cavitation bubbles*. *Physics-Spekhi*, 2014, vol. 57, no. 9, pp. 877–890.
- Nigmatulin R.I., Akhatov I.Sh., Topolnikov A.S., Bolotnova R.Kh., Vakhitova N.K., Lahey R.T. Jr., Taleyarkhan R.P. Theory of supercompression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fusion. *Physics of Fluids*, 2005, vol. 17, no. 10, P. 107106(1)–107106(31).
- Nigmatulin R.I. *Dynamics of Multiphase Media*: vol. 1–2. New York, United States, Hemisphere Publ. Corp., 1990. 507 p.

15. Gimaltdinov I.K., Kucher A.M. Detonation waves in a multicomponent bubble liquid. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 3, pp. 411–416.
16. Sychev A.I. Detonation waves in multicomponent bubble media. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1993, vol. 29, no. 1, pp. 104–111.
17. Sychev A.I. Influence of the initial pressure in bubble media on the detonation wave parameters. *Technical Physics*, 2015, vol. 60, no. 4, pp. 603–606.
18. Sychev A.I. Effect of the initial pressure of multicomponent bubble media on the characteristics of detonation waves. *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 654–658.
19. Gimaltdinov I. K., Stolpovskiy M. V., Levina T. M. The influence of initial pressure on the characteristics of detonation waves in bubble liquids. *Neftegazovoye delo*, 2017, no. 5, pp. 52–66. In Rus. Available at: [http://ogbus.ru/issues/5\\_2017/ogbus\\_5\\_2017\\_p52-66\\_GimaltdinovIK\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/5_2017/ogbus_5_2017_p52-66_GimaltdinovIK_ru.pdf) (accessed 1 November 2018).
20. Gimaltdinov I.K., Levina T.M. Features of detonation wave dynamics in bubbly liquid on the border «hydroglyceric solution – oil». *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 8, pp. 55–63.

*Received: 23 November 2018.*

#### **Information about the authors**

**Ilias K. Gimaltdinov**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University, corresponding member of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan.

**Tatyana M. Levina**, Cand. Sc., head of the department, Ufa State Petroleum Technological University.

**Anastasia M. Kucher**, college teacher Sterlitamak branch of Bashkir State University.

УДК 549.452.3+549.452.4(571.52)

## ИОДСОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ РЯДА ХЛОРАРГИРИТ–БРОМАРГИРИТ В ОКИСЛЕННЫХ РУДАХ ЗОЛОТО–КВАРЦЕВЫХ РУДОПРОЯВЛЕНИЙ ХААК–САИР И ТАРДАН-2 (ТУВА, РОССИЯ)

Кужугет Ренат Васильевич<sup>1</sup>,  
rkuzhuget@mail.ru

Монгуш Андрей Александрович<sup>1</sup>,  
amongush@inbox.ru

Ооржак Шолбан Николаевич<sup>1</sup>,  
sholban1988@mail.ru

Бутанаев Юрий Владимирович<sup>1</sup>,  
jyra3@mail.ru

<sup>1</sup> Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,  
Россия, 667007, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117 а.

*Редкая распространённость природных иодсодержащих минералов ряда хлораргирит–бромаргирит, их растворимость в воде, сравнительно небольшие размеры, минеральные формы (единичные микрозёрна, корки, налёты, кристаллы микронного размера), небольшая твёрдость – 1,5–2,5, неустойчивость при воздействии электронного пучка в процессе микрозондового анализа обусловили сравнительно слабую изученность их минералого-геохимических особенностей.*

**Цель работы:** выяснение генезиса и минералого-геохимических особенностей иодсодержащих минералов ряда хлораргирит–бромаргирит в окисленных рудах на примере золото-кварцевых рудопроявлений Хаак-Саир и Тардан-2.

**Методы исследования:** полевые исследования, детальные минералогические исследования с изучением рудной минерализации в полированных шлифах (аншлифах) с помощью растровых сканирующих электронных микроскопов MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системами микроанализа INCA Energy 450+XMax 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd) и Tescan Vega 3 sbu с ЭДС Oxford Instruments X-act.

**Результаты исследования.** В окисленных рудах золото-кварцевых рудопроявлений Хаак-Саир и Тардан-2 выявлены и описаны гипергенные иодсодержащие минералы ряда хлораргирит–бромаргирит. Установлено, что на Хаак-Саире в ряду AgCl–AgBr иодсодержащие разности представлены I-содержащим бромистым хлораргиритом (I до 8,16 мас. %), I-содержащим хлористым бромаргиритом (I до 11,11 мас. %), Cl-содержащим иодистым бромаргиритом (I до 13,94 мас. %) и иодистым бромаргиритом (I до 15,45 мас. %), на Тардан-2 – I-содержащим бромистым хлораргиритом (I до 4,29 мас. %), I-содержащим хлористым бромаргиритом (I до 10,16 мас. %). Галогениды в рассматриваемых рудопроявлениях распространены по мере уменьшения их растворимости: AgCl→AgBr→AgI. На Хаак-Саире и Тардан-2 в ряду AgCl–AgBr содержание иода увеличивается от хлористых фаз к более бромистым фазам, т. е. параметры гранецентрированной кубической решётки постепенно увеличиваются от AgCl к AgBr. При этом пределы твёрдых растворов AgI в ряду AgCl–AgBr весьма ограничены, что связано с тем, что иодиды Ag отличаются по структуре от его хлоридов и бромидов.

### Ключевые слова:

Природные галогениды Ag, минералы ряда хлораргирит–бромаргирит, бромистый хлораргирит, I-содержащий бромистый хлораргирит, I-содержащий хлористый бромаргирит, Cl-содержащий иодистый бромаргирит, иодистый бромаргирит, Тува.

### Введение

Галогениды Ag (хлораргирит AgCl (куб.), бромаргирит AgBr (куб.), иодаргирит AgI (гекс.) и майерсит AgI (куб.)) в природе встречаются редко и исключительно в зонах гипергенеза серебряных и Ag-содержащих месторождений, преимущественно расположенных в регионах с аридным климатом. Слабая изученность минералого-геохимических особенностей природных галогенидов Ag обусловлена их сравнительно редкой распространённостью.

Уникальным по масштабам проявления гипергенных галогенидов Ag является крупнейшее в мире по запасам и уникальное по содержанию металлов месторождение Ag, Pb и Zn Брокен-Хилл в Австралии. Данный объект является практически единственным месторождением на Земле, где широко отмечаются практически все галогениды Ag

(иодиды, хлориды и бромиды), в том числе иодсодержащие минералы ряда хлораргирит–бромаргирит [1, 2]. В России бромиды и хлориды отмечаются во многих рудных объектах разного генезиса, а вот иодиды и иодсодержащие минералы ряда хлораргирит–бромаргирит описаны только в некоторых рудных и нерудных месторождениях Урала и Рудного Алтая [3–7]. Иодидная минерализация, по масштабам развития не уступающая месторождению Брокен-Хилл, выявлена в зоне окисления Рубцовского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай, Алтайский край) [8].

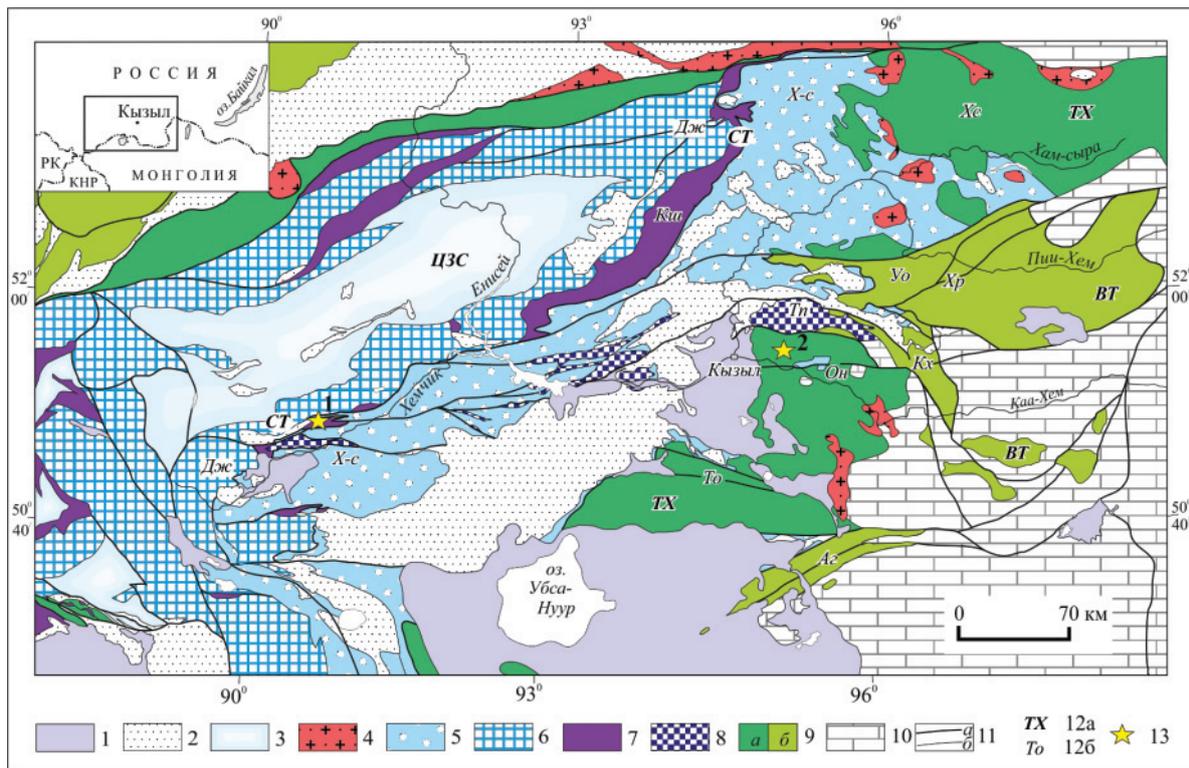
В данной статье описаны природные твёрдые растворы AgI в ряду минералов AgCl–AgBr, т. е. в непрерывном изоморфном ряду хлораргирит–бромаргирит, из окисленных руд золото-кварцевых рудопроявлений Хаак-Саир и Тардан-2.

**Краткая характеристика Хаак-Саирского рудопроявления**

Хаак-Саирское рудопроявление является составной частью Алдан-Маадырского золоторудного узла. Последний приурочен к зоне сочленения: а)  $E_1-O$  метатерригенных комплексов Западного Саяна; б)  $V-E_1$  океанических комплексов хаотического типа и  $E_2-S$  молассы, слагающих, соответственно, фундамент и осадочный чехол Хемчикско-Сыстыгхемского преддугового коллизионного прогиба; и в)  $D$  магматических и осадочных комплексов одного из рукавов Тувинского рифтоген-

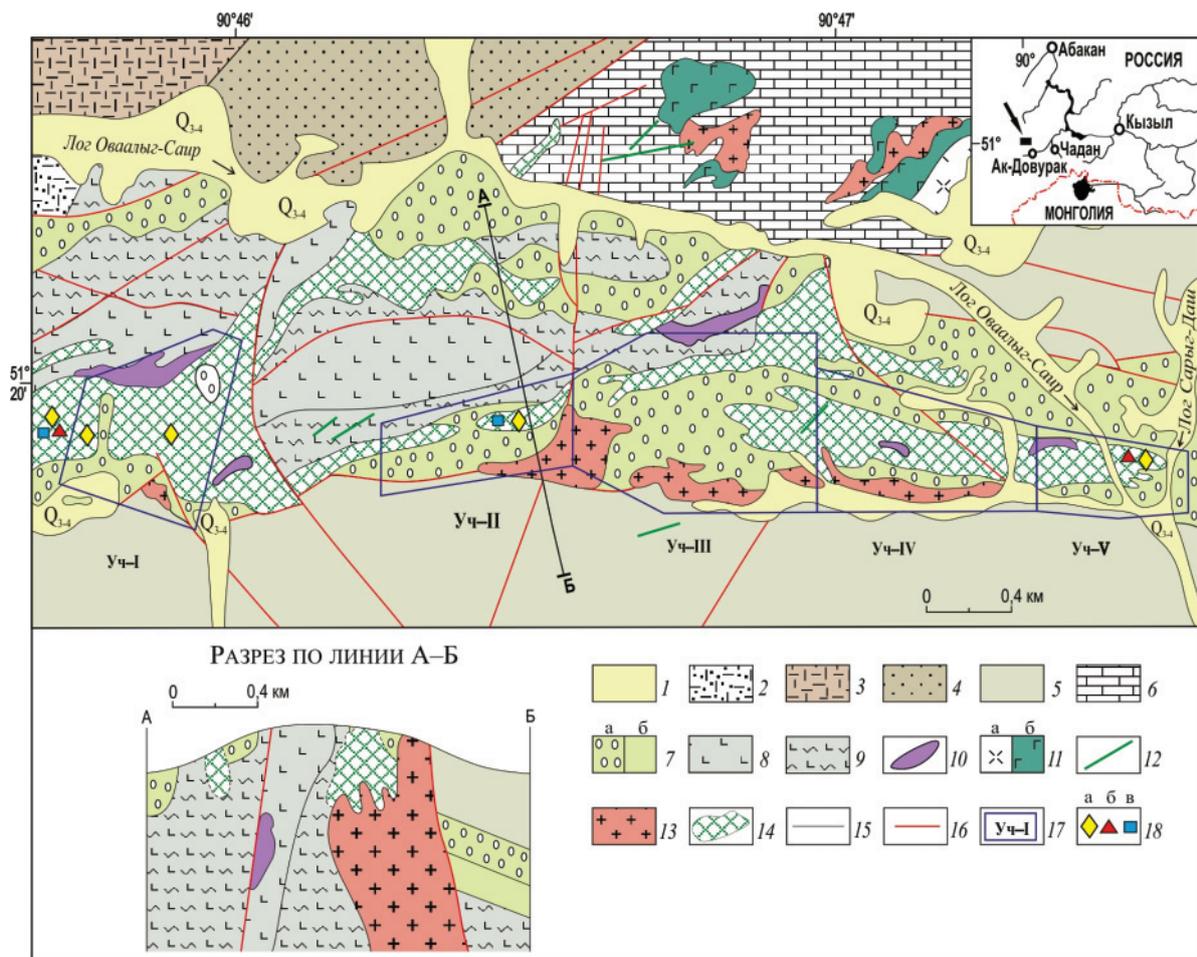
ного прогиба (рис. 1) [9, 10]. Нижнедевонские и среднедевонские отложения представлены в основном красноцветными терригенными и вулканогенно-осадочными породами, в которых практически повсеместно отмечаются многочисленные глиптоморфозы каменной соли, гипса и ангидрита [11].

Геолого-минералогическая характеристика Хаак-Саирского рудопроявления приведена в [12]. Здесь подчеркнем, что золотое оруденение контролируется разломами, опережающими Хемчикско-Куртушибинский (Саяно-Тувинский) глубинный разлом, и генетически связано с малыми интруз-



**Рис. 1.** Геолого-тектоническая схема Тувы по данным [10]: 1 – MZ и KZ осадки; 2 – рифтогенные вулканиты и осадки ( $PZ_2$ ); 3 – вулканиты (J); 4 – турбидиты пассивной окраины ( $E_2-S$ ); 5 – осадки чехла ( $E_2-S$ ) преддугового прогиба (X-c); 6 – субдукционно метаморфизованные комплексы аккреционной призмы: океанические базальты (V) и турбидиты ( $E_1$ ) активной окраины (Дж); 7 – комплексы преддугового автохтона: вендские офиолиты фундамента и венд-нижнекембрийские базальты, карбонатно-кремнисто-терригенные осадки, нижнекембрийские комплексы активной окраины (Kш); 8 – венд-нижнекембрийские выступы фундамента преддугового прогиба (X-c); 9 – венд-нижнекембрийские островодужные (а) и задуговые (б) комплексы; 10 – докембрийские террейны; 11 – границы террейнов и главные разломы (а), границы наложенных ассоциаций (б); 12 – названия зон и подзон: СТ – Саяно-Тувинская преддуговая зона, подзоны: Дж – Джебашская, Кш – Куртушибинская, Тп – Тапсинская, X-c – Хемчикско-Сыстыгхемская, ТХ – Таннуольско-Хамсаринская островодужная зона, подзоны: То – Таннуольская, Он – Ондумская, Хм – Хамсаринская, ВТ – Восточно-Тувинская задуговая зона, подзоны: Аг – Агардагская, Кх – Каахемская, Хр – Харальская, Уо – Улугуйская, ЦЗС – Центрально-Западносаянская зона; 13 – объекты исследований: 1 – Хаак-Саир; 2 – Тардан-2

**Fig. 1.** Geological-tectonic map of Tuva (compiled using data [10]): 1 are the MZ-KZ overlap assemblages; 2 are the riftogenic volcanics and sediments ( $PZ_2$ ); 3 are the volcanics (J); 4 are the  $E_1-S$  turbidites continental margin; 5 are the  $E_2-S$  sedimentary cover of the Khemchik-Systyghem collisional trough; 6 are the subduction metamorphosed complexes of the accretionary prism: oceanics (V) and turbidite ( $E_1$ ) of active margin (Дж); 7 are the complexes of forearc autochthon: Vendian ophiolite of the basement and Vendian-Lower Cambrian basalt, carbonate-siliceous-terrigenous sediments, Lower Cambrian complexes of the active margin (Kш); 8 is the Vendian-Lower Cambrian basement high of the forearc trough (X-c); 9 are the V-E<sub>1</sub> island-arc (a) and back-arc (б) complexes; 10 are the precambrian terranes; 11 are the boundaries of terranes and major faults (a), boundaries of superimposed assemblages (b); 12 are the names of zones and subzones: СТ – Sayano-Tuvan forearc zone, subzones: Дж – Dzhebashskaya, Кш – Kurtushibinskaya, Тп – Tapsinskaya, X-c – Khemchiksko-Systyghemskaya, ТХ – Tannuolsko-Khamsarinskaya arc zone, subzones: Tannuolskaya, Он – Ondumskaya, Хм – Khamsarinskaya, ВТ – East Tuvan backarc zone, subzones: Аг – Agardagskaya, Кх – Kaakhemskaya, Хр – Kharalskaya, Уо – Ulugoyskaya, ЦЗС – Central Western Sayan zone; 13 – objects of research: 1 – Khaak-Sair; 2 – Tardan-2



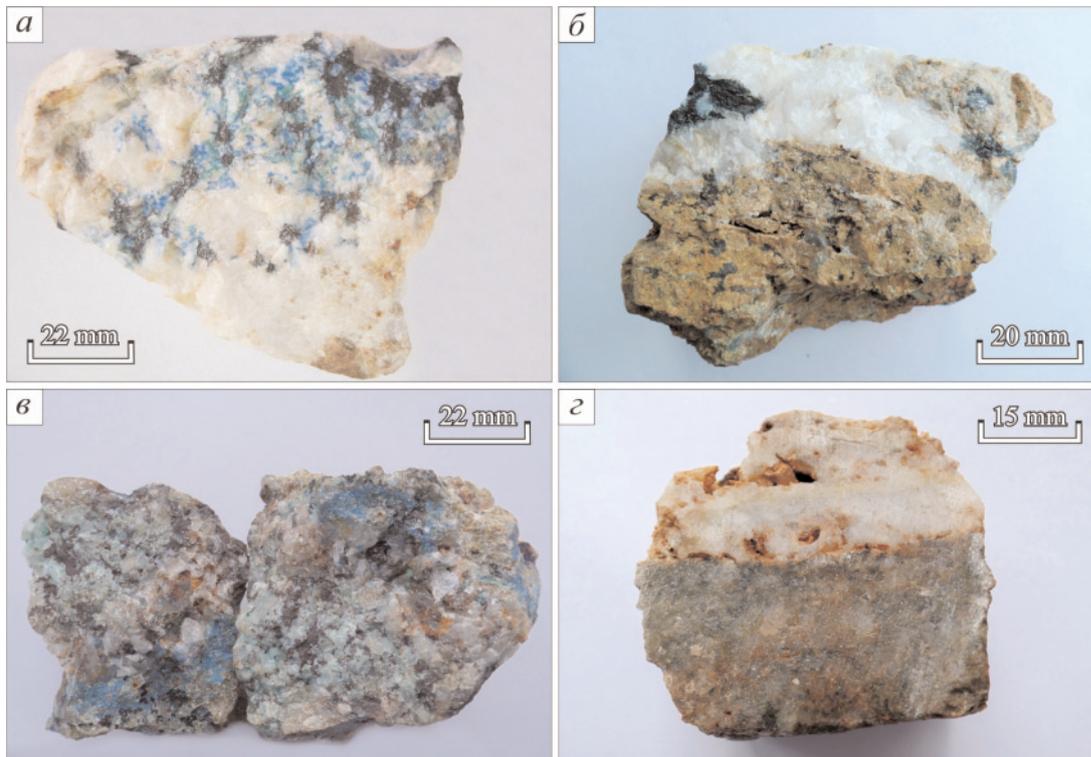
**Рис. 2.** Геологическая карта и разрез Хаак-Саирского рудопоявления: 1 – четвертичные отложения ( $Q_{3-4}$ ); 2–7 – осадочные, вулканогенно-осадочные и вулканогенные породы: 2 – алевролиты, песчаники, гравелиты, эффузивы кислого и среднего состава саглинской свиты ( $D_2sg$ ); 3 – эффузивы, риолитовые порфиры верхней подсвиты кендейской свиты ( $D_3kn_2$ ); 4 – красноцветные песчаники и алевролиты верхней подсвиты хондергейской свиты ( $S_2-D_1hn_2$ ); 5 – алевролиты чергакской свиты ( $S_{1-2}xr$ ); 6 – известняки и линзы алевритов чергакской свиты ( $S_{1-2}xr$ ); 7 – адырташская свита ( $O_3ad$ ): рассланцованные конгломераты верхней подсвиты; алевролиты, гравелиты и песчаники нижней подсвиты; 8–10 – офиолиты Саяно-Тувинской преддуговой зоны: 8 – эффузивы, спилиты чингинской свиты ( $V-Ecn$ ); 9 – рассланцованные эффузивы, спилиты чингинской свиты ( $V-Ecn$ ); 10 – серпентиниты, перидотиты, пироксениты и связанные с ними габброиды и диориты офиолитового акдоврацкого комплекса ( $\sigma V-Eak$ ); 11–13 – интрузивные образования баянкольского комплекса ( $D_{2-3}bn$ ): 11 – кварцевые и андезитовые порфиры (а), габброиды III фазы (б); 12 – дайки микродиоритов, диоритовых порфиритов III фазы; 13 – гранодиорит-, тоналит-порфиры, гранит-порфиры, риолиты I фазы; 14 – листвениты и лиственитизированные породы; 15 – границы геологические; 16 – разрывные нарушения; 17 – участки Хаак-Саирского месторождения и их контуры; 18 – точки выделения иодидной (а), хлоридной (б) и бромидной (в) минерализации

**Fig. 2.** Geological map and section of the Khaak-Sair ore occurrence: 1 are the quaternary deposits ( $Q_{3-4}$ ); 2–7 are the sedimentary, volcanosedimentary, and volcanic rocks: 2 are the siltstones, sandstones, gravelstones, and felsic and intermediate effusive rocks of the Sagli Formation ( $D_2sg$ ); 3 are the effusive rocks and rhyolite porphyry of the Upper Kendei Subformation ( $D_3kn_2$ ); 4 are the red-colored sandstones and siltstones of the Upper Khodergei Subformation ( $S_2-D_1hn_2$ ); 5 are the siltstones of the Chergak Formation ( $S_{1-2}xr$ ); 6 are the limestones and silt lenses of the Chergak Formation ( $S_{1-2}xr$ ); 7 is the Adyrtash formation: foliated conglomerates of the Upper Subformation (a); siltstones, gravelstones, and sandstones of the Lower Subformation (b); 8–10 are the ophiolites of the basement of the Sayan-Tuva pre-arc zone: 8 are the effusive rocks and spilites of the Chingga Formation ( $V-Ecn$ ); 9 are the foliated effusive rocks and spilites of the Chinga Formation ( $V-Ecn$ ); 10 are the serpentinites, peridotites, pyroxenites, and associated and diorites of the Akdovrak ophiolite complex ( $\sigma V-Eak$ ); 11–13 are the intrusive rocks of the Bayan-Kol complex ( $D_{2-3}bn$ ): 11 are the quartz and andesite porphyry (a) and gabbroids of phase III (b); 12 are the dikes of microdiorites and diorite porphyrites of phase III; 13 are the granodiorite- and tonalite-porphyry, granite-porphyry, and rhyolites of phase I; 14 are the listwanites and listwanitized rocks; 15 are the geologic boundaries; 16 are the faults; 17 are the sites of the Khaak-Sair deposit and their outlines, 18 are the isolation points of iodide (a), chloride (b) and bromide (v) mineralizations

зиями и дайками гранодиорит- и тоналит-порфи- ров баянкольского комплекса ( $D_3-C_1$ ). На рудопроявлении выделяются пять участков развития золото-кварцевых жил среди лиственитов, V– $C_1$  эффузивов и O конгломератов, алевролитов и песчаников. Основную площадь рудопроявления занимают мусковит-парагонит-кварц-карбонатные (зелёные) и типичные кварц-карбонатные (серые) листвениты, образованные по V– $C_1$  осадочным и магматическим породам (рис. 2).

Малосульфидные золото-кварцевые жилы и жильные зоны рудопроявления преимущественно развиты среди лиственитов, т. е. сопряжены с метасоматитами березит-лиственитовой формации. Длина жил варьируется от 20 до 250 м, мощность – от 0,1 до 8 м. Жильные зоны представляют собой системы шириной 1–10 м и длиной 10–100 м, состоящие из жил и прожилков мощностью до 0,4 м. Жилы и жильные зоны сложены молочно-белым, светло-зеленоватым или бледно-коричневатым халцедоновидным или тонкозернистым кварцем. Рудная минерализация в жилах вкрапленная, гнездово-вкрапленная и прожилково-вкрапленная с неравномерным распределением (рис. 3). Руды характеризуются высоким Ag/Au отношением 0,12–67.

На основании минералогических исследований выделены три продуктивные стадии образования минералов Au и Ag, в том числе: золото-сульфо-сульфо-сульфидно-кварцевая (кварц, Fe-тетраэдрит, Fe-теннантит-тетраэдрит, галенит, халькопирит, Ag-тетраэдрит, Zn-тетраэдрит, аргентотетраэдрит, аргентотеннантит-тетраэдрит, Fe-теннантит, борнит, золото, электрум, арсенопирит, герсдорфит, Fe-Co-герсдорфит, бурнонит, сфалерит, гессит, акантит, ялпаит), золото-ртутисто-сульфосолюно-кварцевая (кварц, золото, Hg-содержащее золото, ртутистое золото, ртутистый электрум, ртутистый кюстелит, Au-содержащее ртутистое серебро и Fe-тетраэдрит) и золото-селенидно-теллуридно-сульфидно-кварцевая (кварц, борнит, герсдорфит, Zn-тетраэдрит, Bi-содержащий тетраэдрит, Se-имитерит, Se-киноварь, неограниченные твёрдые растворы минералов ряда галенит – клаусталит, тиманнит, науманнит, S-науманнит, фишессерит, золото, ртутистое золото, ртутистый электрум, колорадоит, гессит и барит). По составу продуктивных минеральных ассоциаций Хаак-Саирское рудопроявление отвечает золото-галенит-сульфосолюному типу с серебристыми блёклыми рудами, минералами ряда Au–Ag–Hg (золотом, электрумом, ртутистым электрумом, ртутистым



**Рис. 3.** Руды рудопроявлений Хаак-Саир (а–б) и Тардан-2 (в–г): а) окисленная золото-сульфидно-кварцевая руда; б) золото-сульфидно-кварцевый прожилок в листвените; в) окисленная золото-сульфидно-кварцевая руда; г) окисленный золото-сульфидно-кварцевый прожилок в березите

**Fig. 3.** Ores of the Khaak-Sair (a–б) and the Tardan-2 (в–г) ore occurrences: а) the oxidized gold-sulfide-quartz ore; б) the gold-sulfide-quartz stringer in listwanite; в) the oxidized gold-sulfide-quartz ore; г) the oxidized gold-sulfide-quartz stringer in beresite

кюстелитом, Au-содержащим ртутистым серебром), селенидами ( $\text{HgSe}$ ,  $\text{PbSe}$ ,  $\text{Ag}_3\text{Se}$  и  $\text{Ag}_3\text{AuSe}_2$ ) и теллуридами ( $\text{HgTe}$ ,  $\text{Ag}_2\text{Te}$ ).

Рудные минералы кварцевых жил и жильных зон частично или полностью окислены. Мощность зоны гипергенеза составляет не менее 50 м. В коре выветривания развиты ковеллин, халькозин, малахит, азурит, гематит, гётит, гидрогётит, штромейрит, англезит, церуссит, линарит, трипугит, трипшкит, конихальцит, ромеит, гидроромеит, брошантит, скородит, золото, акантит, серебро, атакамит, иодиды, бромиды, хлориды и т. д.

#### Краткая характеристика рудопроявления Тардан-2

Золото-кварцевое рудопроявление Тардан-2 является составной частью Тарданского золоторудного узла, который приурочен к зоне проявления: а)  $V\text{-}E_1$  островодужных комплексов Ондумской подзоны Таннуольско-Хамсаринской островодужной зоны; б)  $E_2\text{-}O$  коллизионных интрузивных, преимущественно гранитоидных комплексов; и в)  $S$  осадочных отложений остаточного прогиба (рис. 1).

Тарданский рудный узел расположен в краевой части Каахемского полихронного батолита. Золотое оруденение рудного узла контролируется оперяющими разрывными нарушениями Каахемского глубинного разлома [13, 14]. Золоторудные объекты рудного узла приурочены к зоне контакта Копто-Байсютского интрузивного массива габбро-диорит-плагиогранитной ассоциации с вулканогенной  $V_2$  ондумской и вулканогенно-карбонатной  $E_1$  ильчирской свиты. Возраст плагиогранитов Копто-Байсютского массива, определённый по биотиту  $Ar/Ar$  методом, составляет  $485,7 \pm 4,4$  млн лет [14], по цирконам  $U\text{-}Pb$  методом –  $479 \pm 2$  млн лет [15]. Возраст золото-висмут-теллуридной минерализации месторождения Тардан, определённый  $Ar/Ar$  методом по серициту из кварцевых прожилков минерализованных зон дробления, составляет  $48 \pm 6,1$  млн лет [14].

Рудопроявление Тардан-2 расположено в междуречье Копто-Бай-Сют (Бай-Соот), в 2–4 км к востоку от Тарданского месторождения, в пределах мощной тектонически ослабленной зоны северо-западного простирания, приуроченной к эндоконтактной зоне Копто-Байсютского массива, вблизи контакта с известняками ильчирской свиты ( $E_1$ ) [16]. Площадь рудопроявления сложена среднезернистыми беловато-серыми плагиогранитами, которые вмещают многочисленные кварцевые и сульфидно-кварцевые жилы с протяжённостью от 10 до 80 м, мощностью от 0,1 до 0,8 м и прожилковые кварцево-жильные зоны шириной от 1 до 10–18 м и протяжённостью до 180 м (рис. 4).

Простирание жил и кварцево-жильных зон северо-западное, реже север-северо-восточное. Жилы и жильные зоны сложены беловато-серым крупнозернистым, местами гребенчатым и друзовидным кварцем с вкрапленниками и гнездами

сульфидов и крупнокристаллического кальцита, реже анкерита.

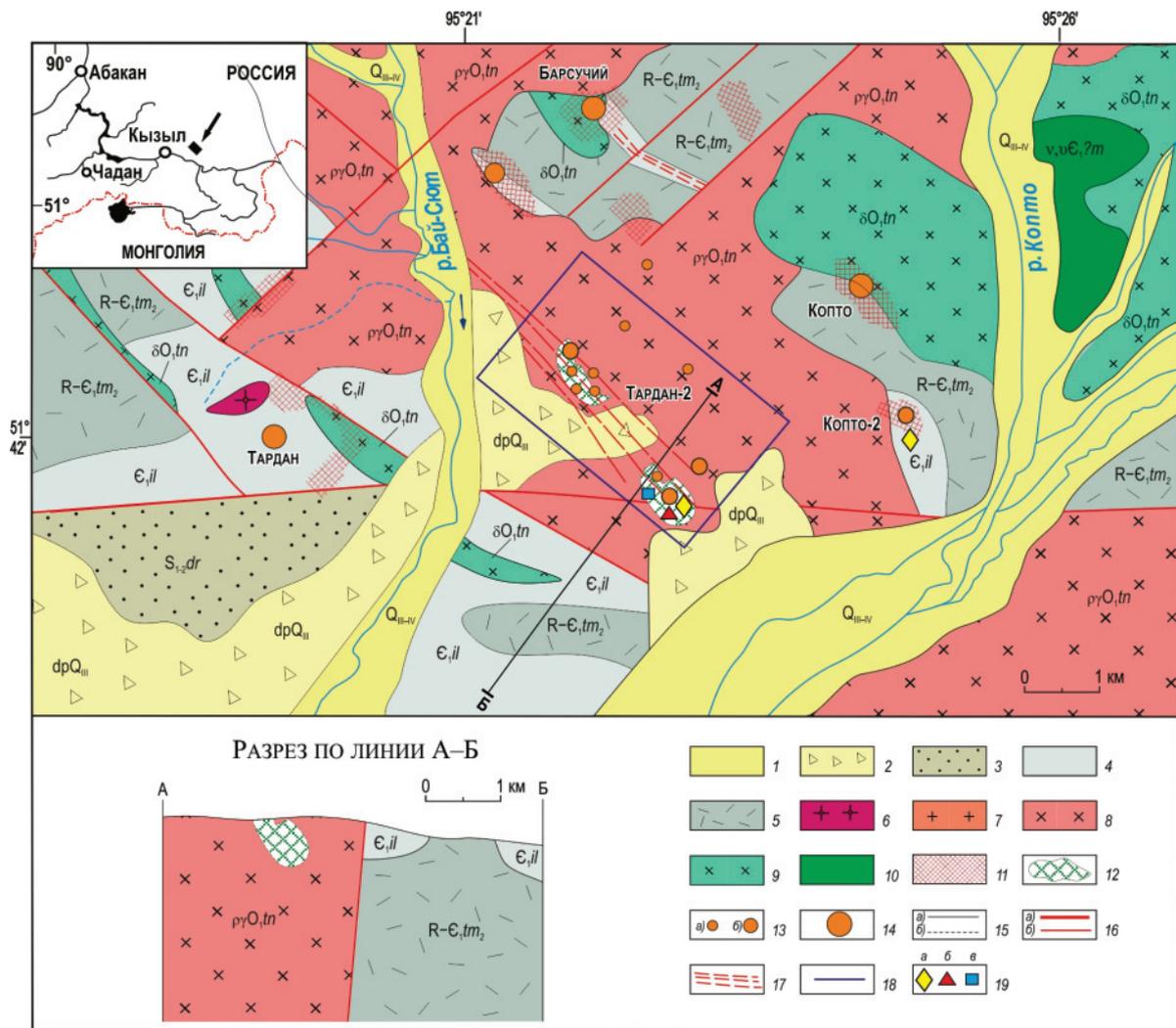
На данном рудопроявлении выделялись две группы точек минерализации: первая – Западный участок, состоит из семи точек минерализации, находится ближе к р. Бай-Сют; вторая – Восточный или Южно-Тарданский участок, состоит из 9 точек минерализации, в том числе жилы «Чудская» и «Студенческая», расположенные ближе к р. Копто. Друг от друга данные участки находятся на расстоянии 2 км [17]. По минералого-геохимическим особенностям руд и по составу самородного золота данные участки рудопроявления близки и отличаются лишь степенью проявления продуктивной минерализации. Малосульфидные золото-кварцевые жилы и жильные зоны рудопроявления развиты среди березитов, образовавшихся по плагиогранитам. Руды данного объекта, так же как и на Хаак-Саире, характеризуются вкрапленным, гнездово-вкрапленным и прожилково-вкрапленным характером и высоким  $Ag/Au$  отношением 0,25–60 (рис. 3 в-г).

Минералого-геохимическими исследованиями установлено, что отложение золоторудной минерализации происходило в течение одной золото-сульфидно-кварцевой стадии (кварц, халькопирит, пирит, барит, галенит ( $Ag$  до 1,18 мас. %),  $Bi$ -содержащий  $Zn$ -теннантит-тетраэдрит ( $Ag$  до 1,62 мас. %), матильдит  $AgBiS_2$ , акантит, золото, электрум, ртутистый электрум, кюстелит, ртутистый кюстелит, айкинит  $CuPbBiS_3$ , берриит  $Cu_3Ag_2Pb_3Bi_7S_{16}$ , пирротин, висмутин и самородный висмут). Для продуктивной минерализации характерна прожилково-вкрапленная и вкрапленная минерализация. По составу продуктивной минеральной ассоциации рудопроявление Тардан-2 отвечает золото-висмут-сульфосольному типу с минералами ряда  $Au\text{-}Ag\text{-}Hg$  (золотом, электрумом, кюстелитом, ртутистым электрумом и кюстелитом), сульфидами  $Ag$  и  $Bi$  ( $AgBiS_2$ ,  $Bi_2S_3$ ) и самородным висмутом.

Сульфидно-кварцевые жилы рудопроявления интенсивно окислены и сложены гипергенными минералами, в т. ч.: азуритом, малахитом, халькозином, ковеллином, скородитом, гетитом, гидрогетитом, бисмитом, бисмутитом, акантитом, купритом, иодаргиритом,  $I$ -содержащими минералами ряда хлораргирит-бромаргирит, миметитом, байдонитом и т. д.

#### Материалы и методы исследования

Исследованы образцы руд из окисленных золото-сульфидно-кварцевых жил рудопроявлений Хаак-Саир и Тардан-2, которые были отобраны из естественных горных обнажений и геологоразведочных канав глубиной до 1,5 м. На Хаак-Саирском рудопроявлении отобрано более 300 образцов, в том числе 25 образцов для изучения галогенидной минерализации, из которых было изготовлено 23 полированных шлифов (шашек). На рудопроявлении Тардан-2 отобрано 20 образцов, из которых было изготовлено 12 полированных шашек.

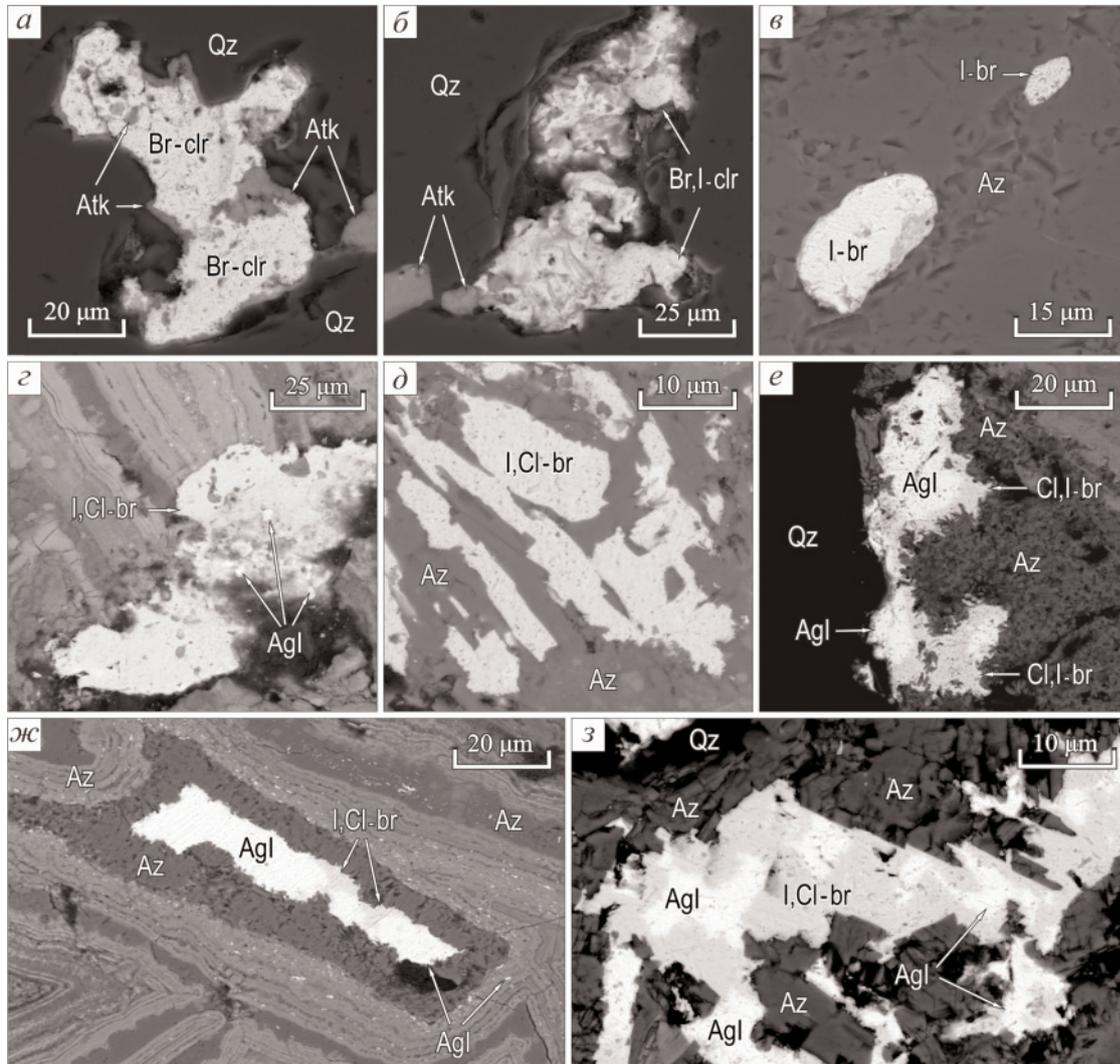


**Рис. 4.** Геологическое строение центральной части Тарданского золоторудного узла (по данным [17]): 1 – аллювиальные отложения пойм ( $Q_{IV}$ ); 2 – делювиально-пролювиальные отложения ( $Q_{III}$ ); 3 – красноцветные песчаники, гравелиты, конгломераты с прослоями известняков дерзигской свиты ( $S_{2-dr}$ ); 4 – песчаники, туфопесчаники, туфогравелиты, алевролиты, конгломераты, кристаллические сланцы, амфибол-хлоритовые сланцы и известняки ильчирской свиты ( $\epsilon_{il}$ ); 5 – базальтовые, андезитовые порфириды с прослоями известняков верхней подсвиты туматтайгинской свиты ( $V-\epsilon_{tm_2}$ ); 6–9 – диорит-тоналит-плаггиогранитный комплекс ( $O_{tn}$ ): 6 – гранит-порфиры и кварцевые порфиры ( $\gamma\tau$ ); 7 – плаггиограниты ( $\rho\gamma$ ); 8 – нерасчлененные плаггиограниты ( $\rho\gamma$ ) и тоналиты ( $\gamma\delta$ ); 9 – диориты ( $\delta$ ), кварцевые диориты ( $q\delta$ ); 10 – габброиды мажалькского перидотит-пироксенит-габброноритового комплекса ( $v, vO_2m$ ); 11 – скарны; 12 – березиты; 13 – точки минерализации (а) и рудопроявления золота (б); 14 – месторождения золота; 15 – границы геологические: установленные (а), предполагаемые (б); 16 – региональные (а) и локальные (б) разломы; 17 – зоны дробления; 18 – контур рудопроявления Тардан-2; 19 – точки выделения иодидной минерализации; 20 – точки выделения хлоридной (а) и бромидной (б) минерализации

**Fig. 4.** Geological structure of the center of the Tardan gold-ore cluster (after [17]), with supplements: 1 are the overbank alluvium ( $Q_{IV}$ ); 2 talus and proluvium ( $Q_{III}$ ); 3 are the red sandstones, gravelstones, and conglomerates interbedded with limestones of the Derzig Formation ( $S_{2-dr}$ ); 4 are the sandstones, tuff sandstones, tuffaceous gravel, siltstones, conglomerates, crystalline schists, amphibole-chlorite schists and limestones of the Ilchir Formation ( $\epsilon_{il}$ ); 5 are the basaltic and andesitic porphyrites interbedded with limestones of the Upper Tumat-Taiga Subformation ( $V-\epsilon_{tm_2}$ ); 6–9 are the Rannetannuolsky diorite-tonalite-plagiogranite complex ( $O_{tn}$ ): 6 are the granite-porphyrus and quartz porphyry ( $\gamma\tau$ ); 7 are the plagiogranites ( $\rho\gamma$ ); 8 are the undivided plagiogranites ( $\rho\gamma$ ) and tonalites ( $\gamma\delta$ ); 9 are the diorites ( $\delta$ ), quartz diorites ( $q\delta$ ); 10 are the gabbro of the Mazhalyksky peridotite-pyroxenite-gabbronorite complex ( $v, vO_2m$ ); 11 are the skarns; 12 are the beresites; 13 are the points of mineralization (a) and gold ore occurrences (b); 14 are the gold deposits; 15 are the geological boundaries: established (a), assumed (b); 16 regionals (a) and locals (b) faults; 17 are the zones of crushing; 18 is the ore occurrence contour of Tardan-2; 19 are the isolation points of iodide mineralization; 20 are the isolation points of chloride (a) and bromide (b) mineralizations

Состав минералов определялся на растровых сканирующих электронных микроскопах: MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системами микроанализа INCA Energy 450 + XMax 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd) (аналитик Н.С. Карманов, ИГМ СО РАН, г. Новосибирск)

и Tescan Vega 3 sbu с ЭДС Oxford Instruments X-act (аналитик И.А. Блинов, ИМин УрО РАН). Методами сканирующей электронной микроскопии были изучены 17 полированных шашек Хаак-Саирского рудопроявления с галогенидной минерализацией и 8 шашек рудопроявления Тардан-2.



**Рис. 5.** Формы выделения минералов ряда AgCl–AgBr Хаак-Саирского рудопроявления: а) срастание бромистого хлораргирита (Br-clr) с атакамитом (Atk) в кварце (Qz); б) срастание I-содержащего бромистого хлораргирита (Br, Cl-clr) с атакамитом (Atk) в кварце (Qz); в) выделения иодистого бромаргирита (I-br) в азурите (Az); г) выделения Cl-содержащего иодистого бромаргирита (I, Cl-br) и иодаргирита (Agl) в трещинах секущих минеральные агрегаты гипергенных минералов Cu, Sb, As и Fe (серые, тёмно-серое); д) выделения Cl-содержащего иодистого бромаргирита (I, Cl-br) в азурите (Az); е) выделения I-содержащего хлористого бромаргирита (Cl, I-br), иодаргирита (Agl) и азурита (Az) в трещинах кварца (Qz); ж) срастание иодаргирита (Agl) с Cl-содержащим иодистым бромаргиритом (I, Cl-br) в азурите (Az) и гипергенных минералах Cu, Sb, As и Fe (серые, тёмно-серое); ж) выделения I-содержащего хлористого бромаргирита (Cl, I-br), иодаргирита (Agl) и азурита (Az) в трещинах кварца (Qz); з) срастание Cl-содержащего иодистого бромаргирита (I, Cl-br) с иодаргиритом (Agl) в азурите (Az). Здесь и на рис. 6 – фотографии в отражённых электронах

**Fig. 5.** Segmentation forms of AgCl–AgBr mineral series of the Khaak-Sair ore occurrence: а) bromine chlorargyrite (Br-clr) intergrowth with atacamite (Atk) in quartz (Qz); б) bromian iodine chlorargyrite (Br, Cl-clr) intergrowth with atacamite (Atk) in quartz (Qz); в) iodine bromargyrite (I-br) in azurite (Az); г) iodine chlorian bromargyrite (I, Cl-br) and iodargyrite (Agl) in the fractures of secant mineral aggregates of hypergenic minerals Cu, Sb, As and Fe (gray, dark gray); д) iodine chlorian bromargyrite (I, Cl-br) in azurite (Az); е) chlorian iodine bromargyrite (Cl, I-br), iodargyrite (Agl), and azurite (Az) occurrences in quartz (Qz) fractures; ж) iodargyrite (Agl) intergrowth with iodine chlorian bromargyrite (I, Cl-br) in azurite (Az) and hypergenic minerals Cu, Sb, As and Fe (gray, dark gray); ж) chlorian iodine bromargyrite (Cl, I-br), iodargyrite (Agl), and azurite (Az) occurrences in quartz (Qz) fractures; з) iodine chlorian bromargyrite (I, Cl-br) intergrowth with iodargyrite (Agl) in azurite (Az). Back-scattered electron images are mentioned higher and in Fig. 6

**Химический состав галогенидов Ag Хаак-Саирского рудопоявления**

Галогениды формировались, прежде всего, при деструкции блёклых руд с богатым содержанием Ag (Fe-тетраэдрита Ag до 5 мас. %, Ag-тетраэдрита – 22,76 мас. %, аргентотетраэдрита – 40,86 мас. %, аргентотеннантит-тетраэдрита – 50 мас. %) и акантита Ag<sub>2</sub>S.

Минералы ряда AgCl–AgBr, в т. ч. их I-содержащие разновидности, являются одними из самых поздних минералов. Их выделения встречаются в наиболее поздних трещинках, секущих замещающие блёклые руды гипергенные минералы, либо развиваются по гипергенному серебру. Рассматриваемые галогениды ассоциируются с безпримесным иодаргиритом и вторичными минералами Cu, Fe, As и Sb, образованными при деструкции первичных рудных минералов. В некоторых окисленных рудах отмечаются только выделения иодидов, т. е. безпримесного иодаргирита с мошелитом Hg<sub>2</sub>I<sub>2</sub> или майерситом AgI. Мошелит содержит (мас. %): Hg – 59,52–60,84; I – 39,09–40,24; состав отвечает формуле (на 4 атома) – Hg<sub>1,96–1,98</sub>I<sub>2,02–2,06</sub>. Содержание Cu в майерсите достигает 15,8 мас. %. Фактически это твёрдые растворы кубических иодидов прерывистого ряда маршит (Mar) – майерсит (Mie). На рудопоявлении встречаются близкие к крайним члены этого ряда с составами Mar<sub>0,00</sub>Mie<sub>100</sub> и Mar<sub>0,10</sub>Mie<sub>90</sub>, а также средние члены – Mar<sub>0,38</sub>Mie<sub>61</sub> и Mar<sub>0,53</sub>Mie<sub>45</sub>. Маршит CuI (куб.) в чистом виде не обнаружен [18].

Формы выделения минералов ряда AgCl–AgBr и иодидов весьма разнообразны, хотя в виде кристаллов не обнаружены. Размеры их не превышают 1,5 мм (рис. 1). Хлориды менее распространены, чем бромиды и иодиды, последние преобладают над бромидами.

Хлоридная минерализация на рудопоявлении представлена бромистым хлораргиритом и I-содержащим бромистым хлораргиритом различной морфологии, размеры их выделений не превышают 70 мкм. Данные минералы отмечаются в окисленных кварцевых жилах и ассоциируются с безпримесным иодаргиритом, азурином, скородитом и атакамитом (гидроксихлоридом Cu состава Cu<sub>2</sub>Cl(OH)<sub>3</sub>), с последним довольно часто образуют сростания (рис. 5 а, б). Состав бромистого хлораргирита отвечает формуле (здесь и далее минералы в ряду AgCl–AgBr в расчёте на 2 атома) Ag<sub>1,07</sub>(Cl<sub>0,71</sub>Br<sub>0,22</sub>)<sub>0,93</sub>, I-содержащего бромистого хлораргирита – Ag<sub>1,00–1,05</sub>(Cl<sub>0,46–0,69</sub>Br<sub>0,25–0,41</sub>I<sub>0,01–0,11</sub>)<sub>0,95–1,04</sub> (рис. 5 а, б, табл. 1, ан. 1–7).

Бромидная минерализация представлена иодистым бромаргиритом, Cl-содержащим иодистым бромаргиритом, I-содержащим хлористым бромаргиритом. Последний на Хаак-Саирском рудопоявлении преобладает в ряду AgCl–AgBr. Состав I-содержащего хлористого бромаргирита отвечает формуле Ag<sub>0,97–1,05</sub>(Br<sub>0,45–0,78</sub>Cl<sub>0,12–0,44</sub>I<sub>0,07–0,16</sub>)<sub>0,95–1,04</sub>, Cl-содержащего иодистого бромаргирита – Ag<sub>0,96–1,05</sub>(Br<sub>0,67–0,78</sub>I<sub>0,12–0,21</sub>Cl<sub>0,05–0,12</sub>)<sub>0,95–1,04</sub>, иодистого бро-

маргирита – Ag<sub>0,99–1,04</sub>(Br<sub>0,71–0,79</sub>I<sub>0,20–0,25</sub>Cl<sub>0,00–0,02</sub>)<sub>0,96–1,01</sub> (табл. 1, ан. 8–33).

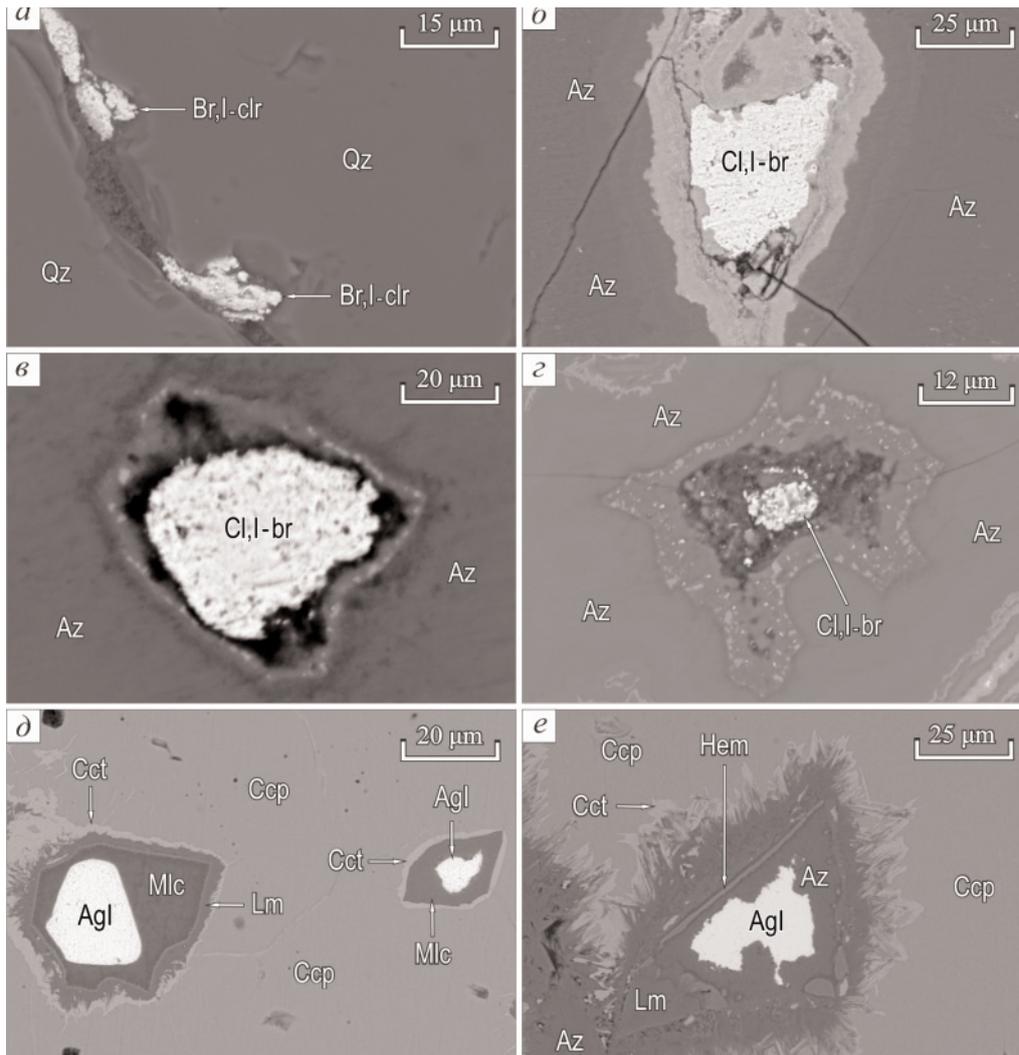
**Таблица 1.** Химический состав минералов ряда AgCl–AgBr Хаак-Саирского рудопоявления (мас. %)

**Table 1.** Chemical composition of AgCl–AgBr mineral series of the Khaak-Sair ore occurrence (wt. %)

Анализ Analysis	Ag	Br	Cl	I	Сумма Total	Формула Formula
<i>Бромистый хлораргирит/Bromian chlorargyrite</i>						
1	72,54	11,08	15,90	–	99,52	Ag <sub>1,07</sub> (Cl <sub>0,71</sub> Br <sub>0,22</sub> ) <sub>0,93</sub>
<i>I-содержащий бромистый хлораргирит Bromian iodian chlorargyrite</i>						
2	70,76	12,35	15,28	1,14	99,53	Ag <sub>1,05</sub> (Cl <sub>0,69</sub> Br <sub>0,25</sub> I <sub>0,01</sub> ) <sub>0,95</sub>
3	69,70	14,71	14,20	1,14	99,75	Ag <sub>1,04</sub> (Cl <sub>0,64</sub> Br <sub>0,30</sub> I <sub>0,02</sub> ) <sub>0,96</sub>
4	66,63	16,50	14,07	2,17	99,37	Ag <sub>1,00</sub> (Cl <sub>0,64</sub> Br <sub>0,33</sub> I <sub>0,03</sub> ) <sub>1,00</sub>
5	66,89	17,39	12,54	2,74	99,53	Ag <sub>1,02</sub> (Cl <sub>0,58</sub> Br <sub>0,36</sub> I <sub>0,04</sub> ) <sub>0,98</sub>
6	65,29	19,62	11,59	2,81	99,3	Ag <sub>1,01</sub> (Cl <sub>0,54</sub> Br <sub>0,41</sub> I <sub>0,04</sub> ) <sub>0,99</sub>
7	65,02	17,43	9,36	8,16	99,97	Ag <sub>1,05</sub> (Cl <sub>0,46</sub> Br <sub>0,38</sub> I <sub>0,11</sub> ) <sub>0,95</sub>
<i>I-содержащий хлористый бромаргирит Chlorian iodian bromargyrite</i>						
8	61,43	20,56	9,06	8,77	99,82	Ag <sub>0,99</sub> (Br <sub>0,45</sub> Cl <sub>0,44</sub> I <sub>0,12</sub> ) <sub>1,01</sub>
9	62,16	21,31	8,06	8,45	99,98	Ag <sub>1,01</sub> (Br <sub>0,47</sub> Cl <sub>0,40</sub> I <sub>0,12</sub> ) <sub>0,99</sub>
10	59,73	22,84	7,05	10,07	99,69	Ag <sub>0,99</sub> (Br <sub>0,51</sub> Cl <sub>0,36</sub> I <sub>0,14</sub> ) <sub>1,01</sub>
11	60,42	23,55	6,94	9,08	99,99	Ag <sub>1,00</sub> (Br <sub>0,53</sub> Cl <sub>0,35</sub> I <sub>0,12</sub> ) <sub>1,00</sub>
12	61,54	24,73	5,73	7,10	99,10	Ag <sub>1,04</sub> (Br <sub>0,56</sub> Cl <sub>0,30</sub> I <sub>0,10</sub> ) <sub>0,96</sub>
13	59,24	24,56	5,73	9,73	99,26	Ag <sub>1,00</sub> (Br <sub>0,56</sub> Cl <sub>0,30</sub> I <sub>0,14</sub> ) <sub>1,00</sub>
14	58,40	25,60	6,67	9,08	99,75	Ag <sub>0,97</sub> (Br <sub>0,57</sub> Cl <sub>0,33</sub> I <sub>0,13</sub> ) <sub>1,03</sub>
15	59,51	26,41	5,24	8,35	99,51	Ag <sub>1,01</sub> (Br <sub>0,60</sub> Cl <sub>0,27</sub> I <sub>0,12</sub> ) <sub>0,99</sub>
16	58,49	25,88	4,51	11,11	99,99	Ag <sub>1,00</sub> (Br <sub>0,60</sub> Cl <sub>0,24</sub> I <sub>0,16</sub> ) <sub>1,00</sub>
17	60,64	25,99	4,53	8,38	99,54	Ag <sub>1,04</sub> (Br <sub>0,60</sub> Cl <sub>0,24</sub> I <sub>0,12</sub> ) <sub>0,96</sub>
18	58,72	27,27	5,00	9,10	100,09	Ag <sub>0,99</sub> (Br <sub>0,62</sub> Cl <sub>0,26</sub> I <sub>0,13</sub> ) <sub>1,01</sub>
19	57,41	26,84	4,68	9,74	98,67	Ag <sub>0,99</sub> (Br <sub>0,62</sub> Cl <sub>0,25</sub> I <sub>0,14</sub> ) <sub>1,01</sub>
20	61,57	27,07	4,48	6,77	99,89	Ag <sub>1,05</sub> (Br <sub>0,62</sub> Cl <sub>0,23</sub> I <sub>0,10</sub> ) <sub>0,95</sub>
21	58,49	27,13	3,93	10,32	99,87	Ag <sub>1,01</sub> (Br <sub>0,63</sub> Cl <sub>0,21</sub> I <sub>0,15</sub> ) <sub>0,99</sub>
22	59,01	27,62	2,75	10,30	99,68	Ag <sub>1,04</sub> (Br <sub>0,66</sub> Cl <sub>0,15</sub> I <sub>0,15</sub> ) <sub>0,96</sub>
23	59,24	29,85	4,96	5,05	99,10	Ag <sub>1,00</sub> (Br <sub>0,68</sub> Cl <sub>0,25</sub> I <sub>0,07</sub> ) <sub>1,00</sub>
24	58,26	29,27	2,94	8,56	99,05	Ag <sub>1,02</sub> (Br <sub>0,69</sub> Cl <sub>0,16</sub> I <sub>0,13</sub> ) <sub>0,98</sub>
25	60,57	30,82	3,21	6,20	100,8	Ag <sub>1,03</sub> (Br <sub>0,71</sub> Cl <sub>0,16</sub> I <sub>0,09</sub> ) <sub>1,04</sub>
26	57,64	32,90	2,26	6,21	99,01	Ag <sub>1,01</sub> (Br <sub>0,78</sub> Cl <sub>0,12</sub> I <sub>0,09</sub> ) <sub>0,99</sub>
<i>Cl-содержащий иодистый бромаргирит Iodian chlorian bromargyrite</i>						
27	57,95	27,89	2,13	12,04	100,01	Ag <sub>1,03</sub> (Br <sub>0,67</sub> I <sub>0,18</sub> Cl <sub>0,12</sub> ) <sub>0,97</sub>
28	56,82	27,92	1,51	13,68	99,93	Ag <sub>1,03</sub> (Br <sub>0,68</sub> I <sub>0,21</sub> Cl <sub>0,08</sub> ) <sub>0,97</sub>
29	53,72	29,51	2,19	13,94	99,36	Ag <sub>0,96</sub> (Br <sub>0,71</sub> I <sub>0,21</sub> Cl <sub>0,12</sub> ) <sub>1,04</sub>
30	55,34	29,51	1,53	13,60	99,98	Ag <sub>0,99</sub> (Br <sub>0,72</sub> I <sub>0,21</sub> Cl <sub>0,08</sub> ) <sub>1,01</sub>
31	58,51	32,14	0,93	7,92	99,50	Ag <sub>1,05</sub> (Br <sub>0,78</sub> I <sub>0,12</sub> Cl <sub>0,05</sub> ) <sub>0,95</sub>
<i>Иодистый бромаргирит/Iodian bromargyrite</i>						
32	54,05	31,91	0,30	12,70	99,00	Ag <sub>0,99</sub> (Br <sub>0,79</sub> I <sub>0,20</sub> Cl <sub>0,02</sub> ) <sub>1,01</sub>
33	56,05	28,15	0,05	15,45	99,70	Ag <sub>1,04</sub> (Br <sub>0,71</sub> I <sub>0,25</sub> ) <sub>0,96</sub>

Примечание. Состав минералов определен на растровом электронном микроскопе MIRA 3 LMU (г. Новосибирск). Прочерк – ниже предела обнаружения. Формулы минералов рассчитаны на 2 формульных коэффициента.

Note. Composition of halides was determined using MIRA 3 LMU scanning electron microscope (in Novosibirsk). Dash – below detection limit. Formulas of halides are for 2 formula coefficients.



**Рис. 6.** Формы выделения иодаргирита (Agl) и минералов ряда AgCl–AgBr рудопроявления Тардан-2: а) выделения I-содержащего бромистого хлораргирита (Br, I-clr) в трещинах кварца (Qz); б–г) выделения I-содержащего хлористого бромаргирита (Cl, I-br) в азурите (Az) и гипергенных минералах Cu, Sb, As и Fe (серые, темно-серое); д, е) выделения иодаргирита (Agl) с малахитом (Mlc), азуритом (Az), лимонитом (Lm), халькозином (Cct), гематитом (Hem) в халькопирите (Ccp)

**Fig. 6.** Forms of iodargyrite (Agl) and AgCl–AgBr mineral series of the Tardan-2 ore occurrence: a) bromian iodian chlorargyrite (Br, I-clr) in the quartz (Qz) fractures; б–г) chlorian iodian bromargyrite (Cl, I-br) in azurite (Az) and hypergenic minerals Cu, Sb, As and Fe (gray, dark gray); д, е) iodargyrite (Agl) with malachite (Mlc), azurite (Az), limonite (Lm), chalcocite (Cct), hematite (Hem) in chalcopyrite (Ccp)

Бромидная минерализация ассоциируется с иодаргиритом, Br-содержащим иодаргиритом, Br-, Cl-содержащим иодаргиритом, азуритом, конихальцитом, финнеманитом  $Pb_5(As^{3+}O_3)_3Cl$ , Br-содержащим финнеманитом (Br до 0,84 мас. %) и различными гипергенными минералами Cu, Sb, As и Fe (рис. 5 б–з).

Химический состав безпримесного иодаргирита (среднее из 8 анализов, мас. %): Ag – 45,30; I – 54,34, формула (здесь и далее в расчете на 2 атома) –  $Ag_{0,99}I_{1,01}$ . Химический состав Br-содержащего иодаргирита (мас. %): Ag – 44,46–45,59; I – 52,02–53,73, Br – 0,46–1,59, состав отвечает формуле  $Ag_{0,97-1,01}(I_{0,95-1,00}Br_{0,01-0,05})_{0,99-1,03}$ . Br-, Cl-содержащего иодаргирита – Ag – 46,12; I – 50,56; Br –

2,53; Cl – 0,54, формула –  $Ag_{0,98}(I_{0,91}Br_{0,07}Cl_{0,04})_{0,99}$ . Последние редки и иногда образуют сростания с Cl-, I-содержащими разновидностями бромаргирита (рис. 1, е–з). Содержание Br и Cl в иодаргирите в сростании с I, Cl-содержащим и Cl, I-содержащим бромаргиритом ниже пределов обнаружения или не превышают 3-х мас. %.

I-содержащие разновидности в минералах ряда AgCl–AgBr обнаруживают тенденцию увеличения содержания иода в ряду: безиодистый бромистый хлораргирит; I-содержащем бромистом хлораргирите – до 8,16 мас. %; I-содержащем хлористом бромаргирите – 11,11 мас. %; Cl-содержащем иодистом бромаргирите – 14 мас. %; иодистом бромаргирите – 15,45 мас. % (табл. 1).

### Химический состав галогенидов Ag рудопроявления Тардан-2

Галогенидная минерализация на рудопроявлении Тардан-2 выявлена только в жиле «Чудская» среди березитов, при этом 100 м к югу от жилы развиты известняки ильчирской свиты (Є<sub>1</sub>). В окисленной жиле «Чудская» галогениды образовались при деструкции матильдита AgBiS<sub>2</sub>, беррита Cu<sub>3</sub>Ag<sub>2</sub>Pb<sub>3</sub>Bi<sub>7</sub>S<sub>16</sub>, акантита Ag<sub>2</sub>S, Zn-теннантит-тетраэдрита (Ag до 1,62 мас. %), их выделения встречаются в наиболее поздних трещинках, секущих замещающие сульфиды, блёклые руды гипергенные минералы (рис. 6).

Формы выделения минералов ряда AgCl–AgBr весьма разнообразны, размеры их не превышают 0,05 мм. Как и на Хаак-Саирском рудопроявлении, хлориды менее распространены, чем бромиды и иодиды, последние преобладают над бромидами. Видимо, в окисленных рудах рудопроявлений Тардан-2 и Хаак-Саир галогениды распространены по мере уменьшения их растворимости; растворимость галогенидов Ag уменьшается в ряду AgCl (1,78·10<sup>-10</sup>) – AgBr (5,3·10<sup>-13</sup>) – AgI (8,3·10<sup>-17</sup>) [19].

Хлоридная минерализация на рудопроявлении Тардан-2 представлена I-содержащий бромистым хлораргиритом различной формы (до 40 мкм) (рис. 6, а, табл. 2).

**Таблица 2.** Химический состав минералов ряда AgCl–AgBr рудопроявления Тардан-2 (мас. %)

**Table 2.** Chemical composition of minerals of AgCl–AgBr series of Tardan-2 ore occurrence (wt. %)

Анализ Analysis	Ag	Br	Cl	I	Сумма Total	Формула Formula
<i>I-содержащий бромистый хлораргирит Bromian iodian chlorargyrite</i>						
1	64,06	19,40	11,6	4,29	99,35	Ag <sub>0,99</sub> (Cl <sub>0,55</sub> Br <sub>0,40</sub> I <sub>0,06</sub> ) <sub>0,97</sub>
<i>I-содержащий хлористый бромаргирит Chlorian iodian bromargyrite</i>						
2	64,97	23,8	8,8	2,42	99,99	Ag <sub>1,03</sub> (Br <sub>0,51</sub> Cl <sub>0,43</sub> I <sub>0,03</sub> ) <sub>0,97</sub>
3	59,63	22,59	7,09	10,16	99,47	Ag <sub>0,99</sub> (Br <sub>0,51</sub> Cl <sub>0,36</sub> I <sub>0,14</sub> ) <sub>0,97</sub>
4	60,29	25,59	8,01	5,21	99,10	Ag <sub>0,98</sub> (Br <sub>0,56</sub> Cl <sub>0,39</sub> I <sub>0,07</sub> ) <sub>1,02</sub>
5	63,51	26,36	8,02	2,11	100	Ag <sub>1,01</sub> (Br <sub>0,57</sub> Cl <sub>0,39</sub> I <sub>0,03</sub> ) <sub>0,99</sub>
6	61,15	26,49	7,17	5,02	99,83	Ag <sub>0,99</sub> (Br <sub>0,58</sub> Cl <sub>0,36</sub> I <sub>0,07</sub> ) <sub>1,01</sub>
7	61,10	27,44	8,21	2,31	99,06	Ag <sub>0,98</sub> (Br <sub>0,59</sub> Cl <sub>0,40</sub> I <sub>0,03</sub> ) <sub>1,02</sub>
8	58,80	28,91	3,41	8,05	99,17	Ag <sub>1,02</sub> (Br <sub>0,68</sub> Cl <sub>0,18</sub> I <sub>0,12</sub> ) <sub>0,98</sub>

Примечание. Состав минералов определен на сканирующем электронном микроскопе Vega 3 Tescan (Миасс). Прочерк – ниже предела обнаружения. Формулы минералов рассчитаны на 2 формульных коэффициента.

Note. Composition of the halides was determined using Vega 3 Tescan scanning electron microscope (Miass). Dash – below detection limit. Formulas of halides are for 2 formula coefficients.

Бромидная минерализация представлена I-содержащим хлористым бромаргиритом, состав которого отвечает формуле Ag<sub>0,98-1,03</sub>(Br<sub>0,51-0,68</sub>Cl<sub>0,18-0,43</sub>I<sub>0,03-0,14</sub>)<sub>0,97-1,02</sub> (рис. 6 б–г, табл. 2, ан. 2–8). В минералах ряда AgCl–AgBr обнаруживается тенденция увеличения содержания иода от хлористых фаз к более бромистым фазам (табл. 2).

Минералы ряда AgCl–AgBr ассоциируются с иодаргиритом и миметитом Pb<sub>3</sub>[AsO<sub>4</sub>]<sub>3</sub>Cl. Иодаргирит (до 35 мкм) содержит (среднее из 4 анализов, мас. %): Ag – 44,59–47,09; I – 52,41–55,34; состав отвечает формуле Ag<sub>0,97-1,03</sub>I<sub>0,97-1,03</sub> (рис. 6 д, е). На контакте ртутистого электрума и гипергенного золота отмечаются единичные выделения AgI (майерсит?) с содержанием Cu 3,45 мас. %. Его состав отвечает формуле (Ag<sub>0,88</sub>Cu<sub>0,12</sub>)<sub>1,00</sub>I<sub>1,00</sub>.

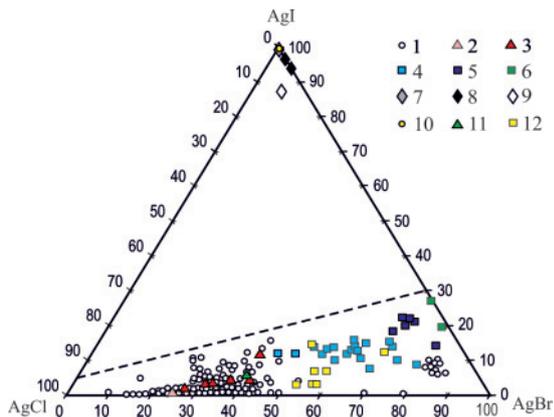
### Обсуждение результатов

Минералы ряда AgCl–AgBr в окисленных золото-сульфидно-кварцевых жилах рудопроявлений Хаак-Саир и Тардан-2 являются одними из самых поздних гипергенных минералов, образовавшихся при деструкции Ag-содержащих блёклых руд и сульфидов серебра (акантита Ag<sub>2</sub>S и т. д.). В первичных рудах выделения галогенидов отсутствуют, их выделения встречаются только в окисленных рудах в наиболее поздних трещинках, секущих замещающие первичные сульфиды гипергенные минералы. Кристаллизация ряда AgCl–AgBr происходила, видимо, из холодных растворов. Рассматриваемые I-содержащие минералы ряда AgCl–AgBr ассоциируются с иодидной минерализацией и вторичными минералами Cu, Fe, As и Sb, образованными при деструкции первичных минералов.

В минералах ряда AgCl–AgBr рудопроявлений Хаак-Саир, Тардан-2 обнаруживается тенденция увеличения содержания иода от хлористых фаз к более бромистым фазам (рис. 7).

Экспериментально установленные пределы смешимости твёрдых растворов AgI в ряду AgCl–AgBr весьма ограничены [20, 21] (рис. 7). Это связано с тем, что иодиды Ag отличаются по структуре от его хлоридов и бромидов [1]. Бромид и хлорид Ag имеют гранцентрированную кубическую (ГЦК) решётку типа каменной соли NaCl. Ионы Ag расположены в вершинах куба и в центрах граней куба, а ионы галогена – на середине рёбер куба и в центре куба. Координационное число в AgCl и AgBr, т. е. число ближайших ионов противоположного знака, равно 6. Постоянная решётки d=5,7748 Å (AgBr) и d=5,5502 Å (AgCl).

AgI известен в трех модификациях: α-AgI, β-AgI и γ-AgI. α-AgI имеет объёмно-центрированную кубическую (ОЦК) решётку и существует при температурах выше 146 °С. β-AgI имеет гексагональную решётку типа вюрцита и устойчив при температурах ниже 146 °С, в природе встречается в виде минерала иодаргирит. γ-AgI существует при температурах ниже 137 °С и имеет ГЦК решётку типа цинковой обманки [22], в природе встречается в виде минерала майерсит AgI. Экспериментально установлено, что при избытке в растворе иода кристаллизуется гексагональная модификация β-AgI, а при избытке ионов серебра более вероятно образование кубической модификации – γ-AgI [23]. Гексагональная решетка β-AgI имеет следующие параметры: a=4,5923 Å и c=7,5093 Å, γ-AgI – a=6,49 Å и d=2,81 С [22].



**Рис. 7.** Вариации состава минералов ряда  $AgCl-AgBr$  и иодаргирита: 1 – составы минералов месторождения Брокен-Хилл [1, 2], 2–9 – составы минералов Хаак-Саирского рудопоявления: 2 – бромистого хлораргирита; 3 – I-содержащего бромистого хлораргирита; 4 – I-содержащего хлористого бромаргирита; 5 – Cl-содержащего иодистого бромаргирита; 6 – иодистого бромаргирита; 7–9 – иодаргирита: 7 – безпримесного, 8 – Br-содержащего, 9 – Br-, Cl-содержащего; 10–12 – составы минералов рудопоявления Тардан-2: 10 – иодаргирита; 11 – I-содержащего бромистого хлораргирита; 12 – I-содержащего хлористого бромаргирита. Пунктирная линия – экспериментально определённый предел твёрдого раствора  $AgI$  в минералах ряда  $AgCl-AgBr$  при 25 °C [20, 21]

**Fig. 7.** Variations in the composition of  $AgCl-AgBr$  mineral series and iodargyrite: 1 are the compositions of the Broken Hill deposit minerals [1, 2], 2–9 are the compositions of minerals of the Khaak-Sair ore occurrence: 2 – bromian chlorargyrite; 3 – bromian iodian chlorargyrite; 4 – chlorian iodian bromargyrite; 5 – iodian chlorian bromargyrite; 6 – iodian bromargyrite; 7–9 – iodargyrite: 7 – undoped; 8 – Br-bearing; 9 – Br-, Cl-bearing; 10–12 are the minerals compositions of the Tardan-2 ore occurrence: 10 – iodargyrite; 11 – bromian iodian chlorargyrite; 12 – chlorian iodian bromargyrite. The dashed line joins the experimentally determined limits of solid solution of  $AgI$  in minerals of the  $AgCl-AgBr$  series at 25 °C [20, 21]

Твёрдые растворы  $AgBr$  и  $AgCl$  могут существовать при любых соотношениях компонентов, так как в обоих веществах решётки одинаковы, тогда как  $AgI$  из-за различия в типе решётки образует твёрдые растворы с другими галогенидами лишь до некоторой предельной концентрации. В какой-то мере I может заменить Cl и Br в системе  $AgCl-AgBr$ , но, так как чистая кубическая модификация  $AgI$  кристаллизуется с атомами с координационным числом четыре при нормальной температуре и давлении, степень смесимости твёрдого раствора ограничена. Поэтому I-содержащие разновидности ряда  $AgCl-AgBr$  отмечаются в очень редких случаях [1].

Согласно экспериментальным данным, максимальная концентрация  $AgI$  в ряду  $AgCl-AgBr$  варьирует 5–31 мол. % при температурах 25–70 °C [20, 21]. По данным [22] в синтетических кубических твёрдых растворах  $Ag$  ( $BrI$ ) содержания I отмечается до 30 мол. % при 25 °C,  $Ag$  ( $ClI$ ) – до 10,5 мол. % при 25 °C.

На Хаак-Саирском рудопоявлении концентрация  $AgI$  в ряду  $AgCl-AgBr$  варьирует 1–25 мол. %, на рудопоявлении Тардан-2 – 3–14 мол. %. В обоих случаях пределы смесимости твёрдых растворов галогенидов  $AgI$ ,  $AgCl$  и  $AgBr$  не превышают экспериментально установленные пределы 5–31 мол. %.

В природе из галогенидов  $Ag$  в большей степени распространён хлораргирит, реже бромаргирит (собственный и единственный минеральный вид брома) [24]. По данным [1] на месторождении Брокен-Хилл (Австралия) из I-содержащих разновидностей в ряду  $AgCl-AgBr$  в основном встречается Br, I-содержащие разновидности хлораргирита, редко встречаются Cl, I-содержащие разновидности бромаргирита. В отличие от Брокен-Хилла, на Хаак-Саире и Тардан-2 не так редки богатые иодом Cl, I-содержащие разновидности бромаргирита. Поскольку распространённость галогенидов ряда  $AgCl-AgBr$  в рассматриваемых рудопоявлениях Тувы прямо связана с уменьшением их растворимости от хлораргирита к бромаргириту [19], то очевидно, что более растворимый хлораргирит проявлен на месторождении Брокен-Хилл, которое расположено в более аридных условиях. Соответственно, галогениды рудопоявлений Хаак-Саир и Тардан-2 образовались в менее аридных условиях.

В целом в I-содержащих разновидностях ряда  $AgCl-AgBr$  месторождения Брокен-Хилл и рудопоявлений Хаак-Саир и Тардан-2 проявлена, во-первых, положительная корреляция между I и Br, т. е. содержание I увеличивается от хлористых фаз к более бромистым фазам (рис. 7), т. к. параметры ГЦК решётки постепенно увеличиваются от  $AgCl$  к  $AgBr$ . Во-вторых, в иодистых фазах серии  $AgCl-AgBr$  из Брокен-Хилла, Хаак-Саира и Тардан-2 содержание  $AgI$  находится ниже линии пределов замещения  $AgI$  в ряду  $AgCl-AgBr$ , что согласуется с результатами экспериментальных исследований [20–22].

#### Заключение

В окисленных золото-сульфидно-кварцевых жилах рудопоявлений Тардан-2 и Хаак-Саир установлены гипергенные твёрдые растворы  $AgI$  в ряду  $AgCl-AgBr$ . Потенциальными источниками Cl, Br и I в соответствующей хлоридной, бромидной и иодидной минерализации на Хаак-Саирском рудопоявлении являются 1) осадочные породы V– $E_1$  океанических комплексов Западной Тувы, 2) осадочные породы Тувинского раннедевонского рифтогенного прогиба и 3) рассолы Тувинского раннедевонского эвапоритового бассейна, т. к. в эвапоритах три этих галогена геохимически тесно связаны. Источником Cl, Br и I на рудопоявлении Тардан-2 могли быть венд-нижнекембрийские (V– $E_1$ ) осадочные породы островодужных комплексов Таннуольско-Хамсаринской островной дуги, прежде всего  $E_1$  известняки ильчирской свиты.

Галогениды в рассматриваемых рудопоявлениях распространены по мере уменьшения их растворимости:  $AgCl \rightarrow AgBr \rightarrow AgI$ . На распределение галогенидов Тувы, помимо климата, также

влият и первичный состав руд, поскольку они отмечаются в окисленных рудах высоким Ag/Au отношением и образовались при деструкции Ag-содержащих блёклых руд и минералов серебра.

Пределы твёрдых растворов AgI в ряду AgCl–AgBr Хаак-Саира и Тардан-2 весьма ограничены, что связано отличием иодидов Ag по структуре от его хлоридов и бромидов. При этом в ряду AgCl–AgBr в рассматриваемых объектах Тувы содержание иода увеличивается от хлористых фаз к

более бромистым фазам (бромистый хлораргирит → I-содержащий бромистый хлораргирит (I от 1,14 до 10,16 мас. %) → I-содержащий хлористый бромаргирит (I от 5,05 до 11,11 мас. %) → Cl-содержащий иодистый бромаргирит (I от 7,92 до 13,94 мас. %) → иодистый бромаргирит (I от 12,70 до 15,45 мас. %), т. к. параметры гранцентрированной кубической решётки постепенно увеличиваются от AgCl к AgBr.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-45-170970 p\_a).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barclay C.J., Jones J.B. The Broken Hill silver halides // Journal of the Geological Society of Australia. – 1971. – V. 18. – P. 149–157.
2. Compositions of silver halides from the Broken Hill district, New South Wales / R.D. Gillard, A.D. Hart, D.A. Humphreys, R.F. Symes, P.A. Williams // Records of the Australian Museum. – 1997. – V. 49. – P. 217–228.
3. Особенности распределения иода в зоне гипергенеза Гайского медноколчеданного месторождения / Н.А. Читаева, А.Д. Миллер, Ю.И. Гроссе, Н.И. Чистякова // Геохимия. – 1971. – № 6. – С. 696–709.
4. Тютев Я.М., Анкушев М.Н., Блинов И.А. Минералогические особенности медного месторождения Таш-Казган (Республика Башкортостан) // Металлогения древних и современных океанов-2015. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2015. – С. 215–218.
5. Блинов И.В. Самородные металлы, селениды, галогениды и ассоциирующие минералы из бурых железняков Амурского и Верхне-Аршинского месторождений (Южный Урал) // Литосфера. – 2015. – № 1. – С. 65–74.
6. Иодидная минерализация в родингитах древнего рудника Воровская Яма, Южный Урал / В.В. Зайков, В.А. Котляров, Р.В. Кужугет, А.М. Юминов // Металлогения древних и современных океанов-2015. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2015. – С. 208–211.
7. Бирюков К.Э. Минералогические особенности рудопроявлений золота в юго-восточной части Барун-Хурайской котловины (юго-западная Монголия) // Металлогения древних и современных океанов-2016. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2016. – С. 206–210.
8. Uniquely high-grade iodide mineralization in the oxidation zone of the Rubtsovskoe base-metal deposit, Northwest Altai, Russia / I.V. Pekov, I.S. Lykova, I.A. Bryzgalov, D.A. Ksenofontov, L.A. Zyryanova, N.D. Litvinov // Geology Of Ore Deposits. – 2011. – V. 53. – № 8. – P. 683–698.
9. Berzin N.A., Kungurtsev L.V. Geodynamic interpretation of Altai-Sayan geological complexes // Russian Geology and Geophysics. – 1996. – V. 37 (1). – P. 56–73.
10. Монгуш А.А. Базальтовые комплексы Саяно-Тувинской преддуговой зоны: геологическое положение, геохимия, геодинамика // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Эколого-экономические проблемы природопользования: Вып. 14 / Отв. ред. д-р геол.-минерал. наук В.И. Лебедев. – Кызыл: ТуВИКОПР СО РАН, 2016. – С. 74–94.
11. Строение, геохимическая характеристика соленосных отложений в Тувинском бассейне / А.С. Колосов, А.И. Пустыльников, В.В. Зайков, Е.В. Зайкова // Проблемы соленакпления. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1977. – Т. 2. – С. 183–197.
12. Gold mineralization of the Khaak-Sair gold-quartz ore occurrence in listwanites (western Tuva) / R.V. Kuzhuguet, V.V. Zaikov, V.I. Lebedeva, A.A. Mongush // Russian Geology and Geophysics. – 2015. – V. 56. – P. 1332–1348.
13. Коробейников А.Ф., Зотов И.А. Закономерности формирования месторождений золото-скарновой формации. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 234 с.
14. Gaskov I.V. New data on the correlation of skarn and gold mineralization at the Tardan deposit (northeastern Tuva) // Russian Geology and Geophysics. – 2008. – V. 49. – № 12. – P. 923–931.
15. Vendian-Early Paleozoic granitoid magmatism in Eastern Tuva / S.N. Rudnev, V.Y. Kiseleva, G.A. Babin, V.P. Kovach, P.A. Serov // Russian Geology and Geophysics. – 2015. – V. 56. – № 9. – С. 1232–1255.
16. Стратиграфический кодекс России. Издание третье. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. – 96 с.
17. Кильчичаков К.М., Токунов В.Ф., Плеханов А.И. Результаты оценки Тарданского золоторудного месторождения и поисков золота в бассейне р. Бай-Сют. – Кызыл: Изд-во ТГРЭ, 1966. – 150 с.
18. Кужугет Р.В. Иодидная и бромидная минерализация в окисленных рудах Хаак-Саирского золоторудного месторождения, Западная Тува // Записки Российского минералогического общества. – 2014. – № 2. – Т. 143. – С. 64–80.
19. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. 5-е изд. – М.: Изд-во «Химия», 1979. – 480 с.
20. Chateau H. Proprietes thermodynamiques des cristaux mixtes d'halogenures d'argent // Comptes Rendus, Academie des Sciences. – Paris, 1959. – V. 248. – P. 1950–1952.
21. Chateau H. Proprietes thermodynamiques des cristaux mixtes d'halogenures d'argent // Comptes Rendus, Academie des Sciences. – Paris, 1959. – V. 249. – P. 1638–1640, 1887–1889.
22. Рабенко Е.В. Исследование начальных стадий фотолитиза галогенидов серебра: элементарные реакции фотогенерированных носителей тока: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Черноголовка, 2005. – 18 с.
23. Wilman H. The structure and orientation of silver halides // Proceedings of the Physical Society. – 1940. – V. 52. – P. 323–347.
24. Яхонтова Л.К., Зверева В.П. Основы минералогии гипергенеза. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 331 с.

*Поступила 11.05.2018 г.*

#### Информация об авторах

**Кужугет Р.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики, магматизма и рудообразования Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

**Монгуш А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

**Ооржак Ш.Н.**, инженер лаборатории геодинамики, магматизма и рудообразования Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

**Бутанаев Ю.В.**, младший научный сотрудник лаборатории геодинамики, магматизма и рудообразования Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

UDC 549.452.3+549.452.4(571.52)

## IODINE-BEARING MINERALS OF CHLORARGYRITE-BROMARGYRITE SERIES IN OXIDIZED ORES OF THE KHAAK-SAIR AND THE TARDAN-2 GOLD-QUARTZ ORE OCCURRENCES (TUVA, RUSSIA)

Renat V. Kuzhuget<sup>1</sup>,  
rkuzhuget@mail.ru

Andrey A. Mongush<sup>1</sup>,  
amongush@inbox.ru

Sholban N. Oorzhak<sup>1</sup>,  
sholban1988@mail.ru

Yuri V. Butanaev<sup>1</sup>,  
jyra3@mail.ru

<sup>1</sup> Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS,  
117 a, Internatsionalnaya street, Kyzyl, 667007, Russia.

The rare abundance of natural iodine-bearing minerals of the chlorargyrite-bromargyrite series, their water solubility, comparatively small sizes, mineral forms (single micrograins, crusts, incrustations, micron-sized crystals), small hardness 1,5–2,5, instability for an electron beam impact in microprobe analysis caused insufficient knowledge of their mineralogical-geochemical features.

**The aim** of the research is to determine genesis and mineralogical-geochemical features of iodine-bearing minerals of the chlorargyrite-bromargyrite series in oxidized ores in the Khaak-Sair and Tardan-2 gold-quartz ore occurrences case study.

**Methods:** field studies, detailed mineralogical studies using ore mineralization in polished sections (polished microsections) using scanning electron microscopes MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) combined with Xray microanalysis systems INCA Energy 450+Xmax-80 and INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd) and Vega 3 (Tescan) with EDA (Oxford Instruments X-act).

**Results.** The authors have identified and described the hypergenic iodine-bearing minerals of the chlorargyrite-bromargyrite series in the oxidized ores of the Khaak-Sair and the Tardan-2 gold-quartz ore occurrences. It is confirmed that the iodine-bearing differences of the Khaak-Sair in the AgCl–AgBr series are represented by bromian iodian chlorargyrite (up to 8,16 wt. % I), chlorian iodian bromargyrite (up to 11,11 wt. % I), iodian chlorian bromargyrite (up to 13,94 wt. % I) and iodian bromargyrite (up to 15,45 wt. % I), on the Tardan-2 – bromian iodian chlorargyrite (up to 4,29 wt. % I), chlorian iodian bromargyrite (up to 10,16 wt. % I). The AgCl–AgBr halides in these ore occurrences are represented as their solubility decreases: AgCl→AgBr→AgI. Iodine content increases from chloride phases to more bromide phases within AgCl–AgBr series of the Khaak-Sair and the Tardan-2, because the parameters of face-centered cubic lattice gradually increase from AgCl to AgBr and the limits of AgI solid solutions in AgCl–AgBr series are very limited due to the fact that Ag iodides differ in structure from its chlorides and bromides.

### Key words:

Natural silver halides, chlorargyrite–bromargyrite mineral series, bromian chlorargyrite, bromian iodian chlorargyrite, chlorian iodian bromargyrite, iodian chlorian bromargyrite, iodian bromargyrite, Tuva.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research grant no. 17–45–170970 p\_a.

### REFERENCES

- Barclay C.J., Jones J.B. The Broken Hill silver halides. *Journal of the Geological Society of Australia*, 1971, vol. 18, pp. 149–157.
- Gillard R.D., Hart A.D., Humphreys D.A., Symes R.F., Williams P.A. Compositions of silver halides from the Broken Hill district, New South Wales. *Records of the Australian Museum*, 1997, vol. 49, pp. 217–228.
- Chitaeva N.A., Miller A.D., Grosse Yu.I., Chistyakova N.I. Distribution features of iodine in the hypergenesis zone of the Gaisky copper-pyrite deposit. *Geochemistry International*, 1971, no. 6, pp. 696–709. In Rus.
- Tyutev Ya.M., Ankushev M.N., Blinov I.A. Mineralogicheskie osobennosti mednogo mestorozhdeniya Tash-Kazgan (Respublika Bashkortostan) [Mineralogical peculiarities of the Tash Kazgan deposit, Republic of Bashkortostan]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2015* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2015], Miass, IMin UB RAS, 2015. pp. 119–124.
- Blinov I.A. Native metals, selenides, halogenides and brown ore associated minerals from the Amur and Verkhnyaya Arsha deposits (Southern Urals). *Litosfera*, 2015, no. 1, pp. 65–74. In Rus.
- Zaykov V.V., Kotlyarov V.A., Kuzhuget R.V., Yuminov A.M. Iodidnaya mineralizatsiya v rodingitakh drevnego rudnika Vorovskaya Yama, Yuzhny Ural [Iodide mineralization in rodingites of the Vorovskaya Yama ancient mine, South Urals]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2015* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2015]. Miass, IMin UB RAS, 2015. pp. 208–211.
- Biryukov K.E. Mineralogicheskie osobennosti rudoproyavleny zolota v yugo-vostochnoy chasti Barun-Khurayskoy kotloviny (yugo-zapadnaya Mongoliya) [Mineralogical features of gold occurrences of the southeast part of the Barun-Khuray depression, southwest Mongolia]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2016* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2016]. Miass, IMin UB RAS, 2016. pp. 206–210.
- Pekov I.V., Lykova I.S., Bryzgalov I.A., Ksenofontov D.A., Zyrjanova L.A., Litvinov N.D. Uniquely high-grade iodide mineralization in the oxidation zone of the Rubtsovskoe base-metal deposit, Northwest Altai, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 53, no. 8, pp. 683–698.
- Berzin N.A., Kungurtsev L.V. Geodynamic interpretation of Altai-Sayan geological complexes. *Russian Geology and Geophysics*, 1996, vol. 37 (1), pp. 56–73.

10. Mongush A.A. Bazaltovye komplekсы Sayano-Tuvinskoy preddugovoy zony: geologicheskoe polozhenie, geokhimiya, geodinamika [Basaltic complexes of the Sayan-Tuva forearc: geological setting, geochemistry, geodynamics]. *Sostoyanie i osvoenie prirodnnykh resursov Tuvy i sopredelnykh regionov Tsentralnoy Azii. Ekologo-ekonomicheskie problemy prirodopolzovaniya* [State and Exploration of Natural Resources of Tuva and Adjacent regions of Central Asia. Ecological and Economic problems of natural resources use]. Kyzyl, TuvIENR SB RAS Publ., 2016. No. 14, pp. 74–94.
11. Kolosov A.S., Pustynnikov A.I., Zaykov V.V., Zaykova E.V. Stroenie, geokhimicheskaya kharakteristika solenosnykh otlozheniy v Tuvinskom bassejne [The structure, geochemical characteristics of saliferous sediments in the Tuva basin]. *Problemy solenakopleniya* [Problems of salt accumulation]. Novosibirsk, IGI SB AS USSR, 1977. Vol. 2, pp. 183–197.
12. Kuzhuget R.V., Zaikov V.V., Lebedeva V.I., Mongush A.A. Gold mineralization of the Khaak-Sair gold–quartz ore occurrence in listwänites (western Tuva). *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, pp. 1332–1348.
13. Korobeinikov, A.F., Zotov I.A. *Zakonomernosti formirovaniya mestorozhdeniy zoloto-skarnovoy formatsii* [Laws of deposit formation of gold-skarn formation]. Tomsk, TPU Publ., 2006. 234 p.
14. Gaskov I.V. New data on the correlation of skarn and gold mineralization at the Tardan deposit (northeastern Tuva). *Russian Geology and Geophysics*, 2008, vol. 49, no. 12, pp. 923–931.
15. Rudnev S.N., Kiseleva V.Y., Babin G.A., Kovach V.P., Serov P.A. Vendian-Early Paleozoic granitoid magmatism in Eastern Tuva. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 9, pp. 1232–1255.
16. *Stratigraficheskiy kodeks Rossii* [Stratigraphic Code of Russia]. Third edition. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2006. 96 p.
17. Kilchichakov K.M., Tokunov V.F., Plekhanov A.I. *Rezultaty otsenki Tardanskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya i poiskov zolota v bassejne r. Bay-Syut* [Evaluation results of the Tardan gold deposit and the search for gold in the Bai-Syut river basin]. Kyzyl, TGRE Publ., 1966. 150 p.
18. Kuzhuget R.V. Iodide and bromide mineralization in oxidized ores of the Khaak-sair gold-ore deposit, western Tuva. *Proceedings of Russian Mineralogical*, 2014, vol. 143, no. 2, pp. 64–80. In Rus.
19. Lurie Yu.Yu. *Spravochnik po analiticheskoy khimii* [Handbook of Analytical Chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 448 p.
20. Chateau H. Proprietes thermodynamiques des cristaux mixtes d'halogenures d'argent [Thermodynamic properties of mixed crystals of silver halide]. *Proceedings of the Academy of sciences*. Paris, 1959, vol. 248, pp. 1950–1952. In Fr.
21. Chateau H. Proprietes thermodynamiques des cristaux mixtes d'halogenures d'argent [Thermodynamic properties of mixed crystals of silver halide]. *Proceedings of the Academy of sciences*. Paris, 1959, vol. 249, pp. 1638–1640, 1887–1889. In Fr.
22. Rabenok E.V. *Issledovanie nachalnykh stadiy fotoliza galogenidov serebra: elementarnye reaktsii fotogenerirovannykh nositeley toka*. Avtoreferat Kand. nauk [Initial Stages of Silver Halide Photolysis: Elementary Reactions between Photogenerated Carriers. Cand. Diss. Abstract]. Chernogolovka, 2005. 18 p.
23. Wilman H. The structure and orientation of silver halides. *Proceedings of the Physical Society*, 1940, vol. 52, pp. 323–347.
24. Yakhontova L.K., Zvereva V.P. *Osnovy mineralogii gipergeneza* [Basic mineralogy of hypergenesis]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2000. 331 p.

*Received: 11 May 2018.*

#### Information about the authors

**Renat V. Kuzhuget**, Cand. Sc., senior researcher, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

**Andrey A. Mongush**, Cand. Sc., lead researcher, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

**Sholban N. Oorzhak**, engineer, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

**Yuri V. Butanaev**, junior researcher, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

УДК 621.316.722.076.12; 504.05; 504

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Палау Илиана Антониа Гонсалес<sup>1</sup>,  
iliana.gonzalez@utc.edu.ec

Рамирез Секундино Марреро<sup>1</sup>,  
secundino.marrero@utc.edu.ec

Балабанов Михаил Станиславович<sup>2</sup>,  
balabanovms@mail.ru

Лобайна Аристидес Легра<sup>3</sup>,  
alegra@ismm.edu.cu

Мендиольа Даниель Мендиольа<sup>3</sup>,  
dmendiola@ismm.edu.cu

<sup>1</sup> Технический университет Котопакси,  
Эквадор, 050150, г. Котопакси, пр. Симона Родригеса, пр. Латакунга, б/н.

<sup>2</sup> Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

<sup>3</sup> Высший металлургический институт Моа, им. доктора Антонио Нуньес Хименес,  
Куба, 644050, г. Моа, Ольгин, пр. Каликсто Гарсия, 15.

**Актуальность.** В настоящее время в России создается интеллектуальная энергосистема с активно-адаптивной сетью – ИЭС ААС (за рубежом – Smart Grid). Базовым кластером архитектуры Smart Grid являются FACTS-устройства, сложность проектирования которых заключается в многокритериальности задачи. Оптимизация реактивной мощности представляет собой подзадачу оптимального потока мощности, в ходе решения которой определяется правильная настройка переменных реактивной мощности, таких как величины: напряжения, положений ступеней трансформаторов и характеристик устройств компенсации реактивной мощности. Решение задач оптимизации реактивной мощности, которые не являются линейными и дискретными, при использовании традиционных методов оптимизации сопровождается определенными трудностями, связанными с обработкой данных разного характера. Поэтому в настоящее время ведется поиск адекватного способа многообъектной обработки данных, например, с помощью алгоритма эволюционной оптимизации.

**Целью** исследования является разработка математического метода поиска оптимального решения из всего множества возможных решений, которое было бы лучше других хотя бы для одной из поставленных целей. При этом модель должна выполнять расчет потока мощности на основной и гармонической частоте для конкретного режима, при большом количестве ограничений.

**Методы.** Моделирование для внедрения устройств FACTS было выполнено в программе DYSCSE. Использовался алгоритм случайного поиска, который является модификацией метода интеграции переменных. Он позволяет решать проблемы сходимости при применении к очень большому массиву данных. В качестве примера и основы для разработки обсуждаемого метода был принят метод расчета и результаты исследования Jose Arzola Ruiz. В данном исследовании оптимизации используется целевая функция метода Чебышева, позволяющая уменьшить взвешенное расстояние от расчетного до желаемого значения каждого индикатора, включенного в целевую функцию. Естественно, что популяция с высоким уровнем исходных данных представляет лучшее решение задачи и при определенных условиях может представлять даже единственно оптимальное решение. Из первоначального поколения потенциальных решений для процесса, который является повторяющимся, вычислялись новые поколения решений, каждый раз с лучшими характеристиками, наиболее близкими к оптимальному решению задачи. Критерии остановки расчета представляли собой смешанное условие – разницу между худшим и лучшим решениями. Каждый эксперимент выполнялся с начальной популяцией, которая имела случайный характер. Исследования показали, что при заданном диапазоне изменения любого параметра, применяемого для решения поставленной задачи компенсации реактивной мощности в электрических сетях, достаточно количество сочетаний ограничить 7 % от всех возможных его значений. В результате реализации алгоритма получается множество решений с минимальными значениями целевой функции. В ходе расчета задача эксперта заключается в выборе рабочего варианта.

**Результаты.** Применение эволюционных методов в оптимизации позволяет одновременно рассматривать несколько независимых решений, создавая набор так называемых оптимально эффективных решений, или решений Pareto, которые удовлетворяют целям исследования. Во всех экспериментах были получены эффективные решения при оценке численности популяции около 10 % от всех возможных решений. Полученные решения можно считать эффективными в сравнении с расчетами, которые можно было бы произвести при наличии абсолютно всех необходимых исходных данных и выполненных полномасштабных вычислений.

**Выводы.** Для достижения энергоэффективности в промышленных сетях требуются новые методы оптимизации, позволяющие улучшить технико-экономические показатели сетей. Использование метода Чебышева позволяет уменьшить взвешенное расстояние от расчетного до желаемого значения каждого индикатора, включенного в целевую функцию. Теоретические расчеты прошли апробацию в ходе практических исследований. Доказано, что для значений, близких к 10 % от спектра всех возможных решений, можно получить решения, которые удовлетворяют требованиям поиска эффективных решений. Разработанный алгоритм значительно сокращает время вычислений при гарантии сходимости результатов и совпадает с рекомендациями, предложенными Arzola.

### Ключевые слова:

Многоцелевая оптимизация, компенсация реактивной мощности, FACTS-устройства, Smart Grid, эволюционные алгоритмы, генетические алгоритмы, расстояние Чебышева, гармоника.

## Введение

Компенсация реактивной мощности с математической точки зрения часто рассматривается как простая задача оптимизации с ограничениями. В этом случае поиск решения включает комбинации нескольких факторов, таких как потери электроэнергии при передаче (как следствие потери инвестиций), отклонения напряжения, снижение надежности. Оптимизация реактивной мощности представляет собой подзадачу оптимального потока мощности (при определенных ограничениях системы) [1–3], в ходе решения которой определяется правильная настройка переменных реактивной мощности, таких как величины напряжения, положения ступеней трансформаторов и характеристики устройств компенсации реактивной мощности.

В настоящее время решение проблем оптимизации реактивной мощности сфокусировано на традиционных методах оптимизации, включая метод градиента [4], квадратичного программирования [4], нелинейного/линейного программирования [5] и метод внутренней точки [4]. Кроме того, ведется поиск оптимальной многообъектной обработки данных с помощью алгоритма эволюционной оптимизации [5, 6]. Решение задач оптимизации реактивной мощности, которые не являются линейными и дискретными, при обработке данных разного характера с использованием перечисленных методов сопровождаются определенными трудностями.

Генетические алгоритмы (ГА) (the Genetic Algorithms – GA) [4] являются наиболее используемым эвристическим методом в оптимизации реактивной мощности. Цель ГА – найти лучшее решение в спектре возможных. Под «лучшими решениями» мы понимаем те, которые позволяют получать значения, наиболее близкие к численному значению для конкретной функции [7, 8]. Традиционные алгоритмы оптимизации позволяют получать приемлемое решение, однако применение эволюционных методов в оптимизации позволяет одновременно рассматривать несколько независимых решений, создавая набор так называемых оптимально эффективных решений, или решений Pareto [9], которые удовлетворяют целям исследования.

Трудности, возникающие в решениях, полученных с использованием метода оптимизации ГА, связаны с характером функциональной пригодности, формой кодирующих решений и разнообразием параметров. Чтобы преодолеть эти недостатки, были разработаны другие эвристические методы, которые поддерживают некоторые общие характеристики с генетическими алгоритмами, например, способ, продемонстрированный Jose Arzola Ruiz [4] на основе метода интеграций переменных (МИП) (the Method of Integration of Variables – MIV). Это обобщение генетических алгоритмов, где параметры не обязательно обновляются с использованием кода для описания возможных ре-

шений, но любой из них может быть пересчитан по указанию оператора.

Алгоритм случайного поиска (АСП) (the Conditional Random Search algorithm – CRS) [10] является модификацией МИП и позволяет решать проблемы сходимости при применении к очень большому массиву данных, в частности:

- 1) вести поиск решений подинтервалами (рис. 3, 4), увеличивать разнообразие исходной информации и улучшать качество решений во всем диапазоне;
- 2) вести поиск эффективных решений вблизи ранее рассчитанного решения для улучшения характеристик уже полученных решений;
- 3) вести поиск подходящих выборок решений на основе лучших характеристик уже рассчитанной совокупности, выбирать субпопуляцию, содержащую значения с благоприятными сегментами кода, которые могут значительно ускорить схождение метода.

## Компенсация реактивной энергии как многокритериальная система принятия решений

Описание компенсации реактивной мощности как процесса принятия решений приводит к внешнему анализу, который должен быть реализован на базе выбора координационных переменных, входных данных, технико-экономических показателей [2].

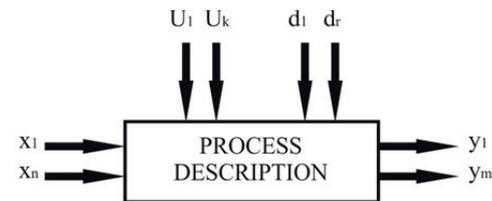


Рис. 1. Информационная классификация внешнего анализа  
Fig. 1. Information classification of external analysis

На рис. 1 параметры  $U_1...U_k, d_1...d_r$  – это независимые воздействия на систему. В качестве  $U_1...U_k$  принимаются данные по нагрузке в сети, а  $d_1...d_r$  – конфигурация схемы электроснабжения с параметрами кабельных и воздушных линий электропередачи.

$x_1...x_n$  – параметры технических устройств, подлежащие изменению в процессе исследований. Например, параметры подключения:  $x_1$  – трансформаторы;  $x_2$  – конденсаторы;  $x_3$  – фильтры;  $x_4$  – синхронные двигатели с возбуждением и т. д.

$y_1...y_m$  – технические и экономические показатели, которые могут характеризоваться как:  $y_1$  – напряжение в узловых точках сети;  $y_2$  – коэффициент мощности;  $y_3$  – суммарные гармонические искажения;  $y_4$  – общие потери энергии в сети;  $y_5$  – экономическая переменная через чистую приведенную стоимость и т. д.

Чтобы получить необходимые индикаторы, нужны соответствующие методы моделирования. Характер используемого метода позволяет вклю-

чать или даже исключать все технические и экономические показатели в соответствии с характеристиками сетей [11, 12].

В целом синтез системы для принятия решений включает в себя разработку или подбор необходимых инструментов для осуществления:

- 1) выбора технико-экономических показателей для заданных значений переменных решений;
- 2) построения вариантов решений, близких к компромиссу между выбранными индикаторами;
- 3) построения графических параметров, которые позволяют увидеть особенности каждого варианта решения;
- 4) получения дополнительных опций моделирования, позволяющих более точно изучить особенности каждого генерируемого варианта.

Применение нетрадиционных методов оптимизации позволяет проводить многокритериальный анализ через объектную функцию (Fitness), не прибегая к использованию производных или градиентов в процессе поиска решений, близких к оптимальному, а также сокращает время обработки вычислений, не выполняя исчерпывающий поиск [1, 13–15].

#### Математическая постановка задачи

Как показано в работах [16, 12], для определения области эффективных решений можно воспользоваться методом Чебышева, который позволяет путем перебора минимизировать локальную целевую функцию по каждому критерию отдельно. Формально минимизация выглядит следующим образом.

$$\max_i \left\{ \omega_i \frac{|y_{c_i} - y_{d_i}|}{|y_{d_i}|} \right\}, \quad (1)$$

где  $\omega_i$  – весовое соотношение, которое дает большее или меньшее значение между  $i$ -ми целями;  $y_{c_i}$  – желаемые значения;  $y_{d_i}$  – рассчитанные значения разных целей  $y$ .

Определив эффективное решение для одного показателя (используя уравнение 1), можно перейти к определению эффективных решений сразу для нескольких показателей на множестве различных комбинаций значений ( $\omega_i$ ), приводящих к созданию эффективного пространства решений. Учитывая преимущества, о которых говорилось ранее, предполагается в качестве частичной целевой функции (ЦФ) (the Objective Function – OF) на каждом узле  $i=1$  в системе воспользоваться следующим выражением

$$Z_i = \max_j \left\{ w_{i,j} \left| \frac{Zc_{i,j} - Zd_{i,j}}{Zd_{i,j}} \right| \right\}, \quad (2)$$

где  $Z_i$  – значение частичной функции узла  $i$  в диапазоне  $0 \leq Z_i \leq 1$ ;  $w_{i,j}$  – коэффициент веса в узле  $i$  для каждого индикатора  $j$ ,  $0 \leq w_{i,j} \leq 1$ ;  $Zc_{i,j}$ ,  $Zd_{i,j}$  – рассчитанное и желаемое значение в узле  $i$  для объекта или индикатора  $j$ .

Весовые коэффициенты играют одну из важнейших ролей в выборе эффективных решений и должны отвечать следующим условиям:  $0 \leq w_{i,j} \leq 1$ ;  $\sum w_{i,j} = 1$ . Коэффициент  $w_{i,j}$  может принимать разные значения в зависимости от анализируемой цели, но когда он принимает значение нуля, то он сводит на нет поиск.

В выражениях (1) и (2)  $y_{c_i}$  и  $Zd_{i,j}$ , т. е. желаемые значения показателей, должны быть определены исходя из требований нормативных документов и рекомендаций, вводимых эксплуатирующей организацией. Значения этих ограничений используется в процессе поиска для каждой ступени итерационного расчета [10, 17]. Тогда для каждого  $i$ -го узла и каждого  $j$ -го показателя целевая функция будет иметь вид:

$$Z_{ij} = w_{ij} \left| \frac{Vc_{ij} - Vd_{ij}}{Vd_{ij}} \right|, \quad (3)$$

Значение  $Z_{ij}$  всегда будет от 0 до 1.

Для случая трех показателей в узлах электрической сети целевая функция примет вид:

$$Z_{iU} = \lambda_1 Z_{i1} + \lambda_2 Z_{i2} + \lambda_3 Z_{i3}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент веса для  $i$ -го узла;  $Z_{i1}$  – результат  $Z$  в узле для объективного ( $i$ ) с наихудшим значением. Уравнение включает в себя только те цели, которые будут проанализированы на уровне узла:  $Z_{i1}$  (напряжение),  $Z_{i2}$  (коэффициент мощности) и  $Z_{i3}$  (гармонические искажения напряжения).

После определения, в зависимости от заданного ограничения, значений  $Z_{iU}$  формируется обобщенная целевая функция, включающая дополнительные составляющие, характеризующие работу всей сети целиком. Допустим, такими показателями являются суммарные потери мощности в сети и экономический показатель, которым соответствуют локальные целевые функции  $Z_4$  и  $Z_5$ . Тогда обобщенная целевая функция будет иметь вид:

$$Z_T = \lambda_1 Z_1 + \lambda_2 Z_2 + \lambda_3 Z_3 + \lambda_4 Z_4 + \lambda_5 Z_5, \quad (5)$$

где  $\lambda_1 - \lambda_5$  – константа веса для узлов  $i$  (диапазон от 0 до 1) соответствует типу узла и индикаторам, которые будут зависеть от важности каждого конкретного случая. Как объяснялось ранее, все значения регулируются между 0 и 1. Сумма весовых коэффициентов должна быть равна 1. Например, если необходимо выделить только экономический показатель, то в этом случае он будет учтен со значением, равным 1.

Математическая модель выполняет расчет потока нагрузки на основной и гармонической частоте, для конкретного исследования. Чтобы обеспечить приемлемый сектор решений, необходимо принять во внимание перечень ограничений, которые даются:

- 1) на ёмкостную реактивную мощность узла, которая должна находиться в допустимых пределах;
- 2) коэффициент мощности вводного узла;
- 3) коэффициент мощности узлов потребителей;
- 4) чистую приведенную стоимость (ЧПС).

### Внедрение метода оптимизации

**Метод переменных интеграций** [9]. Структура популяции определяется набором переменных решений, участвующих в процессе оптимизации. Для получения возможных решений существует механизм кодирования, который позволяет присваивать каждому отдельному параметру единое значение, которое отражает его качество как решение.

Естественно, что популяция с высоким уровнем исходных данных представляет лучшее решение проблемы и при определенных условиях может представлять даже единственно оптимальное решение [18, 19].

Из первоначального поколения потенциальных решений для процесса, который является повторяющимся, выполняются новые поколения решений с лучшими характеристиками, которые каждый раз приближают задачу к оптимальному ее решению [20].

Выбор критериев окончания расчета, в общем случае, обусловлен особенностями каждого конкретного приложения. Во внимание принимаются следующие критерии:

- 1) количество итераций без изменений в популяции;
- 2) разница между лучшим и худшим решением, уступающим заранее установленному значению в популяции;
- 3) предопределенное количество вариантов сгенерированных решений;
- 4) смешанные условия.

Алгоритм МПИ показан на рис. 2.

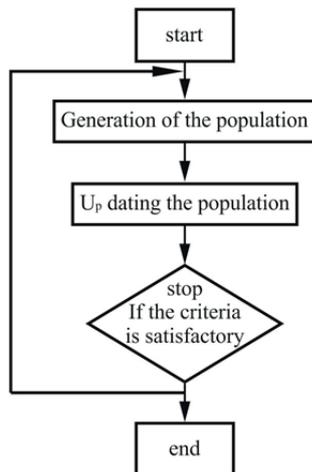


Рис. 2. Алгоритм метода интеграции переменных

Fig. 2. Algorithm of variables integration method

**Метод случайного условного поиска (МСУП)** (the Random Conditional Search – RCS) следует основным идеям метода МИП, предложенного Arzola [4] (рис. 2). Этот метод состоит из серии алгоритмов, с помощью которых осуществляется поиск начальной популяции, улучшение начальной популяции и выборочное сокращение популяции.

**Алгоритм поиска первоначальной совокупности (ПС)** (the Initial Population – IP) состоит из множества  $K$  элементов, назначенных исследователем [21]. Для каждой итерации расчета наилучшее решение включено в популяцию, и эти расчеты повторяются до тех пор, пока размер популяции не совпадает с первоначальным.

Существует два шага получения ПС, предполагая, что  $T$  представляет собой совокупность всех возможных решений системы:

- 1) возьмите  $k$  случайных чисел между 1 и  $T$ ;
- 2) разделите интервал от 1 до  $T$  на  $K$  подинтервалов и получите решение ПС в каждом промежуточном интервале.

**Первоначальное улучшение численности популяции.** После того как ПС имеет фиксированное значение, производится его обновление, путем сравнения полученных решений в целевой функции. Выбирается лучшее из решений, то есть то, которое имеет меньшее значение  $Z$ , и это новое решение сравнивается с уже рассчитанным наихудшим решением популяции. Определяется возможность замены. В тот момент, когда достигается точность  $\delta$ , процесс генерации случайных значений популяции перезапускается.

Для каждой итерации генерируются два кода переменных в интервале  $[A, B]$  (рис. 3). Между  $A$  и  $B$  три подинтервала  $[A, X_1]$ ,  $[X_1, X_2]$  и  $[X_2, B]$ . Исключается интервал, содержащий более высокое значение  $Z$ , что является наихудшим результатом  $[X_2, B]$  (рис. 3). Затем в пределах полученного интервала  $[A, X_2]$  генерируются два других случайных значения. Этот процесс повторяется до тех пор, пока на каждую стадию добавляется решение с более низким значением  $Z$ . При вычислении меньшего значения  $Z$  оно заменяет наихудшее решение, которое уже было найдено на предыдущих этапах.

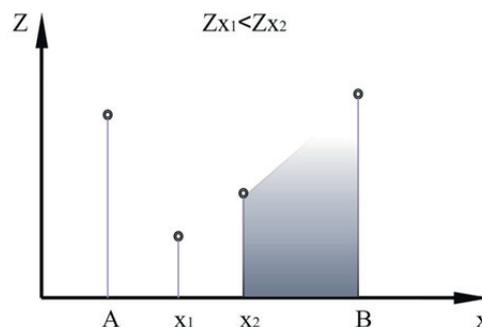


Рис. 3. Первый шаг для начального поиска популяции в интервале  $[A, B]$ , исключая интервал  $[X_2, B]$

Fig. 3. First step for population initial search in the interval  $[A, B]$ , eliminating the interval  $[X_2, B]$

Существенным моментом при реализации представленного алгоритма является определение количества изменения параметра  $X_n$  при достижении значения  $Z_{\max}$ . Для разветвленной электрической сети решение на основе метода Чебышева может содержать сотни тысяч вариантов решений.

Уменьшить количество расчетных точек и сократить время расчета позволяет метаэвристический метод. Алгоритм нацелен на поиск решений с уменьшающимися значениями  $Z$ , что означает сходимость алгоритма. Для исключения возможности появления значений меньших, чем рассчитанный  $Z_{x_1}$ , были реализованы возможности усечения в основном алгоритме [22].

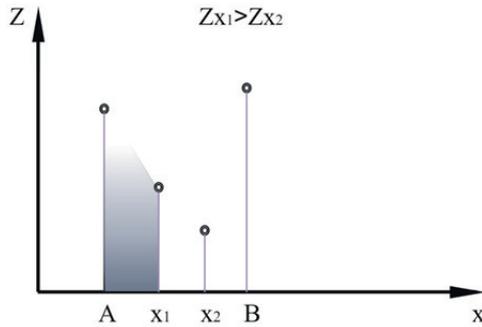


Рис. 4. Второй шаг для начального поиска популяции в  $[A, X_1]$

Fig. 4. Second step for population initial searching in the  $[A, X_1]$

Исследования показали, что при заданном диапазоне изменения любого параметра, применяемого для решения поставленной задачи компенсации реактивной мощности в электрических сетях, достаточно его изменение ограничить 7 % от всех возможных его значений. Такое утверждение следует из анализа зависимости, представленной на рис. 5. График был получен из нескольких экспериментов, в которых отражается конвергенция (прямая линия от 7 % расчета всей совокупности и далее), поэтому делается вывод, что из 10 % можно гарантированно получить хорошие решения или решения, близкие к оптимальным.

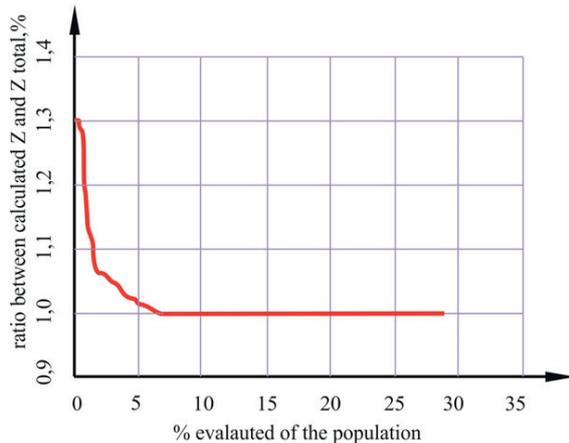


Рис. 5. Среднее соотношение рассчитанных  $Z$  и процентов от общей популяции значений

Fig. 5. Average ratio of calculated  $Z$  and percent of population evaluated

#### Кодирование переменных полученных решений

Переменные решения могут принимать разные конфигурации, определяемые как  $(x)$ . Исследова-

ние предполагало, что  $(x)$  является строковым символом, где каждый символ представляет собой трансформатор, батарею конденсаторов или фильтр в схеме, и каждое возможное значение  $(x)$  зависит от определения анализируемого элемента.

Например, электрическая схема состоит из: трансформатора ( $T$ ) с двумя выводами 1 и 2; конденсаторной батареи ( $C$ ) с двумя переключаемыми секциями 1 и 2; фильтра ( $F$ ) с двумя состояниями (включен или выключен). Тогда число независимых комбинаций (ЧНК) конфигураций, принятых этими переменными решениями, было бы:

$$\text{ЧНК} = 2 * 3 * 2 = 12.$$

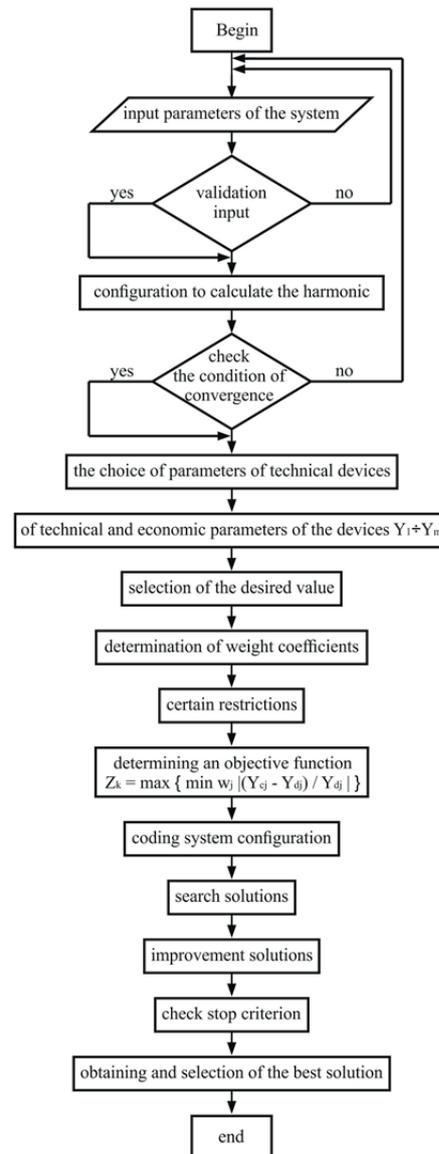


Рис. 6. Общий алгоритм достижения эффективных решений

Fig. 6. General algorithm for achieving efficient solutions

Необходимо отметить, что предлагаемое кодирование является десятичным, то есть каждая цифра кода принимает десятичные значения. Следовательно, необходим специальный алгоритм для

реализации кодирования в двух функциях, которые представляют значения  $X$ . С помощью этих двух функций получается код ( $X$ ), гарантирующий однозначным образом кодификацию для каждого элемента электрической системы – трансформаторов, фильтров и банок конденсаторов.

**Критерии остановки и проверки алгоритма оптимизации.** Критерии остановки, используемые при оптимизации, представляют собой смешанное условие, в котором вычисляется ряд кодов решений без изменений в составе популяции. Разница между вычисленными значениями  $Z$  в целевой функции должна быть меньше заданного значения (худшее и лучшее решение) [23].

Каждый эксперимент выполняется с начальной популяцией, которая имеет случайный характер, получая приемлемые решения из 7 % оцениваемых (рис. 5, 6) [9]. Из чего можно сделать вывод, что для значений, близких к 10 % от спектра всех возможных решений, можно получить решения, которые гарантируют выполнение требований поиска эффективных решений, совпадающие с рекомендациями, предложенными Arzola [4]. В этих экспериментах стандарт качества, используемый для оценки решений, соответствует наилучшему решению, найденному в исчерпывающем поиске, представленном через  $Z_{\text{ext}}$ .

Результаты экспериментов по проверке сходимости алгоритма, показанного на рис. 5, были получены для системы, показанной на рис. 8. Системные данные для моделирования и полученные эффективные решения приведены в табл. 1, 2 соответственно.

С другой стороны, для больших систем поставленная задача представляет собой проблему: если одновременно оценивать разные индикаторы, то можно получить сомнительные решения. Поэтому удобно использовать эволюционные методы, которые позволяют получать решения, близкие к эффективным значениям, а следовательно позволяют оценить во всей сложности такую систему, как электрическая схема [24].

#### Проверка сходимости

В табл. 1 показана активная и реактивная мощность, согласно схеме на рис. 7.

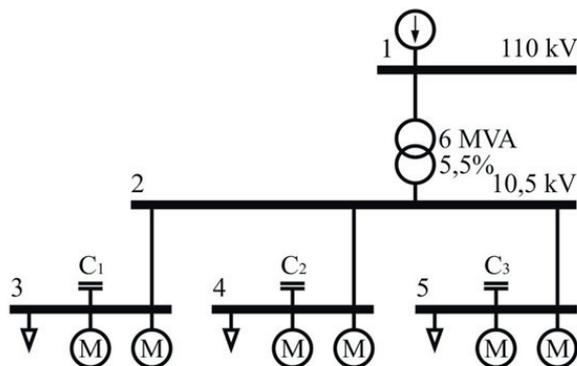


Рис. 7. Энергетическая система для оценки сходимости метода

Fig. 7. Power system to evaluate the convergence of the method

Таблица 1.  $Q_c$  и нагрузки, установленные в системе на рис. 8 до оптимизации

Table 1.  $Q_c$  and loads installed in the system of Fig. 8 before optimization

Узлы Nodes	Активная мощность, кВт Active power, kW	Реактивная мощность, кВАр Reactive power, kVAr	Емкостная мощность, $Q_c$ , кВАр Capacitive Power, $Q_c$ , kVAr
3	1053	390	450
4	81	34	34
5	2050	874	460

Результаты поиска эффективных решений представлены в табл. 2. Как видно, значение  $Z$  является минимальным в варианте № 1, что является лучшим решением с точки зрения потерь энергии. Результаты расчетов по известным методам и методу, разработанному авторами, совпали. Проверка сходимости результатов успешно пройдена [25].

Таблица 2. Значения  $\cos\varphi$  и потери для трех эффективных решений, найденных при оптимизации

Table 2. Values of  $\cos\varphi$  and losses for three of the efficient solutions found during optimization

Вычисленные значения $Z$ Calculated values $Z$	$\cos\varphi$			$Q_c$ (кВАр/kVAr)		
	4	5	6	$C_1$	$C_2$	$C_3$
$0,736 \cdot 10^{-2}$	0,96	0,94	0,94	472	27	375
$0,762 \cdot 10^{-2}$	0,95	0,95	0,94	450	34	375
$0,771 \cdot 10^{-2}$	0,95	0,95	0,95	450	34	469
$0,923 \cdot 10^{-2}$	0,93	0,92	0,93	225	17	234

#### Пример исследования

На рис. 8 показана модель предлагаемого алгоритма МСУП.

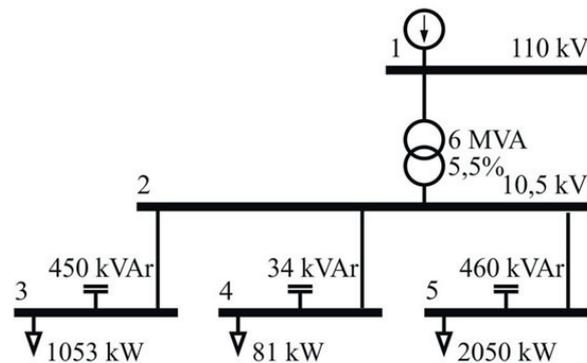


Рис. 8. Электрическая схема

Fig. 8. Electric diagram

В табл. 3, 4 представлены результаты трех решений, согласно рис. 8, где решение 1 имеет наибольшее значение, решение 2 – среднее значение, а решение 3 – наименьшее значение.

Изменение коэффициента мощности при включении различных ступеней конденсаторных установок представлено в табл. 2.

В табл. 5, 6 показаны четыре оптимальных решения (так называемые решения Pareto) из расче-

та от 7 до 10 % от общей численности популяции. Предложенный алгоритм значительно сокращает время вычислений при гарантии сходимости.

**Таблица 3.** Значение потерь и  $\cos\varphi$  для разных решений  
**Table 3.** Value of losses and  $\cos\varphi$  for different solutions

Решение/Solution	Расчетное значение (Z) в целевой функции Calculated value of (Z) in the objective function	$\Delta E$ (кВтч) (kWh)	$\cos\varphi$		
			Узел/Node		
			3	4	5
1	0,025	298015	0,90	0,76	0,92
2	0,019	283824	0,94	0,89	0,92
3	0,009	276728	0,93	0,92	0,93

**Таблица 4.** Положение ступени трансформатора и  $Q_c$   
**Table 4.** Transformers tap position and  $Q_c$

Решение/Solution	Расчетное значение (Z) в целевой функции Calculated value of (Z) in the objective function	Ступень трансформатора и значение $Q_c$ , кВАр Transformer position and value of $Q_c$ in kVAr			
		T	C1	C2	C3
точка 1 point 1	0,025	2	472	17	234
точка 2 point 2	0,019	3	472	17	469
точка 3 point 3	0,009	6	225	17	234

### Выводы

Уменьшение гармонических искажений и компенсацию реактивной мощности можно сформулировать как задачу принятия решений по нескольким критериям в дискретных переменных с различными связанными с ними техническими и экономическими показателями. Эффективность решений достигается использованием значений Чебышева целевой функции.

Характер сформулированной задачи для компенсации реактивной мощности позволяет использовать процедуры для генерации решений, основанных на эволюции кодов, то есть любой из соответствующих алгоритмов метода интеграции переменных. Алгоритм условного случайного поиска

быстро и эффективно генерирует ряд коррелированных решений с задачей оптимизации, а также облегчает оценку нескольких корректирующих элементов вариантов подключения в сети, чтобы облегчить работу по принятию решения.

**Таблица 5.** Расчетные значения четырех выбранных оптимальных решений  
**Table 5.** Calculated values of four of the selected optimal solutions

Решение/Solution	Расчетные значения (Z) Calculated values of (Z)	$\Delta E$ (кВтч) (kWh)	$\cos\varphi$ в узлах нагрузки $\cos\varphi$ in the load nodes		
			4	5	6
1	0,007	272471	0,96	0,94	0,94
2	0,007	274599	0,95	0,95	0,94
3	0,007	270342	0,95	0,95	0,95
4	0,009	276728	0,93	0,92	0,93

**Таблица 6.** Изменение ступени трансформаторов и мощности конденсаторов для оптимальных решений  
**Table 6.** Change in transformer taps and capacitive reactive power for optimal solutions

Решение/Solution	Ступень трансформатора Transformer taps		$Q_c$ в конденсаторах, кВАр $Q_c$ in the capacitors in kVAr		
	T1		C1	C2	C3
1	6		472	27	375
2	6		450	34	375
3	6		450	34	469
4	6		225	17	234

Для лучшего выбора зарезервированных индикаторов можно использовать значения в целевой функции. В случае большой размерности системы значения должны определяться с помощью экспериментальных данных (учитывая значимость анализируемого индикатора) чтобы уменьшить количество коэффициентов значений объективной функции.

Во всех экспериментах были получены эффективные решения при оценке поиска первоначальной совокупности около 10 % от всех возможных решений. Полученные решения можно считать эффективными в сравнении с расчетами, когда известны абсолютно все необходимые исходные данные и выполнены полномасштабные расчеты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Optimal power flow solutions using differential evolution algorithm integrated with effective constraint handling techniques / P.P. Biswas, P.N. Suganthana, R. Mallipeddi, G.A.J. Amaratunga // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – February 2018. – V. 68. – P. 81–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.10.019>
- Optimal reconfiguration and capacitor placement for power loss reduction of distribution system using improved binary particle swarm optimization / M. Sedighizade, M. Dakhem, M. Sarvi, H.H. Kordkheili // International Journal of Energy and Environmental Engineering. – April 2014. – V. 5. – № 1. – P. 1–11. DOI: [10.1007/s40095-014-0073-9](https://doi.org/10.1007/s40095-014-0073-9)
- A controlled device for reactive-power compensation for electrified alternating-current / A.N. Marikin, V.A. Miroshchenko,

- V.V. Nikitin, A.V. Tret'yakov // Russian Electrical Engineering. – October 2017. – V. 88. – № 10. – P. 639–642. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371217100091>
- Jose A.R. Sistemas de ingenieria. – La Habana: Editorial Félix Varela, 2000. – 482 p.
- Iliana G.P. Optimization of reactive power compensation in industrial power supply networks using a multi criteria algorithm // Energy. – 2006. – V. XXVII. – № 2. – P. 40–44.
- Alejandro C., Demetrio R.L., Juan M. Metaheuristic optimization applied to the calculation of optimum load flow in electric power grids with mixed type control variables // Engineering Journal UC. – December 2013. – V. 20. – № 3. – P. 71–78. DOI: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70732641009>
- Iliana G.P., Secundino M.R. Reactive power compensation by evolutionary techniques // The VII International Conference for the

- Exploitation of Mineral Resources «CINAREM 2013». – Moa, province of Holguin, Cuba, November 19–21, 2013. – P. 1–7.
8. Yun Wei Li, Jinwei He. Distribution system harmonic compensation methods: an Overview of DG-Interfacing inverters // IEEE. Industrial Electronics Magazine. – November 2014. – № 8. – Iss. 4. – P. 18–31. DOI: 10.1109/IME.2013.2295421
  9. Шклярский Я.Э., Гонсалес Палау И. Оптимизация компенсации реактивной мощности в сложных электрических сетях // Записки Горного института. – 2011. – Т. 194. – С. 349–352.
  10. Metaheuristics based on the variables integration method applied to reactive power compensation in multi-objective optimization / G.P. Iliana, M.R. Secundino, L.L. Aristides, M.E. Daniel // Proc. of the International Conference on Applied Mathematics, Computational Science & Engineering (AMCSE 2015). – Crete, Greece, October 17–19 2015. – P. 207–212.
  11. Гонсалес Палау И. Выбор параметров экономически выгодной компенсации реактивной мощности // Записки Горного института. – 2011. – Т. 194. – С. 235–239.
  12. Utopian point based decomposition for multi-objective optimization problems with complicated Pareto fronts / Yutao Qi, Qingsai Zhanga, Xiaoliang Ma, Yining Quana, Qiguang Miaoa // Applied Soft Computing. – December 2017. – V. 61. – P. 844–859. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.08.036>
  13. Abd-Elazim S.M., Ali E.S. Synergy of particle swarm optimization and bacterial foraging for TCSC damping controller design // Journal of WSEAS Transactions on Power systems. – April 2013. – V. 8. – № 2. – P. 74–84.
  14. Ali E.S., Abd-Elazim S.M. Power system stability enhancement via bacteria foraging optimization algorithm // Arabian journal for Science and Engineering (AJSE). – March 2013. – V. 38. – № 3. – P. 599–611. DOI: 10.1007/s13369-012-0423-y
  15. Ali E.S., Abd-Elazim S.M. Optimal PSS design in a multimachine power system via bacteria foraging optimization algorithm // Journal of WSEAS Transactions on Power systems. – October 2013. – V. 8. – № 4. – P. 186–196.
  16. Applying distances between terms to both at and hierarchical data / J.A. Bedoya-Puerta, J. Hernandez-Orallo, C. Ferri, M.-J. Ramirez-Quintana // Proc. of AAIIP 2011. 4<sup>th</sup> International Workshop on Approaches and Applications of Inductive Programming. – Denmark, July 2011. – P. 1–16.
  17. Modeling of electric network regimes in the presence of harmonic distortion / P.I. Gonzalez, R.S. Marrero, L.A. Legra, S.A. Leon, M.X. Proano // Energy Technical Magazine. – 2017. – № 13. – P. 97–105.
  18. Barrico C., Antunes C.H., Pires D.F. Robustness analysis in evolutionary multi-objective optimization applied to VAR planning in electrical distribution networks // Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. EvoCOP 2009. Lecture Notes in Computer Science / Eds. C. Cotta, P. Cowling. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. – V. 5482. – P. 216–227. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-01009-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-01009-5_19)
  19. Muthukumar K., Jayalalitha S. Multiobjective hybrid evolutionary approach for optimal planning of shunt capacitors in radial distribution systems with load models // Ain Shams Eng J. – 2017. – P. 1–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.as-ej.2017.02.002>
  20. Vasconcellos D.B., Abril I.P., Martínez V.L. Reactive power compensation in unbalanced systems using genetic algorithms // Ingeniare. Chilean journal Engineering. – 2012. – V. 20. – № 3. – P. 284–292. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052012000300002>
  21. Secundino M.R., Iliana G.P., Aristides L.L. Convergence analysis of the variables integration method applied in multiobjective optimization in the reactive power compensation in the electric nets // DYNA 82 (190). – April 2015. – P. 160–165. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n190.43697>
  22. Sharaf A.M., Elgammal A. A novel discrete multiobjective particle swarm optimization (MOPSO) of optimal shunt power filter // IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. 2009. – P. 1–7. DOI: 10.1109/PSCE.2009.4839957
  23. Schweickardt G.A. Multiobjective metaheuristic FPSO- $\chi$ . An application to mid/long term expansion planning of an electric distribution system // Energetica. – 2009. – № 42. – P. 73–88. DOI: 10.15446/energetica
  24. Rueda V.M., Velazquez J.D., Franco C.J. Recent advances in load forecasting using nonlinear models // DYNA. – Medellin, Junio, 2011. – № 78 (167). – P. 36–43.
  25. Shklyarskiy E., Skamyin A.N. Compensation of the reactive power in the presence of higher voltage harmonics at coke plants // Coke and Chemistry. – 2016. – V. 59. – № 4. – P. 163–168. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068364X16040062>

Поступила 22.12.2017 г.

#### Информация об авторах

**Палау Илиана Антониа Гонсалес**, кандидат технических наук, профессор Технического университета Котопакси.

**Рамирез Секундино Марреро**, кандидат технических наук, декан кафедры электротехники Технического университета Котопакси.

**Балабанов М.С.**, аспирант кафедры электрической техники Омского государственного технического университета.

**Лобайна Аристидес Легра**, кандидат технических наук, доцент кафедры математики Высшего металлургического института Моа, им. доктора Антонио Нуньес Хименес.

**Мендиольа Даниель Мендиольа**, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники Высшего металлургического института Моа, им. доктора Антонио Нуньес Хименес.

UDC 621.316.722.076.12

## MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION IN REACTIVE POWER COMPENSATION

**Iliana Antonia G. Palau<sup>1</sup>,**  
iliana.gonzalez@utc.edu.ec

**Secundino M. Ramirez<sup>1</sup>,**  
secundino.marrero@utc.edu.ec

**Mikhail S. Balabanov<sup>2</sup>,**  
balabanovms@mail.ru

**Aristides L. Lobaina<sup>3</sup>,**  
alegra@ismm.edu.cu

**Daniel M. Ellis<sup>3</sup>,**  
dmendiola@ismm.edu.cu

<sup>1</sup> Cotopaxi Technical University,  
S/N, Simón Rodríguez Avenue, Latacunga, Cotopaxi, 050150, Ecuador.

<sup>2</sup> Omsk State Technical University,  
11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia.

<sup>3</sup> Higher Metallurgical Mining Institute of Moa, Dr. Antonio Nunez Jimenez,  
15, Calixto Garcia Avenue, Moa, Holguin, 83310, Cuba.

**Relevance.** Currently, Russia is creating an intelligent power system with an actively-adaptive network – IES AAS (abroad – Smart Grid). The basic Smart Grid group architecture is FACTS-devices; the complexity is the multi-criterion nature of the problem. Reactive power optimization is a secondary problem of the optimal power flow, when the setting of the correct reactive power variables, such as values of voltage, transformer position stages and reactive power characteristics of compensation devices, is determined. The solution for the problems to reactive power optimization, which are not linear and discrete, using traditional optimization methods is accompanied by certain difficulties associated with the processing of data that has different nature. Therefore, at the present, an adequate method of multi-object data processing is being searched, for example, using the evolutionary optimization algorithm

**The aim** of the research is to develop a mathematical method to find an optimal solution from the whole set of possible ones, which would be better than others for at least one objective. In this case, the model must perform a calculation of the power flux at the fundamental and harmonic frequency for a particular mode, with a large number of restrictions.

**Methods.** The simulation modeling of the FACTS device implementation was carried out in a program called DYCSSE. We used the random search algorithm, which is a variable integration method modification and allows solving convergence problems when it is applied to a very large data set. The calculation method and the results of the study of Arzola Ruiz Jose As were taken as an example and the basis for developing our method. The Chebyshev method was used in the objective function. This method allows reducing the weighted distance from the calculated value to the desired one of each indicator included in the objective function. It is obvious that a population with a high level of initial data represents the best solution to the problem and, under certain conditions, it can present even the only optimal solution. From the initial generation of potential solutions for the process that is repetitive, the new generations of solutions were derived, each time with better characteristics approaching the optimal solution of the problem. The criteria for stopping the calculation were a mixed condition – the difference between the worst and the best decisions. Each experiment was performed with the initial population that has a random character, obtaining acceptable solutions about 7 % according to the estimated value.

**Results.** The use of evolutionary methods in optimization allows simultaneous consideration of several independent solutions, creating a set of so-called optimally effective solution or Pareto solutions that satisfy the research objectives. In all the experiments, the effective solutions were obtained to estimate the population size about 10 % of all possible solutions. The obtained solutions can be considered effective in comparison with the calculations that could be performed with absolutely all required initial data and full-scale calculations performed.

**Conclusions.** To achieve energy efficiency in industrial networks, new optimization methods that improve the technical and economic performance of networks are required. The use of the Chebyshev method, which makes it possible to reduce the weighted distance from the calculated value to the desired one of each indicator included in the objective function, was tested obtaining satisfactory results in theoretical and practical studies. It is proved that for values close to 10 % of the spectrum of all possible solutions we can obtain solutions that satisfy the search for effective solutions, and that coincide with the recommendations proposed by Arzola. The developed algorithm significantly reduces the computation time, with results convergence guarantee.

### Key words:

Multi-objective optimization, reactive power compensation, FACTS-devices, Smart Grids, evolutionary algorithms, genetic algorithms, Chebycheff distance, harmonic.

## REFERENCES

- Biswas P.P., Suganthana P.N., Mallipeddi R., Amaratunga G.A.J. Optimal power flow solutions using differential evolution algorithm integrated with effective constraint handling techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, February 2018, vol. 68, pp. 81–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.10.019>
- Sedighzade M., Dakhem M., Sarvi M., Kordkheili H.H. Optimal reconfiguration and capacitor placement for power loss reduction of distribution system using improved binary particle swarm optimization. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, April 2014, vol. 5, no. 1, pp. 1–11. DOI: [10.1007/s40095-014-0073-9](https://doi.org/10.1007/s40095-014-0073-9)
- Marikin A.N., Miroshchenko V.A., Nikitin V.V., Tret'yakov A.V. A controlled device for reactive-power compensation for electrified alternating-current. *Russian Electrical Engineering*, October 2017, vol. 88, no. 10, pp. 639–642. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371217100091>
- Jose A.R. *Sistemas de ingeniería*. La Habana, Editorial Félix Varela, 2000. 482 p.
- Iliana G. P. Optimization of reactive power compensation in industrial power supply networks using a multi criteria algorithm. *Energy*, 2006, vol. XXVII, no. 2, pp. 40–44.
- Alejandro C., Demetrio R.L., Juan M. Metaheuristic optimization applied to the calculation of optimum load flow in electric power grids with mixed type control variables. *Engineering Journal UC*, December 2013, vol. 20, no. 3, pp. 71–78. DOI: <http://www.redalyc.org/artuculo.oa?id:70732641009>
- Iliana G.P., Secundino M.R. Reactive power compensation by evolutionary techniques. *The VII International Conference for the Exploitation of Mineral Resources «CINAREM 2013»*. Moa, province of Holguín, Cuba, November 19–21, 2013. pp. 1–7.
- Yun Wei Li, Jinwei He. Distribution system harmonic compensation methods: an Overview of DG-Interfacing inverters. *IEEE, Industrial Electronics Magazine*, November 2014, no. 8, Iss. 4, pp. 18–31. DOI: [10.1109/MIE.2013.2295421](https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2295421)
- Chkliarsky Y.E., Gonsales P.I. Reactive power compensation optimization and its in the electrical network complex. *Journal of Mining Institute*, 2011, vol. 194, pp. 349–352. In Rus.
- Iliana G.P., Secundino M.R., Aristides L.L., Daniel M.E. Metaheuristics based on the variables integration method applied to reactive power compensation in multi-objective optimization. *Proc. of the International Conference on Applied Mathematics, Computational Science & Engineering (AMCSE 2015)*. Crete, Greece, October 17–19 2015. pp. 207–212.
- Gonsales P.Z. Selection of parameters economically advantage reactive power compensation. *Journal of Mining Institute*, 2011, vol. 194, pp. 235–239. In Rus.
- Yutao Qi, Qingsai Zhang, Xiaoliang Ma, Yining Quana, Qiguang Miao. Utopian point based decomposition for multi-objective optimization problems with complicated Pareto fronts. *Applied Soft Computing*, December 2017, vol. 61, pp. 844–859. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.08.036>
- Abd-Elazim S.M., Ali E.S. Synergy of particle swarm optimization and bacterial foraging for TCSC damping controller design. *Journal of WSEAS Transactions on Power systems*, April 2013, vol. 8, no. 2, pp. 74–84.
- Ali E.S., Abd-Elazim S.M. Power system stability enhancement via bacteria foraging optimization algorithm. *Arabian journal for Science and Engineering (AJSE)*, March 2013, vol. 38, no. 3, pp. 599–611. DOI: [10.1007/s13369-012-0423-y](https://doi.org/10.1007/s13369-012-0423-y)
- Ali E.S., Abd-Elazim S.M. Optimal PSS design in a multimachine power system via bacteria foraging optimization algorithm. *Journal of WSEAS Transactions on Power systems*, October 2013, vol. 8, no. 4, pp. 186–196.
- Bedoya-Puerta J.A., Hernandez-Orallo J., Ferri C., Ramirez-Quintana M.-J. Applying distances between terms to both at and hierarchical data. *Proc. of AAIP 2011. 4<sup>th</sup> International Workshop on Approaches and Applications of Inductive Programming*. Denmark, July 2011. pp. 1–16.
- Gonzalez P.I., Marrero R.S., Legra L.A., Leon S.A., Proano M.X. Modeling of electric network regimes in the presence of harmonic distortion. *Energy Technical Magazine*, 2017, no. 13, pp. 97–105.
- Barrico C., Antunes C.H., Pires D.F. Robustness analysis in evolutionary multi-objective optimization applied to VAR planning in electrical distribution networks. *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. EvoCOP 2009. Lecture Notes in Computer Science*. Eds. C. Cotta, P. Cowling. Berlin, Heidelberg, Springer, 2009. Vol. 5482, pp. 216–227. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-01009-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-01009-5_19)
- Muthukumar K., Jayalalitha S. Multiobjective hybrid evolutionary approach for optimal planning of shunt capacitors in radial distribution systems with load models. *Ain Shams Eng J*, 2017, pp. 1–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2017.02.002>
- Vasconcellos D.B., Abril I.P., Martínez V.L. Reactive power compensation in unbalanced systems using genetic algorithms. *Ingeniare. Chilean journal Engineering*, 2012, vol. 20, no. 3, pp. 284–292. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052012000300002>
- Secundino M.R., Iliana G.P., Aristides L.L. Convergence analysis of the variables integration method applied in multiobjective optimization in the reactive power compensation in the electric nets. *DYNA 82 (190)*. April 2015. pp. 160–165. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n190.43697>
- Sharaf A.M., Elgammal Adel. A novel discrete multiobjective particle swarm optimization (MOPSO) of optimal shunt power filter. *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*. 2009. pp. 1–7. DOI: [10.1109/PSCE.2009.4839957](https://doi.org/10.1109/PSCE.2009.4839957)
- Schweickardt G.A. Multiobjective metaheuristic FPSO- $\chi$ . An application to mid/long term expansion planning of an electric distribution system. *Energetica*, 2009, no. 42, pp. 73–88. DOI: [10.15446/energetica](https://doi.org/10.15446/energetica)
- Rueda V.M., Velazquez J.D., Franco C.J. Recent advances in load forecasting using nonlinear models. *DYNA*, 2011, no. 78 (167), pp. 36–43.
- Shklyarskiy E., Skamyin A.N. Compensation of the reactive power in the presence of higher voltage harmonics at coke plants. *Coke and Chemistry*, 2016, vol. 59, no. 4, pp. 163–168. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068364X16040062>

Received: 22 December 2017.

## Information about the authors

**Iliana Antonia G. Palau**, Cand. Sc., professor, Cotopaxi Technical University.

**Secundino M. Ramirez**, Cand. Sc., dean of the department, Cotopaxi Technical University.

**Mikhail S. Balabanov**, postgraduate student, Omsk State Technical University.

**Aristides L. Lobaina**, Cand. Sc., assistant professor, Higher Metallurgical Mining Institute of Moa, Dr. Antonio Nunez Jimenez.

**Daniel Mendiola Ellis**, Cand. Sc., assistant professor, Higher Metallurgical Mining Institute of Moa, Dr. Antonio Nunez Jimenez.

УДК 551.83; 552

## ОБСТАНОВКИ СЕДИМЕНТАЦИИ ЛОХКОВ-НИЖНЕЭМСКИХ ВУЛКАНОКЛАСТИЧЕСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНО-МАГНИТОГОРСКОЙ ЗОНЫ ЮЖНОГО УРАЛА

Зайнуллин Руслан Ишмуратович<sup>1,2</sup>,  
zri-bgu@mail.ru

<sup>1</sup> Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Россия, 450077, г. Уфа, ул. Карла-Маркса, 16/2.

<sup>2</sup> Башкирский государственный университет, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки-Валиди, 32.

**Актуальность исследования.** Раннедевонский этап формирования Магнитогорской островодужной системы, несмотря на многолетнюю историю исследований и достаточно большой объем полученных данных, остается малоизученным. Данному этапу соответствуют лохков-нижнеэмские вулканокластические, карбонатные и кремнистые породы, широко распространенные на севере Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала. Расположены они в зоне Главного Уральского разлома и поэтому подвержены вторичным изменениям, а разрезы их имеют фрагментарное строение. Вулканокластические разности, пользующиеся наибольшим распространением, практически не изучались. Исследование их и фациальных взаимоотношений между нижнедевонскими отложениями позволяет реконструировать обстановки седиментации раннедевонского бассейна и детализировать историю развития Магнитогорской островодужной системы на начальном этапе ее образования.

**Цель** исследования состоит в выявлении источников сноса и реконструкции обстановок седиментации нижнедевонских вулканокластических отложений Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала.

**Методы.** Реконструкция обстановок накопления проведена на основе изучения структурно-текстурных особенностей, минералого-петрографического и литогеохимического состава вулканокластических пород и корреляции нижнедевонских отложений по биостратиграфическим данным. Полученные результаты сопоставлялись с данными ведущих исследователей по современным обстановкам седиментации.

**Результаты.** Нижнедевонские вулканокластические отложения Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала являются турбидитами и дебритами. Они сложены преимущественно пирокластическим и вулканотерригенным материалом основного и среднего состава. Впервые показано, что накопление их происходило в проксимальной и дистальной части островной дуги. В дистальной части накапливались отложения ильтибановской и мансуровской толщ, в проксимальной – ускульской и рыскужинской толщ. Формирование Магнитогорской островодужной системы могло начаться в раннеэмское время или даже раньше.

### Ключевые слова:

Вулканокластические отложения, нижний девон, островная дуга, Магнитогорская мегазона, Южный Урал.

### Введение

На севере Западно-Магнитогорской зоны (ЗМЗ) широко распространены лохков-нижнеэмские отложения рыскужинской, ускульской, ильтибановской и мансуровской толщ [1] (рис. 1). Они состоят из вулканокластических, карбонатных, кремнистых пород и реже вулканитов, расположенных в зоне Главного Уральского разлома или в непосредственной близости от нее. Поэтому отложения часто подвержены вторичным изменениям, а разрезы их имеют фрагментарное строение. В связи с малым количеством находок фауны лохков-нижнеэмские отложения раньше картировали в составе ирендыкской свиты среднего девона. В настоящее время, благодаря детализации стратиграфии нижнедевонских отложений ЗМЗ [1], появилась возможность подробно изучать литологические особенности пород, сравнивать разновозрастные толщи и восстанавливать обстановки их накопления.

Вышеперечисленные нижнедевонские толщи редко образуют непрерывные разрезы. Нижняя и верхняя границы их чаще всего тектонические. Перекрывают их отложения баймак-бурибаевской или ирендыкской свит ранне-среднедевонского возраста. Подстилающие отложения силурийского возраста на дневной поверхности обнажены редко.

Изучение вулканокластических отложений производилось в Вознесенско-Присакмарской и Узынкырской подзонах ЗМЗ при описании 10 перспективных участков, включающих 16 разрезов.

### Строение разрезов нижнедевонских отложений

Вулканокластические отложения среди нижнедевонских пород пользуются наибольшим распространением. Они представлены песчаниками, алевритами, гравелитами, крупно- и грубообломочными микститами, которые часто слагают турбидиты и дебриты [2, 3] (рис. 2 а, б). В строении разрезов рыскужинской и ускульской толщ участвуют кластолиты главным образом псаммитовой и алевритовой размерности и аргиллиты. Они образуют турбидиты мощностью 0,3–0,5 и реже 1 м. В свою очередь, разрезы ильтибановской и мансуровской толщ состоят преимущественно из грубо- и крупнозернистых песчаников и псефитовых микститов, слагающих турбидиты и дебриты, мощностью 0,15–0,2, 0,4–2 и 3–8 м соответственно. В основании турбидитов (в крупно- и грубозернистых песчаниках) иногда встречаются обломки кремнистых аргиллитов гравийной размерности. Дебриты состоят из плохо сортированных неокатанных грубозернистых фрагментов вулканитов

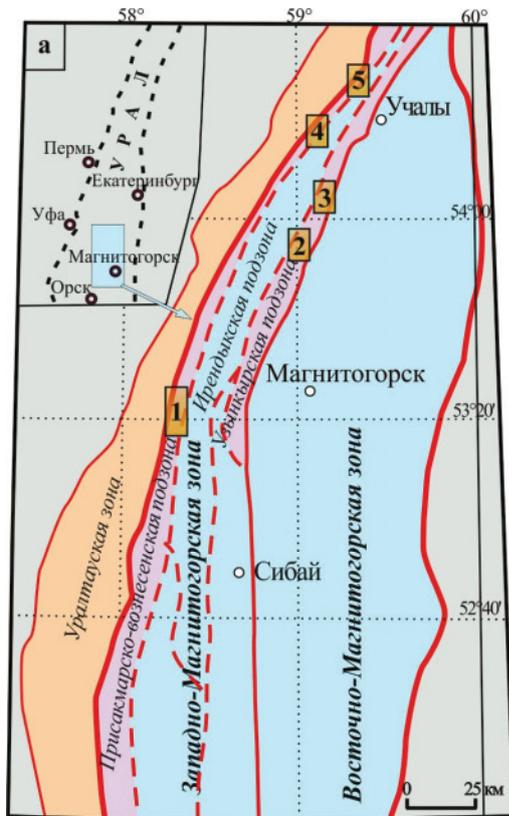
песчаной размерности, среди которых присутствуют гравийно-галечные обломки силицитов и известняков, реже их отломы и глыбы. Обломки расположены хаотически и иногда ориентированы длинной осью параллельно подошве.

В разрезах *рыскужинской* и *ускульской толщ* также встречаются единичные слои песчаников мощностью 0,15–0,3 м, содержащих большое количество остатков макрофауны – брахиопод, криноидей и гастропод (рис. 2, в–е). В рыскужинской толще брахиоподы имеют раннеэмский возраст [4], в ускульской – пражско-эмский (определения выполнены Л.И. Мизенс, ИГГ УрО РАН). Помимо этого, в данных толщах пачки кластолитов иногда чередуются с массивными и брекчиевыми плагиоклазовыми и пироксен-плагиоклазовыми порфиритами (лавовыми потоками) мощностью примерно 3–15 м. В строении разрезов *ильтибановской* и *мансуровской толщ* потоки вулканитов не обнаружены, состоят они преимущественно из обломочных образований, которые чередуются с кремнями и кремнисто-глинистыми сланцами.

*Кремнистые* и *кремнисто-глинистые породы* представлены светло-серыми, серыми тонкослоистыми, плитчатыми и рассланцованными разности-

ми. Присутствуют во всех перечисленных толщах. Они образуют среди кластолитов слои мощностью 0,3–1 м и более или слагают пачки и фрагменты разрезов мощностью 50–60 и 250–400 м соответственно. Кремни датированы конодонтами лохковского, пражского и раннеэмского возраста [4].

*Известняки* белые, светло-серые, серые массивные и реже рассланцованные, иногда мраморизованные. Образуют тела (биогермы (?)), расположенные преимущественно среди обломочных отложений *рыскужинской* и *ускульской толщ*. В разные годы в них найдены кораллы (табуляты, ругозы), брахиоподы, стебли и членики криноидей и конодонты. Согласно фаунистической характеристике, известняки принадлежат двум стратиграфическим интервалам девонского разреза – пражско-нижеэмскому и реже лохковскому [1, 5, 6]. Тела известняков имеют субмеридиональное простирание, ширина их составляет примерно 100–500 м, длина – более 500–1000 м. В некоторых из тел обнаружены слои и пачки вулканокластических песчаников и алевролитов [6]. Контакты с окружающими их отложениями описываются в основном как тектонические и, в редких случаях, как согласные [1, 6 и др.].



б		Отдел	Ярус	Западно-Магнитогорская структурно-формационная зона	
Средний девон	Эйфельский	ярылкаповская свита: яшмоиды (20-100 м)			
		ирендыкская свита: базальты, андезибазальты, туфы, тейфроиды (до 1200 м)			
Нижний девон	Эмский	аналоги баймак-бурибаевской свиты		<b>ильтибановская и мансуровская толщи:</b> вулканокластические песчаники, алевролиты, микститы, кремнисто-глинистые сланцы (200-800 м)  <b>рыскужинская и ускульская толщи:</b> вулканокластические песчаники, алевролиты, гравелиты, аргиллиты, известняки и реже вулканиты (300-700 м)	
	Пражский				
	Лохковский				

**Рис. 1.** Схема районирования Магнитогорской мегазоны и расположение разрезов нижедевонских отложений (а): 1 – рыскужинской, 2, 3 – ускульской, 4 – ильтибановской и 5 – мансуровской толщ; стратиграфическая схема ниже-среднедевонских отложений ЗМЗ (б)

**Fig. 1.** Scheme of zoning of the Magnitogorsk megazone and location of the sections of the Lower Devonian deposits (a): 1 – ryksuzhinskaya, 2, 3 – uskul'skaya, 4 – iltibanovskaya and 5 – mansurovskaya strata; stratigraphic scheme of the Lower-Middle Devonian deposits of ZMZ (b)

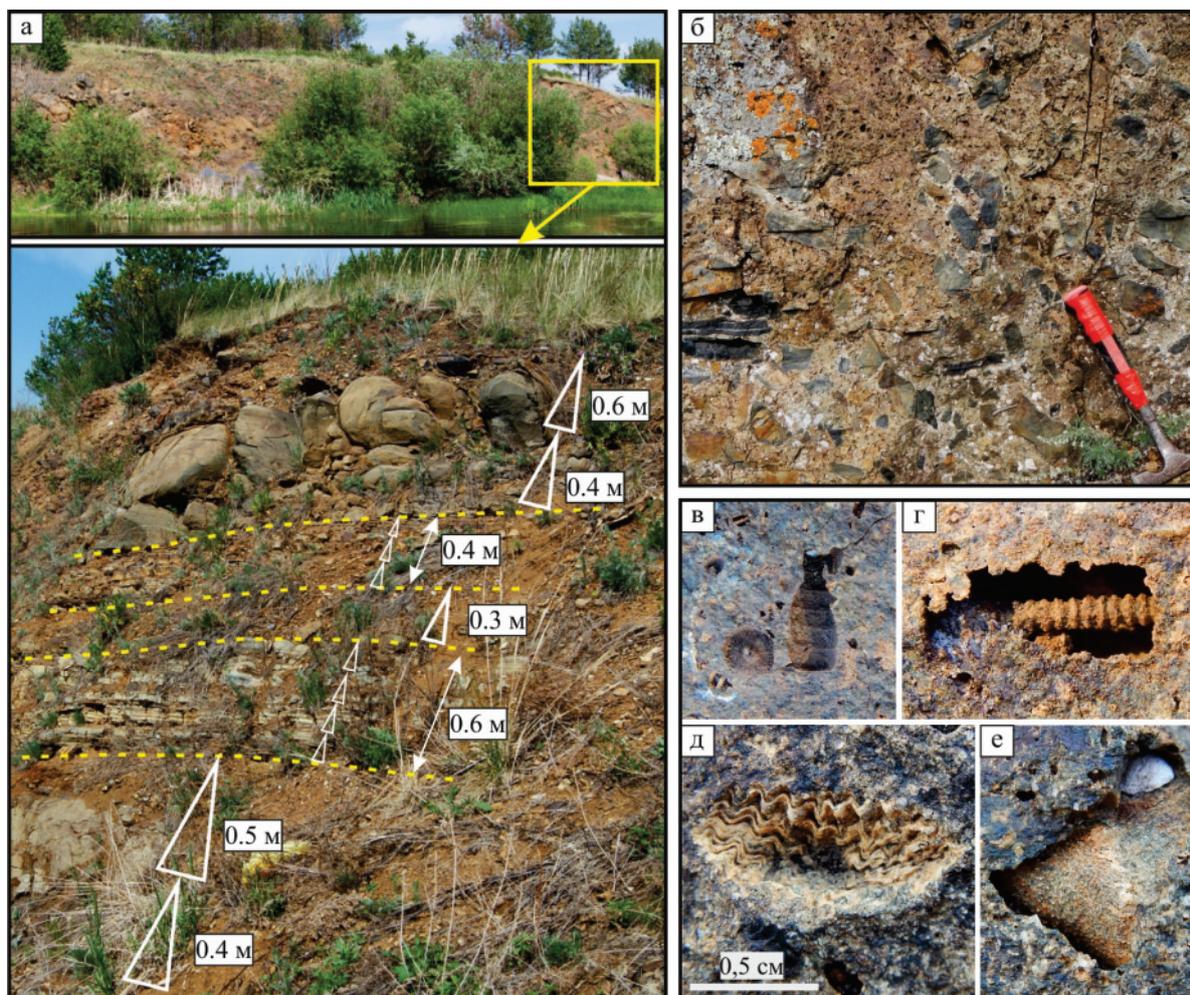
**Состав и источники сноса  
 вулканокластических отложений**

Вулканокластические отложения сложены слабо окатанными и неокатанными литокластами вулканитов основного и среднего состава, кристаллокластами плаггиоклаза, реже пироксена и кварца. Состав их в нижнедевонских толщах различается. Например, в песчаниках *ускульской толщи* немного выше (на 5–10 %) содержание кристаллокластов пироксена и обломков пироксен-плаггиоклазовых порфиритов. В свою очередь песчаники *рыскужинской толщи* состоят преимущественно из кристаллокластов плаггиоклаза, обломков плаггиоклазовых порфиритов и единичных зерен кислых вулканических пород и габбродиоритов. Кластолиты *ильтибановской* и *мансуровской толщ* имеют более пестрый состав и сложены главным образом плаггиоклазовыми порфиритами (60–70 %), кристаллокластами плаггиоклаза (10–20 %), реже кварца (в т. ч. его поликристаллическими разновидностями) (5–7 %), единичны-

ми зернами пироксена, а также обломками (менее 15 %) известняков, силицитов и кремнисто-глинистых сланцев.

Окатанность обломков пород во всех толщах соответствует 0, 1, 2 и реже 3 баллам по шкале А.В. Хабакова. Сортировка кластики плохая, средняя и, реже, хорошая, упаковка зерен плотная. Цемент в песчаниках глинистый и глинисто-хлоритовый. Вторичные процессы проявлены в виде эпидотизации, хлоритизации, альбитизации и карбонатизации.

Сравнение минералого-петрографических составов изучаемых пород и современных вулканогенных осадков показало [7], что вулканокластические отложения *рыскужинской* и *ускульской толщ*, скорее всего, сложены преимущественно пирокластическим материалом, который после выпадения перемещался по склону вулканической постройки турбидными потоками, т. е. представляют собой тефроиды или тефротурбидиты. Обломочные отложения *ильтибановской* и *мансуровской*



**Рис. 2.** Фрагмент разреза ильтибановской толщи с турбидитами (а) и дебритами (б) разной мощности, а также криноидеи (в, г) и брахиоподы (д, е) и их отпечатки в турбидитах ускульской толщи

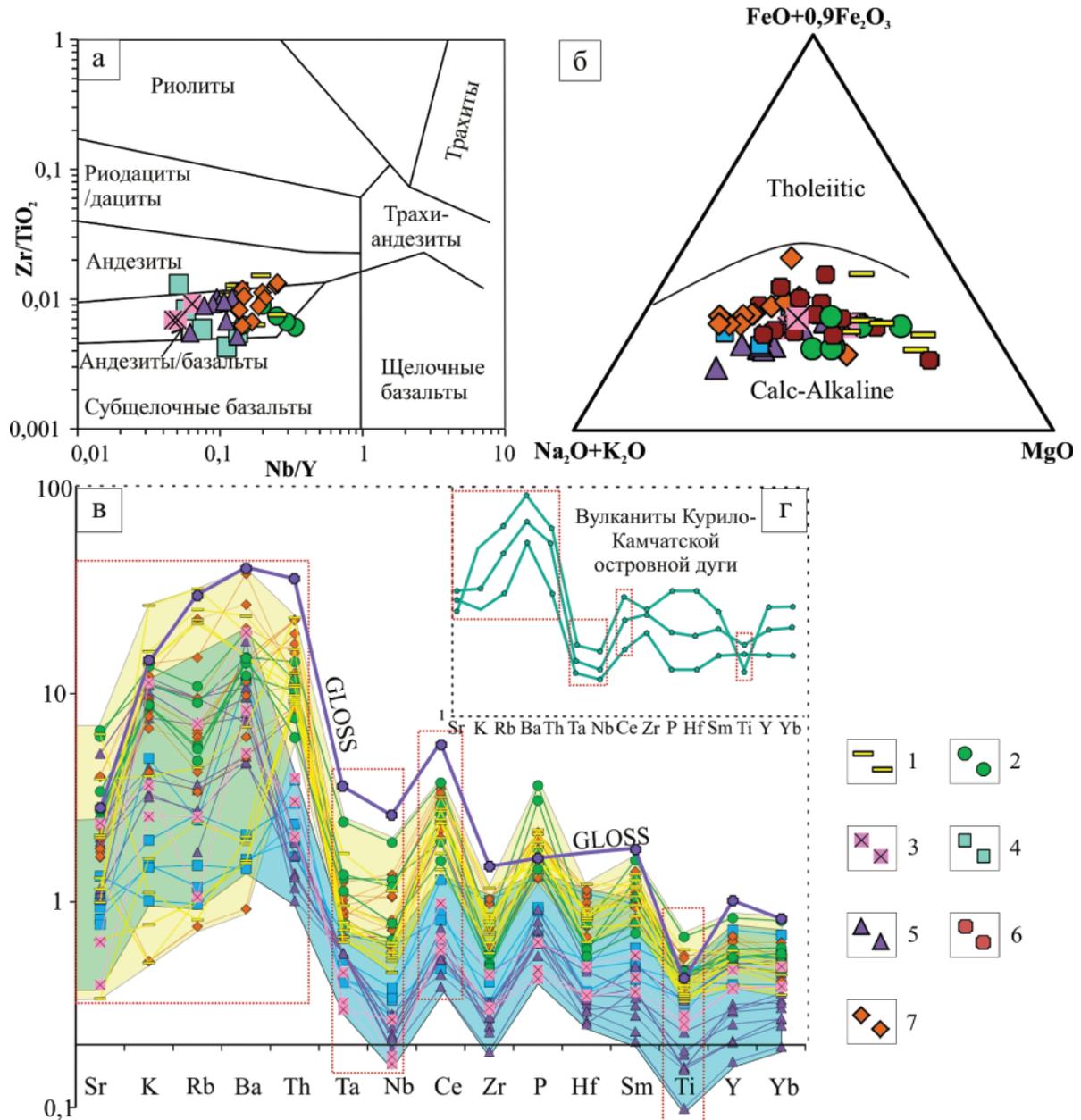
**Fig. 2.** Fragment of the section of the itlibanovaya strata with turbidite (a) and debris deposits (б) of different thickness, as well as crinoids (v, g) and brachiopods (д, е) and their imprints in turbidites of the uskul strata

толщ состоят преимущественно из вулканотерригенного (вулканомиктового) материала, транспортировка которого осуществлялась также турбидными и чаще обломочными потоками.

Содержание химического состава, проанализированное ранее [3], позволяет считать, что нижедевонские вулканокластические отложения сложены породообразующими компонентами основ-

ного и среднего состава (базальтового и андезибазальтового). Хорошо это наблюдается на диаграмме Nb/Y–Zr/TiO<sub>2</sub> [8], где фигуративные точки пород всех толщ компактно расположились в одном поле (рис. 3, а).

Согласно геодинамическим реконструкциям [3], источником вещества для изучаемых пород служила океаническая островная дуга. Объясняет-



**Рис. 3.** Диаграммы для определения состава (а, б) и геодинамических обстановок формирования (в, г) нижедевонских вулканокластических отложений. Условные обозначения: кластолиты разрезов дд. Тирман (1), Рыскужино (2), Казмашево (3) – рыскужинская толща; оз. Ускуль (4) и д. Уразово (5) – ускульская толща; д. Мансурово (6) – мансуровская толща и Ильтибановского водохранилища (7) – ильтибановская толща; GLOSS – global subduction sediment (средний состав осадков из глобальных зон субдукции)

**Fig. 3.** Diagrams for determining the composition (a, б) and geodynamic environments of formation (в, г) of the Lower Devonian volcaniclastic deposits. Legend: clastoliths of sections in villages Tirman (1), Ryskuzhino (2), Kazmashevo (3) – ryskuzhinskaya stratum; lake Uskul (4) and the village Urazovo (5) – uskulska strata; Mansurovo (6) – mansurovskaya stratum and iltibanovskaya reservoir (7) – iltibanovskaya stratum; GLOSS – global subduction sediments

ся данный вывод тем, что кластолиты характеризуются низкими содержаниями титана, хрома и никеля, относятся к известково-щелочной серии и спектры малых элементов, нормированных на N-MORB, имеют схожее расположение со спектрами вулканитов современных островных дуг, например Курильской [9–11] (рис. 3, в, з). На диаграмме N-MORB хорошо выражены повышенные содержания некогерентных элементов, отрицательные геохимические аномалии Ta-Nb, Zr, Ti и положительные – Се.

#### Характеристика и особенности развития раннедевонского бассейна

Формирование нижедевонских отложений происходило в седиментационном бассейне, который описывается в работе [12] как ранне-среднеде-

вонский преддуговой. Достаточно разнообразный литологический состав и генезис нижедевонских пород свидетельствует о дифференцированной глубине и неоднородности рельефа данного бассейна и существовании в нем различных седиментационных обстановок и источников сноса.

В раннедевонское время накопление вулканокластических отложений, возможно, происходило вокруг вулканических центров островной дуги в виде покровов, конусов выноса (fans) и мощных шлейфов в глубоководной части бассейна. Согласно многочисленным исследованиям [13–20 и др.], считается, что *вблизи вулканического центра* накапливаются лавовые потоки, разнотермные вулканокластические отложения, продукты их дезинтеграции и образуются различные интрузивные тела и рифогенные известняки. *Вдали от цен-*

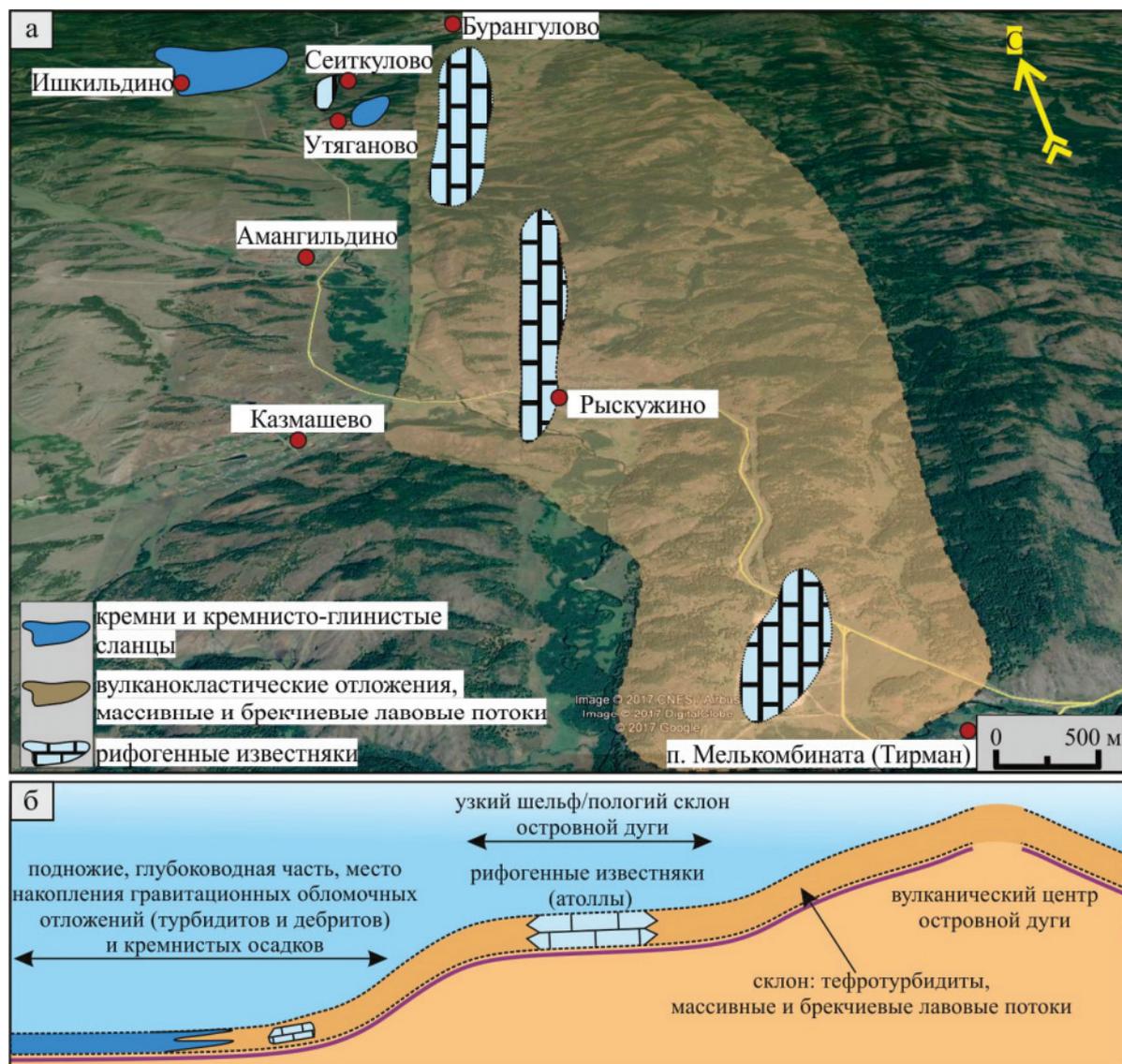


Рис. 4. Схематичная карта распространения отложений рыскужинской толщи (а) и идеализированная модель обстановок седиментации и строения вулканического центра островной дуги раннеэмского времени (б) (масштабы разные)

Fig. 4. Schematic map of location of the ryskuzhinsky deposit (a) and idealized model of sedimentation and structure of the volcanic center of the island arc of the early ems (b) (different scales)

тра лавовые потоки и интрузивные породы исчезают, а вулканогенные осадки становятся более тонкозернистыми. Поэтому можно предположить, что накопление *тефротурбидитов*, массивных и брекчиевых лавовых потоков и известняков *рыскужинской и ускульской толщ* происходило на склонах и у подножий вулканических центров (т. е. в проксимальной части) (рис. 4, 5).

Согласно результатам минералого-петрографических и химических исследований и расположению разрезов, обломочные отложения рыскужинской и ускульской толщ имели разные источники сноса, т. е. накапливались вокруг разных вулканических центров единой дуги, находившихся, примерно, на таком же расстоянии, которое есть сегодня между стратотипическими разрезами этих толщ – 65–70 км. Такие расстояния наблюдаются между островами Курильской, Марианской и других дуг.

В более глубоководной части островной дуги (в дистальной части) в виде конусов выноса и шлейфов формировались обломочные отложения *ильтибановской и мансуровской толщ*. Объясняется это тесной ассоциацией их с глубоководными массивными и тонкослойными силицитами и кремнисто-глинистыми сланцами, а также отсутствием мелководных отложений (с характерными текстурами), в том числе распространенных в проксимальной части островной дуги – лавовых потоков и

рифогенных известняков (могут присутствовать только в виде обломков и глыб) (рис. 5).

Биостратиграфические данные (полный список источников в [1]) позволяют условно разделить формирование нижедевонских отложений ЗМЗ на два этапа – позднесилурийско-лохковский и пражско-раннеэмский (рис. 5).

*Позднесилурийско-лохковское время.* В северной части бассейна (здесь и далее в современных координатах) в относительно глубоководной обстановке происходило активное накопление вулканокластических дебритов и турбидитов, а также кремнистых и кремнисто-глинистых осадков ильтибановской и мансуровской толщ. По мнению Г.А. Мизенса [21], при формировании девонских вулканогенно-осадочных толщ Магнитогорской зоны могли размываться аналоги силурийско-раннедевонской островной дуги. Поэтому нельзя исключать, что источником вещества для вулканокластических отложений ильтибановской и мансуровской толщ могли служить размываемые комплексы вышеупомянутой островной дуги. В свою очередь И.С. Анисимов [22] считал, что отложения мансуровской и ильтибановской толщ представляют собой мелко-среднеобломочную олистострому, формирование которой связано с начальными этапами заложения и развития Магнитогорской (Ирендыкской) островной дуги.

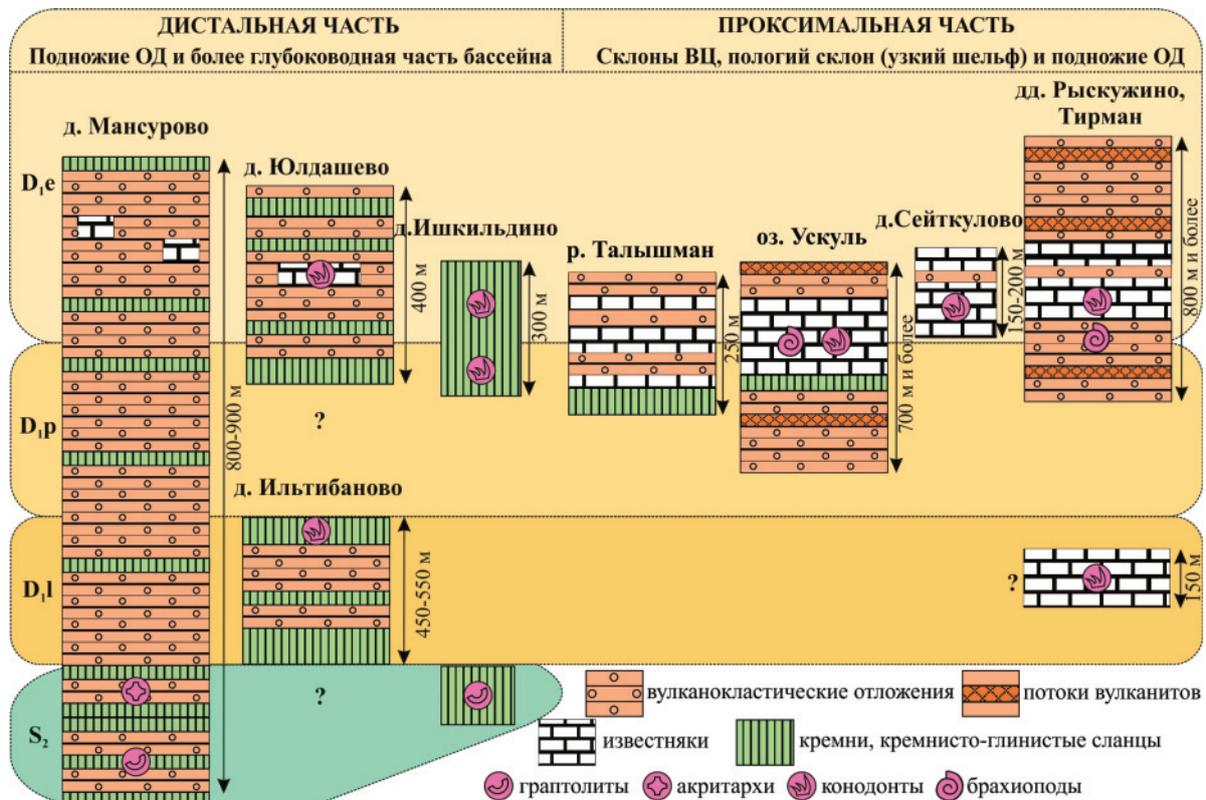


Рис. 5. Время формирования и обстановки седиментации нижедевонских отложений Западно-Магнитогорской зоны. Сокращения: ВЦ – вулканические центры, ОД – островная дуга

Fig. 5. Time of formation and environment of sedimentation of lower Devonian deposits of the West-Magnitogorsk zone. Abbreviations: ВЦ – volcanic centers, ОД – island arc

В южной части бассейна, в районе распространения отложений рыскужинской толщи, в данное время, видимо, происходило образование известняков и накопление кремнисто-глинистых осадков.

*Пражско-раннеэмское время.* Недостаточность палеонтологических находок пражского возраста затрудняет проведение каких-либо реконструкций бассейна этого времени. Можно лишь предположить, что большинство отложений, датированных раннеэмской фауной, могли начать формироваться немного раньше, в том числе и в пражское время, т. к. нижние границы (время начала формирования) их не установлены.

В данный период в северной части бассейна в глубоководной зоне продолжалось накопление вулканокластических дебритов и турбидитов и кремнистых осадков ильтибановской и мансуровской толщ. Количество и частота поставляемого вулканокластического материала могла сокращаться, что приводило к увеличению кремненакопления (разрез у д. Юлдашево).

В связи с началом образования и действия Магнитогорской энсиматической островной дуги произошло перестроение территории и изменение рельефа дна бассейна, что привело, возможно, к более резкому обособлению обстановок, различающихся глубиной. Например, в западной части бассейна (разрезы дд. Ишкильдино и Утяганово), в относительно более глубоководной зоне, активнее начали накапливаться кремнистые осадки рыскужинской толщи. Наоборот, в восточной части бассейна, после того как сформировался стабильный рельеф юной островной дуги с узким пологим склоном (шельфом), возможно, началось активное накопление известняков. Подтверждением этого, в определенной степени, являются исследования А.М. Фазлиахметова, указывающие, что формирование нижнедевонских известняков происходило на активной континентальной окраине [5]. Скорее всего, в данный небольшой отрезок раннеэмского времени вулканической активности не было или она была слабой и существенно не влияла на карбонатно- и кремненакопление. Кратковременные и маломощные извержения лишь на некоторое время прерывали формирование карбонатных пород, что подтверждается наличием небольших слоев и пачек вулканокластических песчаников и алевролитов в известняках рыскужинской толщи и у д. Баталово. Поэтому, учитывая данное обстоятельство, а также то, что известняки находятся в тесной ассоциации с островодужными вулканокластическими отложениями, можно предположить, что они окаймляли вулканические центры в виде рифогенных построек (*sensu lato*), часто подвергаясь разрушению гравитационными потоками или волновыми процессами различной природы. В результате образовывался обломочный карбонатный материал, содержащий большое количество макрофауны, который сносился в глубоководные зоны бассейна и накапливался совместно с тефротурби-

дитами вышеназванных толщ (разрезы Рыскужино и Ускуль). Учитывая, что для благоприятного формирования рифов требуются особые условия и рельеф, видимо, островодужные вулканические постройки с узким шельфом (относительно пологой поверхностью) уже были подготовлены. Примером могут служить современные действующие вулканические центры Марианской дуги (например, Аламаган), где созданы благоприятные условия для развития коралловых рифов (по данным Benthic Habitat Pacific Islands). В последующем вулканические центры продолжили активно действовать, на их склонах и подножиях формировались преимущественно тефротурбидиты, массивные и брекчиевые лавовые потоки и в связи с этим, возможно, прекратилось карбонатонакопление рыскужинской и ускульской толщ. В эмское время с юной островной дуги вулканокластический материал, обломки и блоки известняков гравитационными потоками также начали поступать в ту часть бассейна, где накапливались отложения ильтибановской и мансуровской толщ (верхние части разрезов Юлдашево и Мансурово).

Таким образом, изучаемый раннедевонский бассейн характеризовался не только длительной тектонической паузой и накоплением преимущественно осадочных пород, как считалось ранее [23, 24], но и мобильным тектоническим режимом с периодами активного формирования относительно большого количества тефрогенного и вулканотерригенного материала.

#### Заключение

Изучение нижнедевонских вулканокластических отложений ЗМЗ и других пород, находящихся в тесной ассоциации с ними, позволило приурочить их накопление к проксимальной и дистальной части островной дуги.

Согласно палеотектоническим реконструкциям, в раннем девоне на данной территории произошло формирование Магнитогорской островодужной системы. Начальные стадии ее образования связывают главным образом с позднеэмским баймак-бурибаевским вулканизмом [1, 24, 25 и др.]. Но на сегодняшний день не установлена нижняя граница баймак-бурибаевской свиты [1] и соответственно неизвестно время начала формирования слагающих ее пород и островодужной системы в целом. Поэтому новые данные, полученные автором по породам, расположенным, предположительно, ниже баймак-бурибаевской свиты, и материалы, указывающие на наличие в ЗМЗ магматических комплексов лохков-эмского возраста с островодужной химической специализацией [26–28], позволяют считать, что формирование Магнитогорской островодужной системы могло начаться в раннеэмское время или даже раньше. Это привело к образованию под водой расчлененного положительного рельефа и преддугового бассейна с латеральными рядами седиментационных обстановок. В результате произошло накопление разнородных ти-

пов отложений – глубоководных кремней и кремнисто-глинистых сланцев, вулканокластических (тефрогенных, вулканотерригенных) дебритов и турбидитов, массивных и брекчиевых склоновых

лавовых потоков и рифогенных известняков – изучаемых толщ.

*Исследования выполнены по теме государственного задания № АААА-А16-116090210010-5.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маслов В.А., Артюшкова О.В. Стратиграфия и корреляция девонских отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. – 288 с.
2. Зайнуллин Р.И. Особенности состава и строения вулканокластических отложений нижнего девона северной части Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Уникальные литологические объекты через призму их разнообразия: 2-я Всероссийская школа студентов, аспирантов и молодых ученых по литологии. – Екатеринбург, 2016. – С. 122–124.
3. Зайнуллин Р.И. Состав и особенности формирования вулканокластических отложений нижнего девона Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Литосфера. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 78–94.
4. Первые находки брахиопод в вулканогенно-осадочных породах ирендыкской свиты на Южном Урале / К.С. Иванов, А.З. Бикбаев, Л.И. Мизенс, В.П. Сапельников // Ежегодник 1996. Информационный сборник научных трудов. – Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 1997. – С. 13–15.
5. Фазлиахметов А.М., Артюшкова О.В. Условия формирования раннеэмских известняков восточного склона Южного Урала по геохимическим данным // Осадочная геология Урала и прилегающих регионов: сегодня и завтра. Материалы 12 Уральского литологического совещания. – Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2018. – С. 355–359.
6. Павлов В.В. Геологическое строение и полезные ископаемые Юлдашевской площади // Отчет о геологическом доизучении в масштабе 1:50000 за 1983–1988 гг. – Уфа: Башкиргеология, 1988. – 435 с.
7. Зайнуллин Р.И. Нижнедевонские вулканокластические отложения Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Геология, география и глобальная энергия. – 2017. – № 4. – С. 74–89.
8. Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements // Chem. Geol. – 1977. – V. 20. – P. 325–343.
9. Фролова Т.И., Бурикова И.А. Магматические формации современных геотектонических обстановок. – М.: МГУ, 1997. – 320 с.
10. Martynov A.Y., Martynov Y.A. Pleistocene basaltic volcanism of Kunashir Island (Kuril island arc): Mineralogy, geochemistry, and results of computer simulation // Petrology. – 2017. – № 2. – P. 206–225.
11. Pearce J.A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins // Continental basalts and mantle xenoliths / Eds. C.J. Hawkesworth, M.J. Norry. – Nantwich: Sica Publ., 1983. – P. 230–249.
12. Мизенс Г.А., Свяжина И.А. О палеогеографии Урала в девоне // Литосфера. – 2007. – № 2. – С. 29–44.
13. Dickinson W.R. Sedimentation of volcanoclastic strata of the Pliocene Koromavua Group in northwest Viti Levu, Fiji, Am // J. Sci. – 1968. – V. 266. – P. 440–453.
14. Mitchell A.H.G. Facies of an early Miocene volcanic arc, Malekula Island, New Hebrides // Sedimentology. – 1970. – V. 14. – P. 201–243.
15. Carey S., Sigurdsson H. A model of volcanogenic sedimentation in marginal basins. – London: Geological Society, 1984. – Special Publications. – V. 16. – P. 37–58.
16. Carey S. Modeling of Tephra Fallout from Explosive Eruptions // Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. – P. 429–461.
17. Fisher R. Submarine volcanoclastic rocks. – London: Geological Society, 1984. – Special Publications. – V. 16. – P. 5–27.
18. Suthren R.J. Facies analysis of volcanoclastic sediments: a review. – London: Geological Society, 1985. – Special Publications. – V. 18. – P. 123–146.
19. Einsele G. Sedimentary basins: evolution, facies, and sediment budget. – Berlin Heidelberg: Springer, 2000. – 792 p.
20. Einsele G. Sedimentary basins: evolution, facies, and sediment budget. – Berlin Heidelberg: Springer, 1992. – 628 p.
21. Мизенс Г.А. Редкие элементы и особенности источников сноса обломочного материала осадочных формаций девона и карбона в восточных зонах Южного Урала // Геохимия. – 2009. – № 12. – С. 1259–1278.
22. Анисимов И.С. Мансуровская толща: ее строение и положение в геологическом разрезе девона // Геология, полезные ископаемые и проблемы геозологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: материалы 9-й Межрегиональной научно-практической конференции. – Уфа, 2012. – С. 3–6.
23. Артюшкова О.В., Маслов А.В. Нижнедевонские (доверхнеэмские) отложения Магнитогорской мегазоны // Геологический сборник № 2. – Уфа: ИГ УНЦ РАН, 2001. – С. 80–87.
24. Косарев А.М., Пучков В.Н., Серавкин И.Б. Петролого-геохимические особенности раннедевонско-эйфельских островодужных вулканитов Магнитогорской зоны в геодинамическом контексте // Литосфера. – 2005. – № 4. – С. 22–41.
25. Seravkin I.B., Kosarev A.M., Puchkov V.N. Geodynamic conditions of formation of massive sulfide deposits in the Magnitogorsk Megazone, Southern Urals, and prospection criteria // Geology of Ore Deposits. – 2017. – № 3. – P. 227–243.
26. Этапы палеозойского интрузивного магматизма Уральского орогена и их геодинамическая интерпретация. Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование / Г.Б. Ферштадтер, А.А. Краснобаев, Ф. Беа, П. Монтеро, Н.С. Бородина, В.В. Холоднов, Е.А. Зинькова, Г.Ю. Шардакова, С.В. Прибавкин. – Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2007. – С. 89–120.
27. Грабежев А.И. Sr-Nd-C-O-H-S изотопно-геохимическая характеристика медно-порфировых флюидно-магматических систем Южного Урала: вероятные источники вещества // Литосфера. – 2009. – № 6. – С. 66–89.
28. New data on the age and geodynamic position of copper-porphyry mineralization in the Main Uralian fault zone (South Urals) / A.M. Kosarev, V.N. Puchkov, I.B. Seravkin, V.V. Kholodnov, A.I. Grabezhev, Y.L. Ronkin // Doklady Earth Sciences. – 2014. – № 1. – P. 1317–1321.

*Поступила 29.05.2018 г.*

#### Информация об авторах

**Зайнуллин Р.И.**, младший научный сотрудник Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук; старший преподаватель Башкирского государственного университета.

UDC 551.83; 552

## SEDIMENTATION OF LOCHKOVIAN-LOWER EMSIAN VOLCANOKLASTIC DEPOSITS OF THE WEST-MAGNITOGORSK ZONE OF THE SOUTH URAL

Ruslan I. Zainullin<sup>1,2</sup>,  
zri-bgu@mail.ru

<sup>1</sup> Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences,  
16/2, Karl Marx street, Ufa, 457700, Russia

<sup>2</sup> Bashkir State University,  
32, Zaki-Validi street, Ufa, 450076, Russia.

**The relevance of research.** The Early Devonian stage of formation of the Magnitogorsk island-arc system remains poorly understood, despite the long history of research and rather large amount of data obtained. This stage corresponds to Lochkovian-Lower Emsian volcanoclastic, carbonate and siliceous rocks, widespread in the north of the West-Magnitogorsk zone. They are located in the zone of the Main Ural Fault and are therefore subject to secondary changes, and their sections have a fragmentary structure. Volcanoclastic rocks, the most widely spread, have not been studied. Their study and the study of facies relationships between them allows us to reconstruct the situation of sedimentation of the early Devonian basin and to detail the history of the development of the Magnitogorsk island arc system at the initial stage of its formation.

**The main aim** of this work is to identify the sources of demolition and sedimentation environments of the Lower Devonian volcanoclastic deposits of the West-Magnitogorsk zone of the Southern Urals.

**Methods.** Reconstruction of accumulation environments was carried out on the basis of studying structural and texture features, mineralogical-petrographic and litho-geochemical composition of volcanoclastic rocks and correlation of Lower Devonian deposits by biostratigraphic data. The results obtained were compared with the data of leading researchers on modern sedimentation environments.

**Results.** The Lower Devonian volcanoclastic deposits of the West-Magnitogorsk zone of the Southern Urals are turbidites and debris. They are composed mainly of pyroclastic and volcanic-terrigenous material of basalt and andesibasalt composition. It is shown that their accumulation took place in the proximal and distal part of the island arc. Deposits of the Itlibanskaya and Mansurovskaya strata were accumulated in the distal part, in the proximal – the Uskulskaia and the Ryskuzhinskaya strata. The formation of the Magnitogorsk island-arc system could begin in the early-ems time or even earlier.

### Key words:

Volcanoclastic deposits, Lower Devonian, island arc, Magnitogorsk megazone, Southern Urals.

The research was carried out on the subject of the State task no. AAAA-A16-116090210010-5.

### REFERENCES

- Maslov V.A., Artyushkova O.V. *Stratigrafiya i korrelyatsiya devonskikh otlozheniy Magnitogorskoy megazoniy Yuzhnogo Urala* [Stratigraphy and correlation deposits of Devonian of the Magnitogorsk megazone of Southern Urals]. Ufa, DizaynPoligrafServis Publ., 2010. 288 p.
- Zaynullin R.I. Osobennosti sostava i stroeniya vulkanoklasticheskikh otlozheniy nizhnego devona severnoy chasti Zapadno-Magnitogorskoy zony Yuzhnogo Urala [Features of composition and structure of volcanoclastic deposits of the Lower Devonian in the northern part of the West-Magnitogorsk zone of the Southern Urals]. *2-ya Vserossiyskaya shkola studentov, aspirantov i molodykh uchennykh po litologii. Unikalnye litologicheskie obekty cherez prizmu ikh raznoobraziya* [2<sup>nd</sup> All-Russian school of students, postgraduates and young scientists of political science. Unique lithological objects through the prism of their diversity]. Ekaterinburg, 2016. pp. 122–124.
- Zaynullin R.I. Composition and features of the formation of volcanoclastic deposits of the Lower Devonian of the Western Magnitogorsk zone of the Southern Urals. *Lithosphere*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 78–94. In Rus.
- Ivanov K.S., Bikbaev A.Z., Mizens L.I., Sapelnikov V.P. Pervye nakhodki brachiopod v vulkanogenno-osadochnykh porodakh irendyyskoy svity na Yuzhnom Urale [First finds of brachiopods in volcano-sedimentary rocks of irendyysk formation in the Southern Urals]. *Ezhegodnik 1996. Informatsionnyy sbornik nauchnykh trudov* [Yearbook 1996. Information collection of scientific papers]. Ekaterinburg, Institute of Geology and Geochemistry, 1997. pp. 13–14.
- Fazliakhmetov A.M., Artyushkova O.V. Usloviya formirovaniya ranneemsskikh izvestnyakov vostochnogo sklona Yuzhnogo Urala po geokhimicheskim dannym [Conditions for formation of early Lima limestones of the eastern slope of the Southern Urals by geochemical data]. *Osadochnaya geologiya Urala i prilozhashchikh regionov: segodnya i zavtra. Materialy 12 Uralskogo litologicheskogo soveshchaniya* [Sedimentary geology of the Urals and adjacent regions: today and tomorrow. Materials of the Ural lithological meeting]. Ekaterinburg, IGG UrB RAS Press, 2018. pp. 355–359.
- Pavlov V.V. Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye Yuldashevskoy ploshchadi [Geological structure and minerals of Yuldashevskaya area]. *Otchet o geologicheskoy doizuchenii v masshtabe 1:50000 za 1983–1988 gg.* [Report on geological survey on a scale of 1:50000 for 1983–1988]. Ufa, Bashkirgeology, 1988. 435 p.
- Zaynullin R.I. Lower Devonian volcanoclastic deposits of the West-Magnitogorsk zone of the Southern Urals. *Geology, geography and global energy*, 2017, no. 4, pp. 74–89. In Rus.
- Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem. Geol.*, 1977, vol. 20, pp. 325–343.
- Frolova T.I., Burikova I.A. *Magmaticheskie formatsii sovremennykh geotektonicheskikh obstanovok* [Magmatic formations of modern geotectonic environments]. Moscow, MGU, 1997. 320 p.
- Martynov A.Y., Martynov Y.A. Pleistocene basaltic volcanism of Kunashir Island (Kuril island arc): Mineralogy, geochemistry, and results of computer simulation. *Petrology*, 2017, no. 2, pp. 206–225.

11. Pearce J.A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. *Continental basalts and mantle xenoliths*. Eds. C.J. Hawkesworth, M.J. Norry. Nantwich, Sica Publ., 1983. pp. 230–249.
12. Mizens G.A., Svyazhina I.A. On paleogeography of the Urals in the Devonian. *Lithosphere*, 2007, no. 2, pp. 29–44. In Rus.
13. Dickinson W.R. Sedimentation of volcanoclastic strata of the Pliocene Koromavua Group in northwest Viti Levu, Fiji. *Am. J. Sci.*, 1968, vol. 266, pp. 440–453.
14. Mitchell A.H.G. Facies of an early Miocene volcanic arc, Malekula Island, New Hebrides. *Sedimentology*, 1970, vol. 14, pp. 201–243.
15. Carey S., Sigurdsson H. *A model of volcanogenic sedimentation in marginal basins*. London, Geological Society, 1984. Special Publications, vol. 16, pp. 37–58.
16. Carey S. Modeling of Tephra Fallout from Explosive Eruptions. *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. pp. 429–461.
17. Fisher R. *Submarine volcanoclastic rocks*. London, Geological Society, 1984. Special Publications, vol. 16, pp. 5–27.
18. Suthren R.J. *Facies analysis of volcanoclastic sediments: a review*. London, Geological Society, 1985. Special Publications, vol. 18, pp. 123–146.
19. Einsele G. *Sedimentary basins: evolution, facies, and sediment budget*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2000. 792 p.
20. Einsele G. *Sedimentary basins: evolution, facies, and sediment budget*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1992. 628 p.
21. Mizens G.A. Trace elements and features of the sources of detritus sedimentary formations Devonian and Carboniferous in the eastern areas of the South Urals. *Geochemistry*, 2009, no. 12, pp. 1259–1278.
22. Anisimov I.S. Mansurovskaya tolshcha: ee stroenie i polozhenie v geologicheskoy razreze devona [Mansurovskaya stratum: its structure and position in the geological section of the Devonian]. *Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geokologii Bashkortostana, Urala i sopredelnykh territoriy: materialy 9-y Mezhrainoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geology, minerals and problems of geocology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories: materials of the 9<sup>th</sup> Interregional Scientific and Practical Conference]. Ufa, 2012. pp. 3–6.
23. Artyushkova O.V., Maslov V.A. Nizhnedevonskie (doverhneemskie) otlozheniya Magnitogorskoy megazony [Lower Devonian (Pre-upper Emsian) deposits of Magnitogorsk mega zone]. *Geologicheskii sbornik* [Geological journal]. Ufa, IG USC RAS, 2001. pp. 80–87.
24. Kosarev A.M., Puchkov V.N., Seravkin I.B. Petrologico-geochemical features of early Devonian-Eifelian island-arc volcanics of the Magnitogorsk zone in the geodynamic context. *Lithosphere*, 2005, no. 4, pp. 22–41. In Rus.
25. Seravkin I.B., Kosarev A.M., Puchkov V.N. Geodynamic conditions of formation of massive sulfide deposits in the Magnitogorsk Megazone, Southern Urals, and prospection criteria. *Geology of Ore Deposits*, 2017, no. 3, pp. 227–243.
26. Fershtater G.B., Krasnobaev A.A., Bea F. Etapy paleozoyskogo intruzivnogo magmatizma Uralskogo orogena i ikh geodinamicheskaya interpretatsiya [Stages of Paleozoic intrusive magmatism of the Uralian orogen and their geodynamic interpretation]. *Geodinamika, magmatizm, metamorfizm i rudoobrazovanie* [Geodynamics, magmatism, metamorphism and ore formation]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 2007. pp. 89–120.
27. Grabezhev A.I. Sr-Nd-C-O-H-S isotopic-geochemical characteristics of copper-porphyry fluid-magmatic systems of the Southern Urals: probable sources. *Lithosphere*, 2009, no. 6, pp. 66–89. In Rus.
28. Kosarev A.M., Puchkov V.N., Seravkin I.B., Kholodnov V.V., Grabezhev A.I., Ronkin Y.L. New data on the age and geodynamic position of copper-porphyry mineralization in the Main Uralian fault zone (South Urals). *Doklady Earth Sciences*, 2014, no. 1, pp. 1317–1321.

Received: 29 May 2018.

#### Information about the authors

**Ruslan I. Zainullin**, junior researcher, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences; senior lecturer, Bashkir State University.

УДК 544.45.452.2

## О МЕХАНИЗМЕ ХИМИЧЕСКОГО СВЯЗЫВАНИЯ АЗОТА ВОЗДУХА В УСЛОВИЯХ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА СМЕСЕЙ НАНОПОРОШКА АЛЮМИНИЯ С ОКСИДОМ ТАНТАЛА

Чудинова Александра Олеговна<sup>1</sup>,  
chudinova.1509@mail.ru

Ильин Александр Петрович<sup>1</sup>,  
ilyin@mail.ru

Роот Людмила Олеговна<sup>1</sup>,  
tolbanova@mail.ru

Мостовщиков Андрей Владимирович<sup>1</sup>,  
avmost@tpu.ru

Спесивцева Софья Викторовна<sup>1</sup>,  
ivakhnyuk-sofya@mail.ru

Джин Чун Ким<sup>2</sup>,  
jckimpml@ulsan.ac.kr

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Ульсанский Университет, Республика Корея, 680–749, г. Ульсан.

**Актуальность исследования.** Предлагаемая новая технология получения тугоплавких нитридов имеет ряд преимуществ: низкие энергозатраты, отсутствие необходимости в сложном оборудовании, для получения нитридов используется азот воздуха, процесс синтеза осуществляется при атмосферном давлении.

**Цель исследования:** экспериментально определить составы продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия и пентаоксида тантала в воздухе и в жидком азоте.

**Объект:** продукты синтеза нитрид тантала, полученные сжиганием в воздухе смесей нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала.

**Методы:** рентгенофазовый анализ (дифрактометр Дифрей-401), дифференциальный термический анализ (ДТА) (термоанализатор Q600 SDT, фирма Instrument). На основании результатов ДТА были рассчитаны четыре параметра активности смесей: температура начала окисления ( $T_{н.о.}$ , °С), степень окисленности ( $\alpha$ , %), максимальная скорость окисления ( $v_{max}$ , мг/мин), удельный тепловой эффект ( $\Delta H$ , Дж/г). Рентгенофазовый анализ с использованием дифрактометра «Дифрей-401», излучение рентгеновской трубки  $F\epsilon_{K\alpha} = 0,193$  нм.

**Результаты.** Определены параметры активности смесей нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала. Установлено, что температура начала окисления смесей равна или превышает 420 °С, т. е. смеси не пирофорны. Процесс горения, инициированный открытым пламенем, протекал в две стадии: при 600–900 и при 2200–2400 °С. Изучены продукты сгорания смесей нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала в воздухе и в жидком азоте. Впервые экспериментально показано, что при горении нанопорошка алюминия в воздухе алюминий восстанавливает пентаоксид тантала, который взаимодействует с азотом воздуха, образуя кристаллический нитрид тантала  $Ta_2N$ . Максимальный выход нитрида тантала при сгорании в воздухе с образованием кристаллической фазы  $Ta_2N$  составлял 54 отн. %. Согласно РФА, также впервые в продуктах сгорания в жидком азоте смеси нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала обнаружены кристаллические фазы  $\alpha$ - и  $\beta$ -тантала. В то же время нитрид тантала не обнаружен в продуктах сгорания образца в жидком азоте. Стабилизация металлической фазы тантала при взаимодействии нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала в условиях теплового взрыва подтверждает ранее сформулированное предположение о механизме образования тугоплавких нитридов. На первой стадии алюминий восстанавливает тантал до металла, и в условиях теплового взрыва и дезактивации кислорода (нетеплового процесса перехода триплетного кислорода в синглетный) происходит взаимодействие восстановленного металла с азотом.

### Ключевые слова:

Нитрид тантала, тепловой взрыв, нанопорошок, алюминий, газ азот, жидкий азот, тантал, пентаоксид тантала, термодинамика, кислород, синтез сжиганием.

### Введение

Долгое время (с 40-х гг. прошлого века по настоящее время) считалось, что металлы (тантал, алюминий, титан, ниобий и другие) при сгорании в воздухе образуют только оксиды, а азот является химически инертным веществом [1, 2]. Согласно эксперимен-

тальным данным, новым основным конечным продуктом сгорания порошкообразного алюминия в воздухе является нитрид алюминия [3].

Возможность образования нитридов допускалась только в качестве промежуточных веществ, обязательно доокисляющихся до оксидов, кроме

того, согласно термодинамическим расчетам, окисление алюминия в воздухе должно протекать до оксида [4, 5]. Тем не менее химическое связывание азота воздуха известно и происходит при сгорании порошков ниобия и тантала с образованием нитрида тантала [6].

При горении в воздухе нанопорошка алюминия (НП Al) с оксидами тантала, ниобия и др. образуются и стабилизируются соответствующие нитриды [7–11]. В то же время процессы при горении и распределении элементов в продуктах сгорания практически не изучены: в процессе формирования кристаллических фаз происходит неравномерное распределение азота. Однородность продуктов сгорания достигается последующим их дезагрегированием и измельчением. Таким образом, перспективным способом химического связывания азота воздуха и получения тугоплавких нитридов тантала [12], ниобия, титана, циркония и др. является синтез сжиганием в воздухе нанопорошка алюминия с соответствующими оксидами.

Предполагаемая технология получения тугоплавких нитридов имеет ряд преимуществ: низкие энергозатраты, отсутствие необходимости в сложном оборудовании [13–18], наличие плавно меняющихся слоев между различными кристаллическими фазами. Процесс синтеза происходит в воздухе при атмосферном давлении. Для осуществления синтеза необходим только кратковременный локальный нагрев исходной шихты, затем процесс протекает самопроизвольно.

Цель настоящей работы экспериментально определить составы продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия и пентаоксида тантала в воздухе и в жидком азоте.

#### Методики экспериментов и характеристики объектов исследования

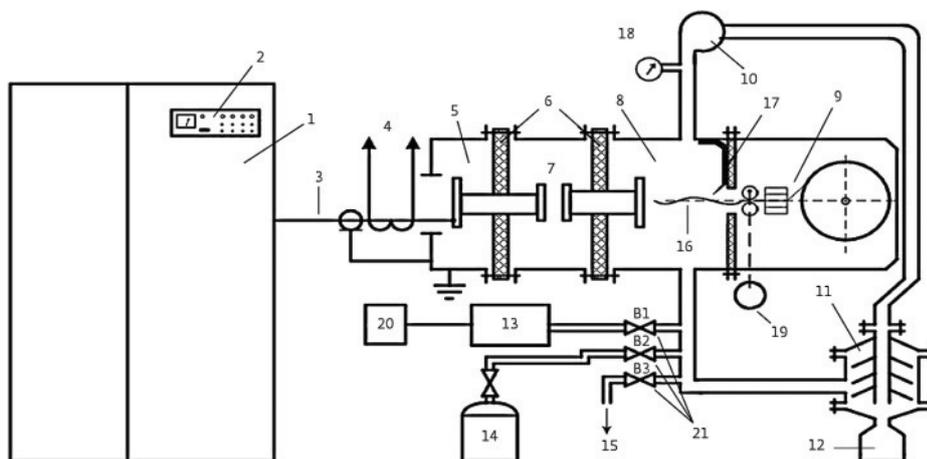
Нанопорошок алюминия был получен с использованием опытно-промышленной установки «УДП-4Г», изготовленной в Научно-исследовательском институте высоких напряжений ТПУ [19]. Схема установки приведена на рис. 1.

В качестве объекта исследования выбрана смесь НП Al с пентаоксидом тантала  $Ta_2O_5$  в мольном 4:1 или в массовом соотношении 0,79:3,21.

Смешивание нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала проводили механическим способом – растиранием смесей на кальке. Из полученной смеси формировали цилиндрический образец высотой 6–8 мм и диаметром 30 мм. Образец формировали в стальной пресс-форме.

Величину пористости регулировали давлением прессования до 3 МПа. В результате был получен высокопористый газопроницаемый образец, сохраняющий форму в процессе горения. Масса компактированного образца составляла 4 г. Образец зажигали в воздухе и сбрасывали в жидкий азот [20–25]. Фотографии процесса горения образца представлены на рис. 2.

Горение [14–26] протекало в две стадии. Первая стадия происходила в воздухе и представляла



**Рис. 1.** Схема установки УДП-4Г для получения нанопорошка алюминия по методу электрического взрыва проводника (ЭВП): 1 – блок питания; 2 – пульт управления; 3 – высоковольтные кабели; 4 – токовый шунт; 5 – камера высоковольтного ввода; 6 – проходные изоляторы; 7 – разрядник; 8 – взрывная камера; 9 – механизм подачи проводника; 10 – вентилятор; 11 – фильтр-уловитель нанопорошка; 12 – сборник нанопорошка; 13 – форвакуумный насос; 14 – баллон с газом; 15 – трубопровод для сброса газа в вытяжную вентиляцию; 16 – взрывающийся проводник; 17 – заземленный электрод; 18 – вакуумметр; 19 – двигатель механизма подачи проводника; 20 – пульт управления форвакуумным насосом; 21 – газовые краны

**Fig. 1.** Scheme of the UDP-4G for production of aluminum nanopowder by the method of wire electrical explosion (WEE): 1 is the power supply; 2 is the control panel; 3 are the high-voltage cables; 4 is the current shunt; 5 is the high-voltage input chamber; 6 are the bushing insulators; 7 is the discharger; 8 is the explosion chamber; 9 is the feeder mechanism; 10 is the fan; 11 is the filter-trap of nanopowder; 12 is the nanopowder chamber; 13 is the fore-vacuum pump; 14 is the cylinder with gas; 15 is the pipeline for venting gas into the exhaust ventilation; 16 is the exploding conductor; 17 is the grounded electrode; 18 is the vacuum meter; 19 is the feeder mechanism motor; 20 is the control panel for vacuum pump; 21 are the gas valves

собой распространение волны горения по боковой поверхности с образованием сплошного горящего кольца и перемещением фронта горения вглубь образца.



**Рис. 2.** Фотографии процесса зажигания и горения таблеток из смеси нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала: инициирование горения в воздухе и горение в жидком азоте

**Fig. 2.** Photos of combustion initiate and tablet burning of aluminum nanopowder and tantalum pentoxide in air and combustion in liquid nitrogen

Затем образец сбрасывали в жидкий азот, и горение переходило в следующую стадию, в результате которой достигалась максимальная температура. Самопроизвольное быстрое увеличение температуры сопровождается увеличением интенсивности свечения и соответствует тепловому взрыву. После достижения тепловыделения и максимальной температуры интенсивность излучения снижалась: продукты сгорания остывали в среде жидкого азота.

### Результаты экспериментов

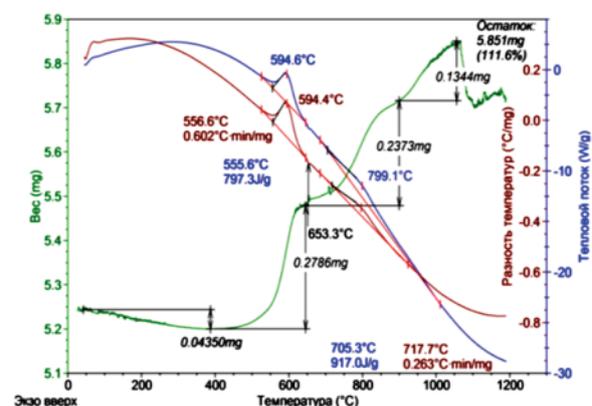
После инициирования процесс горения нанопорошка протекал в режиме тления при 600–900 °С с последующим перемещением фронта горения вглубь образца. Затем горение переходило во вторую стадию уже в жидком азоте. Вторая стадия сопровождалась резким увеличением интенсивности свечения. Уменьшение интенсивности свечения образца свидетельствовало об охлаждении образца. Полученные спеки дезагрегировали и просеивали через сито с размером ячеек 63 мкм.

Для изучения термической устойчивости в воздухе нанопорошка алюминия и его смесей с пентаоксидом тантала использовали дифференциальный термический анализ.

Дифференциальный термический анализ использовали (рис. 3) для оценки реакционной способности исходного нанопорошка алюминия и исследуемых смесей, а также были рассчитаны четыре параметра их химической активности (табл. 1) [27].

Все приготовленные смеси имели температуру начала окисления выше 400 °С. Скорость окисления максимальна для образца № 3: она мало отличалась от скорости окисления образца № 4, но в 1,5 раза выше, чем для образца № 2.

Скорость окисления минимальна для образца без добавок. Таким образом, добавка пентаоксида тантала оказывает каталитическое влияние на горение нанопорошка алюминия. Степень окисленности смесей возрастает с 53,7 до 88,9 % с увеличением содержания нанопорошка алюминия.



**Рис. 3.** Термограмма смеси нанопорошка алюминия с порошком пентаоксида тантала с массовым соотношением НП Al: Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=4:1 (атмосфера – воздух, скорость нагрева 10 °С, вес – 5,851 мг)

**Fig. 3.** Thermogram of aluminum nanopowder and tantalum pentoxide mixture with mass ratio NPAI: Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=4:1 (air, heating rate 10 °C/min, sample weight is 5,851 mg)

**Таблица 1.** Параметры активности смесей нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала

**Table 1.** Activity parameters of aluminum nanopowder and tantalum pentoxide mixtures

№ образца Sample no.	Состав образца, мас. частей Composition sample, wt. parts		T <sub>гор.</sub> , °C T <sub>ст.окр.</sub> , °C	α, %	V <sub>макс.</sub> мас. % / с V <sub>макс.</sub> wt. % / s	ΔH <sub>г</sub> , кДж/моль Al ΔH <sub>г</sub> , кДж/моль Al
	НП Al, г Al NP, g	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , г/г				
0	4,00	0,00	445	53,7	0,025	6,7
1	0,44	3,57	450	88,8	0,037	0,868
2	0,62	3,38	420	88,8	0,029	1,466
3	0,79	3,21	420	89,1	0,040	1,714
4	0,93	3,06	510	88,9	0,038	2,235

Тепловой эффект минимален для образца № 1 и увеличивается с 1521,5 до 6750 Дж/г. Тепловой эффект сгорания смеси нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала возрастает с увеличением содержания нанопорошка алюминия.

Для определения фазового состава продуктов сгорания использовали метод рентгенофазового анализа [19]. На рис. 4 представлена рентгенограмма продуктов сгорания в воздухе образца исходной смеси, для которого выход нитрида тантала максимальный (54 отн. %).

Согласно рентгенофазовому анализу, в состав конечных продуктов сгорания смеси образца 3 входят: Ta<sub>2</sub>N, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и невосстановленный Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Из рентгенограммы следует, что нитриду тантала соответствует рефлекс 100 % интенсивности.

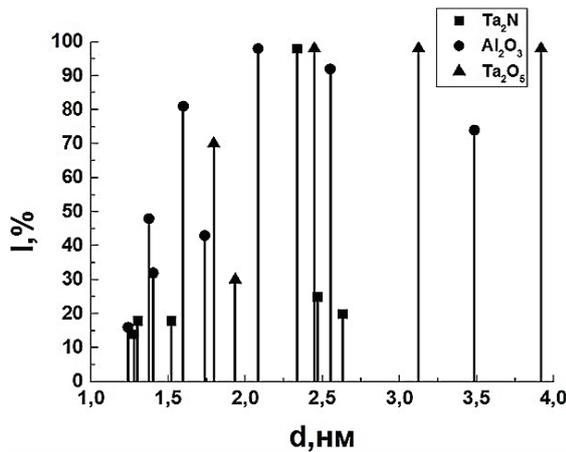


Рис. 4. Рентгенограмма продуктов сгорания в воздухе смеси нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала (массовое соотношение НП Al: Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=4:1)

Fig. 4. X-ray diagram of combustion products of tantalum pentoxide and aluminum nanopowder mixture in air (NPAI: Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=4:1)

Таблица 2. Состав продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала по данным рентгенофазового анализа

Table 2. Composition of combustion products of mixtures of aluminum nanopowder with tantalum pentoxide according to X-ray analysis

Состав образца (НП Al: Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) Sample composition (NP Al: Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Интенсивность 100 % рефлекса фазы Intensity of the 100 % phase reflex		
	Ta <sub>2</sub> N	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AlTaO <sub>4</sub>
(2:1)	22,5	1,04	65,3
(3:1)	28,5	8,00	22,7
(4:1)	54,0	11,00	–
(5:1)	52,3	6,50	7,50

Выход нитрида тантала Ta<sub>2</sub>N максимален и составляет 54 отн. %, при мольном соотношении, равном 4:1 (массовое соотношение в шихте НП Al: Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0,79:3,21).

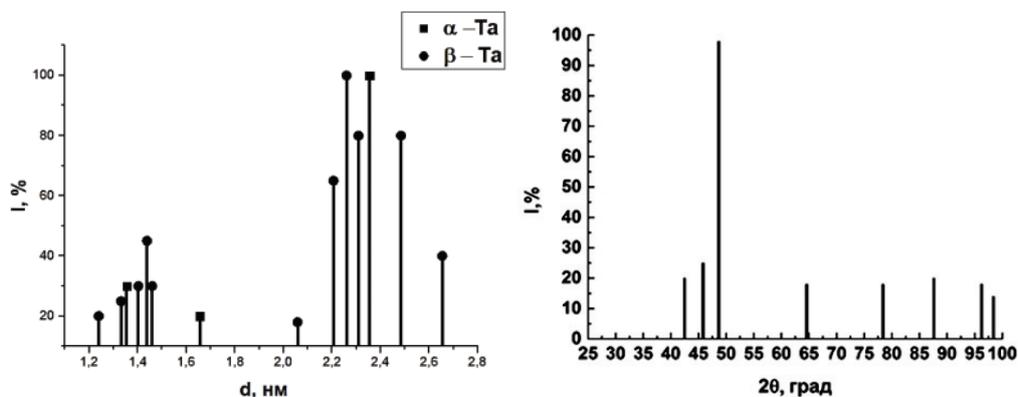


Рис. 5. Рентгенограмма продуктов сгорания в жидком азоте смеси нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала (массовое соотношение НП Al: Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=4:1) и штрих-диаграмма Ta<sub>2</sub>N (карточка PDF-260985)

Fig. 5. X-ray diagram of combustion products of tantalum pentoxide and aluminum nanopowder mixture in nitrogen liquid (Al NP: Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=4:1) and X-ray analyses of diagram of Ta<sub>2</sub>N (card PDF-260985)

На рис. 5 приведена рентгенограмма продуктов сгорания смеси нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала в жидком азоте.

Рентгенограмма нитрида тантала в продуктах совпадает со штрих-диаграммой, взятой из картотеки PDF-260985, которая представлена на рис. 5. Согласно РФА, в продуктах сгорания в жидком азоте смеси нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала обнаружены кристаллические фазы α- и β-тантала (рис. 5), но нитрид тантала в продуктах отсутствовал.

Из рентгенограммы (рис. 5) следует, что α-Ta соответствует рефлекс 100 % интенсивности, а в перерасчете на содержание α-Ta составляет 89,2 отн. %, а содержание кристаллической фазы β-Ta равно 10,7 отн. %.

### Заключение

Результаты исследований показали, что с увеличением содержания (табл. 2) исходного нанопорошка алюминия содержание нитрида тантала в продуктах сгорания увеличивалось и выход достигал 54 отн. %. При сжигании смеси нанопорошка алюминия и пентаоксида тантала в жидком азоте стабилизировались две фазы металлического тантала – α- и β-фазы. Нитрид тантала при сжигании смеси в жидком азоте не образовался из-за недостаточной температуры при горении.

Стабилизация металлической фазы тантала при взаимодействии нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала в условиях теплового взрыва подтверждает ранее сформулированное предположение о механизме образования тугоплавких нитридов. На первой стадии [27] алюминий восстанавливает оксид тантала до металла: в условиях теплового взрыва в воздухе и дезактивации кислорода [2] происходит взаимодействие восстановленного металла с азотом.

### Выводы

1. Экспериментально установлено, что максимальный выход нитрида тантала в продуктах

- сгорания смесей нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала наблюдается в образце с исходным соотношением Al: Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, равным 4:1 (0,79:3,21), табл. 1. При этом содержание нитрида тантала, согласно рентгенофазовому анализу, достигало 54 отн. %.
2. Установлено, что после сгорания в воздухе смесей нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала в продуктах сгорания содержится нитрид – Ta<sub>2</sub>N, который образуется при взаимодействии с азотом воздуха в присутствии дезактивированного кислорода (2200–2400 °C) с участием алюминия как восстановителя.
  3. Определен фазовый состав продуктов сгорания: согласно рентгенофазовому анализу, в состав продуктов сгорания в воздухе смесей входят: Ta<sub>2</sub>N, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlTaO<sub>4</sub>.
  4. Экспериментально показано, что при сгорании в жидком азоте смеси нанопорошка алюминия с пентаоксидом тантала в качестве конечного продукта стабилизируется металлический тантал.
- Работа выполнена при поддержке Государственного задания «Наука», проект № 11.1928.2017/4.6.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beckstead M.W.A. Summary of aluminum combustion. RTO/VK Special Course on «Internal aerodynamics in Solid Rocket Propulsion». Report № RTOEN023, 2002. – 45 p.
2. Ильин А.П., Роот Л.О. Новый механизм высокотемпературного химического связывания азота воздуха // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6–6. – С. 1377–1381.
3. О влиянии азота на горение алюминия / В.М. Боборыкин, В.М. Гремячкин, А.Г. Истратов и др. // Физика горения и взрыва. – 1983. – № 3. – С. 22–29.
4. A facile synthesis of boron nitride nanosheets and their potential application in dye adsorption / Xiaobo Wang, Yanfei Yang, Guodong Jianga, Zewei Yuanc, Songdong Yuana // Diamond & Related Materials. – 2018. – № 81. – P. 89–95.
5. Gromov A.A., Teipel U. Metal Nanopowders: Production, Characterization and Energetic Application. – Weinheim: Wiley-VCH, 2014. – 440 p.
6. Nobuzo Terao. Structure des Nitrures de Niobium // Jap. J. of applied physics. – 1965. – V. 64. – № 5. – P. 353–367.
7. Самсонов Г.В. Нитриды. – Киев: Наукова думка, 1969. – 377 с.
8. Самсонов Г.В. Химия и физика нитридов. – Киев: Наукова думка, 1968. – 174 с.
9. Тот Л. Карбиды и нитриды переходных металлов. – М.: Мир, 1974. – 294 с.
10. Facile synthesis of powder-based processing of porous aluminum nitride / Kyungju Nam, Kicheol Hong, Hyeji Park, Heeman Choe // Journal of the European Ceramic Society. – April 2018. – V. 38. – № 4. – P. 1164–1169.
11. Химия синтеза сжиганием / пер. с яп. / под ред. М. Коидзуми. – М.: Мир, 1998. – 247 с.
12. Low-temperature synthesis of tantalum carbide by facile one-pot reaction / Jinming Jiang, Song Wang, Wei Li, Zhaohui Chen // Ceramics International. – 2016. – V. 42. – № 6. – P. 7118–7124.
13. Schweiter C., Schmidt R. Physical Mechanisms of Generation and Deactivation of Singlet Oxygen // Chemical Review. – 2003. – V. 103 (5). – P. 1685–1787.
14. Harneet Kaur Sidana, Rameez Ahmad Mir, Pandey O.P. Synthesis of molybdenum nitride (Mo<sub>2</sub>N) nanoflakes via in-situ reduction-nitridation // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – № 736. – P. 255–265.
15. Low-temperature direct synthesis of mesoporous vanadium nitrides for electrochemical capacitors / Hae-Min Lee, Gyoung Hwa Jeong, Sang-Wook Kim, Chang-Koo Kim // Applied Surface Science. – 2017. – № 400. – P. 194–199.
16. Thobeka Kente, Sabelo Dalton Mhlanga. Gallium nitride nanostructures: Synthesis, characterization and applications // Journal of Crystal Growth. – 2016. – № 444. – P. 55–72.
17. Ковба Л.М., Трунов В.К. Рентгенофазовый анализ. – М.: МГУ, 1976. – 232 с.
18. Zarko V.E., Gromov A.A. Energetic nanomaterials: Synthesis, Characterization and Application. – Weinheim: Wiley-VCH, 2016. – 374 p.
19. Molten salt synthesis of tetragonal carbon nitride hollow tubes and their application for removal of pollutants from wastewater / Liang Tiana, Junyi Lia, Feng Lianga, Junkai Wang, Saisai Lia, Haijun Zhanga, Shaowei Zhang // Applied Catalysis B: Environmental. – 2018. – № 225. – P. 307–313.
20. Aluminium nitride cubic modifications synthesis methods and its features. Review / V.S. Kudyakova, R.A. Shishkin, A.A. Elagin, M.V. Baranov, A.R. Beketov // Journal of the European Ceramic Society. – 2017. – № 37. – P. 1143–1156.
21. An atmospheric pressure microplasma process for continuous synthesis of titanium nitride nanoparticles / Liang liang Lin, S.A. Starostin, Qi Wang, V. Hessel // Chemical Engineering Journal. – 2017. – № 321. – P. 447–457.
22. Synthesis of TiN nanostructures by Mg-assisted nitriding TiO<sub>2</sub> in N<sub>2</sub> for lithium ion storage / Huimin Shi, Hang Zhang, Zhi Chena, Tao Wang, Lei Wang, Wei Zeng, Guanhua Zhang, Huihao Duan // Chemical Engineering Journal. – 2018. – № 336. – P. 12–19.
23. Synthesis of boron nitride nanostructures from catalyst of iron compounds via thermal chemical vapor deposition technique / W.M. da Silva, H. Ribeiro, T.H. Ferreira, L.O. Ladeira, E.M.B. Sousa // Physica E. – 2017. – № 89. – P. 177–182.
24. Facile synthesis of powder-based processing of porous aluminum nitride / Kyungju Nam, Kicheol Hong, Hyeji Park, Heeman Choe // Journal of the European Ceramic Society. – April 2018. – V. 38. – Iss. 4. – P. 1164–1169.
25. Ognjanović S.M., Winterer M. Optimizing particle characteristics of nanocrystalline aluminum nitride // Powder Technology. – 15 February 2018. – V. 326. – P. 488–497.
26. Уэндландт У. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 218 с.
27. Горение нанопорошков металлов / А.А. Громов, Т.А. Хабас, А.П. Ильин и др. / под. ред. А.А. Громова. – Томск: Дельта-план, 2008. – 382 с.

*Поступила 18.06.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Чудинова А.О.**, аспирант отделения естественных наук Школы базового инженерного образования Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ильин А.П.**, доктор физико-математических наук, профессор отделения естественных наук Школы базового инженерного образования Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Роот Л.О.**, кандидат технических наук, доцент отделения естественных наук Школы базового инженерного образования Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мостовщиков А.В.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории СВЧ-технологий Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Спесивцева С.В.**, магистр отделения естественных наук Школы базового инженерного образования Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Джин Чун Ким**, доктор технических наук, профессор Школы материаловедения и машиностроения Ульсанского Университета.

UDC 544.45.452.2

## ON AIR NITROGEN CHEMICAL BONDING IN HEAT EXPLOSION OF ALUMINUM NANOPOWDER AND TANTALUM OXIDE MIXTURES

**Alexandra O. Chudinova**<sup>1</sup>,

chudinova.1509@mail.ru

**Alexander P. Ilyin**<sup>1</sup>,

ilyin@mail.ru

**Lyudmila O. Root**<sup>1</sup>,

tolbanova@mail.ru

**Andrey V. Mostovshchikov**<sup>1</sup>,

avmost@tpu.ru

**Sofia V. Spesivtseva**<sup>1</sup>,

ivakhnyuk-sofya@mail.ru

**Jin Chun Kim**<sup>2</sup>,

jckimpml@ulsan.ac.kr

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> University of Ulsan,  
Daehak-ro 102, Nam-gu, Ulsan, 680–749, South Korea.

**The relevance of the research.** The new proposed technology for obtaining refractory nitrides has several advantages: low energy consumption, no need for complex equipment, nitrogen is used to produce nitrides, synthesis is carried out at atmospheric pressure.

**The main aim** of the research is to determine experimentally the composition of combustion products of aluminum nanopowder and tantalum pentoxide mixtures in air and in liquid nitrogen.

**Object:** tantalum nitride synthesis product obtained by burning the aluminum nanopowder mixture with tantalum pentoxide in air.

**Methodsh:** x-ray analysis (diffractometer Difrey-401), differential thermal analysis (DTA) (thermoanalyzer SDT Q600 Instrument company). According to the results of the DTA the authors have calculated four parameters of activity of the mixtures: oxidation onset temperature ( $T_{st,ox}$ , °C), oxidation level ( $\alpha$ , %), maximal oxidation rate ( $v_{max}$ , mg/min), specific thermal effect ( $\Delta H$ , J/g).

**Results.** The authors determined the parameters of activity of aluminum nanopowder with tantalum pentoxide mixtures. It is revealed that along with nitride and aluminum oxide in the products a crystalline phase of metallic tantalum is formed. The maximum yield of tantalum was 54 rel. %. It was shown experimentally that at aluminum nanopowder combustion in air, aluminum recovers tantalum pentoxide, which interacts with air nitrogen to form crystalline  $Ta_2N$  tantalum nitride. According to X-ray, in the combustion products of a mixture of aluminum nanopowder with tantalum pentoxide, the crystalline phases of  $\alpha$ - and  $\beta$ -tantalum are found. At the same time, tantalum nitride was not detected when the sample was burned in liquid nitrogen.

### Key words:

Tantalum nitride, thermal explosion, nanopowder, aluminum, gas nitrogen, liquid nitrogen, tantalum, tantalum pentoxide, thermodynamics, oxygen, synthesis by combustion.

The research was supported by the State task «Nauka», project no. 11.1928.2017/4.6.

### REFERENCES

1. Beckstead M.W.A. *Summary of aluminum combustion. RTO/VK Special Course on «Internal aerodynamics in Solid Rocket Propulsion»*. Report no. RTOENO23, 2002. 45 p.
2. Ilin A.P., Root L.O. Novy mekhanizm vysokotemperaturnogo khimicheskogo svyazyvaniya azota vozdukh [New mechanism of high-temperature chemical bonding of air nitrogen]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 6–6, pp. 1377–1381.
3. Boborykin V.M., Gremyachkin V.M., Istratov A.G. O vliyani azota na gorenije alyuminiya [Nitrogen impact on aluminum combustion]. *Fizika gorenija i vzryva*, 1983, no. 3, pp. 22–29.
4. Xiaobo Wang, Yanfei Yang, Guodong Jianga, Zewei Yuanc, Songdong Yuana. A facile synthesis of boron nitride nanosheets and their potential application in dye adsorption. *Diamond & Related Materials*, 2018, no. 81, pp. 89–95.
5. Gromov A.A., Teipel U. *Metal Nanopowders: Production, Characterization and Energetic Application*. Wiley-VCH, Weinheim, 2014. 440 p.
6. Nobuzo Terao. Structure des Nitrures de Niobium. *Jap. J. of applied physics*, 1965, vol. 64, no. 5, pp. 353–367.
7. Samsonov G.V. *Nitridy* [Nitrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1969. 390 p.
8. Samsonov G.V. *Khimiya i fizika nitridov* [Chemistry and physics of nitrides]. Kiev, Naukova dumka, 1968. 174 p.
9. Thoht L. *Karbidy i nitridy perekhodnykh metallov* [Carbides and nitrides of transition metals]. Moscow, Mir Publ., 1974. 294 p.
10. Kyungju Nam, Kicheol Hong, Hyeji Park, Heeman Choe. Facile synthesis of powder-based processing of porous aluminum nitride. *Journal of the European Ceramic Society*, April 2018, vol. 38, no. 4, pp. 1164–1169.

11. *Khimiya sinteza szhiganiem* [Chemistry of synthesis by burning]. Ed. M. Koizumi. Translated from Japanese. Moscow, Mir Publ., 1998. 247 p.
12. Jinming Jiang, Song Wang, Wei Li, Zhaohui Chen. Low-temperature synthesis of tantalum carbide by facile one-pot reaction. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, no. 6, pp. 7118–7124.
13. Schweiter C., Schmidt R. Physical Mechanisms of Generation and Deactivation of Singlet Oxygen. *Chemical Review*, 2003, vol. 103 (5), pp. 1685–1787.
14. Harneet Kaur Sidana, Rameez Ahmad Mir, O.P. Pandey. Synthesis of molybdenum nitride (Mo<sub>2</sub>N) nanoflakes via in-situ reduction-nitridation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, no. 736, pp. 255–265.
15. Hae-Min Lee, Gyoung Hwa Jeong, Sang-Wook Kim, Chang-Koo Kim. Low-temperature direct synthesis of mesoporous vanadium nitrides for electrochemical capacitors. *Applied Surface Science*, 2017, no. 400, pp. 194–199.
16. Thobeka Kente, Sabelo Dalton Mhlanga. Gallium nitride nanostructures: Synthesis, characterization and applications. *Journal of Crystal Growth*, 2016, no. 444, pp. 55–72.
17. Kovba L.M., Trunov V.K. *Rentgenofazovoy analiz* [X-ray diffraction analysis]. Moscow, MGU Publ., 1976. 232 p.
18. Zarko V.E., Gromov A.A. *Energetic nanomaterials: Synthesis, Characterization and Application*. Wiley-VCH, Weinheim, 2016. 374 p.
19. Liang Tiana, Junyi Lia, Feng Lianga, Junkai Wanga, Saisai Lia, Haijun Zhanga, Shaowei Zhang. Molten salt synthesis of tetragonal carbon nitride hollow tubes and their application for removal of pollutants from wastewater. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018, no. 225, pp. 307–313.
20. Kudyakova V.S., Shishkin R.A., Elagin A.A., Baranov M.V., Bekeov A.R. Aluminium nitride cubic modifications synthesis methods and its features. Review. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, no. 37, pp. 1143–1156.
21. Liang liang Lin, Starostin S.A., Qi Wang, Hessel V. An atmospheric pressure microplasma process for continuous synthesis of titanium nitride nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, 2017, no. 321, pp. 447–457.
22. Huimin Shi, Hang Zhang, Zhi Chena, Tao Wang, Lei Wang, Wei Zeng, Guanhua Zhang, Huigao Duan. Synthesis of TiN nanostructures by Mg-assisted nitriding TiO<sub>2</sub> in N<sub>2</sub> for lithium ion storage. *Chemical Engineering Journal*, 2018, no. 336, pp. 12–19.
23. Da Silva W.M., Ribeiro H., Ferreira T.H., Ladeira L.O., Sousa E.M.B. Synthesis of boron nitride nanostructures from catalyst of iron compounds via thermal chemical vapor deposition technique. *Physica E*, 2017, no. 89, pp. 177–182.
24. Kyungju Nam, Kicheol Hong, Hyeji Park, Heeman Choe. Facile synthesis of powder-based processing of porous aluminum nitride. School of Materials Science and Engineering, Kookmin University, Republic of Korea. *Journal of the European Ceramic Society*, April 2018, vol. 38, Iss. 4, pp. 1164–1169.
25. Ognjanović S.M., Winterer M. Optimizing particle characteristics of nanocrystalline aluminum nitride. *Powder Technology*, 15 February 2018, vol. 326, pp. 488–497.
26. Uendlandt U. *Termicheskie metody analiza* [Thermal analysis methods]. Moscow, Mir Publ., 1978. 218 p.
27. Gromov A.A., Khabas T.A., Ilin A.P. *Gorenie nanoporoshkov metallov* [Metal nanopowder burning]. Ed. by A.A. Gromov. Tomsk, Deltoplan Publ., 2008. 382 p.

Received: 18 June 2018.

#### Information about the authors

**Alexandra O. Chudinova**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander P. Ilyin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Lyudmila O. Root**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Andrey V. Mostovshchikov**, Cand. Sc., research fellow, associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sofia V. Spesivtseva**, master, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Jin Chun Kim**, PhD technical, professor, University of Ulsan.

УДК 69.058.8

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЖИВУЧЕСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Однокопылов Георгий Иванович<sup>1</sup>,  
OGIz@yandex.ru

Саркисов Дмитрий Юрьевич<sup>2</sup>,  
Milandd@yandex.ru

Бутузов Егор Анатольевич<sup>2</sup>,  
egorko18m@gmail.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

**Актуальность** работы обусловлена техническим усложнением объектов нефтегазового комплекса вследствие увеличения объемов и скорости добычи сырья, на которые возможно воздействие ударно-волновых нагрузок при нештатных ситуациях. Причинами воздействия могут быть взрывы, падения тяжелых грузов, террористические акты, природные и техногенные катастрофы и т. д. Данные ситуации с большой вероятностью приводят к значительному повреждению строительных конструкций производственных зданий и сооружений. Вследствие чего для обеспечения дальнейшего функционирования сооружения необходимо проектировать строительные конструкции и объект в целом, обладающие свойствами живучести при нестационарном воздействии. Учет таких свойств должен анализироваться при построении сценариев возникновения и развития нештатных ситуаций, а также при анализе рисков. Таким образом, разработка способов оценки степени живучести строительных конструкций при ударно-волновом воздействии является актуальной задачей.

**Цель работы:** создание практически применимого способа оценки степени живучести строительной конструкции при кратковременном ударно-волновом нагружении на основе анализа энергетического параметра.

**Методы исследования:** измерения ускорений, прогибов и нагрузки методами тензометрии, графоаналитический метод исследования с применением программы Microsoft Excel.

**Результаты.** Разработан способ оценки степени живучести строительной конструкции при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса с применением коэффициента степени живучести. На примере конкретного испытания изгибаемого железобетонного элемента на кратковременную динамическую нагрузку получены значения указанного коэффициента. Внесены предложения по направлениям использования коэффициента степени живучести при проектировании строительных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых при возможном воздействии кратковременных динамических нагрузок.

### Ключевые слова:

Степень живучести, энергия упругой деформации, работа, кратковременное динамическое нагружение, ударно-волновое нагружение, железобетон, экспериментальные исследования.

### Актуальность исследования

Согласно федеральному закону № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», многие объекты нефтегазового комплекса относятся к категории опасных производственных объектов, например, цеха нефтеили газоперерабатывающих заводов, стационарные платформы и др.

На опасных производственных объектах всегда существует повышенная вероятность возникновения чрезвычайной ситуации аварийного характера, вследствие которой могут происходить взрывы и воздействия на строительные конструкции кратковременных динамических нагрузок. Такие нагрузки характеризуются резким нарастанием фронта, коротким сроком действия и волновым характером воздействия.

При строительстве указанных объектов для возведения несущих оснований зданий и сооружений часто используется монолитный или сборный железобетон.

Основным требованием, предъявляемым к несущим строительным конструкциям при аварийных воздействиях, является сохранение несущей способности, при этом прогибы и деформации в общем случае не нормируются, а, следовательно, в целях экономии при проектировании можно использовать все ресурсы пластической работы материала. По сути, конструкция должна обладать свойством живучести при воздействии на нее кратковременных динамических нагрузок. Применение методов теории живучести технических систем [1–7] и статических и динамических оценок функционирования технических объектов позволяет точнее определить остаточный ресурс строительных конструкций, а также зданий и сооружений после воздействий сверхнормативных динамических нагрузок.

Сложность процессов, происходящих в железобетоне при кратковременном динамическом воздействии [8–30], особенно в пластической стадии

работы материала, делает неотъемлемой частью работы по проектированию таких конструкций экспериментальные исследования.

В то же время экспериментальные исследования имеют ограничения в плане наличия необходимого оборудования и методов его использования (возможность установки и применения, недопущения повреждений вследствие высокой стоимости, воспроизводимость полученных данных и др.).

Таким образом, перед исследователями стоит задача создавать доступные способы обработки и интерпретации информации, полученной при экспериментальных исследованиях, с возможностью их практического применения. Такие способы должны быть воспроизводимы и применимы при проведении испытаний конструкций с различными динамическими параметрами.

В работе предложена методика для оценки степени живучести ответственных строительных конструкций при ударно-волновом нагружении. В качестве примера рассмотрено испытание изгибаемого железобетонного элемента при действии кратковременной динамической нагрузки.

Целью работы является создание практически применимого способа оценки степени живучести строительной конструкции при кратковременном ударно-волновом нагружении на основе анализа энергетического параметра.

#### Экспериментальные исследования

Исследования работы изгибаемого железобетонного элемента проводились на действии ударной нагрузки на основе копровой установки. Опытный образец представлял собой железобетонную балку длиной 2,0 м, сечением 90\*180 мм, армиро-

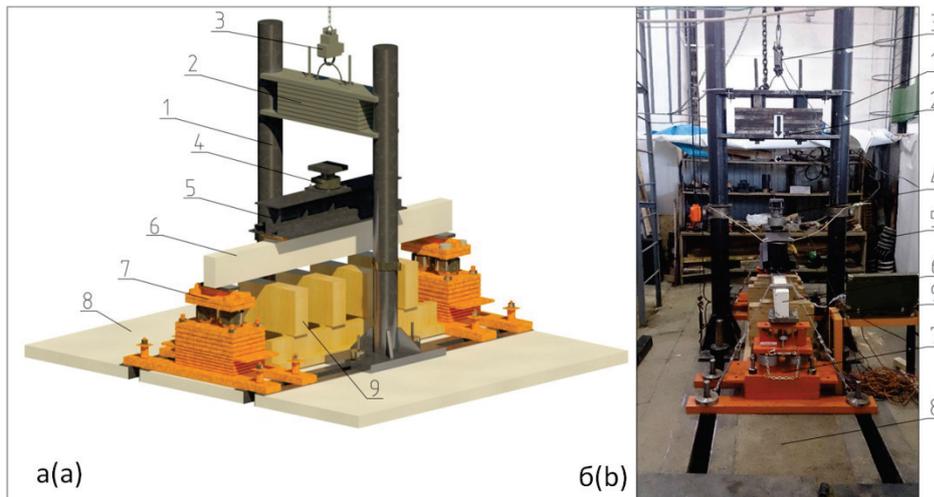
ванную четырьмя стержнями продольной арматуры диаметром 10 мм класса А400. Условия закрепления образца – шарнирные, схема однопролетная, расчетный пролет составлял 1,8 м. Деформирование образца происходило путем передачи энергии падающего с высоты 0,5 м груза массой 430 кг. Модель и реализация стенда приведены на рис. 1.

Для контроля величины нагрузки при эксперименте был применен датчик силоизмерительный тензорезистивного типа ДСТ4126 с допускаемым усилием при статическом воздействии до 2000 кН (при кратковременном динамическом нагружении до 200 кН), контроль давлений осуществлялся месдозами – 2 шт. Датчик для измерения нагрузки от падающего груза устанавливался в середине пролета распределительной траверсы. Для достижения необходимого времени действия нагрузки на датчик сверху устанавливался комплект резиновых прокладок.

Для записи ускорений и прогибов в контрольных точках экспериментального образца (пять точек, равномерно распределенных по длине) устанавливались акселерометры ARF-10000A и прогибомеры WayCon RL150-G-SR. Используемые приборы и схемы их расстановки представлены на рис. 2, 3.

Для регистрации показаний всех датчиков в процессе эксперимента были применены сертифицированные измерительные системы MIC-300m и MIC-036g (рис. 4).

Все датчики были подсоединены через кабели, имеющие защиту от помех, чем достигалась необходимая точность при синхронизации показаний со всех датчиков во времени.



**Рис. 1.** Общий вид стенда для испытаний: а) модель; б) реализация; 1 – копровая установка; 2 – груз массой 430 кг; 3 – бомбосбрасыватель; 4 – силоизмеритель; 5 – распределительная траверса; 6 – экспериментальный образец; 7 – опора; 8 – силовой пол; 9 – система страховки

**Fig. 1.** General view of the stand for the tests: a) model; b) realization; 1 is the pile driver installation; 2 is the weight of 430 kg; 3 is the release gear; 4 is the dynamometer; 5 is the distribution traverse; 6 is the experimental sample; 7 is the support; 8 is the floor power; 9 is the insurance system

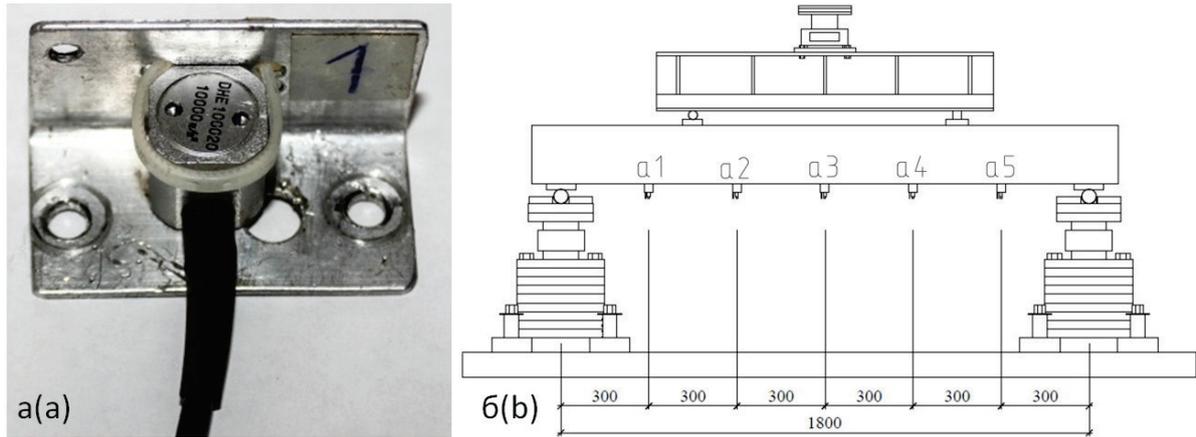


Рис. 2. а) акселерометр ARF-10000А; б) схема расстановки

Fig. 2. a) accelerometer ARF-10000A; b) arrangement scheme

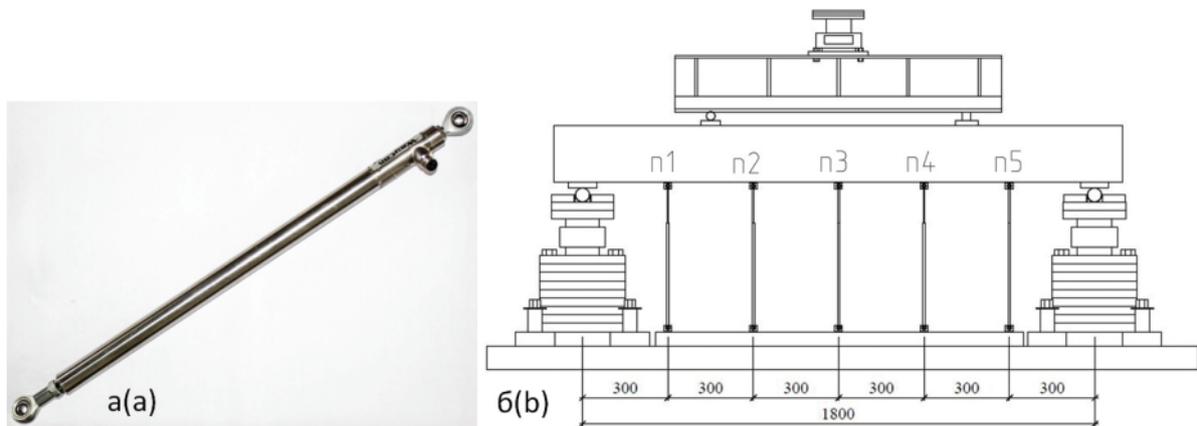
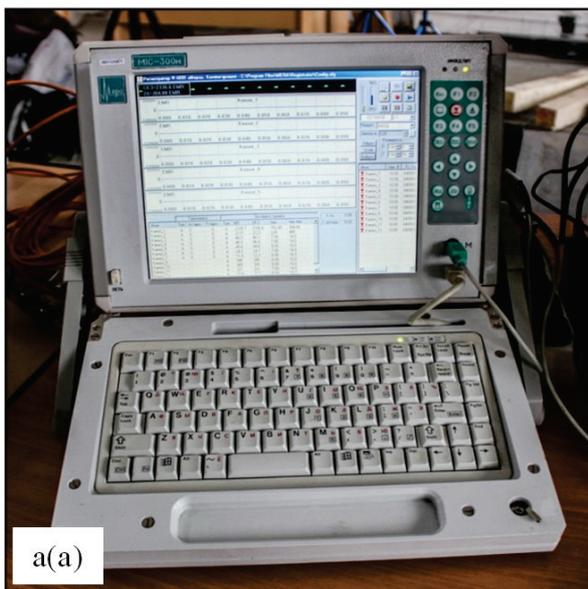
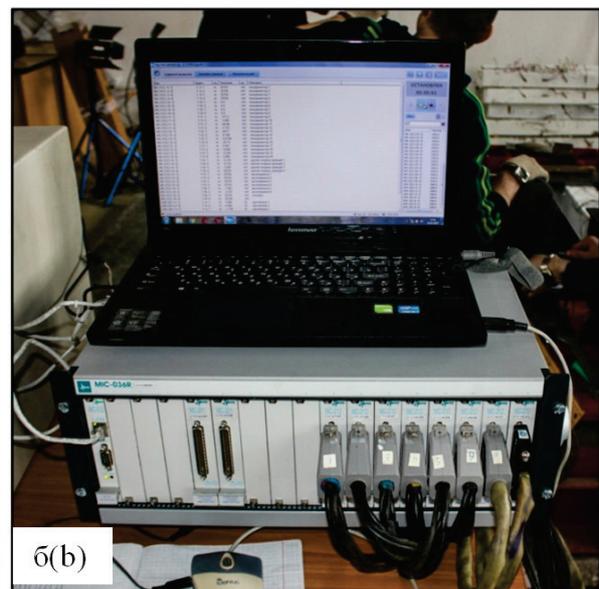


Рис. 3. а) прогибомер WayCon RL150-G-SR; б) схема расстановки

Fig. 3. a) deflectometer WayCon RL150-G-SR; b) arrangement scheme



а(а)



б(б)

Рис. 4. Измерительные системы: а) MIC-300m; б) MIC-036r

Fig. 4. Measuring systems: a) MIC-300m; b) MIC-036r

### Анализ экспериментальных данных

Из различных источников, например [31–38], известно, что при кратковременном динамическом воздействии прочность железобетонных конструкций возрастает относительно прочности при статическом действии нагрузки, что объясняется изменением физико-механических характеристик бетона и арматуры. При кратковременном динамическом нагружении происходит неравномерное развитие и некоторое запаздывание деформаций по сравнению с результатами статических испытаний. К тому же в несущих железобетонных элементах при таких воздействиях могут возникать усилия, крутящие моменты и изгибающие моменты двух плоскостей в различных сочетаниях [39, 40]. Указанное выше, с учетом скоротечности проведения исследований, существенно усложняет процесс регистрации, обработки и анализа данных.

Ранее авторами для оценки работы конструкции при кратковременном динамическом воздействии был предложен подход с использованием коэффициентов результирующей силы [41], где использованы только действующая нагрузка и опорные реакции. В настоящей работе дополнительно использованы такие параметры, как ускорения и прогибы.

После завершения эксперимента полученные исходные сигналы со всех датчиков преобразовывались в формат xls (Microsoft Excel), расчеты и обработка результатов производились в данной программе.

При упругих гармонических колебаниях твердого тела волны ускорения, скорости и координаты (прогибов) взаимосвязаны (рис. 5).

Относительно проведенного авторами эксперимента, исходя из рис. 5, можно предположить, что:

- в момент удара груза по образцу последний начинает движение, в этот момент его скорость условно максимальна (так как за малый промежуток времени изменяется на конечную величину), далее за некоторый период времени скорость уменьшается до нуля и образец останавливается в точке максимального прогиба, при этом на графике ускорения мы имеем максимум;
- далее скорость образца снова возрастает, и образец начинает движение вверх, затем скорость падает до нуля и в этот момент на графике перемещений имеем максимальный выгиб образца, на графике ускорения также видно максимальное значение;
- затем в общем случае процесс продолжаться аналогично.

Таким образом, иногда можно охарактеризовать и колебательный процесс, например, при работе технологического оборудования в здании [42].

Однако при реально проведенном эксперименте зарегистрированный график прогибов значительно отличается от графика, представленного для гармонических колебаний упругого тела на рис. 5. За счёт разрушения внутренних связей материала

и проявления пластических деформаций как в бетоне, так и в арматурных стержнях график прогибов «растягивается во времени» и «уходит вниз». В этом случае теряется ярко выраженная закономерность по времени между координатой (прогибом), скоростью и ускорением.

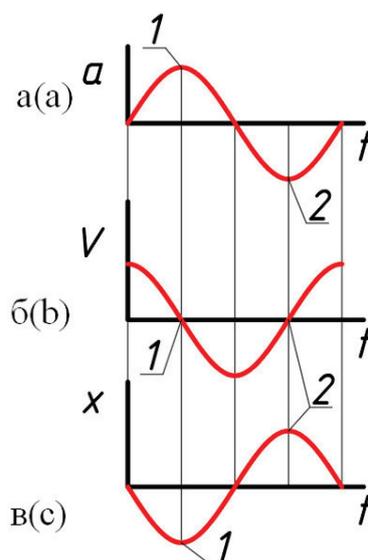


Рис. 5. Форма волны при колебании в общем виде: а) ускорение; б) скорость; в) координата (прогиб); 1 – точка на графике, соответствующая максимальному прогибу образца; 2 – точка на графике, соответствующая максимальному выгибу образца

Fig. 5. Waveform under oscillation in general form: a) acceleration; b) speed; c) coordinate (deflection); 1 is the point on the graph corresponding to the maximum deflection of the sample; 2 is the point on the graph corresponding to the maximum bend of the sample

В связи с тем, что при проведении исследований скорость приборами не регистрировалась (могла быть получена только путем интегрирования сигнала ускорения или дифференцирования сигнала перемещения), за сигналы, по которым можно было выделить временные периоды движения образца вниз и вверх при колебании, оставались сигналы ускорения и прогибов. За основной сигнал авторами был принят сигнал прогибов (как наиболее понятный для интерпретации).

В исследованиях ставилась задача оценить энергетический параметр при движении конструкции в процессе ее деформирования. Соответственно необходимо было определить работу сил на заданных перемещениях в каждый момент времени. Таким образом, нужно было иметь исходные сигналы внешней силы, прогибов, а также ускорений для нахождения возникающих сил инерции. Согласно принципу Даламбера, для составления уравнений равновесия конструкции при динамическом нагружении в расчет необходимо принимать силы инерции.

Из схемы расстановки приборов (рис. 2, 3) видно, что точки приложения нагрузки непосредственно на образец (места опоры распределитель-

ной траверсы) располагаются посередине между установленными прогибомерами и акселерометрами 1, 2 и 4, 5 соответственно. Так как при нахождении работы необходимо оценить действие сил на заданных перемещениях, были вычислены средние значения прогибов и ускорений (по показаниям датчиков п1-п2, п4-п5 и а1-а2, а4-а5 соответственно), тем самым получены необходимые величины в месте приложения сил.

Нагрузка на образец передавалась через силоизмеритель, установленный сверху на распределительной траверсе. В процессе обработки информа-

ции было условно принято, что нагрузка на образец передается через опоры распределительной траверсы в равных долях. Для нахождения каждой из этих сил значения, зафиксированные силоизмерителем, делились пополам.

Преобразованные из полученных в ходе экспериментальных исследований сигналы половины действующей силы, ускорений и прогибов в местах приложения нагрузки приведены на рис. 6–8 соответственно.

Анализ графиков на рис. 6–8 показывает, что максимального прогиба образец достиг за время

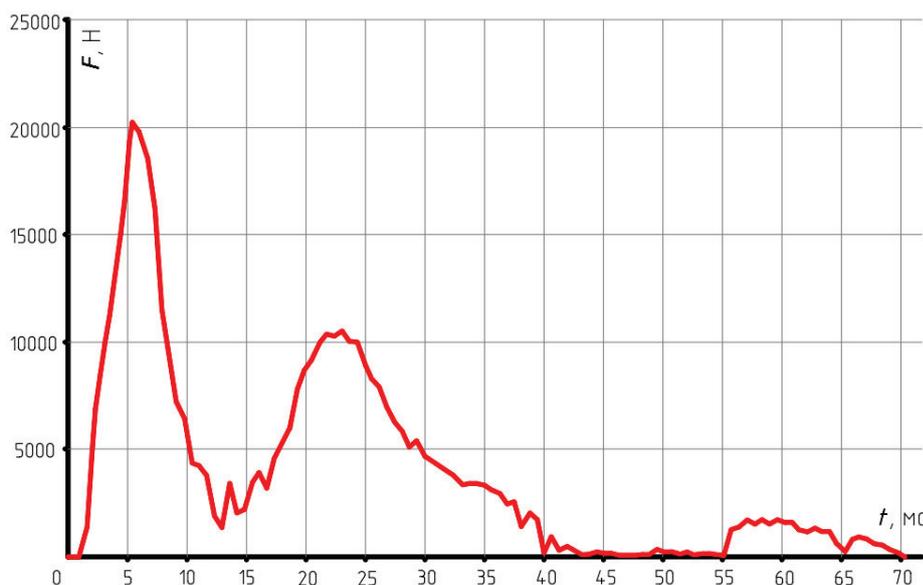


Рис. 6. График изменения половины действующей силы во времени

Fig. 6. Graph of time changes of a half of the acting force

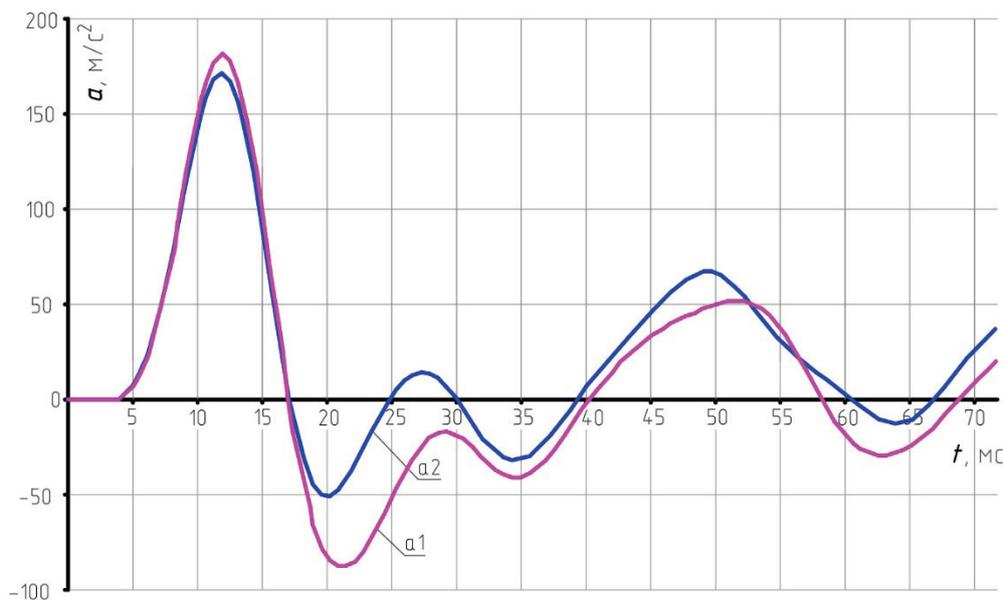
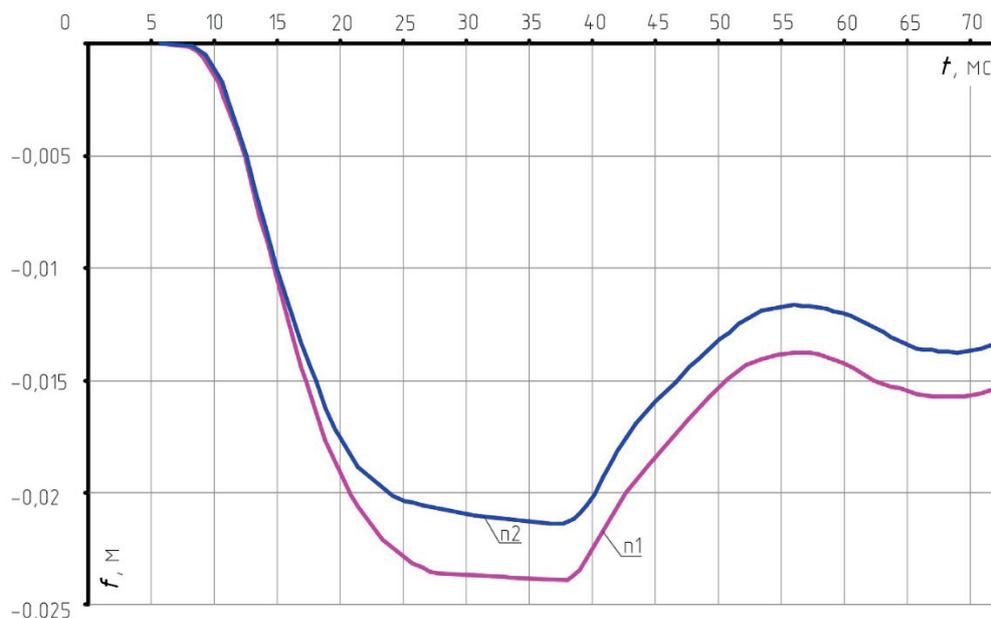


Рис. 7. График изменения ускорений образца в местах приложения нагрузки во времени: 1 – средние значения по показаниям акселерометров а1 и а2; 2 – средние значения по показаниям акселерометров а4 и а5

Fig. 7. Graph of time changes of sample accelerations in places where load is applied: 1 are the average values by indications of the accelerometers a1 and a2; 2 are the average values by indications of the accelerometers a4 and a5



**Рис. 8.** График изменения прогибов образца в местах приложения нагрузки во времени: 1 – средние значения по показаниям прогибомеров n1 и n2; 2 – средние значения по показаниям прогибомеров n4 и n5

**Fig. 8.** Graph of time changes of the sample deflections in places where load is applied: 1 are the average values by indications of the deflectometers n1 and n2; 2 are the average values by indications of the deflectometers n4 and n5

около 38 мс, что для данного эксперимента примерно соответствует первому периоду колебания сигнала ускорений с акселерометров. Второй период колебания сигнала ускорения завершается около 68 мс и примерно соответствует максимальному (стабилизированному) выгибу образца. Далее продолжается процесс затухающих колебаний. В настоящей работе условно в рассмотрение было принято два периода колебаний сигнала ускорений, примерно соответствующих однократному прогибу и выгибу образца (для конкретного эксперимента). В связи с этим все представленные графики и зависимости приведены за время порядка 70 мс.

Тут нужно отметить, что дополнительный всплеск сигнала ускорений в период времени 25–30 мс связан, вероятно, с несовершенством экспериментальной установки, проявляющимся в отскоке груза и его повторном падении.

Также нельзя исключить влияние на показания датчиков шумов от перемещения опорных пластин и других металлических элементов стенда. Известно, что невозможно произвести идеальный вибродатчик, вообще не чувствительный к условиям окружающей среды и их изменениям. В рамках описанного исследования причинами погрешностей могут быть: деформации основания (железобетонная балка), податливость крепления датчика, поперечные колебания, а также изменения температуры и влажность. Хотя, исходя из скоротечности времени проведения эксперимента, последний параметр можно практически исключить.

Для повышения достоверности результатов необходимо собрать стенд, исключая отскок груза, и получить результаты при чистом однократном ударе.

В начальный момент времени ускорения направлены в одну сторону, а силы инерции в другую, согласно формуле (1):

$$F_{ин} = -ma. \quad (1)$$

При эксперименте силоизмеритель располагался на распределительной траверсе и измерял все приходящиеся на него силы, а силы инерции от массы распределительной траверсы, опытного образца и самого силоизмерителя необходимо было определить. Общая их масса составляла 165 кг. В рамках настоящей работы силы инерции условно были найдены как произведение половины массы на средние значения ускорений (рис. 8) в точках приложения нагрузки на образец с обратным знаком. График изменения сил инерции, полученный описанным способом за выбранный для рассмотрения период времени, приведен на рис. 9.

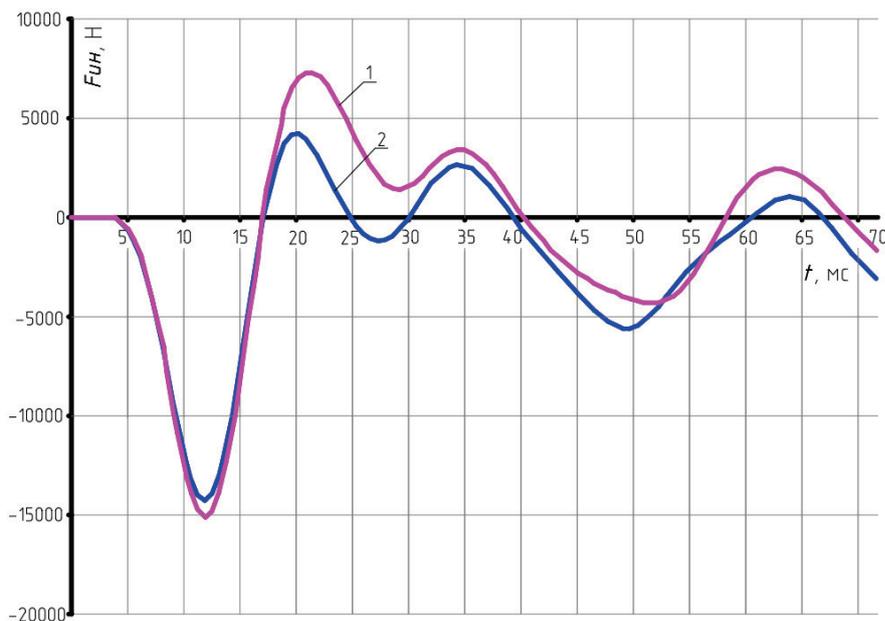
Далее на периоде времени 70 мс был построен график работы сил на заданных перемещениях. В соответствии с теоремой Клайперона, при воздействии на инженерную конструкцию группы внешних сил работа этих сил равна половине суммы произведений каждой силы на величину соответствующего ей перемещения, вызванного действием всей группы сил. Формулу для определения работы в каждый момент времени (2) можно представить в виде:

$$A(t) = \frac{(F_{\text{сил}}(t)/2 + F_{\text{ин1}}(t))f_1(t)}{2} + \frac{(F_{\text{сил}}(t)/2 + F_{\text{ин2}}(t))f_2(t)}{2}, \quad (2)$$

где  $A(t)$  – работа сил на заданных перемещениях в каждый момент времени, Дж;  $F_{\text{сил}}(t)/2$  – сила, зафиксированная силоизмерителем при испытании, деленная на 2 для получения величины силы в ме-

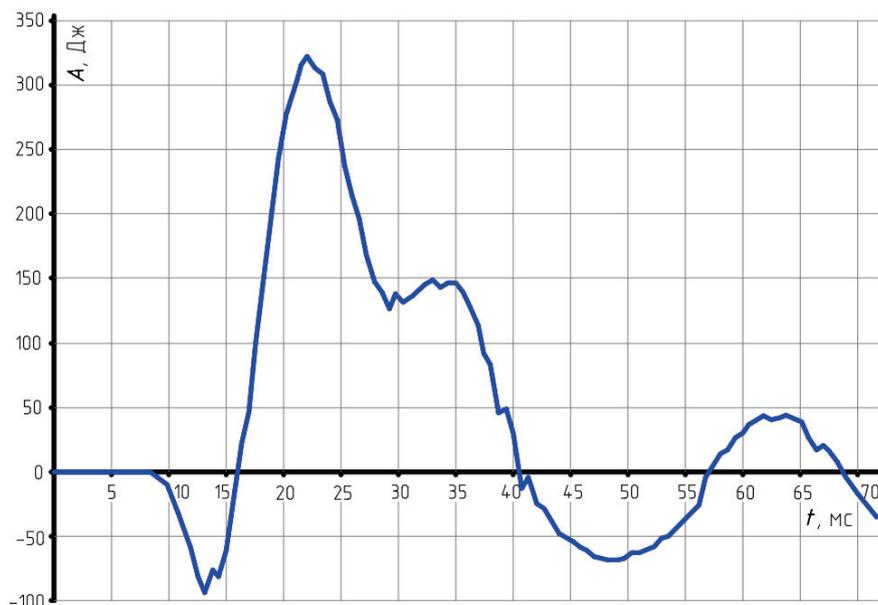
сте передачи ее на образец через опоры распределительной траверсы в каждый момент времени, Н;  $F_{\text{ин1}}(t), F_{\text{ин2}}(t)$  – условные силы инерции, сведенные в места приложения сил на образец в каждый момент времени, Н;  $f_1(t), f_2(t)$  – прогибы образца в месте передачи на него внешних сил в каждый момент времени, м.

Полученный график работы за время 70 мс приведен на рис. 10.



**Рис. 9.** График изменения сил инерции во времени: 1 – средние значения, полученные с учетом данных акселерометров a1 и a2; 2 – средние значения, полученные с учетом данных акселерометров a4 и a5

**Fig. 9.** Graph of time changes of the inertia forces: 1 are the average values obtained taking into account the data of accelerometers a1 and a2; 2 are the average values obtained taking into account the data of accelerometers a4 and a5



**Рис. 10.** График изменения работы за период времени 70 мс

**Fig. 10.** Graph of work time changes over a period of 70 ms

### Способ оценки степени живучести

В представленном экспериментальном исследовании рост внутренней энергии образца обусловлен увеличением потенциальной энергии, которая связана со взаимным расположением молекул тела при его прогибе. Если мы имеем дело с упругой деформацией, то после снятия нагрузки, за счет внутренней энергии, силы упругости совершают работу, осуществляя выгиб образца.

Известно, что в ходе упругой деформации температура твердых тел существенно не увеличивается, а при пластической деформации твердые тела могут значительно увеличивать свою температуру. В повышении температуры, следовательно, кинетической энергии молекул, отражается рост внутренней энергии тела при пластической деформации. При этом увеличение внутренней энергии происходит также за счет работы сил, вызывающих деформацию.

Если оценить разницу между энергией за временной период, характеризующий движение образца вниз (до максимального прогиба), и энергией упругой деформации, благодаря которой образец перемещается вверх (временной период от максимального прогиба до максимального выгиба), можно, исходя из закона сохранения энергии, сделать вывод о суммарном объеме энергии, затраченном на разрушение (пластическую деформацию), колебательное движение соударяющихся тел, энергию, перешедшую в выделение тепла и пр.

Учет и точное разложение энергии на все указанные составляющие при кратковременном динамическом воздействии технически и математически осуществить очень сложно.

Поэтому в рамках практического применения для оценки живучести экспериментального образ-

ца авторами предложен коэффициент степени живучести, выражающий отношение полной переданной энергии к энергии упругой деформации твердого тела при одном полном колебании (прогиб и выгиб).

Для получения энергии необходимо найти площадь под графиком зависимости работы от времени (рис. 10) за необходимые отрезки времени (прогиб и выгиб). Это можно сделать графическим способом или аналитическим – путем интегрирования.

Вычислить значение коэффициента степени живучести можно по аналитической зависимости (3), приведенной ниже:

$$k_{с.ж} = \frac{\int_0^{\pi} |A(t)| dt}{\int_0^{\pi} |A(t)| dt}, \quad (3)$$

где  $k_{с.ж}$  – коэффициент степени живучести образца;  $A$  – работа сил на заданных перемещениях в каждый момент времени, Дж;  $\pi$  – время максимального прогиба, с;  $v$  – время максимального (стабилизированного) выгиба, с.

В графическом виде нахождение коэффициента степени живучести для образца проведенных исследований приведено на рис. 11. Здесь для удобства отображения информации значения работы переведены в относительные единицы путем деления на максимальную величину –  $A_{\max}$  – максимальное значение работы сил на заданных перемещениях за весь временной период вычислений, Дж. На рис. 11 площадь  $S_1$  (заштрихованная красным цветом) соответствует полной относительной энергии, а площадь  $S_2$  (заштрихованная зеленым

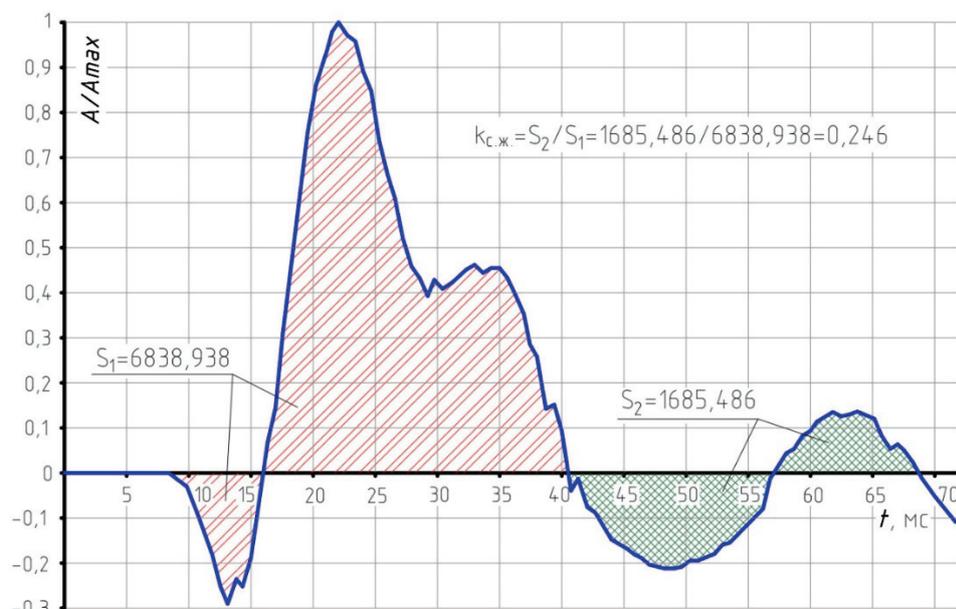


Рис. 11. График для нахождения коэффициента степени живучести

Fig. 11. Graph for finding the survivability coefficient

цветом) – относительной энергии упругой деформации образца. Для получения абсолютных значений энергий из графика необходимо умножить соответствующие площади на значение  $A_{\max}$ .

Как видно из рис. 11 для представленного в качестве примера испытания, значение коэффициента степени живучести образца составило  $k_{c,ж}=0,246$ .

Использование приведенного подхода позволяет получить качественную и количественную картину процесса распределения энергии при кратковременном динамическом воздействии на изгибаемый железобетонный образец и оценку степени живучести образца, выраженную через коэффициент степени живучести.

Разработанная методика и коэффициент степени живучести могут быть полезны, например, при проектировании и оценке эффективности защитных систем на податливых опорах и систем, гасящих колебания для смягчения динамического воздействия на железобетонные конструкции при сейсмических, аварийных ударных или взрывных нагрузках [43–50].

Теоретически можно вычислить значение коэффициента степени живучести на всем временном интервале колебания образца – до полной остановки, однако процесс вычисления сильно усложняется, а амплитуды последующих колебаний значительно меньше, чем при первом прогибе и выгибе образца вследствие затухания колебаний

(то есть погрешность вычислений, вероятно, будет не значительной). Таким образом, в целях практического применения коэффициент степени живучести рекомендуется оценивать только за временной интервал, соответствующий одному полному периоду колебания образца (прогиб–выгиб).

Для получения более полных данных о процессе распределения энергии, происходящего в ходе кратковременного динамического воздействия на железобетонный образец, необходимо оценить деформации бетона и арматуры экспериментального образца и выйти через них на объем энергии разрушения (энергии пластического деформирования).

Разработанная методика может быть применена для оценки степени живучести различных классов строительных конструкций, а также при различных временных интервалах ее действия.

#### Выводы

1. Предложен способ оценки степени живучести ответственных строительных конструкций зданий и сооружений при ударно-волновом нагружении, с применением коэффициента степени живучести на основе энергетического параметра.
2. На примере конкретного испытания изгибаемого железобетонного элемента на кратковременную динамическую нагрузку получено значение коэффициента степени живучести, которое составило  $k_{c,ж}=0,246$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стекольников Ю.И. Живучесть систем. – СПб.: Политехника, 2002. – 155 с.
2. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Fault tolerant vector control of induction motor drive (Article number 012015) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – № 1. – P. 1–6.
3. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive (Article number 012035) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – № 1. – P. 1–7.
4. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 698. – P. 24–29.
5. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings. – Omsk, May 21–23, 2015. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2015. – P. 1–5.
6. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings. – Omsk, May 21–23, 2015. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2015. – P. 1–6.
7. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes // 2016 The 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST): proceedings. – Novosibirsk, Jun 1–3, 2016. – P. 140–144.
8. Short and long term cracking behavior of GFRP reinforced concrete beams / C. Mias, L. Torres, M. Guadagnini, A. Turon // Composites Part B: Engineering. – 2015. – V. 77. – P. 223–231.
9. Lou T., Lopes S.M.R., Lopes A.V. FE analysis of short- and long-term behavior of simply supported slender prestressed concrete columns under eccentric end axial loads causing uniaxial bending // Engineering Structures. – 2015. – V. 85. – P. 52–62.
10. Correlation analysis of accelerated aging and natural aging of GFRP in reinforced concrete beams // J. Dong, X. He, H. Zhang, J. Zhang, Y. Yang, Y. Song, J. Rao // Journal of Wuhan University of technology (Transportation Science and Engineering). – 2017. – V. 41. – № 2. – P. 312–317.
11. Method of measurement of the dynamic strength of concrete under explosive loading / A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov, G.I. Kanel // International Journal of Fracture. – 2018. – V. 209. – P. 109–115.
12. A comment on the calculation models for reinforced concrete under intense dynamic loading / F. Gao, M. Wang, X. Zhang, Y. He, M. Li // Baozha Yu Chongji. – 2017. – V. 37. – № 2. – P. 365–376.
13. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending // Journal of Applied Engineering Science. – 2017. – V. 15. – № 3. – P. 381–386.
14. Mesoscopic simulation of the dynamic tensile behaviour of concrete based on a rate-dependent cohesive model / W. Zhou, L. Tang, G. Ma, X. Liu, M. Chen // International Journal of Impact Engineering. – 2016. – V. 95. – P. 165–175.
15. Li H.-Y., Teng J., Li Z.-H. An efficient platform HSNAS (GPU) for nonlinear static and dynamic analysis of reinforced concrete frames-II. Program verification and analysis // Zhendong yu Chongji. – 2016. – V. 35. – № 14. – P. 54–60.
16. Chen X., Chen C., Xu L., Shao Y. Dynamic flexural strength of concrete under high strain rates // Magazine of Concrete Research. – 2017. – V. 69. – № 3. – P. 109–119.

17. Гениев Г.А. О влиянии продолжительности действия нагрузки на прочность материала // Бетон и железобетон. – 1996. – № 4. – С. 19–22.
18. Плевков В.С. Динамическая прочность бетона и арматуры железобетонных конструкций. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 1996. – 64 с.
19. Беспаяв А.А., Куралов У.С., Алтигенов У.Б. Исследование работы изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных фиброармированными пластиками, при динамических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2015. – № 3. – С. 43–45.
20. Исследование механических свойств мелкозернистого бетона при динамическом нагружении / А.М. Брагов, А.Ю. Константинов, А.К. Ломунов, Д.А. Ламзин // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 4 (32). – С. 11–21.
21. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Расчет внецентренножатых железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку // Строительство: наука и образование. – 2013. – № 4. – С. 2–6.
22. Барбашев Н.П. Расчет железобетонной арки в грунте на действие динамической нагрузки // Вестник МГСУ. – 2016. – № 1. – С. 35–43.
23. Тамов М.А. Расчет железобетонный изгибаемых элементов, армированных высокопрочными сталями, на динамические нагрузки. Депонированная рукопись № 3016 01.02.1982.
24. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Прочность и несущая способность сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях повышенных температур // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 7. – С. 56–60.
25. Сембаев Б.Н., Грушевский К.Е. Методы расчета железобетонных конструкций на динамические нагрузки // Управление Социально-Экономическими Системами: Теория, Методология, Практика: сборник статей Международной научно-практической конференции: в 2 ч. – М., 2017. – С. 45–47.
26. Experimental-theoretical investigation of fiber reinforced concrete under dynamic loading / A.M. Bragov, A.Yu. Konstantinov, Yu.V. Petrov, I.V. Smirnov, B.L. Karihaloo, D.A. Lamzin, A.K. Lomunov // Fib Symposium TEL-AVIV 2013: Engineering a Concrete Future: Technology, Modeling and Construction. – Tel-Aviv, 2013. – С. 633–636.
27. Berlinov M. Developing the phenomenological equations triaxial deformation of concrete under dynamic loads // MATEC Web of Conferences International Science Conference SPbWOSCE-2016 «SMART City». – St-Petersburg, EDP Science, 2017. – P. 1–9.
28. Snozzi L., Molinari J.F., Gatuingt F. A meso-mechanical model for concrete under dynamic tensile and compressive loading // International Journal of Fracture. – 2012. – V. 178. – № 1–2. – С. 179–194.
29. Research on dynamic mechanical properties of alkali activated slag concrete under temperature-loads coupling effects / W.-J. Long, J.-J. Wei, Y.-C. Gu, F. Xing // Construction and Building Materials. – 2017. – V. 154. – P. 687–696.
30. Kotronis P., Mazars J., Davenne L. The equivalent reinforced concrete model for simulating the behavior of walls under dynamic shear loading // Engineering Fracture Mechanics. – 2003. – V. 70. – № 7–8. – С. 1085–1097.
31. Родевич В.В., Арзамасцев С.А. К оценке прочности железобетонных изгибаемых элементов при кручении от кратковременных динамических нагрузок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 2 (61). – С. 112–122.
32. Кумпяк О.Г., Галаяудинов З.Р. Расчет железобетонных плит на кратковременные динамические нагрузки с учетом реальных свойств материалов // Бетон и железобетон. – 2007. – № 6. – С. 15–18.
33. Уткин Д.Г. Деформирование изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов со смешанным армированием при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 5 (52). – С. 80–89.
34. Уткин Д.Г., Григорьев Д.В., Зайцев И.А. Определение прочностных и деформативных свойств сталефибробетона при статическом и кратковременном динамическом нагружениях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 6 (59). – С. 139–149.
35. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Вопросы расчета и конструирования специальных сооружений. – М.: Стройиздат, 1980. – 190 с.
36. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. – М.: Стройиздат, 1964. – 151 с.
37. Особенности разрушения железобетонных конструкций при динамическом нагружении / В.С. Плевков, А.В. Радченко, И.В. Балдин, П.А. Радченко, М.Е. Гончаров, С.П. Батуев // Вестник Тамбовского Университета. – 2013. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 1578–1579.
38. Calculation of reinforced-concrete frame strength under a simultaneous static cross section load and a column lateral impact / N. Belov, D. Kopanitsa, A. Yugov, S. Kaparulin, A. Plyaskin, A. Kalichkina, A. Ustinov, N. Yugov, G. Kopanitsa // AIP Conference Proc. Advanced Materials in Technology and Construction. – Томск, 2016. – P. 47–53.
39. Саркисов Д.Ю. Прочность и деформативность железобетонных элементов при косом внецентренном кратковременном динамическом сжатии, растяжении и изгибе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2008. – № 3. – С. 134–143.
40. Плевков В.С., Саркисов Д.Ю., Тигай О.Ю. Исследование железобетонных элементов при косом внецентренном кратковременном динамическом сжатии, растяжении и изгибе // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. – 2008. – № 3–19. – С. 33–37.
41. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю. Оценка параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 85–95.
42. Плевков В.С., Саркисов Д.Ю., Балдин С.В. Анализ параметров колебательных процессов несущего каркаса производственного здания // Строительство и реконструкция. – 2017. – № 4 (72). – С. 47–56.
43. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading / B. Chiaia, O. Kumpyak, L. Placidi, V.B. Maksimov // Engineering Structures. – 2015. – № 96. – P. 88–99.
44. Mescheulov N., Kumpyak O., Lyulevich Y. Deformability of oblique sections of rc beams on yielding supports under dynamic impact // AIP Conference Proc. Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects. – Томск, 2017. – P. 1–8.
45. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading // AIP Conference Proc. Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects. – Томск, 2017. – P. 40–44.
46. Kumpyak O.G., Mescheulov N.V. Numerical simulation of yielding supports in the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loading // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – V. 13. – № 4. – P. 103–113.

47. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading // AIP Conference Proc. Advanced Materials in Technology and Construction. – Tomsk, 2016. – P. 59–68.
48. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Кокорин Д.Н. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении: монография. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 272 с.
49. Анализ динамического деформирования железобетонных балок на податливых опорах / З.Р. Галяутдинов, М.М. Боглаева, Д.Р. Галяутдинов, Е.В. Рюмин // Наука и образование в жизни современного общества: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 18 ч. – Томск, 2013. – С. 49–52.
50. Галяутдинов З.Р. Исследование работы железобетонных плит на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: Материалы Международных академических чтений. Курский государственный университет. – Курск, 2015. – С. 130–138.

*Поступила 07.11.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Однокопылов Г.И.**, доктор технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Саркисов Д.Ю.**, кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета.

**Бутузов Е.А.**, магистрант Томского государственного архитектурно-строительного университета.

UDC 69.058.8

## EVALUATION OF SURVIVABILITY DEGREE OF RESPONSIBLE BUILDING STRUCTURES UNDER SHOCK WAVE LOADING

Georgy I. Odnokopylov<sup>1</sup>,

OGlz@yandex.ru

Dmitriy Yu. Sarkisov<sup>2</sup>,

Milandd@yandex.ru

Egor A. Butuzov<sup>2</sup>,

egorko18m@gmail.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russia.

**The relevance** of the research is caused by technical complication of oil and gas complex objects, owing to the increase in the volumes and speed of extraction of raw materials, which may be affected by shock wave loads in abnormal situations. The causes of the impact may be explosions, heavy cargo drops, terrorist acts, natural and man-made disasters, etc. These situations with a high probability lead to significant damage to the building structures of industrial buildings. To ensure further functioning of the structure, it is necessary to design the building structures and the object as a whole that have survivability properties under non-stationary influence. Accounting for such properties should be analyzed in the construction of scenarios for the emergence and development of contingencies, as well as in the analysis of risks. Thus, the development of methods for assessing the survivability of building structures under shock-wave action is an urgent task.

**The main aim** of the study is to develop a practically applicable method for assessing the survivability of a building structure under short-term shock wave loading based on an analysis of the energy parameter.

**The methods:** measurement of accelerations, deflections and loads by tensometry methods, graph analysis method using Microsoft Excel software.

**The results.** The authors have been developed the technique to assess the survivability of a building structure under shock wave loading, for responsible building structures of oil and gas facilities with the use of survivability coefficient. On the example of test of a reinforced concrete element for a short-term dynamic load, the values of the indicated coefficient were obtained. The authors made proposals for using the survivability coefficient in the design of building structures which may be affected by short-term dynamic loads.

### Key words:

Survivability degree, destruction energy, work, short-term dynamic load, shock-wave loading, reinforced concrete, experimental study.

### REFERENCES

1. Stekolnikov Yu.I. *Zhivuchest sistem* [Survivability of systems.] St-Petersburg, Politekhnik Publ., 2002. 155 p.
2. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Fault tolerant vector control of induction motor drive (Article number 012015). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–6.
3. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive (Article number 012035). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–7.
4. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 24–29.
5. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings*. Omsk, May 21–23, 2015. Novosibirsk, IEEE Russia Siberia Section, 2015. pp. 1–5.
6. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings*. Omsk, May 21–23, 2015. Novosibirsk, IEEE Russia Siberia Section, 2015. pp. 1–6.
7. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes. *The 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST): proceedings*. Novosibirsk, Jun 1–3, 2016. pp. 140–144.
8. Mias C., Torres L., Guadagnini M., Turon A. Short and long term cracking behavior of GFRP reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 77, pp. 223–231.
9. Lou T., Lopes S.M.R., Lopes A.V. FE analysis of short- and long-term behavior of simply supported slender prestressed concrete columns under eccentric end axial loads causing uniaxial bending. *Engineering Structures*, 2015, vol. 85, pp. 52–62.
10. Dong J., He X., Zhang H., Zhang J., Yang Y., Song Y., Rao J. Correlation analysis of accelerated aging and natural aging of GFRP in reinforced concrete beams. *Journal of Wuhan University of technology (Transportation Science and Engineering)*, 2017, vol. 41, no. 2, pp. 312–317.
11. Savinykh A.S., Garkushin G.V., Razorenov S.V., Kanel G.I. Method of measurement of the dynamic strength of concrete under explosive loading. *International Journal of Fracture*, 2017, vol. 209, pp. 109–115.
12. Gao F., Wang M., Zhang X., He Y., Li M. A comment on the calculation models for reinforced concrete under intense dynamic loading. *Baozha Yu Chongji*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 365–376.
13. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spa-

- tial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending. *Journal of Applied Engineering Science*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 381–386.
14. Zhou W., Tang L., Ma G., Liu X., Chen M. Mesoscopic simulation of the dynamic tensile behaviour of concrete based on a rate-dependent cohesive model. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, vol. 95, pp. 165–175.
  15. Li H.-Y., Teng J., Li Z.-H. An efficient platform HSNAS (GPU) for nonlinear static and dynamic analysis of reinforced concrete frames-II. Program verification and analysis. *Zhendong yu Chongji*, 2016, vol. 35, no. 14, pp. 54–60.
  16. Chen X., Chen C., Xu L., Shao Y. Dynamic flexural strength of concrete under high strain rates. *Magazine of Concrete Research*, 2017, vol. 69, no. 3, pp. 109–119.
  17. Geniev G.A. O vliyaniy prodolzhitelnosti deystviya nagruzki na prochnost materiala [Effect of duration of load action on material strength]. *Concrete and reinforced concrete*, 1996, no. 4, pp. 19–22.
  18. Plevkov V.S. *Dinamicheskaya prochnost betona i armatury zhelezobetonnykh konstruksiy* [Dynamic strength of concrete and rebar reinforced concrete structures]. Tomsk, TSUAB Publ., 1996. 64 p.
  19. Bespayev A.A., Kuralov U.S., Altigenov U.B. Investigation of the work of bent ferro-concrete structures reinforced with fibro-reinforced plastics under dynamic influences. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy*, 2015, no. 3, pp. 43–45. In Rus.
  20. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Lamzin D.A. Investigation of mechanical properties of fine-grained concrete under dynamic loading. *Privolzhskiy nauchny zhurnal*, 2014, no. 4 (32), pp. 11–21. In Rus.
  21. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Calculation of off-centered reinforced concrete elements for a short-term dynamic load. *Stroitelstvo: nauka i obrazovanie*, 2013, no. 4, pp. 2–6. In Rus.
  22. Barbashev N.P. Calculation of the reinforced concrete arch in the ground on the effect of the dynamic load. *Bulletin of MGSU*, 2016, no. 1, pp. 35–43. In Rus.
  23. Tamov M.A. *Raschet zhelezobetonnyh izgibayemykh elementov, armirovannykh vysokoprochnymi stalyami, na dinamicheskie nagruzki* [Calculation of reinforced concrete bending elements reinforced with high-strength steels, for dynamic loads]. Deposited manuscript, no. 3016 01.02.1982.
  24. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Strength and load-bearing capacity of compressed reinforced concrete elements under dynamic loading under elevated temperatures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*, 2016, no. 7, pp. 56–60. In Rus.
  25. Sembaev B.N., Grushevskiy K.E. *Metody rascheta zhelezobetonnykh konstruksiy na dinamicheskie nagruzki* [Methods for calculating reinforced concrete structures for dynamic loads]. *Upravlenie sotsialno-ekonomicheskimi sistemami: teoriya, metodologiya, praktika. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Control of social and economic systems: theory, methodology, practice. Proc. of International scientific and practical conference]. Moscow, 2017. pp. 45–47. In Rus.
  26. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Petrov Yu.V., Smirnov I.V., Karihaloo B.L., Lamzin D.A., Lomunov A.K. Experimental-theoretical investigation of fiber reinforced concrete under dynamic loading. *Fib Symposium TEL-AVIV 2013: Engineering a Concrete Future: Technology, Modeling and Construction*. Tel-Aviv, 2013. pp. 633–636.
  27. Berlinov M. Developing the phenomenological equations triaxial deformation of concrete under dynamic loads. *MATEC Web of Conferences International Science Conference SPbWOSCE-2016 «SMART City»*. St-Petersburg, 2017. – P. 1–9.
  28. Snozzi L., Molinari J.F., Gatuingt F. A meso-mechanical model for concrete under dynamic tensile and compressive loading. *International Journal of Fracture*, 2012, vol. 178, no. 1–2, pp. 179–194.
  29. Long W.-J., Wei J.-J., Gu Y.-C., Xing F. Research on dynamic mechanical properties of alkali activated slag concrete under temperature-loads coupling effects. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 154, pp. 687–696.
  30. Kotronis P., Mazars J., Davenne L. The equivalent reinforced concrete model for simulating the behavior of walls under dynamic shear loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, vol. 70, no. 7–8, pp. 1085–1097.
  31. Rodevich V.V., Arzamastsev S.A. To evaluation of the strength of reinforced concrete bending elements under torsion from short-term dynamic loads. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2017, no. 2 (61), pp. 112–122. In Rus.
  32. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Calculation of reinforced concrete slabs for short-time dynamic loads taking into account the real properties of materials. *Concrete and reinforced concrete*, 2007, no. 6, pp. 15–18. In Rus.
  33. Utkin D.G. Deformation of bent steel-fiber-reinforced concrete elements with mixed reinforcement under short-time dynamic loading. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2015, № 5 (52), pp. 80–89. In Rus.
  34. Utkin D.G., Grigoryev D.V., Zaytsev I.A. Determination of strength and deformation properties of steel-fiber-concrete in the case of static and short-term dynamic loading. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2016, no. 6 (59), pp. 139–149. In Rus.
  35. Popov N.N., Rastorguev B.S. *Voprosy rascheta i konstruirovaniya spetsialnykh sooruzheniy* [Issues of calculation and design of special structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 190 p.
  36. Popov N.N., Rastorguyev B.S. *Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy na deystvie kratkouvremennykh dinamicheskikh nagruzok* [Calculation of reinforced concrete structures for short-term dynamic loads]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1964. 151 p.
  37. Plevkov V.S., Radchenko A.V., Baldin I.V., Radchenko P.A., Goncharov M.E., Batuev S.P. Features of destruction of reinforced concrete structures under dynamic loading. *Vestnik Tambovskogo Universiteta*, 2013, vol. 18, Iss. 4, pp. 1578–1579. In Rus.
  38. Belov N., Kopanitsa D., Yugov A., Kaparulin S., Plyaskin A., Kalichkina A., Ustinov A., Yugov N., Kopanitsa G. Calculation of reinforced-concrete frame strength under a simultaneous static cross section load and a column lateral impact. *AIP Conference Proc. Advanced Materials in Technology and Construction*. Tomsk, 2015. pp. 47–53.
  39. Sarkisov D.Yu. Strength and deformability of reinforced concrete elements with oblique eccentric short-term dynamic compression, stretching and bending. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2008, no. 3, pp. 134–143. In Rus.
  40. Plevkov V.S., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu. Investigation of reinforced concrete elements with oblique eccentric short-term dynamic compression, stretching and bending. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitelstvo i transport*, 2008, no 3–19, pp. 33–37. In Rus.
  41. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu. Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 85–95. In Rus.
  42. Plevkov V.S., Sarkisov D.Yu., Baldin S.V. Analysis of the parameters of the oscillatory processes of the bearing frame of a production building. *Building and reconstruction*, 2017, no. 4 (72), pp. 47–56. In Rus.
  43. Chiaia B., Kumpyak O., Placidi L., Maksimov V.B. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading. *Engineering Structures*, 2015, no. 96, pp. 88–99.

44. Mescheulov N., Kumpyak O., Lyulevich Y. Deformability of oblique sections of rc beams on yielding supports under dynamic impact. *AIP Conference Proc. Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects*. Tomsk, 2017, pp. 1–8.
45. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading. *AIP Conference Proc. Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects*. Tomsk, 2017. pp. 40–44.
46. Kumpyak O.G., Mescheulov N.V. Numerical simulation of yielding supports in the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loading. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 103–113.
47. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading. *AIP Conference Proc. Advanced Materials in Technology and Construction*. Tomsk, 2016. pp. 59–68.
48. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. *Prochnost i deformativnost zhelezobetonnykh konstruksiy na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii*. Monografiya [Strength and deformability of reinforced concrete structures on compliant supports under short-term dynamic loading. Monograph]. Tomsk, TSUAB Publ., 2016. 272 p.
49. Galyautdinov Z.R., Boglayeva M.M., Galyautdinov D.R., Ryumin E.V. Analiz dinamicheskogo deformirovaniya zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporakh [Analysis of the dynamic deformation of reinforced concrete beams on compliant supports]. *Nauka i obrazovanie v zhizni sovremennogo obshchestva. Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. of International scientific and practical conference. Science and education in modern society]. Tomsk, 2013. pp. 49–52.
50. Galyautdinov Z.R. *Issledovanie raboty zhelezobetonnykh plit na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii* [Investigation of the work of reinforced concrete slabs on flexible bearings under short-term dynamic loading]. *Bezopasnost stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Materialy mezhdunarodnykh akademicheskikh chteniy* [Safety of construction fund in Russia. Problems and solutions. Proc. of International academic readings]. Kursk, 2015. pp. 130–138.

Received: 7 November 2018.

#### Information about the authors

**Georgy I. Odnokopylov**, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitriy Yu. Sarkisov**, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

**Egor A. Butuzov**, graduate student, Tomsk State University of Architecture and Building.

УДК 551.311.231

## ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ ОЛЬХОВСКО-ЧИБИЖЕКСКОГО РАЙОНА

Мартыненко Ирина Владимировна<sup>1</sup>,  
martynenko@tpu.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович<sup>1</sup>,  
v\_g\_v@tpu.ru

Тимкин Тимофей Васильевич<sup>1</sup>,  
timkin@tpu.ru

Мансур Зиайи<sup>2</sup>,  
m.ziayi47@gmail.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Шахрудский технологический университет,  
Иран, Шахруд.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью расширения и укрупнения минерально-сырьевого потенциала золотодобывающей промышленности.

**Целью** исследования является получение новой дополнительной информации о строении, зональности, минеральном составе кор выветривания Ольховско-Чибихевского района, а также выявление петрохимических критериев, определяющих условия повышенных концентраций золота в продуктах гипергенеза.

**Объекты:** остаточные и переотложенные коры выветривания каолинового и гидрослюдисто-каолинового состава Ольховско-Чибихевского района (Восточный Саян). По условиям залегания, в пределах района выделяются линейные и линейно-площадные типы кор выветривания, преимущественно золотоносные.

**Методы.** Количественное определение основных породообразующих элементов по профилю коры выветривания проводилось методом рентгенофлуоресцентного анализа при помощи энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного микроскопа (ЭДРФ, модель HORIBA XGT-7200). Для характеристики процесса корообразования и количественной его оценки были использованы коэффициенты выветривания. Был проведен анализ распределения породообразующих элементов по профилю коры выветривания с выделением потенциально золотоносного горизонта.

**Результаты.** В пределах Ольховско-Чибихевского района коры выветривания развиты довольно широко. Среди них выделяются остаточные и переотложенные. Остаточные коры выветривания мел-палеогенового возраста на изучаемой площади района развиты по кислым и средним породам ольховского комплекса, а также карбонатным образованиям чибихевской свиты; представлены они линейным и линейно-площадным морфологическими типами; продукты выветривания сложены глинистым, песчано-глинистым и дресвяно-щербнистым материалом, с преобладанием тонкодисперсной глинистой фракции; эти отложения в значительной степени лимонитизированы и карбонатизированы; по составу остаточные коры выветривания относятся к каолиновому и каолинит-гидрослюдистому типу. Установлено, что остаточные коры выветривания характеризуются развитием полного профиля, в составе которого выделяются зоны: дресвяно-щербнистая, монтмориллонит-гидрослюдистая и охристо-каолиновая. В результате проведенных исследований изучены особенности минерального состава остаточных коры выветривания Ольховско-Чибихевского района; дана минералого-петрохимическая характеристика изучаемых кор выветривания, установлен характер изменения коэффициентов выветривания и особенности распределения золота в вертикальном разрезе кор выветривания, определены геохимические критерии накопления золота в продуктах коры выветривания. Установлено, что повышенные содержания золота приурочены к нижней части верхней охристо-каолиновой зоны с высокими значениями коэффициента ферритизации, аллитизации и коэффициента окисления и минимальными значениями коэффициента выщелачивания. И наоборот, низкие содержания золота характерны для менее выветрелых пород с минимальными значениями коэффициентов ферритизации, аллитизации и окисления.

### Ключевые слова:

Кора выветривания, Восточный Саян, строение, зональность, минералого-геохимические особенности, месторождения золота.

### Введение

В последнее время все больший интерес вызывают месторождения полезных ископаемых, связанные с формацией кор выветривания. Это обусловлено близкповерхностным залеганием, высокой степенью дифференциации вещества, что способствует формированию промышленных концентраций целого ряда элементов.

Особое внимание уделяется золотоносным корам выветривания, которые представляют собой значительный сырьевой потенциал для развития золотодобывающей промышленности. Повышенный интерес горнорудных компаний к этим объектам определяется рядом причин:

- возможностью открытой разработки месторождения без применения буровзрывных работ;

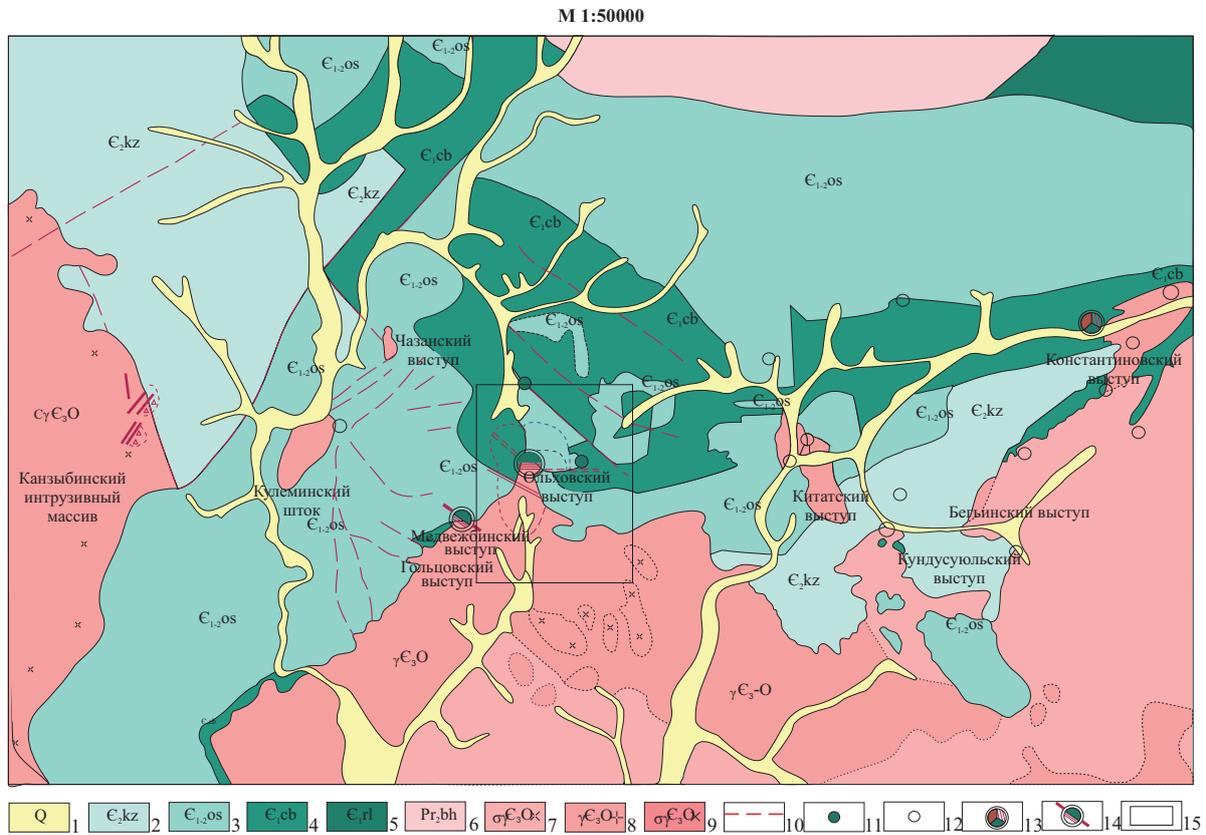
- отсутствием необходимости дробления руды, что значительно удешевляет ее переработку;
- простая технология извлечения золота;
- высокой экономической эффективностью извлечения золота при низких его содержаниях.

Целью данных исследований является получение информации о минералогическом составе и геохимической характеристике кор выветривания Ольховско-Чибизекского района и потенциальной золотоносности изучаемых объектов.

#### Геологическое строение района

Золото является одним из ведущих полезных ископаемых Восточного Саяна, а Ольховско-Чибизекский золоторудный район является одним из старейших центров золотодобычи в Сибири.

Ольховско-Чибизекский рудный район занимает северо-западную окраину Восточного Саяна и располагается в пределах Кизир-Казырской структурно-формационной зоны Восточного Саяна, которая на северо-востоке имеет тектонический контакт с байкалидами Дербинской структурно-формационной зоны, на западе ограничивается Минусинским межгорным прогибом девонского возраста, а на юго-западе через Кандатский глубинный разлом граничит со структурами Западного Саяна. Для него характерен двухъярусный геологический разрез: нижний ярус представлен нижнекембрийскими карбонатными, а верхний – вулканогенными толщами, прорванными интрузивными образованиями Ольховского габбро-диорит-гранодиоритового и Беллыкского гранитоид-



**Рис. 1.** Геологическая карта северной части Ольховско-Чибизекского рудного района: 1) современные аллювиальные отложения, глины сугленки, пески; 2) кизирская свита. Риолиты, туфы, линзы известняков; 3) осиновская свита. Аргиллиты, алевролиты, туфы кислого и среднего состава, туфопесчаники; 4) чибизекская свита. Известняки, прослои и линзы аргиллитов и туфов; 5) колпинская свита. Песчаники, алевролиты, сланцы; 6) кварц-хлоритовые, кварц-эпидот-хлоритовые сланцы; 7) диориты; 8) граниты; 9) гранодиориты, плагиограниты; 10) тектонические нарушения; 11) коренные месторождения золота, сульфидные залежи; 12) рудопроявления золота; 13) месторождения золота, жилы кварц-карбонатные с сульфидами и гематитом; 14) месторождения золота, жилы кварц-сульфидного состава; 15) контур участка работ

**Fig. 1.** Geological map of the Northern part of Olkhov-Chibizhek ore district: 1) modern alluvial deposits, clay, loam, sand; 2) Kizir suite. Rhyolites, tuffs, limestone lenses; 3) Osinovsk suite. Argillites, siltstones, felsic and intermediate tuffs, tuff-sandstones; 4) Chibizhek suite. Limestone, interlayers and lenses of mudstone and tuff; 5) Kolpino suite. Sandstones, siltstones, slates; 6) quartz-chlorite, quartz-epidote-chlorite shales; 7) diorites; 8) granites; 9) granodiorites, plagiogranites; 10) tectonic disturbances; 11) primary gold deposits, sulphide shoot; 12) gold-ore occurrence; 13) gold deposits, quartz-carbonate veins with sulphides and hematite; 14) gold deposits, quartz-carbonate veins; 15) site of work

ного комплексов, которые образуют крупные и удлиненные в плане батолитовые массивы (рис. 1) [1].

Главной геотектонической структурой района является Артемовская мегантиклиналь, которая простирается в северо-западном направлении на 120 км. В строении мегантиклинали принимают участие в восточной части верхнепротерозойские метаморфические сланцы кувайской серии и существенно карбонатные отложения овсиниковской свиты. В западной части развиты кембрийские вулканогенно-осадочные образования колпинской (песчано-сланцевые нижнекембрийские), балахтисонской или чибихекской (конгломераты, известняки, доломиты), осиновской (туфогенные породы) и кизирской (вулканические породы) свит [2].

### Особенности коры выветривания

На всей территории Восточного Саяна рыхлые отложения, к которым приурочены древние россыпи, представлены: а) образованиями древней коры выветривания на коренных породах и на древних аллювиальных и делювиальных отложениях; б) переотложенными продуктами коры выветривания; в) аллювиально-делювиальными отложениями древних долин, не затронутыми химическим выветриванием [2, 3]. Первичное оруденение представлено метасоматически измененными сульфидными залежами и умеренно-сульфидными мало-мощными кварцевыми телами жильного и штокеркового типов, которые локализируются главным образом в гранитоидах. Умеренно-сульфидные кварцевые жилы имеют сравнительно небольшое распространение. Минеральный состав первичного оруденения: кварц, карбонаты, пирит, в незначительном количестве пирротин, золото [4].

На изучаемой площади довольно широко развиты рыхлые отложения меловой, палеогеновой, неогеновой и четвертичной систем. При этом образования палеоген-неогенового возраста в большинстве сохранились в пределах молодых впадин, а также на обрывках террас высоких уровней (выше 50 м). К образованиям верхнемелового возраста с некоторой условностью относятся дресвяно-щебенисто-глинистые осадки, сохранившие структуру материнских пород, являющиеся субстратом палеогеновых отложений. Мощность рыхлых образований не постоянна и меняется в зависимости от типа рельефа. На большей части площади района мощность рыхлого покрова не превышает 5...10 м, но на отдельных участках достигает 100 и более метров [5].

Остаточные коры выветривания мел-палеогенового возраста на изучаемой площади района пользуются широким распространением, развиты по кислым породам ольховского комплекса и карбонатным образованиям чибихекской свиты. Наиболее развиты коры выветривания каолинового и гидрослюдисто-каолинового состава [6]. По условиям залегания, в пределах района выделяются

линейная и линейно-площадная коры, с преобладанием кор выветривания линейного типа. Продукты выветривания сложены глинистым и песчано-глинистым материалом. Эти отложения в значительной степени лимонитизированы и карбонатизированы, местами в них присутствуют железистые и железо-марганцевые конкреции [7].

Остаточная кора выветривания, сформированная на гранитах и гранодиоритах, традиционно характеризуется развитием полного профиля выветривания [8], в составе которого выделяются три основные зоны (снизу вверх):

- 1) дресвяно-щебенистая;
- 2) монтмориллонит-гидрослюдистая с каолинитом;
- 3) каолиновая с охристыми включениями гидроокислов железа и марганца.

Отличительной особенностью коры выветривания является преобладание минералов тонкодисперсной, глинистой фракции [9].

### Методика исследования

С целью геохимической характеристики выделенных зон было проведено количественное определение основных породообразующих элементов по профилю коры выветривания методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). РФА как метод реализации силикатного анализа выполнялся с использованием микроанализатора HORIBA X-Ray Analytical Microscope XGT 7200, оснащенного энергодисперсионным детектором с пределом обнаружения химических элементов до 0,01 %. Данный прибор позволяет делать качественный и количественный химический анализ в диапазоне измерения элементов от натрия до урана, а также анализировать распределения элементов с использованием функции картирования. Анализ производился на подготовленных препаратах (таблетках) при параметрах: напряжение 50 кВ, сила тока 0,5 мА, время сканирования 100 с, площадь сканирующего луча 1,2 мм. Таблетки изготавливались следующим образом: истертая проба спрессовывалась под гидравлическим прессом, после чего спекалась в муфельной печи в течение 9 часов при температуре 900 °С. Пробы были отобраны из керн скважин с интервалом опробования 1 м. Всего было исследовано 48 образцов, по три измерения на пробу.

Для характеристики процесса корообразования и количественной их оценки были применены следующие параметры, предложенные Е.В. Скляровым (2001 г.) и И.И. Гинзбургом (1963 г.), с дополнениями автора:

- 1) индекс выветривания [10, 11];
- 2) коэффициент ферритизации;
- 3) коэффициент окисления;
- 4) коэффициент алитизации;
- 5) коэффициент выщелачивания;
- 6) коэффициент разложения [12].

*Индекс химического изменения (CIA – Chemical Index of alteration).* Критерием для разграни-

чения отложений принято считать значение индекса, равное 70. Невыветрелые породы характеризуются значениями CIA порядка 50, тогда как сильно выветрелые разновидности соответствуют CIA около 100.

$$[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] * 100 \text{ [10, 11, 13].}$$

Коры выветривания, развитые по гранитам, характеризуются постепенным увеличением индекса химического выветривания снизу вверх, от слабо выветрелых исходных пород с индексом CIA 55 до интенсивно преобразованных пород с индексом CIA до 80.

Коэффициент ферритизации – отношение содержания окиси железа к кремнезему в продуктах выветривания к такому же отношению в материнской породе:

$$(Fe_2O_3 / SiO_2) / (Fe_2O_3 / SiO_2) \text{ исх.}$$

Коэффициент ферритизации колеблется по профилю выветривания от 0,6 до 2,5, достигая максимальных значений в верхней части сформированной коры выветривания.

Коэффициент окисления – отношение суммы содержания окиси железа, двуокиси марганца в продуктах выветривания к такой же сумме окиси и закиси железа и закиси марганца в материнской породе:

$$(Fe_2O_3 + MnO_2) / (Fe_2O_3 + FeO + MnO) \text{ исх.}$$

Значения коэффициента окисления находятся в пределах от 0,65 в зоне слабо выветрелых пород, которые представлены гранитом, гранодиоритом и обломками кварц-альбит-хлорит-серицитовых, кварц-альбит-эпидот-хлоритовых, кварц-мусковитовых и кварц-амфиболитовых метасоматитов, и продуктами их разложения, и до 2,5 в охристо-каолиновой зоне.

Коэффициент аллитизации – отношение содержания глинозема к кремнезему в продуктах выветривания к такому же отношению в материнской породе:

$$(Al_2O_3 / SiO_2) / (Al_2O_3 / SiO_2) \text{ исх.}$$

Коэффициент аллитизации находится в интервале от 0,65 до 1,12.

Коэффициент выщелачивания показывает степень выноса оснований в продуктах выветривания по отношению к материнской породе:

$$(CaO + K_2O + Na_2O) / (CaO + K_2O + Na_2O) \text{ исх.}$$

Значение коэффициента выщелачивания колеблется в пределах от 0,1 до 1,7.

Коэффициент разложения – отношение содержания оксида трехвалентного железа к содержанию оксида кальция в материнской породе.

$$Fe_2O_3 / CaO \text{ исх [12].}$$

Разброс в значениях коэффициента разложения весьма значительный. Минимальные значения характерны для слабо выветрелых пород и составляют 0,08, а максимальные фиксируются в верхней части профиля коры и имеют значение 25,67, что и отражает процесс корообразования с полным профилем выветривания [14].

## Результаты исследований и обсуждение результатов

Охристо-каолиновая зона – верхняя интенсивно проработанная зона сформированной коры выветривания. В минералогическом отношении характеризуется преобладанием пелитовой фракции крупности, которая состоит из кальцита, кварца, каолинита, разупорядоченного смектита, плагиоклаза, калиевого полевого шпата, иллита, гематита и гетитачто согласуется с выводами E. Galan с соавторами и Georges Martial Ndzana, Li Huang и др. [15, 16]. Песчаная и алевролитовая фракции представлены следующими минералами: *тяжелая фракция* – магнетит, мартит и мушкетовит, гематит, гидроокислы железа, амфиболы (роговая обманка, актинолит), циркон (гацинт), золото, *ед. знаки* – ильменит, пирит и псевдоморфозы лимонита по пириту, марганцевые минералы, хлоритид, шпинель, корунд, рутил, анатаз, *легкая фракция* – обломки обохренного кварца, серицитизированный плагиоклаз, калиевые полевые шпаты, карбонаты. Дресвяная фракция (более 1 мм) – крупные обохренные обломки кварца, гематита, реже обломки интенсивно выветрелых материнских пород – гранитов, кварц-альбит-хлорит-серицитовых, кварц-альбит-хлоритовых и кварц-мусковитовых метасоматитов.

Выделенная охристо-каолиновая зона характеризуется следующими петрохимическими параметрами, рассчитанными по предложенной методике: коэффициент ферритизации от 2,2 до 2,46; коэффициент окисления 1,7–2,27, коэффициент аллитизации 0,71–0,94; коэффициент выщелачивания 0,88–1,03 (рис. 2). Коэффициент разложения в этой зоне имеет наибольшие значения от 6,5 до 17,8, а по отдельным скважинам коэффициент разложения достигает значений до 27. Индекс выветривания, рассчитанный по методике, предложенной Е.В. Скляровым (2001 г.) и Я.В. Юдовичем (2000 г.), характеризуется высокими значениями от 68 до 76. Максимальные концентрации золота, которые достигают значений 4,5 г/т, при среднем значении 2,7 г/т, приурочены к нижней части верхней охристо-каолиновой зоны, что не противоречит выводам Н.А. Рослякова, Ю.А. Калинин и др. [17, 18].

Средняя монтмориллонит-гидрослюдистая зона представлена минералами глинистой фракции – гидромусковитом и вермикулитом, монтмориллонитом и смешаннослойными хлорит-монтмориллонитовыми образованиями. Песчаная и алевролитовая фракции крупности представлены магнетитом, гематитом и гидроокислами железа, часто в виде псевдоморфоз по кубическим и пентагон-додекаэдрическим кристаллам пирита, амфиболами, редко ильменитом и рутилом, в незначительном количестве присутствует хлоритид, шпинель, корунд, циркон, эпидот, единичные знаки марганцевых минералов, и самородного золота, легкая фракция – кварц, плагиоклазы, полевые шпаты и слюды. Дресвяная фракция крупности

представлена обломками выветрелых кварц-альбит-хлорит-серицитовых, кварц-альбит-эпидот-хлоритовых, кварц-мусковитовых, кварц-амфиболитовых метасоматитов и кварца, который покрыт пленкой гидроокислов железа и марганца, реже гематита.

В петрохимическом отношении выделенная монтмориллонит-гидрослюдистая зона, в отличие от верхней охристо-каолиновой зоны, имеет более низкие коэффициенты: ферритизации от 1,2 до 2,1; окисления 0,9–1,53, аллитизации 0,56–0,7, разложения 2,7–6,7 и более высокий коэффициент выщелачивания 0,9–1,2 (рис. 2). Индекс химического выветривания составляет 60–68. Содержания золота в монтмориллонит-гидрослюдистой зоне не превышают 0,5–1 г/т, при среднем 0,43 г/т.

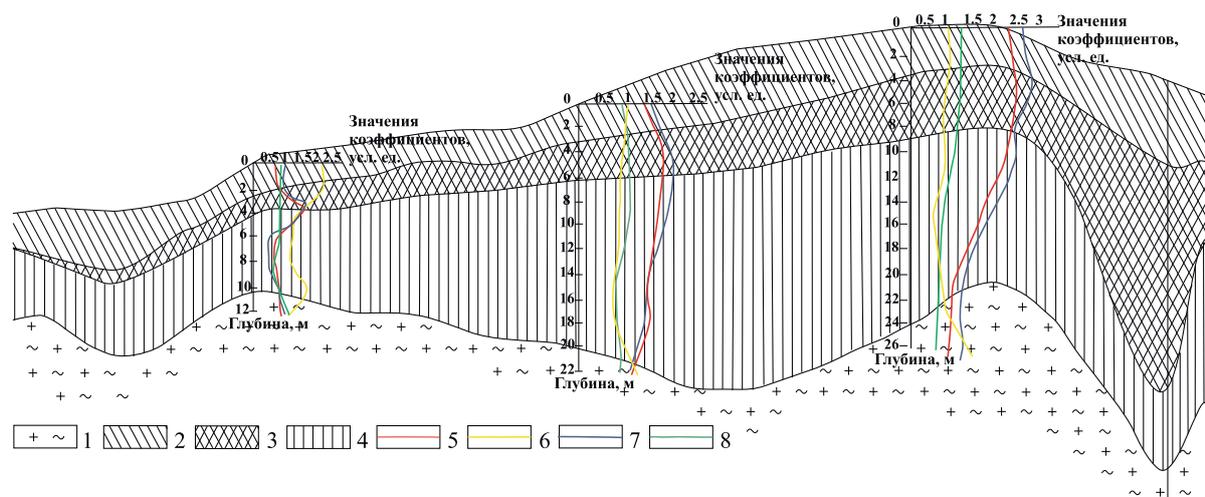
Нижняя зона дезинтеграции сложена обломками кварц-альбит-хлорит-серицитовых, кварц-альбит-эпидот-хлоритовых, кварц-мусковитовых и кварц-амфиболитовых метасоматитов и продуктами их разложения. В незначительном количестве присутствуют минералы песчаной и алевролитовой фракций крупности – кварц, калиевый полевой шпат, серицитизированные плагиоклазы, слюды, магнетит, гематит, гидроокислы железа, в том числе и псевдоморфозы по пириту, амфиболы, циркон, единичные знаки ильменита, рутила, барита, корунда, шпинели. Пелитовая фракция представлена кальцитом, присутствуют кварц, разупорядоченный смектит, иллит, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, следы доломита, ангидрита.

Коэффициенты выветривания в выделенной зоне дезинтеграции указывают на породы со слабой степенью их гипергенной проработки. Коэффициент ферритизации от 0,4 до 1,02, коэффициент окисления 0,9–1,2, аллитизации 0,45–0,7, разложения 1,58–4,3, коэффициент выщелачивания 1–1,7 (рис. 2). Индекс химического выветривания

составляет 58–64. Повышенные содержания золота отмечаются в единичных пробах, до 3,8 г/т при среднем 0,5 г/т. Эти данные не противоречат представлениям К.Р. Ковалева, Е.А. Наумова и др. (2009 г.) и согласуются с выводами Н.В. Петровской (1973 г.) [19–21].

Помимо характеристики выделенных зон, с помощью известной методики Гинзбурга [12] нами установлена зависимость между поведением золота в коре выветривания и значениями показателей выветривания. Так, максимальные содержания золота до 4,5 г/т приурочены к верхней охристо-каолиновой зоне с высокими значениями коэффициента ферритизации, аллитизации и коэффициента окисления и минимальными значениями коэффициента выщелачивания. И наоборот, низкие содержания золота характерны для менее выветрелых пород с минимальными значениями коэффициентов ферритизации, аллитизации и окисления (рис. 2).

Наряду с остаточной корой на площади рудного района выделяются продукты переотложенной коры выветривания в водных, наземных и озерно-болотных условиях [1]. Это преимущественно светло-коричневые глинистые, глинисто-щебенистые образования, представленные каолинитом и гидрослюдой с обломками гранита, гранодиорита, кварца, известняка и бурого железняка. Песчаная и алевролитовая фракции содержат магнетит, гематит, окислы и гидроокислы железа и марганца, пирит. В незначительных количествах присутствует ильменит, рутил, брукит, анатаз, лейкоксен, циркон, корунд и золото. Минералы легкой фракции – кварц, полевые шпаты, редкие знаки марганцевых минералов и карбонатов. Гранулометрический состав продуктов переотложенной коры выветривания следующий: древесная фракция – 35 %, песчаная – 10 %, алевролитовая – 7 % и



**Рис. 2.** Схематический геологический разрез. Зоны: 1) древесно-щебенистая; 2) охристо-каолиновая; 3) нижняя часть охристо-каолиновой зоны с повышенными содержаниями золота; 4) монтмориллонит-гидрослюдистая. Коэффициенты: 5) окисления; 6) выщелачивания; 7) ферритизации; 8) аллитизации

**Fig. 2.** Schematic geological cross section. Zones: 1) gruss-breakstone; 2) ochre-kaolin; 3) lower part of the ochre-kaolin zone with high gold content; 4) montmorillonite-hydromica. Coefficients: 5) oxidation; 6) leach; 7) ferritization; 8) allitization

глинистая фракция – 48 %. Эти образования залегают на элювиальной коре и сохранились в пределах древней поверхности. Мощность от 1 до 10 м, в карстовых полостях до 40 м [9].

#### Выводы

1. Установлено, что в пределах Ольховско-Чибихевского района коры выветривания развиты довольно широко. Среди них выделяются остаточные и перетолженные. Остаточные коры выветривания мел-палеогенового возраста на площади района развиты по кислым и средним породам ольховского комплекса, а также карбонатным образованиям чибихевской свиты. Представлены они линейным и линейно-площадным морфологическими типами. Продукты выветривания сложены глинистым, песчано-глинистым и дресвяно-щебнистым материалом, с преобладанием тонкодисперсной глинистой фракции. Эти отложения в значительной степени лимонитизированы и карбонатизированы.
2. По составу остаточные коры выветривания относятся к каолиновому и каолинит-гидрослю-

дистому типу. Установлено, что они характеризуются развитием полного профиля, в составе которого выделяются зоны (снизу вверх): дресвяно-щебенистая, монтмориллонит-гидрослюдистая и охристо-каолиновая. Повышенные содержания золота приурочены к нижней части верхней охристо-каолиновой зоны.

3. Определены геохимические критерии накопления золота в продуктах коры выветривания. Установлен характер изменения коэффициентов выветривания и особенности распределения золота в вертикальном разрезе кор выветривания. Максимальные содержания золота до 4,5 г/т приурочены к верхней охристо-каолиновой зоне с высокими значениями коэффициента ферритизации, аллитизации и коэффициента окисления и минимальными значениями коэффициента выщелачивания. И наоборот, низкие содержания золота характерны для слабо выветрелых пород с минимальными значениями коэффициентов ферритизации, аллитизации и окисления.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-45-700019.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотоносные коры выветривания Сибири / под ред. С.С. Сердюка. – Красноярск: КНИИГМС, 2002. – 116 с.
2. Хазагаров А.М. Мезозойские и третичные золотоносные россыпи Восточного Саяна и Кузнецкого Алатау // Геология россыпей / под ред. В.И. Смирнова. – М.: Наука, 1965. – С. 188–198.
3. Цыкин Р.А., Попова Н.Н. Кайнозой северо-западной части Восточного Саяна. – Красноярск: СФУ, 2009. – 115 с.
4. Коробейников А.Ф., Зотов И.А. Комплексные месторождения благородных и редких металлов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 327 с.
5. Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Прудников С.Г. Золотоносные коры выветривания юга Сибири. – Новосибирск: Гео, 2006. – 339 с.
6. Sidorova E., Sitdikova L., Izotov V. The Major Types of the Weathering Crust of the Eastern Russian Plate and its Mineralogical and Geochemical Features // Procedia Earth and Planetary Science. – 2015. – V. 15. – P. 573–578.
7. Мартыненко И.В. Золото в продуктах коры выветривания Ольховского рудного поля // Россыпи и месторождения кор выветривания: современные проблемы исследования и освоения: Матер. XIV Междунар. совещ. – Новосибирск, 2010. – С. 426–430.
8. Alavi Nezhad Khalil Abad S.V. et al. Characteristics of weathering zones of granitic rocks in Malaysia for geotechnical engineering design // Engineering Geology. – 2016. – V. 200. – P. 94–103.
9. Мартыненко И.В., Мазуров А.К. Зональность и минералогический состав продуктов коры выветривания Ольховско-Чибихевского района // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 23–28.
10. Интерпретация геохимических данных / Е.В. Скларов, И.Г. Бараш, В.А. Буланов, Д.П. Гладкочуб, Т.В. Донская, А.В. Иванов, Е.Ф. Летникова, А.Г. Миронов, А.И. Сизых. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 288 с.
11. Jiang-Hai Yang, Yuan-Sheng Du. Weathering geochemistry and palaeoclimate implication of the Early Permian mudstones from eastern Henan Province, North China // Journal of Palaeogeography. – 2017. – V. 6. – № 4. – P. 370–380.
12. Гинзбург И.И. Термины и понятия относящиеся к коре выветривания // Обзор геологических понятий и терминов в применении к металлогении. – М.: АН СССР, 1963. – С. 151–158.
13. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. – СПб.: «Наука» РАН, 2000. – 480 с.
14. Geological and geochemical characteristics in the paleo-weathering crust sedimentary type REE deposits, western Guizhou, China / Lingjie Zhou, Zhengwei Zhang, Yujiao Li et al. // Journal of Asian Earth Sciences. – 2013. – V. 73. – P. 184–198.
15. Galan E., Ferrell R.E. Genesis of Clay Minerals // Developments in Clay Science. Ch. 3. – 2013. – V. 5. – P. 83–126.
16. Characteristics of clay minerals in soil particles from an argillic horizon of Alfisol in central China / G.M. Ndzana, L. Huang, J.B. Wang, Z.Y. Zhang // Applied Clay Science. – January 2018. – V. 151. – P. 148–156.
17. Росляков Н.А. Геохимия золота в зоне гипергенеза. – Новосибирск: Наука, 1981. – 239 с.
18. Gold in the Weathering Crust at the Suzdal' deposit (Kazakhstan) / Yu.A. Kalinin, K.R. Kovalev, E.A. Naumov, M.V. Kirillov // Russian Geology and Geophysics. – March 2009. – V. 50. – P. 174–187.
19. Петровская Н.В. Самородное золото. – М.: Наука, 1973. – 349 с.
20. Climatic zonation and weathering control on sediment composition (Angola) / P. Dinisa, E. Garzantib, P. Vermeesch, J. Huivid // Chemical Geology. – 2017. – V. 467. – P. 110–121.
21. Kovalev K.R. et al. Relationship of antimony with gold mineralization in the ore districts of Eastern Kazakhstan // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – V. 55. – P. 1170–1182.

*Поступила 22.09.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Мартыненко И.В.**, ассистент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ворошилов В.Г.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Тимкин Т.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Зианин М.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент Шахрудского технологического университета.

UDC 551.311.231

## PETROCHEMICAL CHARACTERIZATION OF WEATHERING CRUSTS OF OLKHOVSK-CHIBIZHEK DISTRICT

Irina V. Martynenko<sup>1</sup>,  
martynenko@tpu.ru

Valery G. Voroshilov<sup>1</sup>,  
v\_g\_v@tpu.ru

Timofey V. Timkin<sup>1</sup>,  
timkin@tpu.ru

Mansour Ziiai<sup>2</sup>,  
m.ziiai47@gmail.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Shahrood University of Technology,  
Bolvar Daneshka, Shahrood, 3619995161, Iran.

**The relevance** of the research is defined by the need to expand and strengthen the resource potential of the gold mining industry.

**The aim** of the study is to obtain new information about the structure, zonation, mineral composition of weathering crusts of Olkhovsk-Chibizhek district and to define the geochemical criteria that contribute to concentration of gold mineralization.

**Objects:** residual and redeposited weathering crust of kaolinite and hydromica-kaolin composition from Olkhovsk-Chibizhek area (East Sayan). According to the occurrence, there are linear and linearly areal types of weathering crusts, mainly gold-bearing, within the area.

**Research methods** include quantitative determination of the main rock-forming elements of the weathering crust by X-ray fluorescence analysis using energy dispersive x-ray fluorescence microscope (HORIBA XGT-7200). The weathering coefficients were used to characterize weathering crust formation and its quantitative evaluation. The analysis of the rock-forming elements distribution across the weathering crust with potential gold-bearing horizon determination was performed.

**Research results.** It was found that the residual and redeposited weathering crusts are widely spread within Olkhov-Chibizhek district. The residual weathering crusts of the Cretaceous-Paleogene age are developed on felsic and intermediate rocks of the Olkhovsk complex and on carbonate formation of the Chibizhek suite. They are represented by linear and linear-areal morphological types. The weathering products are composed of clay, sand-clay and gruss-gravel material, with a predominance of fine-dispersed clay fraction. They are intensely limonitized and carbonized. Composition of the residual weathering crust belongs to the kaolinite and kaolinite-hydromica type. Weathering crust profile is characterized by the development of a complete profile, which has gruss-detrital, montmorillonite-hydromica and ochre-kaolin zone. As a result, the mineral composition peculiarities of the weathering crust of Olkhov-Chibizhek district are studied; mineralogical and petrochemical features of residual weathering crust are characterized. The nature of the weathering ratios change and characteristics of gold distribution across a vertical section are established. Geochemical criteria for gold accumulation in the products of the weathering crust are defined. High contents of gold are confined to the lower part of the upper ochre-kaolin zone with high values of the ferritization, allitization and oxidation coefficients, and minimum values of the leaching coefficient. Conversely, low content of gold is typical for less weathered rocks with low values of ferritization, allitization and oxidation coefficients.

### Key words:

Weathering crust, Eastern Sayan, structure, zonation, mineralogical and geochemical features, gold deposits.

The research was financially supported by the RFBR grant no. 18-45-700019.

### REFERENCES

1. *Zolotonosnye kory vyvetrivaniya Sibiri* [Au-bearing weathering crusts of Siberia]. Ed. by S.S. Serdyuk. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 2002. 116 p.
2. Khazarov A.M. Mezozoyskie i tretichnye zolotonosnye rossypi Vostochnogo Sayana i Kuznetskogo Alatau [Mesozoic and tertiary gold-bearing placers of East Sayan and Kuznetsk Alatau]. *Geologiya rossypey*. Ed. by V.I. Smirnov. Moscow, Nauka Publ., 1965. pp. 188–198.
3. Tsykin R.A., Popova N.N. *Kaynozoy severo-zapadnoy chasti Vostochnogo Sayana* [The Cenozoic of the North-Western part of Eastern Sayan]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2009. 115 p.
4. Korobeynikov A.F., Zotov I.A. *Kompleksnye mestorozhdeniya blagorodnykh i redkikh metallov* [Complex deposits of precious and rare metals]. Tomsk, TPU Publ. house, 2006. 327 p.
5. Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A., Prudnikov S.G. *Zolotonosnye kory vyvetrivaniya yuga Sibiri* [Au-bearing weathering crusts of the South Siberia]. Novosibirsk, Geo Publ., 2006. 339 p.
6. Sidorova E., Sitdikova L., Izotov V. The Major Types of the Weathering Crust of the Eastern Russian Plate and its Mineralogical and Geochemical Features. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, vol. 15. pp. 573–578.
7. Martynenko I.V. Zoloto v produktakh kory vyvetrivaniya Olkhovskogo rudnogo polya [Gold in the weathering crust products of Olkhovsk ore field]. *Rossypi i mestorozhdeniya kor vyvetrivaniya: sovremennye problemy issledovaniya i osvoeniya. Materialy XIV Mezhdunarodnogo soveshchaniya* [Deposits of weathering crusts: modern problems of studying and exploration. Proc. of the XIV International meeting]. Novosibirsk, 2010. pp. 426–430.

8. Alavi Nezhad Khalil Abad S.V. Characteristics of weathering zones of granitic rocks in Malaysia for geotechnical engineering design. *Engineering Geology*, 2016, vol. 200, pp. 94–103.
9. Martynenko I.V., Mazurov A.K. Zoning and mineralogical-geochemical composition of the weathering crust products of Olkhovsk-Chibizhek district. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 1, pp. 23–28. In Rus.
10. Sklyarov E.V., Barash I.G., Bulanov V.A., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ivanov A.V., Letnikova E.F., Mironov A.G., Sizykh A.I. *Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh* [Interpretation of geochemical data]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2001. 288 p.
11. Jiang-Hai Yang, Yuan-Sheng Du. Weathering geochemistry and palaeoclimate implication of the Early Permian mudstones from eastern Henan Province, North China. *Journal of Palaeogeography*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 370–380.
12. Ginzburg I.I. *Terminy i ponyatiya odnosyashchiesya k kore vyvetrivaniya* [Terms and concepts related to weathering crust]. *Obzor geologicheskikh ponyatiy i terminov v primenenii k metallogenii* [Review of geological terms related to metallogenesis]. Moscow, AN SSSR Publ., 1963. pp. 151–158.
13. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Osnovy litokhimii* [Basics of lithochemistry]. St-Petersburg, Nauka RAN Publ., 2000. 480 p.
14. Lingjie Zhou, Zhengwei Zhang, Yujiao Li et al. Geological and geochemical characteristics in the paleo-weathering crust sedimentary type REE deposits, western Guizhou, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, vol. 73, pp. 184–198.
15. Galan E., Ferrell R.E. Genesis of Clay Minerals. *Developments in Clay Science*. Ch 3. 2013, vol. 5, pp. 83–126.
16. Ndzana G.M., Li Huang, Jin Bo Wang, Zhi Yi Zhang. Characteristics of clay minerals in soil particles from an argillic horizon of Alfisol in central China. *Applied Clay Science*, January 2018, vol. 151, pp. 148–156.
17. Roslyakov N.A. *Geokhimiya zolota v zone gipergeneza* [Gold geochemistry in hypergenesis]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 239 p.
18. Kalinin Yu.A., Kovalev K.R., Naumov E.A., Kirillov M.V. Gold in the Weathering Crust at the Suzdal deposit (Kazakhstan). *Russian Geology and Geophysics*, March 2009, pp. 174–187.
19. Petrovskaya N.V. *Samorodnoe zoloto* [Native gold]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 349 p.
20. Dinisa P., Garzantib E., Vermeesch P., Huvid J. Climatic zonation and weathering control on sediment composition (Angola). *Chemical Geology*, 2017, vol. 467, pp. 110–121.
21. Kovalev K.R. Relationship of antimony with gold mineralization in the ore districts of Eastern Kazakhstan. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 1170–1182.

Received: 22 September 2018.

#### Information about the authors

**Irina V. Martynenko**, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Valery G. Voroshilov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Timofey V. Timkin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Mansour Ziiai**, PhD, associate professor, Shahrood University of Technology.

УДК 665.658.6

## КАТАЛИТИЧЕСКИЙ ПАРОВОЙ КРЕКИНГ ГУДРОНА В ПРИСУТСТВИИ ДИСПЕРСНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Соснин Глеб Андреевич<sup>1,2</sup>,  
sosningleb@catalysis.ru

Заикина Олеся Олеговна<sup>1,2</sup>,  
omironenko@catalysis.ru

Елецкий Петр Михайлович<sup>1</sup>,  
yeletsky@catalysis.ru

Яковлев Вадим Анатольевич<sup>1,2</sup>,  
yakovlev@catalysis.ru

<sup>1</sup> Институт Катализа имени Г.К. Борескова СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 5.

<sup>2</sup> Новосибирский Государственный Университет,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки альтернативных водородным технологий переработки тяжелого нефтяного сырья для вовлечения последнего в структуру нефтепереработки и увеличения глубины переработки остатков (мазут, гудрон) с повышением выхода светлых дистиллятов и минимизацией выхода побочных продуктов.

**Цель:** исследовать процесс каталитического парового крекинга гудрона западно-сибирской нефти в присутствии дисперсных катализаторов на основе различных металлов

**Объекты:** каталитический паровой крекинг – термокаталитический процесс облагораживания тяжелого нефтяного сырья в присутствии воды.

**Методы.** Для оценки эффективности катализаторов на основе различных металлов использовали совокупность физико-химических показателей: фракционный состав жидких продуктов каталитического парового крекинга (ASTM D716991-11), содержание S, соотношение H:C (HCNS-O анализ), плотность и кинематическую вязкость (ASTM D7042) жидких продуктов.

**Результаты.** Установлены особенности парового каталитического крекинга гудрона при 450 °С в присутствии дисперсных катализаторов на основе различных металлов (при концентрации металла в исходной эмульсии 0,5 мас. %). Выявлено, что применение Mo-содержащего дисперсного катализатора приводит к увеличению соотношения H:C (до 1,56) в жидких продуктах по сравнению с паровым крекингом без катализатора (1,32), также происходит снижение содержания серы в жидких продуктах (на 0,22 мас. %), что свидетельствует об увеличении глубины взаимодействия воды и сырья при использовании дисперсного катализатора. В случае использования дисперсного катализатора на основе железа отмечено увеличение выхода светлых фракций (29,3 мас. %), поскольку данный катализатор характеризуется высокой активностью в процессах окислительного крекинга. Остальные дисперсные катализаторы на основе Ni, Al, и Co не превосходят Mo- и Fe-содержащие катализаторы по выходу и качеству жидких продуктов облагораживания. Вязкость продуктов облагораживания снижается по сравнению с исходным гудроном приблизительно в 90 раз.

### Ключевые слова:

Каталитический паровой крекинг, тяжелое нефтяное сырье, дисперсный катализатор, сларри-реактор, молибден, железо.

### Введение

В условиях постоянного развития технологий и роста потребления энергоносителей спрос на жидкие продукты с низкой температурой кипения постоянно растет. Вследствие чего вовлечение тяжелого нефтяного сырья (тяжелая нефть, битум, мазут, гудрон и др., далее – ТНС) в инфраструктуру нефтеперерабатывающих производств является необходимым для увеличения глубины переработки добываемого углеводородного сырья с получением максимально возможного количества светлых дистиллятных фракций (бензиновые и дизельные). Вакуумный остаток (гудрон) как трудноперерабатываемый продукт перегонки нефти является одним из наиболее доступных и предпочтительных к переработке типов тяжелых нефтяных высококипящих фракций. Все процессы облагора-

живания нефтяного сырья можно условно разделить на процессы, основанные на снижении содержания углерода в сырье, либо насыщении его водородом [1]. В основе вышеперечисленных подходов лежит термическая обработка сырья с получением маловязкой полусинтетической нефти (ПСН). Процессы, основанные на снижении содержания углерода, являются наиболее простыми в промышленной реализации с минимальными экономическими затратами. Данный подход характеризуется невысоким выходом светлых фракций, а также значительным количеством получаемых побочных продуктов (газообразные продукты и продукты уплотнения) [2]. Для снижения выхода коксовых отложений и увеличения селективности по светлым фракциям целесообразно использовать молекулярный водород [3]. Основным недостатком ги-

дрогенизационных процессов является их высокая стоимость и опасность, связанная с использованием высоких давлений водорода [4]. В последнее время активно развиваются процессы, совмещающие преимущества двух вышеуказанных подходов, например, термокаталитические процессы с использованием воды [5–8].

В процессах облагораживания тяжелого нефтяного сырья используются катализаторы на основе различных 3d-металлов (Ni, Mo, Co, W, Fe и др.) [9–12]. Данные катализаторы можно разделить на нанесенные [13], грубодисперсные [7] (>10 мкм) и дисперсные. Последние, в свою очередь, делятся по типу прекурсора на получаемые *in situ* водо- и нефтерастворимые катализаторы [14, 15] и получаемые *ex situ* порошковые катализаторы [12]. Основным преимуществом нанесенных и грубодисперсных катализаторов является простое отделение катализатора после проведения реакции облагораживания [16]. Однако в данном случае работа с тяжелым нефтяным сырьем характеризуется несколькими серьезными недостатками. К таковым относятся следующие протекающие процессы: блокировка пор высокомолекулярными фрагментами тяжелого нефтяного сырья, диффузионные ограничения массопереносу в ходе реакции и, как следствие, быстрая дезактивация катализатора [17]. К преимуществам дисперсных катализаторов можно отнести увеличение доступности высокодисперсных активных центров для крупных молекул реагентов, возможность стабилизации высокомолекулярными компонентами каталитической дисперсии при термообработке и способность захватывать свободные радикалы на поверхности, тем самым уменьшая реакции поликонденсации [17].

Поиск активных каталитических систем в процессах глубокой переработки гудрона является интересной и актуальной научной задачей. Для получения максимального выхода дистиллятных фракций, химических веществ с соблюдением экологических норм ТНС должно быть переработано с удалением гетероатомов и превращением тяжелых фракций в более желательные светлые углеводородные фракции, которые совместимы с современными двигателями внутреннего сгорания или подходят в качестве химических прекурсоров. В настоящий момент в литературе активно обсуждаются различные каталитические подходы к переработке гудрона. Наиболее распространенными направлениями исследования являются гидрогенизационные процессы, каталитический крекинг и процессы с использованием воды (акватермолиз, каталитический паровой крекинг (КПК) и крекинг в сверхкритической воде). В гидропроцессах в основном используются катализаторы на основе молибдена [15, 18–21], которые позволяют увеличивать выходы светлых фракций и снижать коксообразование. Ряд работ посвящен модифицированию традиционных Mo-содержащих катализаторов [16, 22, 23]. Так, в работе [22] приведены результаты исследования гидрокрекинга каменноугольно-

го вакуумного остатка в присутствии мультиметаллического катализатора (на основе Fe-Mo-Ni) в сларри-режиме в автоклавной установке при температурах 330–430 °С в течение 20 мин. Показано, что один из компонентов каталитической системы Fe<sub>1-x</sub>S (пирротин) в присутствии дисперсных сульфидов молибдена и никеля является активной фазой в процессе гидрокрекинга. Мультикомпонентная сульфидная каталитическая система способствует термическому разложению каменноугольного вакуумного остатка при низкой температуре, при этом подавляется коксообразование с увеличением выхода легких углеводородов и удалением гетероатомов, что связано с синергетическим эффектом между активными фазами.

Основной особенностью каталитического крекинга является отсутствие внешних доноров водорода, в связи с этим применяемые катализаторы должны обладать высокой активностью в реакциях крекинга и низкой склонностью к коксообразованию. В работе [12] для превращения гудрона (реактор периодического действия, 410–450 °С, 1–2 ч) в качестве катализатора использовался карбид вольфрама в виде частиц микронного размера. При анализе фракционного состава получаемых продуктов установлено, что катализатор WC способствует увеличению выхода светлых фракций с уменьшением содержания вакуумного газойля и образующихся побочных продуктов. Авторы предположили, что в присутствии карбида вольфрама вклад реакций уплотнения уменьшается, а увеличение образования светлых фракций связано с ростом вклада реакций по карбокатионному механизму. Авторами работы [24] изучен процесс каталитического крекинга вакуумного остатка в автоклавной установке при 400–420 °С в течение 60 мин в присутствии образующегося *in situ* и коммерческого оксида алюминия, а также бурового шлама, состоящего в основном из песчаника (алюмосиликаты, оксиды железа, титана). В качестве основных результатов авторы приводят снижение выхода кокса и большую конверсию вакуумного остатка в присутствии 10 мас. % буровых шламов, по сравнению с термическим крекингом и крекингом в присутствии оксида алюминия обоих типов. Данный факт авторы объясняют равновесием между процессами образования предшественников продуктов уплотнения и их адсорбцией на поверхности частиц катализатора с дальнейшим крекингом. На основании литературных данных можно заключить, что каталитический крекинг гудрона способствует получению жидких продуктов с улучшенным фракционным составом, однако отсутствие доноров водорода приводит к ухудшению качества продуктов (снижение соотношения H:C) либо показателей процесса (увеличение выхода кокса и газа), по сравнению с гидропроцессами.

Для сглаживания недостатков термического/каталитического крекинга гудрона целесообразно использовать подходы, способствующие улучшению качества получаемых нефтяных фрак-

ций за счет процессов переноса водорода из водородсодержащих источников. Одним из наиболее доступных доноров водорода является вода [25]. Как было указано ранее, процессы с использованием воды можно разделить (по ее фазовому состоянию) на акватермолиз (субкритическая вода), паровой крекинг (перегретый пар) и крекинг в сверхкритической воде [5, 26]. Акватермолиз проводят при сравнительно мягких условиях ( $T < 374$  °C и давлении насыщенных паров воды), достаточных для гидролиза C-S связей в углеводородном сырье, однако недостаточных для глубокой конверсии высококипящих фракций за счет протекания термического крекинга. Как следствие, в качестве основных результатов данных процессов авторы указывают снижение вязкости и содержания серы при незначительном изменении фракционного состава получаемых жидких продуктов [27–29]. Использование сверхкритической воды в присутствии различных катализаторов (на основе  $\text{CeO}_2$  [30, 31],  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [32–34],  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{MnO}_2$  [30],  $\text{NiMo/SiO}_2$  [35],  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [36, 37]) в процессах облагораживания тяжелого нефтяного сырья характеризуется высокой эффективностью благодаря как переходу в более жесткие условия ( $T = 400\text{--}500$  °C,  $P > 22,1$  МПа), так и изменениям свойств воды при переходе в сверхкритическое состояние [38]. Данный процесс зарекомендовал себя в качестве эффективного подхода к облагораживанию тяжелого нефтяного сырья (в т. ч. гудрона) с получением облегченной качественной полусинтетической нефти с минимальным выходом кокса. Однако дороговизна данного подхода, а также необходимость использования специальных коррозионностойких сплавов для реакторов и других технологических узлов делают данный процесс нерентабельным в промышленных масштабах.

Использование воды в виде перегретого пара при  $T = 400\text{--}500$  °C позволяет решить проблемы недостаточной эффективности облагораживания сырья в случае акватермолиза и при этом не требует значительных экономических вложений, связанных с модернизацией установок, при реализации каталитического парового крекинга на существующих НПЗ. В процессе КПК тяжелого нефтяного сырья используются катализаторы на основе Mo [39, 40], Ni [6, 41] и Fe [14, 42]. В данных работах в качестве основных положительных результатов можно выделить увеличение выхода жидких продуктов с ростом в последних соотношения H:C и снижением содержания S. Кроме того, отмечается снижение выхода кокса по сравнению с термическим крекингом без использования воды и катализатора. Однако, данное направление характеризуется отсутствием достаточной научной базы. Как следствие, для изучения всех аспектов КПК – влияния природы активных фаз каталитических систем на основе различных металлов и физико-химических параметров процесса на выход и свойства получаемых продуктов, требуется дальнейшее проведение научно-исследовательских работ.

Таким образом, поиск и исследование активных каталитических систем для крекинга ТНС в присутствии водяного пара является актуальной задачей. Целью данной работы является изучение каталитической активности дисперсных катализаторов на основе ряда металлов (Mo, Ni, Al, Co, Fe) в процессе каталитического парового крекинга гудрона как наиболее часто используемых металлов, обладающих различными функциями, в катализаторах для переработки тяжелого нефтяного сырья.

#### Экспериментальная часть.

##### Свойства используемого гудрона

В экспериментах использовали гудрон западно-сибирской нефти АО «Газпромнефть-ОНПЗ» с высоким содержанием серы (1,8 мас. %), преимущественно состоящий из углеводородных фракций с температурой кипения выше 500 °C (табл. 2). В табл. 1 представлены данные по CHNS-составу, плотности и вязкости, а также коксуемости по Конрадсону.

Таблица 1. Основные характеристики использованного в экспериментах гудрона

Table 1. The main characteristics of the vacuum residue used in the experiments

Элементный состав Elemental composition	Содержание, мас. % Content, wt. %	Атомное соотношение H:C Atomic ratio H:C	1,57
C	85,6	Плотность при 25 °C, г/см <sup>3</sup> Density at 25 °C, g/cm <sup>3</sup>	1,00
H	11,2	Кинематическая вязкость при 60 °C, cSt Kinematic viscosity at 60 °C, cSt	6712,5
N	0,9	Коксуемость по Конрадсону, мас. % Conradson residue, wt. %	19,6
S	1,8		
O	0,5		

##### Методика приготовления катализаторов

Дисперсный катализатор на основе различных металлов формировался *in situ* в горячей зоне реактора из приготовленной ранее обратной эмульсии водного раствора прекурсора катализатора в гудроне. Методика приготовления обратной эмульсии заключается в равномерном диспергировании соответствующего количества водного раствора предшественника катализатора (парамолибдат аммония, сульфат алюминия, нитрат никеля, хлорид кобальта, сульфат железа II) в нагретом до 80 °C гудроне. Количество воды и прекурсора выбиралось таким образом, чтобы в состав конечной эмульсии входило 10 % воды и 0,5 % металла. Диспергирование осуществляли с использованием диспергатора ИКА Т-25 basic ULTRA-TURRAX при скорости перемешивания 24000 об/мин в течение 3 мин.

##### Методика проведения эксперимента

Исследование каталитического парового крекинга гудрона проводили на установке с проточным реактором типа сларри (рис. 1) при температуре 450 °C и давлении 2,0 МПа. Внутренний диа-

метр реактора – 20 мм, длина – 300 мм, материал – нержавеющая сталь.

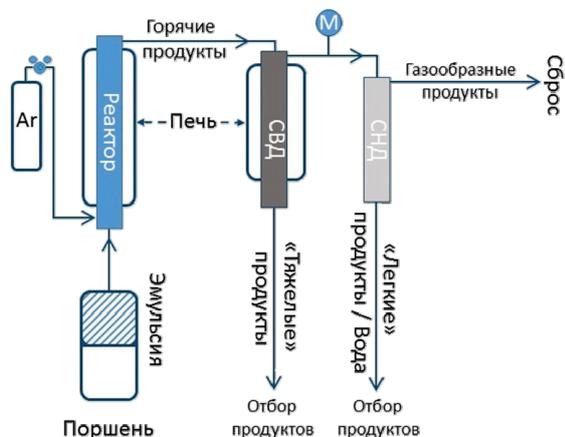


Рис. 1. Схема проточной установки с реактором типа сларри для проведения экспериментов по каталитическому паровому крекингу гудрона

Fig. 1. Scheme of a flow installation with slurry-type reactor for experiments on catalytic steam cracking of vacuum residue

Подача обратной эмульсии водного раствора предшественника в реактор обеспечивается с помощью поршня, подогреваемого до 60 °С. Скорость подачи сырья составляла 100 мл/ч (в случае термического крекинга – чистого гудрона, в случае парового крекинга – обратной эмульсии воды в гудроне). В реактор также подавали аргон для достижения общего давления в системе 2,0 МПа, со скоростью 100 мл/мин. «Тяжелые» продукты накапливались в сепараторе высокого давления (СВД), нагретого до 230 °С, более «легкие» продукты и вода далее поступали в сепаратор низкого давления (СНД), охлаждаемого до комнатной температуры. Жидкие продукты крекинга после отделения воды на делительной воронке объединяли и анализировали. Определение выхода продуктов уплотнения проводили путем суммирования массы остатков в реакторе, после отмывки дихлорметаном, с содержанием кокса в жидких продуктах, которое определяли следующим образом: часть жидких продуктов растворяли в избытке дихлорметана с последующим центрифугированием и промыванием остатка на бумажном фильтре.

Продукты переработки гудрона исследовали следующими физико-химическими методами:

HCNS-O анализ исходного сырья и жидких продуктов переработки гудрона

Элементный CHNS-состав жидких и твердых образцов определяли на CHNS-O анализаторе VA-RIO EL CUBE (Elementar Analysensysteme, Германия). Пробу анализировали не менее трех раз с последующим усреднением полученных данных.

Определение фракционного состава жидких нефтепродуктов по ASTM D716991-1-1

Фракционный состав исходного гудрона и объемных жидких продуктов его переработки

определяли с помощью высокотемпературной газовой хроматографии в соответствии со стандартом ASTM D71691-11. В качестве стандартного вещества для определения степени извлечения использовали вакуумный газойль.

Определение кинематической вязкости

Кинематическую вязкость измеряли исходя из величин плотности и динамической вязкости, определенных на вискозиметре Штабингера по стандарту ASTM D7042. Кинематическую вязкость измеряли в диапазоне температур 20–100 °С в зависимости от исследуемого образца.

Определение плотности

Определение плотности исходного углеводородного сырья и продуктов переработки проводили на вискозиметре Штабингера по стандарту ASTM D7042.

### Результаты и обсуждение

Для исследования влияния природы катализатора на выход и свойства продуктов термического превращения гудрона были проведены эксперименты по термическому крекингу (ТК), паровому крекингу (ПК) и каталитическому паровому крекингу (КПК) в присутствии дисперсных катализаторов на основе различных металлов. Оценку эффективности процессов проводили по совокупности параметров: выхода светлых фракций ( $T_{кип} < 350$  °С) и полусинтетической нефти (жидких продуктов в целом), а также нефтяного кокса и газообразных продуктов (табл. 2). Также оценивались параметры, связанные с качественными характеристиками жидких продуктов: атомное соотношение Н:С, содержание серы, вязкость и плотность (табл. 3).

Использование Мо-содержащего дисперсного катализатора в процессе каталитического парового крекинга гудрона по сравнению с паровым крекингом без катализатора (ПК) позволяет при практически неизменном выходе жидких продуктов (86,5 мас. %) увеличить выход светлых фракций (с 20,9 до 23,0 мас. %), снизить содержание серы на 0,22 мас. % и увеличить соотношение Н:С на 0,24 в жидких продуктах. Также обнаружено, что его использование не приводит к увеличению выхода продуктов уплотнения (кокс), однако выход газообразных продуктов увеличивается на 0,9 мас. %, что, вероятнее всего, связано с активностью Мо-содержащего дисперсного катализатора в процессе обессеривания тяжелого нефтяного сырья с образованием газообразных серосодержащих продуктов [40].

В случае никеля, по сравнению с молибденом, наблюдается незначительное повышение содержания серы в жидких продуктах (до 1,32 мас. %) и увеличение выхода кокса (6,1 мас. %), что, в свою очередь, приводит к снижению выхода жидких продуктов (на 5,5 мас. %). Это объясняется большей склонностью никеля к коксообразованию как

в каталитическом крекинге, так и в каталитическом паровом крекинге, что согласуется с данными, полученными в процессе каталитического парового крекинга тяжелой нефти в статическом режиме [6].

**Таблица 2.** Выход продуктов термического крекинга, парового крекинга гудрона с 0,5 мас. % различных металлов при соотношении вода:гудрон=0,1:1. Условия процесса: температура – 450 °С; давление 2,0 МПа, скорость подачи гудрона – 0,1 кг/ч

**Table 2.** Yield of thermal cracking (TC), steam cracking (SC) products of vacuum residue (VR) with 0,5 wt. % of various metals with water:vacuum residue=0,1:1 ratio. Process conditions: temperature – 450 °C; pressure 2,0 MPa, feed rate – 0,1 kg/h

Выход фракций, мас. % Fraction yield, wt. %	Гудрон VR	ТК TC	ПК SC	Продукты крекинга на различных катализаторах (металл – основа дисперсного катализатора) Products on various metals – the basis of the dispersed catalysts				
				Mo	Ni	Fe	Co	Al
				Газообразные продукты Gas	–	10,1	5,5	6,4
Бензиновая н.к. –200 °С Gasoline b.p. –200 °С	0	16,6	8,4	10,3	6,8	13,0	8,6	9,9
Дизельная/Diesel 200–360 °С	0	21,6	12,5	12,7	9,6	16,3	12,0	11,9
Масляная/Gasoil 360–500 °С	5	12,2	15,1	15,6	12,2	11,4	13,7	14,9
Остаточные/Residue T>500 °С	95	16,9	49,2	47,9	52,4	41,9	51,5	46,1
Светлые н.к. –360 °С Light fractions b.p. –360 °С	0	38,2	20,9	23,0	16,4	29,3	20,6	21,8
Выход ПСН Liquid products	–	65,8	85,2	86,5	81,0	82,6	85,8	82,8
Выход кокса/Coke	–	15,5	3,1	3,0	6,1	5,5	3,2	4,7

В экспериментах с использованием Al-содержащего дисперсного катализатора не наблюдается ярко выраженной крекирующей способности, характерной для оксидных форм алюминия ввиду отсутствия значительных различий во фракционном составе жидких продуктов, по сравнению с паровым крекингом без катализатора. Мы предполагаем, что отсутствие каталитической активности данного катализатора может быть связано либо с быстрой его дезактивацией, либо с незначительным превращением прекурсора (сульфат алюминия) в активные оксидные формы ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Использование Fe-содержащих дисперсных катализаторов позволяет значительно увеличить выход светлых фракций, вероятнее всего, благодаря протеканию процесса окислительного крекинга [34]. При этом также наблюдается увеличение выхода газообразных продуктов (согласно механиз-

му, за счет образования CO и CO<sub>2</sub>) и продуктов уплотнения по сравнению с КПК в присутствии Mo-содержащего катализатора. То есть возрастает конверсия гудрона в целом, что, возможно, связано локальными перегревами на поверхности катализатора ввиду экзотермичности процесса окисления. Однако Fe-содержащий дисперсный катализатор не обладает столь выраженными обессеривающими свойствами по сравнению с катализатором на основе молибдена, что приводит к увеличению содержания серы до 1,34 мас. % в жидких продуктах облагораживания.

**Таблица 3.** Свойства жидких продуктов термического крекинга, парового крекинга гудрона с 0,5 мас. % различных металлов при соотношении вода:гудрон=0,1:1. Условия процесса: температура – 450 °С; давление 2,0 МПа, скорость подачи гудрона – 0,1 кг/ч

**Table 3.** Features of thermal cracking (TC), steam cracking (SC) liquid products of vacuum residue (VR) with 0,5 wt. % of various metals with water:vacuum residue=0,1:1 ratio. Process conditions: temperature – 450 °C; pressure 2,0 MPa, feed rate – 0,1 kg/h

Показатель Parameter of liquid products	Гудрон VR	ТК TC	ПК SC	Продукты крекинга на различных катализаторах (металл – основа дисперсного катализатора) Products on various metals – the basis of the dispersed catalysts				
				Mo	Ni	Fe	Co	Al
				Содержание S в ПСН, мас. % S content, wt. %	1,8	1,63	1,50	1,28
H:C	1,57	1,23	1,32	1,56	1,57	1,60	1,57	1,35
Плотность ПСН, кг/м <sup>3</sup> (25 °С) Density, kg/m <sup>3</sup> (25 °C)	1000	890	935	940	955	915	950	937
Вязкость ПСН, сСт (60 °С) Viscosity, cSt (60 °C)	6712,5	52	125	62	190	88	128	76

В случае Co-содержащих дисперсных катализаторов наблюдаются схожие с молибденом выход и качество продуктов парового крекинга. Однако при одинаковой степени обессеривания, в случае кобальта, наблюдается меньшая конверсия гудрона в легкие фракции (выход остаточных фракций больше на 3,6 мас. %). Это может быть связано с тем, что оксидные формы молибдена, присутствующие в системе (MoO<sub>3</sub> и MoO<sub>2</sub>), могут участвовать в окислительном крекинге наподобие оксидов железа (рис. 2).

Анализ жидких продуктов КПК показал, что процесс каталитического крекинга приводит к снижению вязкости по сравнению с исходным гудроном приблизительно в 90 раз: 62–75 сСт и 6712,5 сСт при 60 °С, соответственно. Также наблюдалось снижение плотности с 1,00 г/см<sup>3</sup> (исходный гудрон) до 0,92 г/см<sup>3</sup> (продукты облагораживания). Наблюдаемое снижение вязкости и плотности продуктов облагораживания гудрона объясняется

изменением его состава в результате термokatалитической обработки в присутствии воды.

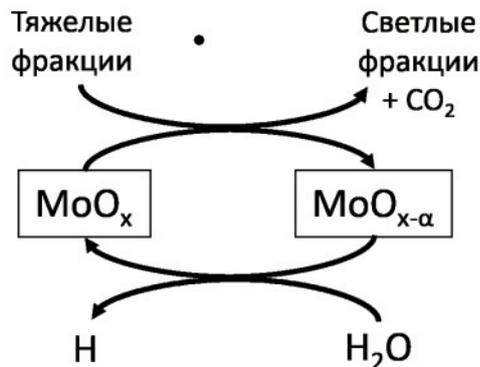


Рис. 2. Предполагаемый принцип работы Мо-содержащего дисперсного катализатора в процессе каталитического парового крекинга тяжелого нефтяного сырья

Fig. 2. Presumptive working principle of Mo-based dispersed catalysts in catalytic steam cracking of heavy oil feedstocks

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности использования дисперсных катализаторов на основе Мо и Fe в паровом крекинге тяжелого нефтяного сырья.

#### Заключение

Исследованы особенности парового каталитического крекинга гудрона при 450 °С в присутствии

дисперсных катализаторов на основе различных металлов (концентрации металлов в исходной эмульсии 0,5 мас. %). Выявлено, что применение Мо-содержащего дисперсного катализатора приводит к увеличению соотношения Н:С (до 1,56) в жидких продуктах, по сравнению с паровым крекингом без катализатора (1,32). Помимо этого, происходит снижение содержания серы в жидких продуктах (на 0,22 мас. %), что свидетельствует об увеличении глубины взаимодействия воды и сырья при использовании дисперсного катализатора. Катализаторы на основе железа эффективны в получении светлых продуктов (выход светлых фракций 29,3 мас. %), поскольку характеризуются высокой активностью в процессах окислительного крекинга. Остальные дисперсные катализаторы на основе Ni, Al, и Co не превосходят Мо- и Fe-содержащие катализаторы по выходу и качеству жидких продуктов облагораживания. Вязкость и плотность жидких продуктов всех процессов облагораживания имеет схожие значения и падает приблизительно на 99,98 и 8 % от исходного значения соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: соглашение № 14.607.21.0172, идентификационный номер соглашения RFMEFI60717X0172, название «Разработка новых технологических решений облагораживания углеводородного сырья, минимизирующих образование отходов и негативного воздействия на окружающую среду».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A review of recent advances in catalytic hydrocracking of heavy residues / R. Sahu, B.J. Song, J.S. Im, Y.P. Jeon, C.W. Lee // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2015. – V. 27. – P. 12–24.
2. Castañeda L.C., Muñoz J.A.D., Ancheyta J. Current situation of emerging technologies for upgrading of heavy oils // Catalysis Today. – 2014. – V. 220–222. – P. 248–273.
3. Ancheyta J., Speight J.G. Hydroprocessing of heavy oils and residua. – London: CRC Press, 2007. – 376 p.
4. Fathi M.M., Pereira-Almao P. Catalytic aquaprocessing of arab light vacuum residue via short space times // Energy and Fuels. – 2011. – V. 25. – № 11. – P. 4867–4877.
5. Catalytic Steam Cracking of Heavy Oil Feedstocks: a Review / P.M. Eletsii, O.O. Mironenko, R.G. Kukushkin, G.A. Sosnin, V.A. Yakovlev // Catalysis in Industry. – 2018. – V. 10. – № 3. – P. 185–201.
6. Investigating the process of heavy crude oil steam cracking in the presence of dispersed catalysts. II: Investigating the effect of Ni-containing catalyst concentration on the yield and properties of products / P.M. Eletsii, O.O. Mironenko, G.A. Sosnin, O.A. Bulavchenko, O.A. Stonkus, V.A. Yakovlev // Catalysis in Industry. – 2016. – V. 8. – № 4. – P. 328–335.
7. Steam cracking of coal-derived liquids and some aromatic compounds in the presence of haematite / V.I. Sharypov, B.N. Kuznetsov, N.G. Beregovtsova, S.V. Baryshnikov, V.N. Sidel'nikov // Fuel. – 1996. – V. 75. – № 7. – P. 791–794.
8. Kinetic Model for Catalytic Cracking of Heavy Oil with a Zirconia–Alumina–Iron Oxide Catalyst in a Steam Atmosphere / E. Fumoto, A. Matsumura, S. Sato, T. Takanohashi // Energy and Fuels. – 2009. – V. 23. – № 11. – P. 5308–5311.
9. Highly active nonpromoted hydrotreating catalysts through the controlled growth of a supported hexagonal WS<sub>2</sub> phase / T. Alphazan, A. Bonduelle-Skrzypczak, C. Legens, A.S. Gay, Z. Boudene, M. Girleanu, O. Ersen, C. Copret, P. Raybaud // ACS Catalysis. – 2014. – V. 4. – № 12. – P. 4320–4331.
10. Catalytic steam cracking of heavy crude oil with molybdenum and nickel nanodispersed catalysts / O.O. Mironenko, G.A. Sosnin, P.M. Eletsii, Y.K. Gulyaeva, O.A. Bulavchenko, O.A. Stonkus, V.O. Rodina, V.A. Yakovlev // Catalysis in Industry. – 2017. – V. 9. – № 3. – P. 221–229.
11. Recovery of useful lighter fuels from petroleum residual oil by oxidative cracking with steam using iron oxide catalyst / S. Funai, E. Fumoto, T. Tago, T. Masuda // Chemical Engineering Science. – 2010. – V. 65. – № 1. – P. 60–65.
12. Каталитические свойства порошков карбида вольфрама в процессе крекинга тяжелого углеводородного сырья / М.А. Морозов, А.С. Акимов, С.П. Журавков, Н.Ю. Золотухина, Н.Н. Свириденко, А.К. Головки, А.В. Восмерилов, Т.А. Федущак // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – V. 328. – № 8. – P. 16–24.
13. Catalytic bitumen cracking in sub- and supercritical water / X.K. Gai, H. Arano, P. Lu, J.W. Mao, Y. Yoneyama, C.X. Lu, R.Q. Yang, N. Tsubaki // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 142. – P. 315–318.
14. Clark P.D., Kirk M.J. Studies on the Upgrading of Bituminous Oils with Water and Transition Metal Catalysts // Energy and Fuels. – 1994. – V. 8. – № 2. – P. 380–387.
15. Khadzhev S.N., Kadiev K.M., Kadieva M.K. Synthesis and properties of nanosized systems as efficient catalysts for hydroconversion of heavy petroleum feedstock // Petroleum Chemistry. – 2014. – V. 54. – № 5. – P. 323–346.

16. Upgrading of vacuum residue in batch type reactor using Ni-Mo supported on goethite catalyst / R. Sahu, B.J. Song, Y.P. Jeon, C.W. Lee // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2016. – V. 35. – P. 115–122.
17. A review of experimental procedures for heavy oil hydrocracking with dispersed catalyst / M.J. Angeles, C. Leyva, J. Ancheyta, S. Ramirez // *Catalysis Today*. – 2014. – V. 220–222. – P. 274–294.
18. Comparative reactivity between thermal and catalytic hydrocracking of vacuum residue: Effect of asphaltenes / N.T. Nguyen, S. Park, J. Jung, J. Cho, C.W. Lee, Y.K. Park // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2018. – V. 61. – P. 32–38.
19. A comparative activity study of a new ultra-dispersed catalyst system for a hydrocracking/hydrotreating technology using vacuum residue oil: Merey/Mesa / G. Noguera, S. Araujo, J. Hernández, A. Rivas, D. Mendoza, O. Castellano // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2012. – V. 90. – № 11. – P. 1979–1988.
20. S.H. Lim, K.S. Go, N.S. Nho, J.G. Lee / Effect of reaction temperature and time on the products and asphaltene dispersion stability in slurry-phase hydrocracking of vacuum residue // *Fuel*. – 2018. – V. 234. – P. 305–311.
21. K.S. Go, S.H. Lim, Y.K. Kim, E.H. Kwon, N.S. Nh / Characteristics of slurry-phase hydrocracking for vacuum residue with reaction temperature and concentrations of MoS<sub>2</sub> dispersed catalysts // *Catalysis Today*. – 2018. – V. 305. – P. 92–101.
22. Multi-metal catalysts for slurry-phase hydrocracking of coal-tar vacuum residue: Impact of inherent inorganic minerals / J. Du, W. Deng, C. Li, Z. Zhang, T. Yang, X. Cao, F. Du, Q. Sun // *Fuel*. – 2018. – V. 215. – P. 370–377.
23. Manek E., Haydari J. Hydrocracking of vacuum residue with solid and dispersed phase catalyst: Modeling of sediment formation and hydrodesulfurization // *Fuel Processing Technology*. – 2017. – V. 159. – P. 320–327.
24. Eshraghian A., Husein M.M. Catalytic thermal cracking of Athabasca VR in a closed reactor system // *Fuel*. – 2018. – V. 217. – P. 409–419.
25. Dutta R.P., McCaffrey W.C., Gray M.R., Muehlenbachs K. Thermal Cracking of Athabasca Bitumen: Influence of Steam on Reaction Chemistry // *Energy & Fuels*. – 2000. – V. 14. – № 3. – P. 671–676.
26. Heavy Oil Upgrading in the Presence of Water / P.M. Eletsii, G.A. Sosnin, O.O. Zaikina, R.G. Kukushkin, V. Yakovlev // *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. – 2017. – V. 10. – № 4. – P. 545–572.
27. Kapadia P.R., Kallos M.S., Gates I.D. A review of pyrolysis, aquathermolysis, and oxidation of Athabasca bitumen // *Fuel Processing Technology*. – 2015. – V. 131. – P. 270–289.
28. Mechanism of catalytic aquathermolysis: Influences on heavy oil by two types of efficient catalytic ions: Fe<sup>3+</sup> and Mo<sup>6+</sup> / Y. Wang, Y. Chen, J. He, P. Li, C. Yang // *Energy and Fuels*. – 2010. – V. 24. – № 3. – P. 1502–1510.
29. Upgrading and visbreaking of super-heavy oil by catalytic aquathermolysis with aromatic sulfonic copper / K. Chao, Y. Chen, J. Li, X. Zhang, B. Dong // *Fuel Processing Technology*. – 2012. – V. 104. – P. 174–180.
30. Golmohammadi M., Ahmadi S.J., Towfighi J. Catalytic cracking of heavy petroleum residue in supercritical water: Study on the effect of different metal oxide nanoparticles // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2016. – V. 113. – P. 136–143.
31. Catalytic cracking reaction of heavy oil in the presence of cerium oxide nanoparticles in supercritical water / M. Dehshosseini, T. Aida, M. Watanabe, Takami, D. Hojo, N. Aoki, T. Arita, A. Kishita, T. Adschiri // *Energy and Fuels*. – 2013. – V. 27. – № 8. – P. 4624–4631.
32. Hosseinpour M., Ahmadi S.J., Fatemi S. Successive co-operation of supercritical water and silica-supported iron oxide nanoparticles in upgrading of heavy petroleum residue: Suppression of coke deposition over catalyst // *Journal of Supercritical Fluids*. – 2015. – V. 100. – P. 70–78.
33. Hosseinpour M., Fatemi S., Ahmadi S.J. Catalytic cracking of petroleum vacuum residue in supercritical water media: Impact of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the form of free nanoparticles and silica-supported granules // *Fuel*. – 2015. – V. 159. – P. 538–549.
34. Fumoto E., Tago T., Masuda T. Production of lighter fuels by cracking petroleum residual oils with steam over zirconia-supporting iron oxide catalysts // *Energy and Fuels*. – 2006. – V. 20. – № 1. – P. 1–6.
35. Anthracene aquacracking using NiMo/SiO<sub>2</sub> catalysts in supercritical water conditions / T.R. Reina, P. Yeletsy, J.M. Bermúdez, P. Arcelus-Arrillaga, V.A. Yakovlev, M. Millan // *Fuel*. – 2016. – V. 182. – P. 740–748.
36. Fedyeva O.N., Vostrikov A.A. Hydrogenation of bitumen in situ in supercritical water flow with and without addition of zinc and aluminum // *Journal of Supercritical Fluids*. – 2012. – V. 72. – P. 100–110.
37. Fedyeva O.N., Antipenko V.R., Vostrikov A.A. Conversion of sulfur-rich asphaltite in supercritical water and effect of metal additives // *Journal of Supercritical Fluids*. – 2014. – V. 88. – P. 105–116.
38. Weingärtner H., Franck E.U. Supercritical water as a solvent // *Angewandte Chemie – International Edition*. – 2005. – V. 44. – № 18. – P. 2672–2692.
39. Vacuum residue upgrading through hydroprocessing with subcritical water / H.K. Ahn, S.H. Park, S. Sattar, S.I. Woo // *Catalysis Today*. – 2016. – V. 265. – P. 118–123.
40. A study of the catalytic steam cracking of heavy crude oil in the presence of a dispersed molybdenum-containing catalyst / O.O. Mironenko, G.A. Sosnin, P.M. Eletsii, Y.K. Gulyaeva, O.A. Bulavchenko, O.A. Stonkus, V.O. Rodina, V.A. Yakovlev // *Petroleum Chemistry*. – 2017. – V. 57. – № 7. – P. 618–629.
41. Cabrales-Navarro F.A., Pereira-Almao P. Catalytic Steam Cracking of a Deasphalted Vacuum Residue Using a Ni/K Ultradispersed Catalyst // *Energy and Fuels*. – 2017. – V. 31. – № 3. – P. 3121–3131.
42. Исследование процесса парового крекинга тяжелой нефти в присутствии железо- и молибденсодержащих дисперсных катализаторов в реакторе проточного типа / Р.Г. Кукушкин, П.М. Елецкий, О.О. Заикина, Г.А. Соснин, О.А. Булавченко, В.А. Яковлев // *Катализ в промышленности*. – 2018. – V. 18. – № 3. – P. 62–71.

Поступила 12.11.2018 г.

#### **Информация об авторах**

**Соснин Г.А.**, младший научный сотрудник лаборатории каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института Катализа имени Г.К. Борескова СО РАН; аспирант кафедры катализа и адсорбции, ассистент кафедры физической химии Новосибирского Государственного Университета.

**Заикина О.О.**, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института Катализа имени Г.К. Борескова СО РАН; научный сотрудник Новосибирского Государственного Университета.

**Елецкий П.М.**, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института Катализа имени Г.К. Борескова СО РАН, Россия.

**Яковлев В.А.**, доктор химических наук, заведующий лабораторией каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института Катализа имени Г.К. Борескова СО РАН; ведущий научный сотрудник Новосибирского Государственного Университета.

UDC 665.658.6

## CATALYTIC STEAM CRACKING OF VACUUM RESIDUE IN PRESENCE OF DISPERSED CATALYSTS BASED ON MO, NI, FE, CO, AL METALS

**Gleb A. Sosnin**<sup>1,2</sup>,  
sosningleb@catalysis.ru

**Olesya O. Zaikina**<sup>1,2</sup>,  
omironenko@catalysis.ru

**Petr M. Eletskii**<sup>1</sup>,  
yeletsky@catalysis.ru

**Vadim A. Yakovlev**<sup>1,2</sup>,  
yakovlev@catalysis.ru

<sup>1</sup> Boreskov Institute of Catalysis SB RAS,  
5, Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Novosibirsk State University,  
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need in developing alternative hydrogen-free technologies for processing heavy oil feedstocks to involve the latter in oil refining and increase the depth of processing of residues (atmospheric and vacuum residues) to minimize yield of by-products.

**The main aim** of the research is to investigate catalytic steam cracking of vacuum residue of West-Siberian oil in the presence of dispersed catalysts based on various metals.

**Objects:** catalytic steam cracking – thermocatalytic process of heavy oil feedstock upgrading in the presence of water.

**Methods.** To assess the efficacy of catalysts based on various metals, a complex of physicochemical parameters: fractional composition of catalytic steam cracking liquid products (ASTM D7169–11), S content, H:C ratio (HCNS-O analysis), density and kinematic viscosity (ASTM D7042) of liquid products, was used.

**Results.** The authors have determined the main features of steam catalytic cracking of vacuum residue at 450 °C in the presence of dispersed catalysts based on various metals (at a metal concentration in the initial emulsion of 0,5 wt. %). It was revealed that the use of a Mo-based dispersed catalyst leads to an increase of the H:C ratio (to 1,56) in liquid products comparing to steam cracking without a catalyst (1,32), also the sulfur content in liquid products decreases (by 0,22 wt. %), these facts indicate the enhancement of interaction between water and heavy feedstocks using this type of dispersed catalyst. The use of a dispersed catalyst based on iron, an increase in the yield of light fractions (29,3 wt. %) was noted, since this catalyst is characterized by high activity in oxidative cracking. The remaining dispersed catalysts based on Ni, Al, and Co do not exceed Mo- and Fe-based catalysts in the yield and quality of liquid products. The viscosity of liquid products is reduced by about 90 times compared with the original vacuum residue.

### Key words:

Catalytic steam cracking, heavy oil feedstocks, dispersed catalyst, slurry-reactor, molybdenum, iron.

The work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: project no. 14.607.21.0172, identification number RFMEFI60717X0172.

### REFERENCES

- Sahu R. A review of recent advances in catalytic hydrocracking of heavy residues. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, vol. 27, pp. 12–24.
- Castañeda L.C., Muñoz J.A.D., Ancheyta J. Current situation of emerging technologies for upgrading of heavy oils. *Catalysis Today*, 2014, vol. 220–222, pp. 248–273.
- Ancheyta J., Speight J.G. *Hydroprocessing of heavy oils and residua*. London, CRC Press, 2007. 376 p.
- Fathi M.M., Pereira-Almao P. Catalytic aquaprocessing of arab light vacuum residue via short space times. *Energy and Fuels*, 2011, vol. 25, no. 11, pp. 4867–4877.
- Eletskii P.M. Catalytic Steam Cracking of Heavy Oil Feedstocks: a Review. *Catalysis in Industry*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 185–201.
- Eletskii P.M. Investigating the process of heavy crude oil steam cracking in the presence of dispersed catalysts. II: Investigating the effect of Ni-containing catalyst concentration on the yield and properties of products. *Catalysis in Industry*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 328–335.
- Sharypov V.I. Steam cracking of coal-derived liquids and some aromatic compounds in the presence of haematite. *Fuel*, 1996, vol. 75, no. 7, pp. 791–794.
- Fumoto E. Kinetic Model for Catalytic Cracking of Heavy Oil with a Zirconia–Alumina–Iron Oxide Catalyst in a Steam Atmosphere. *Energy and Fuels*, 2009, vol. 23, no. 11, pp. 5308–5311.
- Alphazan T. Highly active nonpromoted hydrotreating catalysts through the controlled growth of a supported hexagonal WS<sub>2</sub> phase. *ACS Catalysis*, 2014, vol. 4, no. 12, pp. 4320–4331.
- Mironenko O.O. Catalytic steam cracking of heavy crude oil with molybdenum and nickel nanodispersed catalysts. *Catalysis in Industry*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 221–229.
- Funai S. Recovery of useful lighter fuels from petroleum residual oil by oxidative cracking with steam using iron oxide catalyst. *Chemical Engineering Science*, 2010, vol. 65, no. 1, pp. 60–65.
- Morozov M.A., Akimov A.S., Zhuravkov S.P., Zolotukhina N.Yu., Sviridenko N.N., Golovko A.K., Vosmerikov A.V., Fedushchak T.A. Catalytic properties of tungsten carbide powders in cracking heavy petroleum feedstock. *Bulletin of the Tomsk Po-*

- lytechnic University. *Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 8, pp. 16–24.
13. Gai X.K. Catalytic bitumen cracking in sub- and supercritical water. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 142, pp. 315–318.
  14. Clark P.D., Kirk M.J. Studies on the Upgrading of Bituminous Oils with Water and Transition Metal Catalysts. *Energy and Fuels*, 1994, vol. 8, no. 2, pp. 380–387.
  15. Khadzhev S.N., Kadiev K.M., Kadieva M.K. Synthesis and properties of nanosized systems as efficient catalysts for hydroconversion of heavy petroleum feedstock. *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 54, no. 5, pp. 323–346.
  16. Sahu R. Upgrading of vacuum residue in batch type reactor using Ni-Mo supported on goethite catalyst. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, vol. 35, pp. 115–122.
  17. Angeles M.J. A review of experimental procedures for heavy oil hydrocracking with dispersed catalyst. *Catalysis Today*, 2014, vol. 220–222, pp. 274–294.
  18. Nguyen N.T. Comparative reactivity between thermal and catalytic hydrocracking of vacuum residue: Effect of asphaltenes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, vol. 61, pp. 32–38.
  19. Noguera G. A comparative activity study of a new ultra-dispersed catalyst system for a hydrocracking/hydrotreating technology using vacuum residue oil: Merex/Mesa. *Chemical Engineering Research and Design*, 2012, vol. 90, no. 11, pp. 1979–1988.
  20. Lim S.H. Effect of reaction temperature and time on the products and asphaltene dispersion stability in slurry-phase hydrocracking of vacuum residue. *Fuel*, 2018 March, vol. 234, pp. 305–311.
  21. Go K.S. Characteristics of slurry-phase hydrocracking for vacuum residue with reaction temperature and concentrations of MoS<sub>2</sub> dispersed catalysts. *Catalysis Today*, 2018, vol. 305, pp. 92–101.
  22. Du J. Multi-metal catalysts for slurry-phase hydrocracking of coal-tar vacuum residue: Impact of inherent inorganic minerals. *Fuel*, 2018, vol. 215, pp. 370–377.
  23. Manek E., Haydary J. Hydrocracking of vacuum residue with solid and dispersed phase catalyst: Modeling of sediment formation and hydrodesulfurization. *Fuel Processing Technology*, 2017, vol. 159, pp. 320–327.
  24. Eshraghian A., Husein M.M. Catalytic thermal cracking of Athabasca VR in a closed reactor system. *Fuel*, 2018, vol. 217, pp. 409–419.
  25. Dutta R.P. Thermal Cracking of Athabasca Bitumen: Influence of Steam on Reaction Chemistry. *Energy & Fuels*, 2000, vol. 14, no. 3, pp. 671–676.
  26. Eletsii P.M. Heavy Oil Upgrading in the Presence of Water. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 545–572.
  27. Kapadia P.R., Kallos M.S., Gates I.D. A review of pyrolysis, aquathermolysis, and oxidation of Athabasca bitumen. *Fuel Processing Technology*, 2015, vol. 131, pp. 270–289.
  28. Wang Y. Mechanism of catalytic aquathermolysis: Influences on heavy oil by two types of efficient catalytic ions: Fe<sup>3+</sup> and Mo<sup>6+</sup>. *Energy and Fuels*, 2010, vol. 24, no. 3, pp. 1502–1510.
  29. Chao K. Upgrading and visbreaking of super-heavy oil by catalytic aquathermolysis with aromatic sulfonic copper. *Fuel Processing Technology*, 2012, vol. 104, pp. 174–180.
  30. Golmohammadi M., Ahmadi S.J., Towfighi J. Catalytic cracking of heavy petroleum residue in supercritical water: Study on the effect of different metal oxide nanoparticles. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2016, vol. 113, pp. 136–143.
  31. Dehoseini M. Catalytic cracking reaction of heavy oil in the presence of cerium oxide nanoparticles in supercritical water. *Energy and Fuels*, 2013, vol. 27, no. 8, pp. 4624–4631.
  32. Hosseinpour M., Ahmadi S.J., Fatemi S. Successive co-operation of supercritical water and silica-supported iron oxide nanoparticles in upgrading of heavy petroleum residue: Suppression of coke deposition over catalyst. *Journal of Supercritical Fluids*, 2015, vol. 100, pp. 70–78.
  33. Hosseinpour M., Fatemi S., Ahmadi S.J. Catalytic cracking of petroleum vacuum residue in supercritical water media: Impact of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the form of free nanoparticles and silica-supported granules. *Fuel*, 2015, vol. 159, pp. 538–549.
  34. Fumoto E., Tago T., Masuda T. Production of lighter fuels by cracking petroleum residual oils with steam over zirconia-supporting iron oxide catalysts. *Energy and Fuels*, 2006, vol. 20, no. 1, pp. 1–6.
  35. Reina T.R. Anthracene aquacacking using NiMo/SiO<sub>2</sub> catalysts in supercritical water conditions. *Fuel*, 2016, vol. 182, pp. 740–748.
  36. Fedyeva O.N., Vostrikov A.A. Hydrogenation of bitumen in situ in supercritical water flow with and without addition of zinc and aluminum. *Journal of Supercritical Fluids*, 2012, vol. 72, pp. 100–110.
  37. Fedyeva O.N., Antipenko V.R., Vostrikov A.A. Conversion of sulfur-rich asphaltite in supercritical water and effect of metal additives. *Journal of Supercritical Fluids*, 2014, vol. 88, pp. 105–116.
  38. Weingärtner H., Franck E.U. Supercritical water as a solvent. *Angewandte Chemie – International Edition*, 2005, vol. 44, no. 18, pp. 2672–2692.
  39. Ahn H.K. Vacuum residue upgrading through hydroprocessing with subcritical water. *Catalysis Today*, 2016, vol. 265, pp. 118–123.
  40. Mironenko O.O. A study of the catalytic steam cracking of heavy crude oil in the presence of a dispersed molybdenum-containing catalyst. *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, no. 7, pp. 618–629.
  41. Cabrales-Navarro F.A., Pereira-Almao P. Catalytic Steam Cracking of a Deasphalted Vacuum Residue Using a Ni/K Ultradispersed Catalyst. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 3121–3131.
  42. Kukushkin R.G., Eletsii P.M., Zaikina O.O., Sosnin G.A., Bulavchenko O.A., Yakovlev V.A. Studies of Steam Cracking of Heavy Oil in the Presence of Iron- and Molybdenum-Containing Disperse Catalysts in a Flow Type Reactor. *Kataliz v promyshlennosti*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 54–63. In Rus.

Received: 12 November 2018.

#### Information about the authors

**Gleb A. Sosnin**, junior researcher, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS; post-graduate student, assistant, Novosibirsk State University.

**Olesya O. Zaikina**, Cand. Sc, researcher, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS; researcher, Novosibirsk State University.

**Petr M. Eletsii**, Cand. Sc, researcher, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS.

**Vadim A. Yakovlev**, Dr. Sc, head of laboratory, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS; leading researcher, Novosibirsk State University.

УДК 519.81:621.311

## АГРЕГИРОВАНИЕ ПРЕДПОЧТЕНИЙ В ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ

Муравьев Сергей Васильевич<sup>1</sup>,  
muravyov@tpu.ru

Борисова Мария Андреевна<sup>1</sup>,  
marits@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена тем, что систематическое проведение энергетических обследований электрических сетей с целью выявления потерь электроэнергии составляет основу энергосбережения и энергоэффективности. Обработка результатов энергетических обследований представляет собой работу с большим объемом неструктурированных данных, которые плохо поддаются полному учету.

**Цель исследования:** рассмотрение возможности решения проблемы обработки результатов энергетических обследований на основе агрегирования предпочтений, что может обеспечить эффективное сжатие данных без потери информации и наглядную визуализацию результатов энергоаудита.

В качестве **объектов** исследования рассмотрены магистральные электрические сети, входящие в Единую национальную электрическую сеть России. Магистральные электрические сети, в свою очередь, состоят из предприятий магистральных электрических сетей, каждое из которых объединяет большое количество подстанций. Данные ежегодных энергетических обследований магистральных электрических сетей России содержатся в базе ПАО «ФСК ЕЭС».

**Методы.** Предложен основанный на агрегировании предпочтений метод, позволяющий представить большой объем данных инструментальных обследований потери энергии подстанциями сетей распределения электрической энергии в форме компактной интегральной оценки в порядковой шкале, удобной для принятия решений и визуализации. Обсуждается применение предложенного метода для анализа реальных данных энергетического обследования магистральных электрических сетей России.

**Результаты.** Метод позволяет выявить источники экономически неоправданных затрат энергетических ресурсов и неоправданных потерь энергии, обеспечить сжатие больших объемов данных энергообследований без потери существенной информации. Предложенный метод может стать удобным перспективным инструментом для организаций, занимающихся энергоконсалтингом.

### Ключевые слова:

Энергоаудит, потери электроэнергии, агрегирование предпочтений, отношение консенсуса, правило Кемени.

### Введение

Основной задачей проведения энергетических обследований является расчет потерь электроэнергии на электрических подстанциях. Являясь одним из распространенных видов георесурсов, электрическая энергия обладает уникальной особенностью, заключающейся в том, что ее транспортировку от мест производства до мест потребления можно осуществить за счет расхода части самой передаваемой энергии. По этой причине ее потери неизбежны. Однако важно, чтобы эти потери не превышали экономически обоснованного уровня. Под потерями подразумевается разница между отпущенной потребителям электроэнергией и фактически поступившей к ним [1].

Международные рекомендации в области энергетики требуют, чтобы в процессе передачи электроэнергии в электрических сетях потери не превышали 4 % [1], однако фактические потери магистральных электрических сетей, как правило, составляют не менее 10 %. Значимой составляющей фактических потерь является расход электрическими подстанциями энергии на собственные нужды [2].

Традиционно обработка результатов энергетических обследований представляет собой работу с большим объемом неструктурированных данных

[3], которые плохо поддаются полному учету. Примеры возникающих при этом проблем методологического и вычислительного характера можно найти в ряде работ, например, в [4–10]. В таких случаях традиционно используются методы многокритериального выбора, такие, например, как метод обобщенного показателя качества или метод анализа иерархий [11], которые реализуют сравнение анализируемых объектов на основе взвешенной суммы частных показателей. Однако эти методы страдают субъективизмом, т. к. не поддаются серьезной аксиоматизации, и могут приводить к ошибочным решениям [12, 13]. Этим недостаткам удастся избежать при применении агрегирования предпочтений [14], основанного на обработке исключительно бинарных отношений, не требующей вычисления весов, и дающего компактную интегральную оценку объектов в порядковой шкале. Применительно к энергоаудиту, агрегирование предпочтений обеспечивает возможность эффективного сжатия данных без потери информации и их наглядную визуализацию.

### Агрегирование предпочтений

Пусть задано множество  $t$  ранжирований  $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$   $n$  объектов (альтернатив) из мно-

жества  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ . Каждое ранжирование имеет вид цепочки и задает отношение предпочтения

$$\lambda_k=(a_1 \succ a_2 \dots \sim a_s \sim a_t \succ \dots \sim a_n) \quad (1)$$

на множестве  $A$ . Отношение предпочтения  $\lambda$  является объединением двух отношений: отношения строгого предпочтения  $\rho$ , т. е.  $a_i \succ a_j$ , и отношения толерантности  $\tau$ , т. е.  $a_i \sim a_j$ , т. е.

$$\Lambda=\rho \cup \tau. \quad (2)$$

Множество  $\Lambda$  ранжирований вида (2) будем называть *профилем предпочтения* для заданных  $m$  и  $n$ .

Агрегировать  $m$  предпочтений, заданных на множестве  $n$  альтернатив, означает определить единственное отношение предпочтения  $\beta$ , называемое *ранжированием консенсуса*, которое обеспечивает между ранжированиями исходного профиля наилучший компромисс. Трактовка понятия «наилучший компромисс» определяется используемым при нахождении ранжирования консенсуса *правилом* агрегирования предпочтений. В данной работе будем использовать *правило Кемени* [15, 16], состоящее в нахождении такого строгого порядка (ранжирования Кемени)  $\beta$  альтернатив, что расстояние  $D(\beta, \Lambda)$  (определенное в терминах числа парных несоответствий между ранжированиями) от  $\beta$  до ранжирований исходного профиля  $\Lambda$  минимально для всех возможных строгих порядков (перестановок) альтернатив.

Правило Кемени допускает существование неединственного ранжирования консенсуса: число  $N$  найденных по этому правилу ранжирований консенсуса может достигать значений более  $10^7$  даже для небольших  $m=4$  и  $n=15$  [17]. Для приведения множества ранжирований консенсуса  $V=\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N\}$  к единственному итоговому ранжированию консенсуса  $\beta_{fin}$  будем использовать следующее *правило свертки*:

пусть *ранг*  $r_i^k$  – это позиция альтернативы  $a_i$  в ранжировании консенсуса  $\beta_k$ ; тогда в итоговом ранжировании консенсуса  $\beta_{fin}$  альтернативы  $a_i$  располагаются в порядке возрастания сумм их рангов  $\sum_{k=1}^N r_i^k$  в ранжированиях консенсуса из  $V$ ; в итоговом ранжировании консенсуса  $\beta_{fin}$  две альтернативы  $a_i$  и  $a_j$  являются толерантными, т. е.  $a_i \sim a_j$ , если они имеют одинаковые суммы рангов в ранжированиях консенсуса из  $V$ .

Для нахождения всех возможных ранжирований консенсуса для заданного исходного профиля предпочтений будем использовать рекурсивный алгоритм собственной разработки RECURSALL, реализующий рекурсивный метод ветвей и границ [18].

При применении правила Кемени следует учитывать, что задача нахождения отношения консенсуса является  $NP$ -полной, т. е. характеризующейся экспоненциальным ростом времени решения в зависимости от размерности  $n=|A|$  задачи [18]. Заметим, что при подходящей для практиче-

ского применения размерности задачи  $n \leq 20$  алгоритм RECURSALL позволяет находить все ранжирования консенсуса за приемлемое время – порядка нескольких миллисекунд. В ситуациях, где  $n > 20$ , следует прибегать к разбиению множества  $A$  на непересекающиеся подмножества  $A_i$ , т. е.

$$A=A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_k, \quad \bigcap_{i=1}^k A_i \neq \emptyset, \quad \text{где } |A_i| \leq 20, \quad i=1, \dots, k.$$

Операция разбиения множества  $A$  приводит к декомпозиции профиля предпочтений  $\Lambda$ , тем самым преобразуя его структуру из линейной в двухуровневую, а при неоднократном повторении этой операции – в иерархическую. Ранжирования консенсуса  $\beta_i$ , найденные на множестве  $A_i$ , войдут в состав профиля вышестоящего уровня иерархии, для которого также может быть найдено ранжирование консенсуса. Процесс продолжается до достижения наивысшего уровня иерархии.

#### Обработка данных энергетических обследований агрегированием предпочтений

Правило Кемени и алгоритм RECURSALL были положены авторами в основу предлагаемого метода анализа данных энергетических обследований элементов Единой национальной электрической сети России. Для краткости будем обозначать этот метод аббревиатурой АПЭО (*агрегирование предпочтений в энергетических обследованиях*).

Единая национальная электрическая сеть России состоит из восьми *магистральных электрических сетей* (МЭС), каждая из которых обладает иерархической структурой. МЭС состоит из *предпочтительных* магистральных электрических сетей (ПМЭС), предприятие, в свою очередь, может объединять большое количество *подстанций* (ПС). Поступающая на шины подстанций электрическая энергия распределяется между конечными потребителями.

Формализованная структура национальной электрической сети приведена на рис. 1, где используются следующие обозначения:

- $M_i, i=1, \dots, I$ , – это МЭС,  $I$  – количество МЭС;
- каждая МЭС  $M_i$  состоит из ПМЭС  $E_j, j=1, \dots, J_i$ , где  $J_i$  – количество ПМЭС в  $i$ -й МЭС;
- каждое ПМЭС  $E_j$  включает в себя подстанции  $s_k, k=1, \dots, K_{ij}$ , где  $K_{ij}$  – количество подстанций  $j$ -й ПМЭС в  $i$ -й МЭС.

При анализе данных энергетических обследований роль элементов множества  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  будут выполнять подстанции  $s_k$ .

Рассмотрим теперь состав *признаков*, характеризующих потери электрической энергии, с учетом которых будут формироваться ранжирования  $\Lambda=\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$  подстанций  $s_k$ . *Структуру потерь электроэнергии* для анализа, нормирования и удобства расчета можно разделить на три категории [19]:

- технические потери, возникающие в процессе передачи электроэнергии в элементах электрической сети вследствие происходящих в них

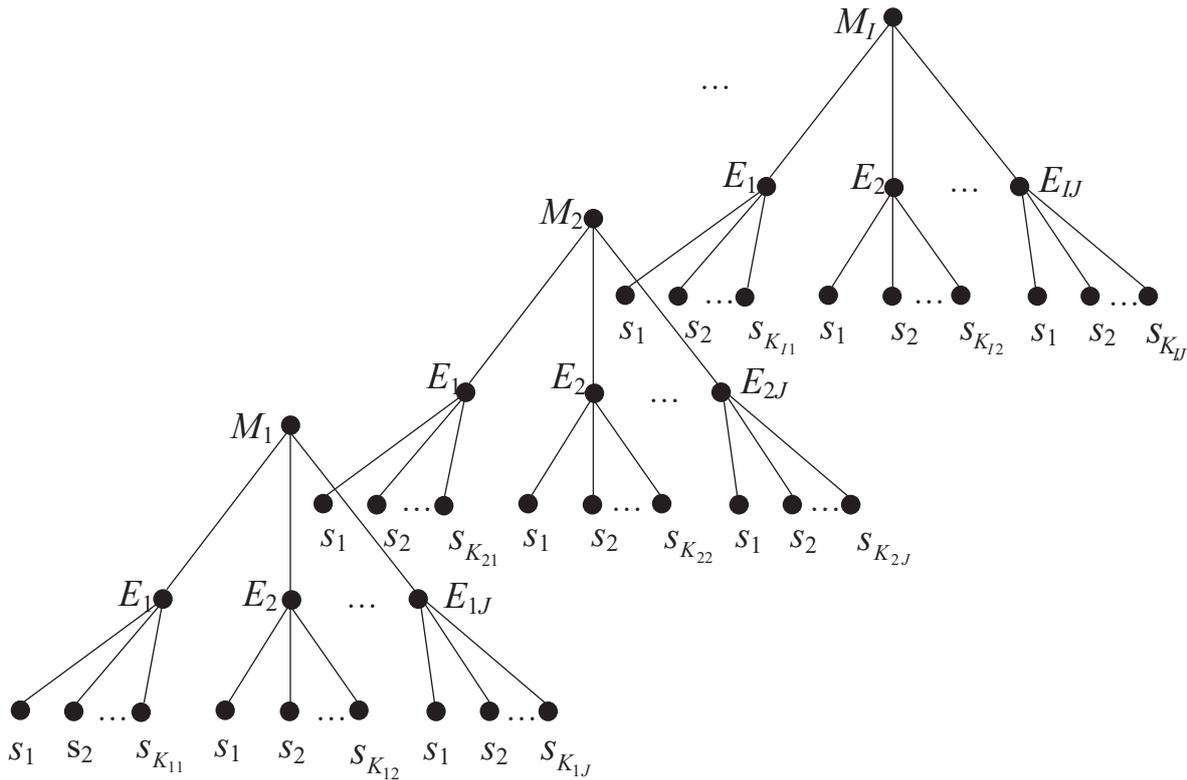


Рис. 1. Формализованная структура национальной электрической сети России

Fig. 1. Formalized structure of the Unified National Electric Network of Russia

физических процессов, состоят из потерь в распределительных линиях ( $\lambda_1$ ), потерь в силовых трансформаторах ( $\lambda_2$ ) и климатических потерь ( $\lambda_3$ );

- расход на собственные нужды подстанций – это электроэнергия, потребляемая вспомогательным оборудованием для поддержания процесса выработки, преобразования и распределения электрической энергии, а также расходующаяся для поддержания нормальных условий жизнедеятельности обслуживающего персонала подстанций; включает в себя расходы: на обогрев зданий и оборудования ( $\lambda_4$ ), на освещение ( $\lambda_5$ ), на электропитание вспомогательных устройств ( $\lambda_6$ ), на охлаждение трансформаторов ( $\lambda_7$ ), на прочие нужды ( $\lambda_8$ );
- коммерческая составляющая потерь – это потери электроэнергии, возникающие в связи с наличием погрешности при выполнении измерений, а также с другими факторами, вызывающими недоучет энергии ( $\lambda_9$ ).

Метод АПЭО предполагает выполнение приведенных ниже четырех основных этапов.

1. Формирование множества подстанций  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , структуру потерь электроэнергии которых необходимо проанализировать.
2. Построение профиля предпочтений  $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ , состоящего из  $m$  ранжирований вида (1)  $n$  подстанций  $s_k$  по каждому из признаков  $\lambda_k, k = 1, \dots, m$ , структуры потерь по следующему правилу: пара подстанций  $a_i$  и  $a_j$  будет на-

ходиться в бинарном отношении  $a_i > a_j$  или  $a_i < a_j$ , или  $a_i \sim a_j$  по признаку  $\lambda_k$ , если соответствующие пары значений потерь  $v_i$  и  $v_j$  состоят в бинарном отношении  $v_i < v_j$  или  $v_i > v_j$ , или  $v_i = v_j$  по признаку  $\lambda_k$  соответственно. Формальная запись этого правила имеет следующий вид:

$$v_i \underset{\lambda_k}{\geq} v_j \Leftrightarrow a_i \underset{\lambda_k}{\gtrsim} a_j. \quad (4)$$

3. Нахождение для профиля  $\Lambda$  ранжирований консенсуса  $V = \{\beta_1, \dots, \beta_N\}$ , представляющих собой отношения строго порядка, по правилу Кемени.
4. Определение с помощью правила свертки (3) итогового ранжирования консенсуса  $\beta_{fin}$ , которое

#### Обработка данных реальных энергетических обследований

Исходные данные о потерях электроэнергии для применения метода АПЭО были взяты из отчета по работе «Проведение аналитического этапа энергетического обследования ПАО «ФСК ЕЭС» по договору № 464525 от 07.04.2017 г. [20]. Поскольку во многих случаях число подстанций  $n$  превышало верхнюю допустимую границу, равную 20 (см. первый раздел статьи), было произведено разбиение множеств подстанций на подмножества (кластеры) по признаку их пропускной способности, т. е. количество энергии, которое поступает на шины подстанции [19].

Для демонстрации возможностей метода АПЭО будем рассматривать фрагмент Единой Национальной электрической сети России – МЭС Сибири  $M_3$ , в которой проанализируем множество подстанций Красноярского ПМЭС  $E_3 = \{s_1, s_2, \dots, s_{28}\}$ .

Следует учитывать, что подстанции множества  $E_3$  характеризуются различной пропускной способностью (т. е. количеством энергии, отпускаемой на их шины), связанной с характеристиками используемых силовых трансформаторов. Обеспечение возможности корректного сравнения потерь электроэнергии на подстанциях с различной пропускной способностью требует разбиения множества  $E_3$  на кластеры. Будем относить к одному кластеру подстанции, которые отличаются друг от друга по пропускной способности не более чем в 2,5 раза. Таким образом, множество  $E_3$  было разбито на 7 кластеров, приведенных в табл. 1, т. е.

$$\begin{aligned}
 E_3 &= \{s_1, s_2, s_3\} \cup \{s_4, s_5, s_6\} \cup \{s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}\} \cup \\
 &\cup \{s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_{15}\} \cup \{s_{16}, s_{17}, s_{18}, s_{19}, s_{20}, s_{21}\} \cup \\
 &\cup \{s_{22}, s_{23}, s_{24}, s_{25}\} \cup \{s_{26}, s_{27}, s_{28}\} = \\
 &= A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5 \cup A_6 \cup A_7 = \\
 &= \{a_1, a_2, a_3\} \cup \{a_1, a_2, a_3\} \cup \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} \cup \\
 &\cup \{a_1, a_2, a_3, a_4\} \cup \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\} \cup \\
 &\cup \{a_1, a_2, a_3, a_4\} \cup \{a_1, a_2, a_3\}.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Профили предпочтений формировались для каждого кластера  $A_1, A_2, \dots, A_7$ .

Значения  $\nu$  потерь электроэнергии по всем признакам  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_9$  для подстанций  $a$  всех кластеров сведены в табл. 2.

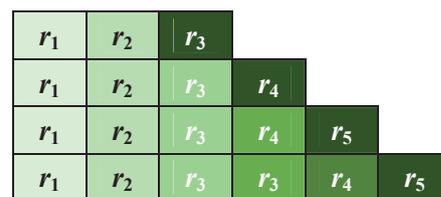
В табл. 3 представлены исходные профили предпочтений  $\Lambda$ , сформированные для семи кластеров из данных табл. 2 по правилу (4), в аналитической (символьной) и графической формах, приведенных соответственно в левой и правой частях таблицы, а также рассчитанные для этих профилей алгоритмом RECURSALL ранжирования консенсуса  $\beta_{\text{ин}}$ .

Аналитическое представление использует вертикальную форму задания ранжирований, в которой более предпочтительный элемент расположен ниже менее предпочтительного, толерантные элементы занимают одну и ту же позицию (например, элементы  $a_2$  и  $a_3$  в ранжировании  $\lambda_7$  кластера 1). К сожалению, аналитическое представление не обеспечивает достаточного уровня наглядности данных о предпочтениях.

Значительно большей наглядности можно достичь графическим представлением профилей предпочтения, если воспользоваться соответствием между определенной интенсивностью цвета и позицией  $r_i$  (рангом, см. раздел «Агрегирование предпочтений») элемента  $a_i$  в ранжировании  $\lambda_k$ . Поскольку числа элементов в профилях могут быть различными, необходимо иметь цветовую шкалу для всех вариантов значений  $n$ , обусловленных исходными анализируемыми данными. В нашем случае потребовалось иметь четыре цветовых шкалы при  $n=3, 4, 5$  и  $6$  (рис. 2). Приведенные на рис. 2 цветовые шкалы были использованы для формирования правой части табл. 3.

**Таблица 1.** Разбиение множества ПС  $E_3$  вида (5) на кластеры  
**Table 1.** Partition of the substations (S) set  $E_3$  of the form (5) into clusters

Кластер/Cluster	Пропускная способность ПС, тыс. кВт·ч Throughput of substation, 10 <sup>3</sup> kWh	Подстанция/Substation		
		Наименование/Name	$E_3$	A
1	5188,430 7334,755 12020,893	ТПК/ТРК	$s_1$	$a_1$
		Имбинская/Imbinskaya	$s_2$	$a_2$
		Рассвет/Rassvet	$s_3$	$a_3$
2	43290,338 85878,540 99228,260	Троицкая/Troitskaya	$s_4$	$a_1$
		Красная	$s_5$	$a_2$
		Сопка Бур-1/Bur-1	$s_6$	$a_3$
3	136978,540 179520,104 211623,787 295662,146 351775,435	Красноярская/Krasnoyarskaya	$s_7$	$a_1$
		Гориевский ГОК/Gorievskiy GOK	$s_8$	$a_2$
		Зеленая/Zelenaya	$s_9$	$a_3$
		Шарыповская/Sharypovskaya	$s_{10}$	$a_4$
		Кодинская ГПП/Kodinskaya GPP	$s_{11}$	$a_5$
4	483497,172 515533,162 614574,001 939575,208	Правобережная/Pravoberezhnaya	$s_{12}$	$a_1$
		Узловая/Uzlovaya	$s_{13}$	$a_2$
		Ужур/Uzhur	$s_{14}$	$a_3$
		Абалаковская/Abalakovskaya	$s_{15}$	$a_4$
5	1220315,140 1235329,424 1895453,760 1944056,319 2648691,818 2908147,770	Центр/Tsentr	$s_{16}$	$a_1$
		Заводская/Zavodskaya	$s_{17}$	$a_2$
		Раздолинская/Razdolinskaya	$s_{18}$	$a_3$
		Приангарская/Priangarskaya	$s_{19}$	$a_4$
		КИСК/KISK	$s_{20}$	$a_5$
		Новокрасноярская/Novokrasnoyarskaya	$s_{21}$	$a_6$
6	3795995,572 4408158,887 9162322,615 9929712,475	Дивногорская/Divnogorskaya	$s_{22}$	$a_1$
		Левобережная/Levoberezhnaya	$s_{23}$	$a_2$
		Октябрьская/Oktyabr'skaya	$s_{24}$	$a_3$
		Енисей/Enisey	$s_{25}$	$a_4$
7	10581581,904 12209039,553 17174478,970	Камала-1/Kamala-1	$s_{26}$	$a_1$
		Итатская/Itatskaya	$s_{27}$	$a_2$
		ЦРП-220/ZRP-220	$s_{28}$	$a_3$



**Рис. 2.** Цветовые шкалы для представления ранжирований (ранг  $r_i$  элемента  $a_i$  в ранжировании  $\lambda_k$  показан соответствующим цветом)

**Fig. 2.** Color scales for representation of rankings (rank  $r_i$  of element  $a_i$  in a ranking  $\lambda_k$  is shown by the bloom)

В табл. 4 приведены результаты вычислений ранжирований консенсуса алгоритмом RECURSALL для каждого из семи кластеров и продемонстрировано применение правила свертки (3). Как видно из табл. 4, свертку потребовалось проводить только для кластеров 4 и 5, т. к. в этих случаях количество оптимальных решений превышало единицу.

В результате анализа данных энергетического обследования множества подстанций Краснояр-

**Таблица 2.** Значения  $v$  потерь электроэнергии по 9 признакам для семи кластеров, тыс. кВт·ч

**Table 2.** Values  $v$  of electrical energy losses by nine attributes for seven clusters,  $10^3$  kWh

ПС/S	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$
<i>Кластер 1/Cluster 1</i>									
$a_1$	532,57	354,10	367,43	196,93	32,48	52,40	307,20	16,10	3,60
$a_2$	575,63	336,73	400,21	853,97	7,53	70,30	131,14	15,50	4,21
$a_3$	446,86	221,56	321,30	149,50	10,91	70,30	190,72	15,50	2,43
<i>Кластер 2/Cluster 2</i>									
$a_1$	529,34	530,18	321,60	121,20	9,06	63,13	191,70	15,50	4,32
$a_2$	500,14	489,30	382,93	228,93	36,67	70,30	172,60	7,36	2,56
$a_3$	593,91	541,17	365,40	885,05	12,45	157,40	380,31	15,50	2,39
<i>Кластер 3/Cluster 3</i>									
$a_1$	631,18	352,03	298,51	988,64	50,11	237,82	574,40	28,72	3,88
$a_2$	418,05	135,12	356,12	500,60	10,30	114,40	361,40	18,11	2,25
$a_3$	525,06	240,00	330,33	411,42	11,62	44,77	420,00	7,10	3,62
$a_4$	735,11	982,21	591,26	1028,40	4,68	157,40	384,40	47,9	3,24
$a_5$	985,43	2038,00	675,13	857,38	16,82	140,76	594,20	48,90	2,11
<i>Кластер 4/Cluster 4</i>									
$a_1$	463,21	1044,32	350,21	1329,37	214,30	132,03	532,03	15,40	5,23
$a_2$	501,47	1932,47	298,75	1175,86	44,18	126,10	480,40	15,40	7,56
$a_3$	398,21	1228,45	300,24	1115,97	41,25	135,20	384,40	13,10	3,87
$a_4$	436,97	2089,88	366,54	2305,35	127,98	95,12	384,40	15,40	2,21
<i>Кластер 5/Cluster 5</i>									
$a_1$	652,21	1112,49	365,45	920,31	86,65	114,20	496,67	42,36	5,24
$a_2$	633,54	2409,04	413,99	1045,25	12,92	70,10	521,17	15,60	6,10
$a_3$	500,98	2216,59	457,31	2369,87	198,54	158,20	404,50	48,65	5,10
$a_4$	539,10	1353,45	506,04	2987,56	203,56	158,20	408,56	145,2	5,92
$a_5$	699,32	1987,32	477,64	980,54	89,75	158,20	500,52	103,65	4,41
$a_6$	706,31	2148,45	563,21	852,14	145,63	158,20	520,96	99,32	6,57
<i>Кластер 6/Cluster 6</i>									
$a_1$	658,32	2675,18	321,65	1754,23	32,54	70,16	408,76	18,40	8,18
$a_2$	500,39	2847,32	488,33	1547,66	87,52	132,80	751,20	29,80	7,10
$a_3$	577,99	2057,39	766,21	876,31	17,87	88,20	480,10	16,40	8,90
$a_4$	602,37	2478,66	658,04	2054,65	96,32	165,56	1449,60	43,10	7,44
<i>Кластер 7/Cluster 7</i>									
$a_1$	889,65	3565,15	704,25	1785,65	375,84	125,00	2085,02	47,02	7,40
$a_2$	997,32	3067,11	766,98	2698,32	175,36	132,80	1159,80	58,07	6,13
$a_3$	947,21	2997,22	632,14	1857,32	102,35	148,20	2013,25	35,50	8,15

ского ПМЭС  $E_3$  был получен список наиболее проблемных подстанций, которые требуют особого внимания и проведения корректирующих мероприятий для снижения потерь электроэнергии. К таким подстанциям относятся ТПК, Бур-1, Кодинская ГПП, Правобережная, Новокрасноярская, Енисей, Итатская. Заметим, что эти подстанции, выделенные наиболее темным цветом в графическом представлении (табл. 3), визуально легко различимы на фоне других подстанций, характеризующихся меньшими потерями электроэнергии. Ясно, что метод АПЭО позволяет формировать списки не только наилучших подстанций, но и имеющих любые одинаковые ранги  $r$  (позиции в ранжированиях консенсуса). Таким образом, графическое представление имеет дополнительные

преимущества при использовании метода АПЭО по сравнению с аналитическим представлением с точки зрения удобства интерпретации данных энергообследований и последующего принятия решений.

#### Заключение

Предложен основанный на агрегировании предпочтений метод анализа и визуализации данных энергетических обследований магистральных электрических сетей. Метод позволяет формализовать и решить проблему выявления источников экономически неоправданных затрат энергетических ресурсов и неоправданных потерь энергии, а также обеспечить сжатие больших объемов данных энергообследований без потери существенной информации.

**Таблица 3.** Результаты обработки данных энергетических обследований Красноярского ПМЭС и их визуализация

**Table 3.** Results of processing the energy audit data of Krasnoyarsk EBEG and their visualization

Аналитическое представление профиля Л Analytical representation of profile L											Графическое представление профиля L Graphical representation of profile L										
$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\beta_{fin}$	A	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\beta_{fin}$	
<b>Кластер 1/Cluster 1</b>																					
$a_3$	$a_3$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_3$	$a_1$											$a_3$
$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_1$	$a_3$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_2$											$a_2$
$a_1$	$a_1$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_3$											$a_1$
<b>Кластер 2/Cluster 2</b>																					
$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_1$											$a_2$
$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_2$											$a_1$
$a_3$	$a_3$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_3$	$a_3$											$a_3$
<b>Кластер 3/Cluster 3</b>																					
$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_3$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_3$	$a_5$	$a_2$	$a_1$											$a_2$
$a_3$	$a_3$	$a_3$	$a_2$	$a_2$	$a_4$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_2$											$a_3$
$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_5$	$a_3$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_4$	$a_1$	$a_3$											$a_1$
$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_1$	$a_5$	$a_4$	$a_1$	$a_4$	$a_3$	$a_4$	$a_1$											$a_4$
$a_5$	$a_5$	$a_5$	$a_4$	$a_1$	$a_5$	$a_5$	$a_1$	$a_5$	$a_5$	$a_5$											$a_5$
<b>Кластер 4/Cluster 4</b>																					
$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_3$	$a_3$	$a_4$	$a_3$	$a_1$	$a_1$											$a_3$
$a_4$	$a_3$	$a_3$	$a_2$	$a_2$	$a_4$	$a_1$	$a_3$	$a_2$	$a_2$	$a_2$											$a_2$
$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_1$	$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_4$	$a_3$											$a_4$
$a_2$	$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_3$	$a_1$	$a_4$	$a_2$	$a_1$	$a_4$											$a_1$
<b>Кластер 5/Cluster 5</b>																					
$a_3$	$a_1$	$a_1$	$a_6$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_5$	$a_1$	$a_1$											$a_1$
$a_4$	$a_4$	$a_2$	$a_1$	$a_1$	$a_4$	$a_1$	$a_3$	$a_2$	$a_2$	$a_2$											$a_2$
$a_2$	$a_5$	$a_3$	$a_5$	$a_3$	$a_1$	$a_3$	$a_1$	$a_3$	$a_3$	$a_3$											$a_3$
$a_1$	$a_6$	$a_5$	$a_2$	$a_6$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_4$	$a_5$	$a_4$											$a_5$
$a_5$	$a_3$	$a_4$	$a_3$	$a_3$	$a_6$	$a_5$	$a_2$	$a_4$	$a_5$	$a_5$											$a_4$
$a_6$	$a_2$	$a_6$	$a_4$	$a_4$	$a_6$	$a_2$	$a_4$	$a_6$	$a_6$	$a_6$											$a_6$
<b>Кластер 6/Cluster 6</b>																					
$a_2$	$a_3$	$a_1$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_1$	$a_3$	$a_2$	$a_3$	$a_1$											$a_3$
$a_3$	$a_4$	$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_4$	$a_1$	$a_2$											$a_1$
$a_4$	$a_1$	$a_4$	$a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_2$	$a_3$											$a_2$
$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_3$	$a_4$	$a_4$											$a_4$
<b>Кластер 7/Cluster 7</b>																					
$a_1$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_3$	$a_1$											$a_3$
$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_3$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_1$	$a_1$	$a_1$	$a_2$											$a_1$
$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_3$											$a_2$

**Таблица 4.** Результаты вычислений ранжирований консенсуса алгоритмом RECURSALL для семи кластеров.

**Table 4.** Computing results of consensus rankings by the algorithm RECURSALL for seven clusters

Кластер Cluster	Множество B ранжирований консенсуса Set B of consensus rankings	Итоговое ранжирование консенсуса $\beta_{fin}$ Final ranking of consensus $\beta_{fin}$
1	$a_3 > a_2 > a_1$	$a_3 > a_2 > a_1$
2	$a_2 > a_1 > a_3$	$a_2 > a_1 > a_3$
3	$a_2 > a_3 > a_1 > a_4 > a_5$	$a_2 > a_3 > a_1 > a_4 > a_5$
4	$a_3 > a_2 > a_4 > a_1$ $a_3 > a_4 > a_2 > a_1$	$a_3 > a_2 > a_4 > a_1$
5	$a_1 > a_2 > a_3 > a_5 > a_4 > a_6$ $a_1 > a_2 > a_5 > a_3 > a_4 > a_6$	$a_1 > a_2 > a_3 > a_5 > a_4 > a_6$
6	$a_3 > a_1 > a_2 > a_4$	$a_3 > a_1 > a_2 > a_4$
7	$a_3 > a_1 > a_2$	$a_3 > a_1 > a_2$

Потери электрической энергии неизбежно возникают в процессе энергоснабжения потребителей, а их объем определяет эффективность работы энергосетей и в значительной мере оказывает влияние на тарифы. Учитывая постоянно возрастающую стоимость энергоресурсов, анализ потерь электроэнергетики и их минимизация представляют собой одну из насущных задач как для ресурсоснабжающих организаций, так и для их потребителей. Описанный в статье подход может стать удобным перспективным инструментом анализа и выявления источников нерациональных потерь электроэнергии для ресурсоснабжающих организаций, их потребителей и организаций, занимающихся энергоаудитом и энергоконсалтингом.

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 18-19-00203, в части разработки метода агрегирования предпочтений, и Министерством образования и науки РФ, базовая часть госзадания «Наука», проект № 2.5760.2017/8.9 в части анализа данных реальных энергообследований.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. EU Energy Efficiency Directive (2012/27/EU) Guidebook for Strong Implementation, 2013. The Coalition for Energy Savings, Brussels, Belgium. URL: <http://eedguidebook.energycoalition.eu/images/PDF/EED.pdf> (дата обращения: 01.05.2018).
2. Energy Technology Perspectives 2017. International Energy Agency. URL: [http://www.iea.org/media/translations/eer\\_ru.pdf](http://www.iea.org/media/translations/eer_ru.pdf) (дата обращения: 25.04.2018).
3. Eupuroglu C., Aydi M.A. Energy efficiency in backbone networks // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2015. – V. 195. – P. 1966–1970.
4. Sait H.H. Energy Conversion and Management Auditing and analysis of energy consumption of an educational building in hot and

- humid area // Energy Conversion and Management. – 2013. – V. 66. – P. 143–152.
5. Energy audit model based on a performance evaluation system / R.P. Zanardo, J.C.M. Siluk, F. de Souza Savian, P.S. Schneider // Energy. – 2018. – V. 154. – P. 544–552.
6. Solution for detection non-technical losses in electricity grid: a review / J.L. Viegas, P.R. Esteves, R. Melicio, V.M.F. Mendes, S.M. Vieira // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 80. – P. 1256–1258.
7. Shayesteh E., Gayme D.F., Amelin M. System reduction techniques for storage allocation in large power system // International Journal of Electrical Power and Energy System. – 2018. – V. 95. – P. 108–117.

8. Constructing core backbone network based on survivability of power grid / F. Dong, D. Liu, J. Wu, L. Ke, Ch. Song, H. Wang, Z. Zhu // *Journal of Electrical Power and Energy System*. – 2016. – V. 67. – P. 161–167.
9. Thang L., Dong X. A travelling wave differential protection scheme for half-wavelength transmission line // *International Journal of Electrical Power and Energy System*. – 2018. – V. 99. – P. 376–384.
10. Hess D., Wetzel D., Cao K.-K. Representing node-internal transmission and distribution grids in energy system models // *Renewable Energy*. – 2015. – V. 119. – P. 874–890.
11. Saaty T.L., Vargas L.G. *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. – New York: Springer Science & Business Media, 2013. – 363 p.
12. Подиновский В.В., Подиновская О.В. О некорректности метода анализа иерархий // *Математические проблемы управления*. – 2011. – № 1. – С. 8–13.
13. Вентцель Е.С. *Исследование операций: задачи, принципы, методология*. – М.: КНОРУС, 2013. – 192 с.
14. Methods of rating competitors for quality awards: tentative comparative analysis / V. Artemenko, P. Martyusheva, S.V. Muravyov, N. Znamenschikova // *Proc. of the 10<sup>th</sup> IMEKO TC7 International Symposium on Advances of Measurement Science*. – Saint-Petersburg, Russia, June 30 – July 2, 2004. – V. 2. – P. 491–496.
15. Kemeny J.G., Snell J.L. *Mathematical models in the social sciences*. – Cambridge: MIT Press, 1972. – 145 p.
16. Muravyov S.V. Rankings as ordinal scale measurement results // *Metrology and Measurement Systems*. – 2007. – V. 13. – P. 9–24.
17. Muravyov S.V. Dealing with chaotic results of Kemeny ranking determination // *Measurement*. – 2014. – V. 51. – P. 328–334.
18. Muravyov S.V. Ordinal measurement, preference aggregation and interlaboratory comparisons // *Measurement*. – 2013. – V. 46. – P. 2927–2935.
19. Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л. *Справочник по проектированию электрических сетей*. – М.: ЭНАС, 2012. – 370 с.
20. Федеральная Сетевая компания Единой энергетической системы. URL: <http://www.fsk-ees.ru/eng> (дата обращения 05.05.2018).

*Поступила 24.10.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Муравьев С.В.**, доктор технических наук, профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Борисова М.А.**, ассистент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 519.81:621.311

## PREFERENCE AGGREGATION IN INTERPRETATION OF ENERGY SURVEY DATA

Sergey V. Muravyov<sup>1</sup>,  
muravyov@tpu.ru

Mariya A. Borisova<sup>1</sup>,  
marits@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the fact that systematic energy surveys of power networks to identify possible energy loss is the basis for energy saving and energy efficiency. Energy survey data processing is a work with large volume of unstructured data that is difficult to fully account.

**The main aim** of the paper is to solve the problem of energy survey data processing on the base of preference aggregation approach, which will enable efficient data compression preventing the loss of useful information and provide clear visualization of energy audit results.

The Backbone Electric Grids (BEGs), being a part of the Unified National Electric Network of Russia are considered as the object of the research. The Backbone Electric Grids, in their turn, consist of the Enterprises of Backbone Electric Grids, each of which may unite a large number of substations. Annual energy survey data of Russian Backbone Electric Grids are included in the database of the Federal Grid Company of Unified Energy System.

**Methods.** The authors propose the method, based on the preference aggregation, which allow obtaining and representing a great amount of data of instrumental survey of substation energy losses in a form of a compact integral estimate in the ordinal scale convenient for rapid decision making and visualization. Application of the proposed method to processing energy survey data of real backbone electric grids of Russia is discussed in the paper.

**Results.** The method makes it possible to identify sources of economically inefficient expenditure of energy resources and unjustified energy losses, and also to provide compression of large volumes of energy survey data without diminution of essential information. The proposed method can be an appropriate and promising tool for organizations engaged in energy consulting.

**Key words:**

Energy audit, losses of electrical energy, preferences aggregation, consensus ranking, Kemeny rule.

The research was supported by the Russian science fund, project no. 18–19–00203, in development of the preference aggregation method, and by the Ministry of Education and science of the RF, the basic part of the state task «Nauka», project no. 2.5760.2017/8.9 in analyzing the data of real energy survey.

## REFERENCES

1. EU Energy Efficiency Directive (2012/27/EU) Guidebook for Strong Implementation, 2013. The Coalition for Energy Savings, Brussels, Belgium. Available at: <http://eedguidebook.energycoalition.eu/images/PDF/EED.pdf> (accessed 1 May 2018).
2. Energy Technology Perspectives 2017. International Energy Agency. Available at: [http://www.iea.org/media/translations/eer\\_ru.pdf](http://www.iea.org/media/translations/eer_ru.pdf) (accessed 25 April 2018).
3. Eyupoglu C., Aydi M.A. Energy Efficiency in Backbone Networks. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2015, vol. 195, pp. 1966–1970.
4. Sait H.H. Energy Conversion and Management Auditing and analysis of energy consumption of an educational building in hot and humid area. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 66, pp. 143–152.
5. Zanardo R.P., Siluk J.C.M., de Souza Savian F., Schneider P.S. Energy audit model based on a performance evaluation system. *Energy*, 2018, vol. 154, pp. 544–552.
6. Viegas J.L., Esteves P.R., Melicio R., Mendes V.M.F., Vieira S.M. Solution for detection non-technical losses in electricity grid: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 80, pp. 1256–1258.
7. Shayesteh E., Gayme D.F., Amelin M. System reduction techniques for storage allocation in large power system. *International Journal of Electrical Power and Energy System*, 2018, vol. 95, pp. 108–117.
8. Dong F., Liu D., Wu J., Ke L., Song Ch., Wang H., Zhu Z. Constructing core backbone network based on survivability of power grid. *Journal of Electrical Power and Energy System*, 2016, vol. 67, pp. 161–167.
9. Thang L., Dong X. A travelling wave differential protection scheme for half-wavelength transmission line. *International Journal of Electrical Power and Energy System*, 2018, vol. 99, pp. 376–384.
10. Hess D., Wetzel D., Cao K.-K. Representing node-internal transmission and distribution grids in energy system models. *Renewable Energy*, 2015, vol. 119, pp. 874–890.
11. Saaty T.L., Vargas L.G. *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. New York, Springer Science & Business Media, 2013. 363 p.
12. Podinovskiy V.V., Podinovskaya O.V. On incorrectness of the analytic hierarchy process. *Mathematical control problems*, 2011, no. 1, pp. 8–13. In Rus.
13. Venttsel E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: problems, principles, methodology]. Moscow, KNORUS Publ., 2013. 192 p.
14. Artemenko V., Martuyusheva P., Muravyov S.V., Znamenshikova N. Methods of rating competitors for quality awards: tentative comparative analysis. *Proc. of the 10<sup>th</sup> IMEKO TC7 International Symposium on Advances of Measurement Science*. Saint-Petersburg, Russia, June 30 – July 2, 2004. Vol. 2, pp. 491–496.

15. Kemeny J.G., Snell J.L. *Mathematical Models in the Social Sciences*. Cambridge, MIT Press, 1972. 145 p.
16. Muravyov S.V. Rankings as ordinal scale measurement results. *Metrology and Measurement Systems*, 2007, vol. 13, pp. 9–24.
17. Muravyov S.V. Dealing with chaotic results of Kemeny ranking determination. *Measurement*, 2014, vol. 51, pp. 328–334.
18. Muravyov S.V. Ordinal measurement, preference aggregation and interlaboratory comparisons. *Measurement*, 2013, vol. 46, pp. 2927–2935.
19. Karapetyan I.G., Faibisovich D.L. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey* [Reference book for design of electrical networks]. Moscow, ENAS Publ., 2012. 370 p.
20. *Federalnaya Setevaya kompaniya Edinoy energeticheskoy sistemy* [Federal Grid Company of Unified Energy System]. Available at: <http://www.fsk-ees.ru/eng> (accessed 5 May 2018).

*Received: 24 October 2018.*

#### **Information about the authors**

**Sergey V. Muravyov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Mariya A. Borisova**, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК550.3, 550.31, 550.46

## ГАЗОГИДРАТЫ АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО СЕКТОРА ЮЖНОГО КАСПИЯ: ТЕРМОДИНАМИКА, СЕЙСМОАКУСТИКА И ГАЗОПРОЯВЛЕНИЯ

Полетаев Александр Владимирович<sup>1</sup>,  
avo1@mail.ru

Полетаева Елена Владимировна<sup>1</sup>,  
yelenapv@mail.ru

<sup>1</sup> Национальная Академия Наук Азербайджана,  
Азербайджан, AZ1000, г. Баку, ул. Ф. Амирова, 9.

**Актуальность.** Геологическое строение и батиметрия морского дна глубоководной части Каспийского моря указывают на возможность образования значительных объемов газогидратов. Анализ опубликованных и неопубликованных материалов по газогидратам Каспийского моря показал, что в основном все работы базируются лишь на изучении скопления газогидратов Элм, Боздаг, площади Абшерон, а также термодинамических факторах региона (без учета реальных значений температуры и давления) с целью определения возможной зоны их скопления.

**Цель** исследования заключается в подсчете объема углеводородных газов газогидратов по термодинамическим данным, а также в изучении и прогнозировании их поступления в верхнюю часть разреза.

**Объектом** исследования являются отложения верхней части разреза. Несмотря на большой фактический материал, имеющийся в различных организациях, верхняя часть разреза в связи с оценкой газоносности является наименее изученной и описанной в литературе зоной. Это связано с тем, что основной интервал исследований в Южном Каспии сосредоточен в участках с высоким потенциалом нефти и газа. Этим интервалом является продуктивная толща и подстилающие отложения, вошедшие в зону интенсивной генерации нефти и газа. Более молодые отложения, накопившиеся до абшеронского региона, в подавляющем случае состоящие из глинистых осадков, не представляли интереса. Во многих работах эта зона описывается как нерасчлененная толща четвертичных отложений.

**Методы** исследования основаны на моделировании термодинамического равновесия углеводородных газов с целью установления зоны формирования газогидратов. В работе использованы данные температур и давления, замеренные в скважинах Южного Каспия, а также данные 160 сейсмоакустических профилей, разрезы интервальных скоростей и данные по нефтегазопроявлениям в пределах шельфовой зоны Южного Каспия.

В результате исследования термодинамического равновесия рассчитаны объемы зон газогидратов. Исходя из расчетов установлено, что суммарные объемы газа для изучаемой площади отложений составляют  $1,15 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup> газа. В результате интерпретации сейсмоакустических данных установлено, что интенсивность проявлений газа изменяется как по площади, так и с глубиной. В зонах, прилегающих к глубоководной части Южного Каспия, присутствие аномалий, характерных для газовых зон, увеличивается по сравнению с прибортовыми зонами. В результате анализа данных по газопроявлениям можно прийти к выводу, что верхняя часть разреза Южного Каспия сильно обогащена газом, причем интенсивность газопроявлений в нижней части наиболее высокая. Нефтепроявления на структурах Хали, Чилев адасы, Палчыг Пильпиля, Чираг указывают на то, что эти структуры более благоприятны для поисков нефтяных залежей. Пластовая вода зафиксирована в широком интервале глубин. Полученные выводы дают основание прогнозировать поступление значительных объемов флюидов в верхнюю часть разреза глубоководной части Южного Каспия.

### Ключевые слова:

Газогидраты, сейсмоакустические профили, оценка, газ, Южный Каспий, нефтегазовые месторождения.

### Введение

Теоретические основы формирования газогидратов опубликованы в статьях и монографиях разных авторов [1–3 и др.], а использование этих основ и результатов приведено в публикациях [4–24]. Газогидраты – твердые кристаллические вещества, так называемые газовые клатраты. Кристаллическая решетка клатратов построена из молекул воды, во внутренних полостях которых размещены молекулы газа, образующего гидрат. Известны три основные структуры газогидратов: I, II и H [1, 3]. Процессы образования газовых гидратов начинаются с формирования центров кристаллизации на поверхности раздела газ–вода. Это может быть свободная плоская поверхность, поверхность микропузырька газа в объеме воды, поверхности капли и пленки воды сконденсировавшихся в объеме газа. Наиболее распространены массивные кристаллы газовых гидратов. Они формируются

путем последовательной сорбции молекул газа и воды на растущей поверхности кристалла [25]. Морфологически выделено четыре основных вида газогидратов: мелковкрапленные, узловатые, слоистые, массивные. В петрографическом смысле в качестве породообразующего компонента газогидраты подразделяются на три типа: 1) гидрат – минеральная порода; 2) гидрат – главный породообразующий компонент (минерал); 3) гидрат акцессорный [26].

В результате расхождения в значениях физических параметров, необходимых для образования газогидратов из отдельных компонентов газа, происходит фракционирование состава многокомпонентных природных газов как в гидратах, так и в остаточном свободном газе в зоне возможного гидратообразования. [27]. Начало процесса образования газовых гидратов определяется составом газа, состоянием воды, внешним давлением и темпера-

турой. Зависимость между давлением и температурой образования гидратов обычно изображается диаграммой гетерогенного состояния в координатах давления и температуры (РТ) [2, 3, 28, 29]. Впервые диаграмма гетерогенного равновесия была построена Г. Розебумом для гидрата хлора [1]. Ряд исследователей использовали эту диаграмму для описания зависимости равновесных условий образования гидратов газов в области умеренных давлений [2, 3, 30]. В дальнейшем, по мере развития исследований, появились более уточненные диаграммы, теоретические выкладки и т. д. В настоящее время существует несколько методов определения давления и температуры начала гидратообразования: а) графический; б) аналитический; в) графоаналитический; г) экспериментальный [4]. Для получения ориентировочных данных при определении условий начала образования гидратов используется графический метод. Рассмотрим основные виды диаграмм РТ равновесия, изучим температуру и давление, необходимые для формирования газогидратов для разных компонентов, используемые

разными авторами при изучении газогидратосодержащих регионов. Авторы [31] обобщили данные и провели статистические исследования химического и изотопного состава газов в 26 газогидратосодержащих областях из 21 географического региона. В результате установлено, что метан является самым распространенным компонентом, причем углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) и сумма тяжелых углеводородов ( $\text{C}_{2+}$ ) в газогидрате по частоте представлены в меньших объемах [31]. В связи с этим подробно рассмотрим формирование газогидратов в системе РТ для метана. В [32] приведены равновесные параметры для индивидуальных газов, при этом экспериментальные данные разных авторов были сглажены, проинтерполированы и приведены к стандартным значениям температур: 263,15 ( $-10^\circ\text{C}$ ); 268,15 ( $-5^\circ\text{C}$ ); 273,15 ( $0^\circ\text{C}$ ); 278,15 ( $5^\circ\text{C}$ ); 283,15 ( $10^\circ\text{C}$ ) К. В графической форме условия разложения газогидратов приведены для двух-, трехфазных равновесий. Для отдельных, наиболее распространенных, компонентов метана, этана, пропана используются равновесные кривые [32].

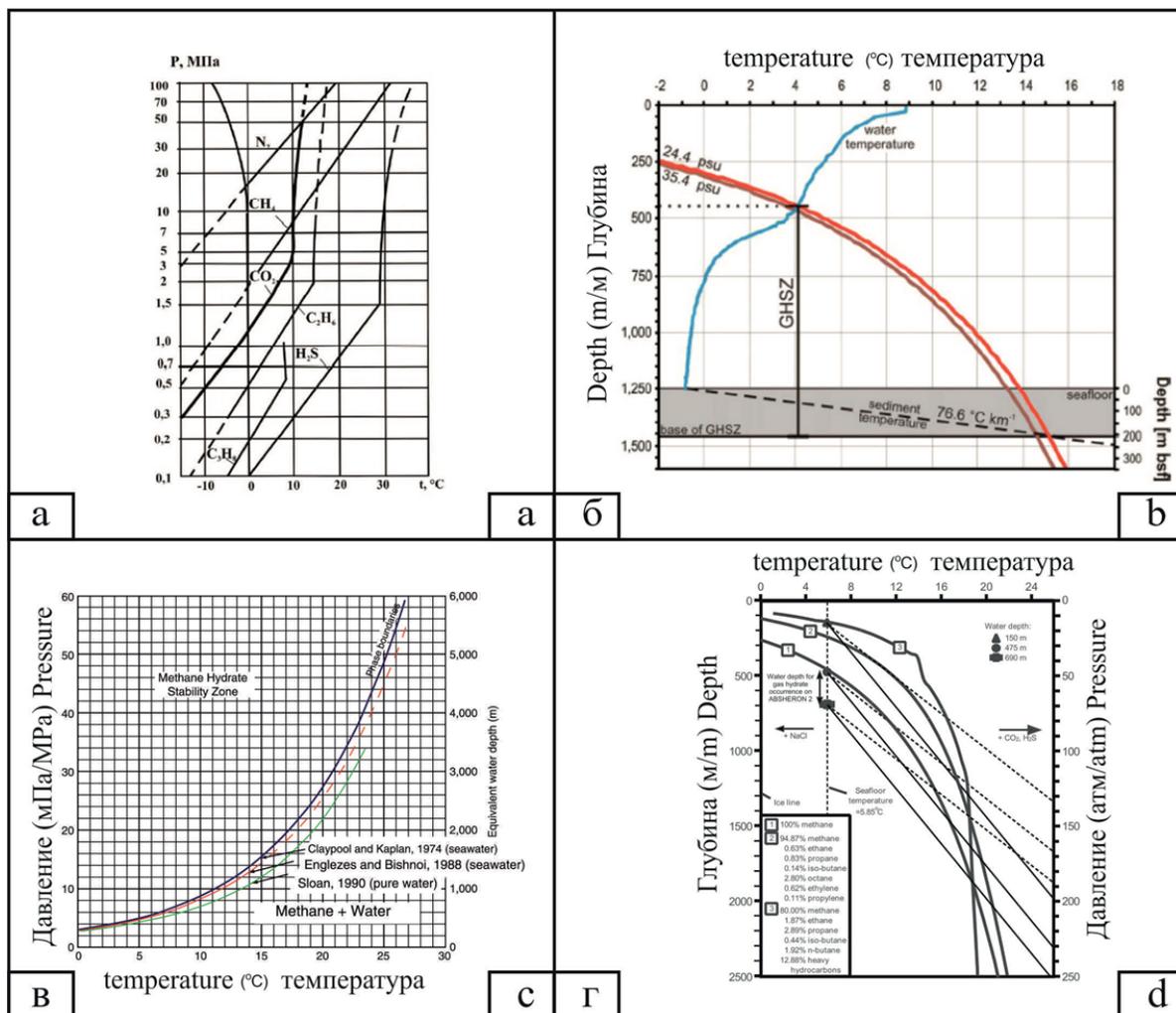


Рис. 1. Диаграммы гетерогенного состояния индивидуальных газов (а, б, в, г) в координатах давления и температуры

Fig. 1. Diagrams of the heterogeneous state of individual gases in the coordinates of pressure and temperature (a, b, c, d)

В работе [33] приведена диаграмма РТ равновесия, разработанная (Н. Katzet et al.) в 1959 г. и дополненная (К. Kvenvolden, М. Mc Menamin) в 1980 г. В ней приведена фазовая граница, располагающаяся в интервале глубин от 180 до 1600 м, охватывающая интервал температур от  $-20$  до  $+17$  °С. Для изучаемой области авторы нанесли на диаграмму кривые геотермического градиента.

Подробный обзор диаграмм приведен в монографиях [1, 4]. В работе представлена диаграмма (рис. 1, а), разработанная для многокомпонентных фазовых сред. На диаграмме приведены кривые для метана, этана, пропана, бутана и изобутана, которые соответствуют интервалу температур от  $-5,5$  до  $+29,85$  °С в интервале давлений от 0,1 до 80 мПа. Причем максимальная температура формирования газогидрата для метана составляет  $29,85$  °С при 80 мПа, для этана  $-14,85$  °С в интервале давлений от 2 до 8 мПа, а для пропана и изобутана максимальная температура составляет менее  $4,85$  °С.

В работе [34] приведена зависимость температуры и глубины для метана. Авторы указывают на то, что граница BSR может отмечаться на глубине 250 м. По расчетным данным установлено, что формирование газогидратов может происходить в интервале глубин от 200 до 7000 м и охватывать температуры от  $-5$  до  $+29$  °С. Автор также указывает, что ниже и выше границы BSR наблюдается зона со свободным газом, причем в верхней части разреза концентрация газа биогенного формирования намного меньше, чем под зоной BSR.

В [35] приведены данные термодинамической стабильности формирования газогидратов (рис. 1, б). Авторы приводят границу газогидратов в интервале температур от 0 до  $12$  °С на глубинах от 200 до 1100 м. Кроме зон возможного скопления газогидратов на этой диаграмме указаны зоны свободного газа.

Кривая устойчивости для газогидратов [36], которая представляет собой соотношение Слоана, построена при наличии метана  $-97,4$  % и сероводорода  $-2,6$  % в газовой фазе и скорректирована по солености морской воды ( $Cl=555$  моль). На диаграмме зона газогидратов располагается в интервале температур от 0 до  $12$  °С и соответствует интервалу глубин от 0 до 1100 м.

В монографии [28] приведена оценочная кривая фазового равновесия (К. Kvenvolden, 1998). Кривая располагается на глубинах от 150 до 5000 м и соответствует интервалу температур от  $-10$  до  $32$  °С, причем граница температуры воды соответствует интервалу от  $-2$  до  $0$  °С. Кривые Claupool and Kaplan (1974) рассчитаны (рис. 1, в) в интервале давлений от 0 до 60 мПа, что соответствует 0–690 бар (69 мПа), и располагаются в интервале температур 0 до  $27$  °С. Кривые других авторов [28] колеблются приблизительно в тех же пределах, что и кривые Claupool and Kaplan (1974). Однако кривая Claupool and Kaplan (1974) рассчитана при солености воды  $3,5$  ‰.

В работе [29] приведена диаграмма стабильной зоны газогидратов для Северо-восточной части Аляски. На этой диаграмме приведена кривая для метана, которая соответствует интервалу температур от  $-5$  до  $+22$  °С и диапазону глубин от 250 до 1400 м. На глубине 1800 м указана зона многолетней мерзлоты. Указанные кривые термодинамического равновесия составлены для метана. Однако существуют также кривые, построенные для этана, пропана, бутана и изобутана, сероводорода и других газов. Для каждой кривой имеются графики, которым соответствует индивидуальная температура. Максимальная температура установлена для сероводорода и составляет  $26,85$  °С. Созданы и другие графики стабильности газогидратов [30], согласно которым температура колеблется 12 до  $18$  °С в интервале глубин до 600 м.

Для территории Азербайджана авторы используют кривые разных авторов [1–3, 30]. Так, в работе [30] приведена РТ диаграмма, охватывающая интервалы температур от  $-10$  до  $+30$  °С, в интервале давлений от 0 до 6 мПа. Учитывая геотермические данные и равновесные параметры гидратообразования, полученные по результатам измерений в герметичных контейнерах, автор [30] предполагает, что гидратоносная зона находится в пределах первых десятков метров ниже уровня морского дна. По сравнению с Буздагом на вулкане Элм эта зона несколько больше, так как здесь глубина моря превышает таковую почти на 200 м.

В работе [37] приведена диаграмма термодинамического равновесия (рис. 1, г). На этой диаграмме в интервале глубин 0 до 2500 м в диапазоне температур от 0 до  $20$  °С устанавливается кривая по метану. Авторы статьи [37] из различных уравнений, разработанных для газогидрата, использовали исследование трехфазного равновесия [3, 38].

Другим важным фактором при формировании газогидратов является поступление в зону гидратообразования значительного количества газа. В связи с этим основной целью данной части работы является определение, уточнение и детализация основных источников газа, имеющих в верхней части разреза шельфовой зоны, с использованием геофизического материала и данных по газонефтепроявлениям. С целью изучения зон газогидратов и прогнозирования нефтегазоносности четвертичных отложений глубоководной части азербайджанского сектора Южного Каспия появилась необходимость в обобщении существующих данных по сопредельным зонам бакинского и абшеронского нефтегазоносных районов, что позволило бы более обоснованно подойти к исследованиям неразбуренной глубоководной части Южного Каспия. Акустические исследования в пределах Южного Каспия начали проводиться с 1956 г. С того времени опубликовано небольшое количество статей на эту тему [39, 40 и др.]. Несмотря на большой фактический материал, имеющийся в различных организациях, верхняя часть разреза в связи с оценкой газоносности является наименее

изученной и описанной в литературе зоной. Это связано с тем, что основной интервал исследований в Южном Каспии сосредоточен в участках с высоким потенциалом нефти и газа [41, 42]. Этим интервалом является продуктивная толща и подстилающие отложения, вошедшие в зону интенсивной генерации нефти и газа. Более молодые отложения, накопившиеся до абшеронского региона, в подавляющем случае состоящие из глинистых осадков, не представляли интереса. Во многих работах эта зона описывается как нерасчлененная толща четвертичных отложений [43].

#### Методика и фактический материал

В работе использованы данные температур [44], замеренные в скважинах Южного Каспия. При выполнении исследований проведены работы по сортировке температур и давлений изучаемой территории. Сортировка данных производилась с целью установления глубины залегания отложений с температурой 24 °С, а также для изучения диапазона изменения давлений в верхней части разреза (ВЧР). Полученный объем данных (рис. 2, 3) позволил проанализировать общую тенденцию изменения температуры по площади.

Для изучения возможных интервалов температур формирования скоплений газогидратов в пределах Азербайджанского сектора Южного Каспия использована методика [2]. Метод является универсальным для определения формирования газогидратов и дает возможность рассчитать температуру формирования газогидрата, образованного для различных типов гидратов. Методические основы моделирования процессов гидратообразова-

ния реализованы в программном комплексе «Gashydrate plus».

В общей сложности использовано 160 сейсмоакустических профилей, а по разным площадям – от 3 до 8 профилей (табл. 1, рис. 4). Для изучения наличия и поступления газа в верхнюю часть разреза произведена интерпретация сейсмоакустических данных по методике [28, 45].

Газонефтепроявления изучены по скважинным данным 21 месторождения (рис. 4, 9). Построены сводные колонки нефтегазопроявлений для указанных месторождений Южного Каспия. Следует отметить, что номера колонок на рис. 6 соответствуют номерам на карте (рис. 1).

#### Результаты исследований по термодинамическим данным

На рис. 2 пунктирными линиями указаны данные распределения температур, которые восстановлены из анализа и сопоставления геологических структур и теплового поля в пределах изучаемых зон, а также подтверждены расчетными данными. Сплошными линиями показаны результаты интерполяции фактических данных. Анализ карты указывает, что температура в 24 °С в пределах Южного Каспия отмечается в интервале глубин от 280 до 480 м. Таким образом, анализ распределения температур в пределах Южного Каспия указывает, что максимальная глубина формирования газогидратов по метану может соответствовать глубине 480 м. Пластовое давление изучено на площадях Пираллахи, Нефть Дашлары, Гюнешли, Чираг, Азери. На площади Пираллахи на глубине 417 м в скважине 72 пластовое давление составля-

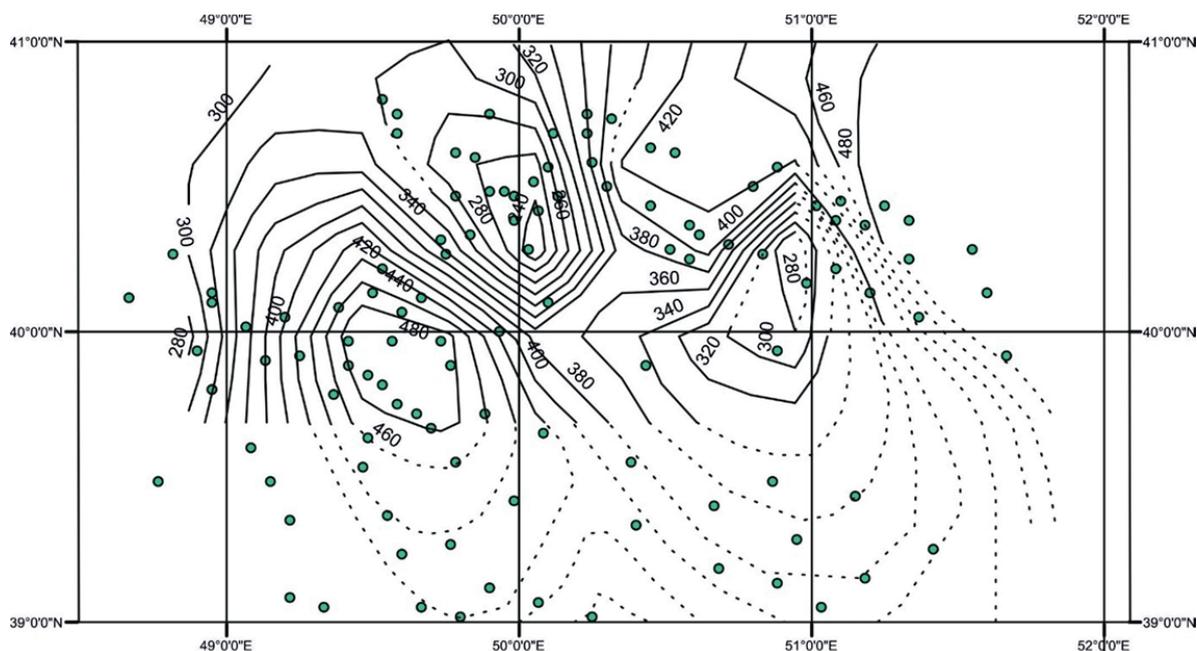


Рис. 2. Карта изменения глубины при фиксированной температуре 24 градуса

Fig. 2. Depth change map at fixed temperature of 24 degrees

ет 22 мПа (217,111 атм), а на 560 м – 38 мПа (375,011 атм). В скважине 355 на глубине 416 м пластовое давление составляет 10 мПа (98,687 атм), а в скважине 456 пластовое давление равно 18 мПа (177,637 атм). Подобное изменение пластового давления наблюдается и по другим месторождениям и площадям. Анализ пластовых давлений по площади ВЧР указывает на колебание значений от 0,3 мПа (2,96061 атм) до 38 мПа (375,011 атм).

**Таблица 1.** Объем сейсмоакустического материала  
**Table 1.** Volume of seismoacoustic material

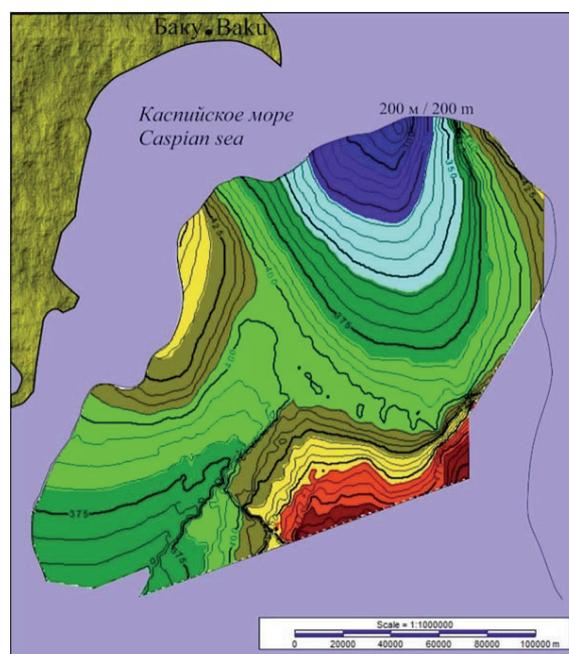
Месторождение Field	Кол-во профилей Number of profiles	Месторождение Field	Кол-во профилей Number of profiles
Пираллахи/Pirallakhi	4	Сабаил/Sabail	5
Гум-дениз/Gum-deniz	9	Бяндован-дениз Byandovan-deniz	2
Хали/Khali	5	Инам/Inam	6
Нефт Дашлары Neft-Dashlary	10	Абшеронбанкасы Absheronbankasy	3
Гюнешли/Gyunesli	4	Арзу/Arzu	4
Чираг/Chirag	28	Дан улдузу/Dan ulduzu	3
Кяпаз/Kyapaz	6	Айпара/Ауара Aypara/Auara	3
Бахар/Bakhar	6	Ашрафи/Ashrafi	4
Шах-дениз Shakh-deniz	18	Региональный профиль (глубоководная часть Южного Каспия) Regional profile (deep-water of the South Caspian)	4
Ширван-дениз Shirvan-deniz	6		
Хара-Зиря/Khara-Ziry	7		
Булладениз/Bulla-deniz	8		
Умид/Umid	6		
Бабек/Babek	9	Сумма/Total	160

Расчеты термодинамического моделирования указали на возможность формирования газогидратов в пределах установленной зоны. На основе программного комплекса «Гидрат+» рассчитаны температура и давление, благоприятные для образования кристаллогидратов. За основу расчетов взяты анализы газов кристаллогидратов, отобранных на грязевых вулканах Боздаг и Элм. В табл. 2, 3 показаны расчетные температуры и давления, при которых образуются кристаллогидраты в условиях Южного Каспия. В табл. 2 рассмотрен состав газа кристаллогидратов Боздаг. Аналогичные данные были получены для химического состава кристаллогидратов на грязевом вулкане Элм (табл. 3). Из табл. 3 следует, что изменение температур на газогидратном скоплении Элм является аналогичным с таковым на Боздаге и варьируют в пределах от 1,62 до 24,16 °С. Данные расчеты были осуществлены для толщи морской воды.

Применение этих данных вместе с данными «Геотермальный атлас Азербайджана» [44], отчетами Института Геологии и Геофизики, а также первичными данными, полученными Государственной Нефтяной Компанией Азербайджанской

Республики, позволило проанализировать общую тенденцию изменения пластовой температуры в зависимости от глубины ниже данного слоя моря. Давление на глубинах воды 10, 100, 1000 м составляет 1 (0,10133 мПа), 10 (1,0133 мПа), 100 атм (10,133 мПа) соответственно, т. е. давление на каждые 10 м увеличивается на 1 атм (0,10133 мПа).

По приведенным данным пластовая температура на глубине 500 м изменяется от 23,0 до 27,8 °С, в среднем составляя 24,6 °С, что соответствует возможности образования кристаллогидратов. В связи с этим температура и давление изменяются по площади и разрезу, термодинамическое равновесие нарушается, что выражается в неравномерном распределении зон газогидратов как по площади, так и по разрезу.



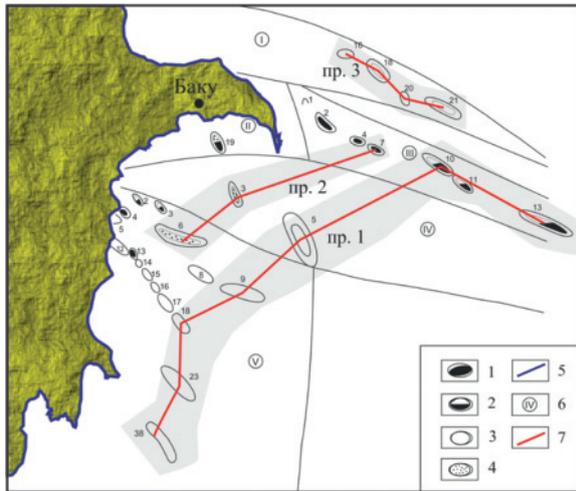
**Рис. 3.** Карта изменения глубины при фиксированной температуре 24 °С (глубоководная часть Южного Каспия)

**Fig. 3.** Map of depth change at fixed temperature of 24 °C (deep-water part of the South Caspian)

#### Результаты исследования по сейсмоакустическим данным и газонефтепроявлениям

На сейсмоакустических профилях установлены зоны с грязевулканическими структурами, а также многочисленные выходы газа, газовые факелы. Газовые факелы прослеживаются на месторождениях Умид, Сабаил, Кяпаз, Нефт Дашлары и др. Проявление газа в виде газовых факелов является не единственным критерием оценки наличия газа. На профилях установлены характерные для газа вертикальные столбы хаотической записи волн, а также аномалии, свойственные для зон газа. Следует отметить, что фактически вся площадь Южного Каспия, в особенности верхняя ее часть, является интенсивной зоной аккумуляции и дегазации газов. Максимальный интервал интерпрета-

ции составляет 400 м. В зависимости от территориальной принадлежности площадей наблюдаются определенные изменения и в волновом поле. Чередование песчанисто-глинистых отложений на месторождении Нефт Дашлары имеет более выраженную волновую картину по сравнению с месторождением Гум-адасы. Более интенсивные выходы газа зафиксированы в зонах грязевулканических проявлений, на месторождениях Кяпаз, Шах-дениз и др.



**Рис. 4.** Расположение основных групп сейсмоакустических профилей (в основу положена карта тектонического районирования нефтегазоносных территорий Азербайджана [41]). Условные обозначения: 1 – нефтяные месторождения, 2 – нефтегазовые месторождения, 3 – газовые месторождения, 4 – нефтегазоконденсатные месторождения, 5 – берег моря, 6 – номер района, 7 – линия профиля. I – 16. Арзу, 18. Дан улдузу, 20. Айпара, 21. Ашрафи; II – 19. Гум-дениз; III – 1. Хали, 2. Чиловадасы, 4. Палчыг Пилпилясы, 7. Нефт Дашлары, 10. Гюнешли, 11. Чираг, 13. Кяпаз; IV – 3. Бахар, 5. Шах-дениз; V – 2. Дуванный-дениз, 3. Хара-Зиря, 4. Алят-дениз, 5. Гиладасы, 6. Булла-дениз, 8. Умид, 9. Бабек (Д-1), 12. Хамамдаг-дениз, 13. Гарасу, 14. Санги Мугань, 15. Ульфат, 16. Аран-дениз, 17. Дашлы, 18. Сабаил, 23. Ширван-дениз, 38. Инам

**Fig. 4.** Location of the main groups of seismoacoustic profiles (based on the tectonic zoning of oil and gas areas of Azerbaijan) [41]. Legend: 1 are the oilfields, 2 are the oil-gas fields, 3 are the gasfields, 4 are the oil-gas condensate fields, 5 is the sea shore, 6 is the number of region, 7 is the cross-section line. I – 16. Arzu, 18. Dan ulduzu, 20. Aypara, 21. Ashrafi; II – 19. Gum deniz; III – 1. Khali, 2. Chilov adasi, 4. Palchig Pilpilyasi, 7. Neft Dashlari, 10. Guneshli, 11. Chirag, 13. Kapaz; IV – 3. Bakhar, 5. Shakh-deniz; V – 2. Duvanniy-deniz, 3. Khara-Ziryay, 4. Alyat, 5. Gil adasi, 6. Bulla-deniz, 8. Umid, 9. Babek (D-1), 12. Khamamdag-deniz, 13. Garasu, 14. Sangi-Mugan, 15. Ulfat, 16. Aran-deniz, 17. Dashli, 18. Sabail, 23. Shirvan-deniz, 38. Inam

Рассматривая изменения волновой картины по площади, можно прийти к выводу, что поступление газа в ВЧР связано не только с наличием грязевулканических структур и зон разломов, но и с вертикальной разгрузкой флюидов. Это позволяет говорить о поступлении газа из нефтегазовых

структур в верхнюю часть разреза. Очевидно, что наличие мощной глинистой толщи в верхней части разреза не является идеальным изолирующим фактором.

С целью детального анализа изменения газонасыщенности отложений как по площади, так и по разрезу изучены сейсмоакустические профили (табл. 1). Имеющийся объем сейсмоакустических данных условно был разбит на три группы (линии профилей). К первой группе относятся профили (рис. 5), примыкающие к глубоководной части Южного Каспия. Во вторую группу профилей (рис. 6), условно названную промежуточной зоной, входят месторождения Булла-дениз–Бахар–Нефт Дашлары, а третья группа (линия) включает зону Ашрафи–Айпара–Дан улдузу–Арзу (рис. 7).

1. Инам–Ширван-дениз–Сабаил–Бабек–Шах-дениз–Гюнешли–Кяпаз.
2. Булла-дениз–Бахар–Нефт Дашлары.
3. Ашрафи–Айпара–Дан улдузу–Арзу.

**Таблица 2.** Моделирование термодинамического равновесия газогидратного скопления Боздаг

**Table 2.** Modeling thermodynamic equilibrium of Bozdag gas hydrate accumulation

№	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	iC <sub>4</sub>	nC <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	Глубина Depth	P, атм/МПа P, atm/MPa	t, °C
1								150	15 (1,51996)	6,1695
2								200	20 (2,02661)	8,5317
3								250	25 (2,53326)	10,2670
4								300	30 (3,03991)	11,6980
5								350	35 (3,54657)	12,8830
6								400	40 (4,05322)	13,8730
7								450	45 (4,55987)	14,7030
8								500	50 (5,06652)	15,5020
9	77,1	18,2	2,4	0,4	1,1	0,33	0,45	550	55 (5,57318)	16,2740
10								1050	105 (10,6397)	20,0850
11								1550	155 (15,7062)	21,7450
12								2050	205 (20,7727)	23,0740
13								2550	255 (25,8393)	24,0180
14								2600	260 (26,3459)	24,1150
15								2650	265 (26,8526)	24,2120
16								2700	270 (27,3592)	24,3100

Таким образом, мы можем детально проанализировать изменения волновой картины по указанным профилям и по месторождениям в целом. Первый профиль охватывает зону Инам–Кяпаз. Геологическое строение структур по профилю неодинаковое. По сейсмоакустическим профилям можно уверенно проследить четкие отражающие горизонты, соответствующие отложениям четвертичного возраста. Геологическое строение этих месторождений хорошо описано в работах [42, 46, 47]. Глинистые отложения являются подавляющими отложениями верхней части разреза. Однако для некоторых зон наблюдается и увеличенное содержание песчаного материала. Этот вывод базируется на данных бурения.

Как видно из рис. 5–7, максимальная газонасыщенность отложений устанавливается на про-

филе 1, на последующих профилях наблюдается постепенное уменьшение газонасыщенности отложений. Минимальные значения отмечаются на профиле 3.

Анализ скоростей [48] по профилям (рис. 8, а–в) показал, что скорости и, соответственно, петрофизические условия меняются по площади и разрезу. На разрезах установлены схожие между собой зоны, выделенные характерным цветом. Выявленные интервалы (пунктирные линии) соответствуют зонам скоплениям флюидов (породам, сильно насыщенным газом). Этот вывод исходит из сопоставления данных, полученных во время бурения и изучения профилей. Особенности скоростной картины по различным профилям указывают на значительные объемы флюидов, которые могут заполнять верхнюю часть разреза. Пересечение профилей и интервалы глубин указывают на идентичность аномалий, формирующихся в единых стратиграфических зонах.

**Таблица 3.** Моделирование термодинамического равновесия газогидратного скопления Элм

**Table 3.** Modeling thermodynamic equilibrium of Elm gas hydrate accumulation

№	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	iC <sub>4</sub>	nC <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	Глубина Depth	P, атм (МПа) P, atm (MPa)	t, °C
1							150	15 (1,51996)	5,2995
2							200	20 (2,02661)	7,6785
3							250	25 (2,53326)	9,4449
4							300	30 (3,03991)	10,9070
5							350	35 (3,54657)	12,1230
6							400	40 (4,05322)	13,1430
7							450	45 (4,55987)	14,0010
8							500	50 (5,06652)	14,8280
9	81,4	15,3	1,6	0,2	0,7	0,81	550	55 (5,57318)	15,6270
10							1050	105 (10,6397)	19,6480
11							1550	155 (15,7062)	21,4350
12							2050	205 (20,7727)	22,8520
13							2550	255 (25,8393)	23,8570
14							2600	260 (26,3459)	23,9600
15							2650	265 (26,8526)	24,0620
16							2700	270 (27,3592)	24,1640

На рис. 9 разными условными обозначениями зафиксированы участки с выходами газа различной интенсивности, присутствием нефти, пластовой воды или запаха сероводорода. Все данные ранжированы по площади, что позволяет проследить изменения зафиксированных газонефтепроявлений как по площади, так и по разрезу в пределах установленных глубин. Как видно из рис. 9, максимальная газонасыщенность отложений соответствует подстилающим отложениям. Сводный разрез указывает на то, что ВЧР преимущественно представлена глинистыми отложениями с прослоями песчаника небольшой мощности. В пределах исследуемой зоны наибольший интерес вызывает присутствие пластовой воды. Она наблюдается в интервале глубин от 0 до 200 м в Восточно-Абшеронском районе, в то время как в нефтегазоносном

районе Бакинского архипелага ее наличие фиксируется в более широком интервале глубин от 0 до 2800 м. Следует отметить, что вода газирована. Величина пористости в верхней части разреза составляет 40 %. Вода была также зафиксирована на месторождении Чилов адасы, расположенном в Восточно-Абшеронском нефтегазоносном районе. Большой фактический материал по Бакинскому архипелагу позволяет наиболее детально охарактеризовать эту зону. Значительные объемы пластовой воды были установлены на месторождении Дуванный-дениз, Хара-Зирия, Алят-дениз, Санги-мугань, Дашлы. На месторождении Умид притоки воды были зафиксированы на более глубоких горизонтах – в интервале глубин от 240 до 2800 м. Газопроявления установлены практически на всех месторождениях за исключением Чираг, Гиладасы, Аран-дениз, Арзу. На двух площадях – Дашлы и Аран-дениз – зафиксировано присутствие H<sub>2</sub>S. На месторождении Аран-дениз наличие H<sub>2</sub>S выявлено до глубин 100 м, в то время как на месторождении Дашлы – на глубине около 500 м. На структурах Хали, Чилов адасы, Палчыг Пильпиля, Чираг Восточно-Абшеронского нефтегазоносного района в верхней части разреза установлены нефтепроявления. Необходимо отметить, что месторождение Палчыг Пильпиля до глубин 600 м характеризуется более песчаными отложениями по сравнению с другими структурами Бакинского архипелага. Эта площадь в верхней части разреза наиболее насыщена нефтями. На месторождении Булладениз притоки пластовой воды зафиксированы в разных интервалах разреза от глубин 600 до 6310 м. В стратиграфическом плане они охватывают практически весь разрез. В абшеронском и акчагыльском регионах, а также верхах ПТ минерализация воды составляет от 49 до 129 г/л. Таким образом, можно уверенно прогнозировать поступление значительных объемов УВ газов в верхнюю часть разреза глубоководной зоны Южного Каспия. Комплексирование полученных данных по термодинамике с результатами, полученными при изучении газонасыщенности верхней части разреза, позволило подсчитать максимальный объем газа из газогидратов для всей газогидратной зоны.

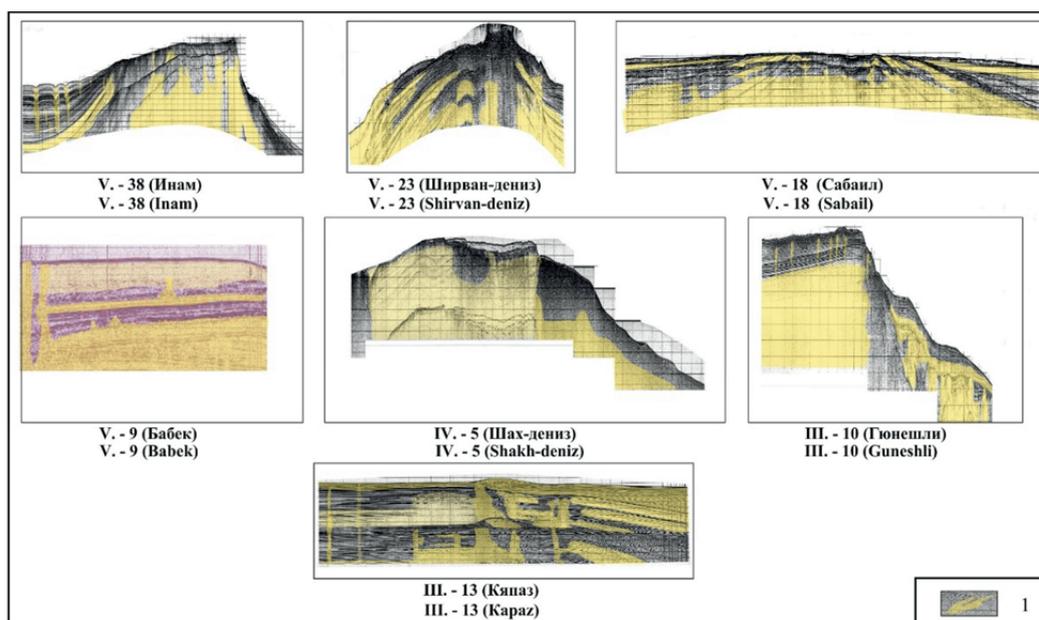
#### Оценка объемов газогидратов

С целью оценки объемов газов в зонах газогидратов (ГН) была использована общепринятая формула:

$$GH = V \times \varnothing \times S_h \times FV,$$

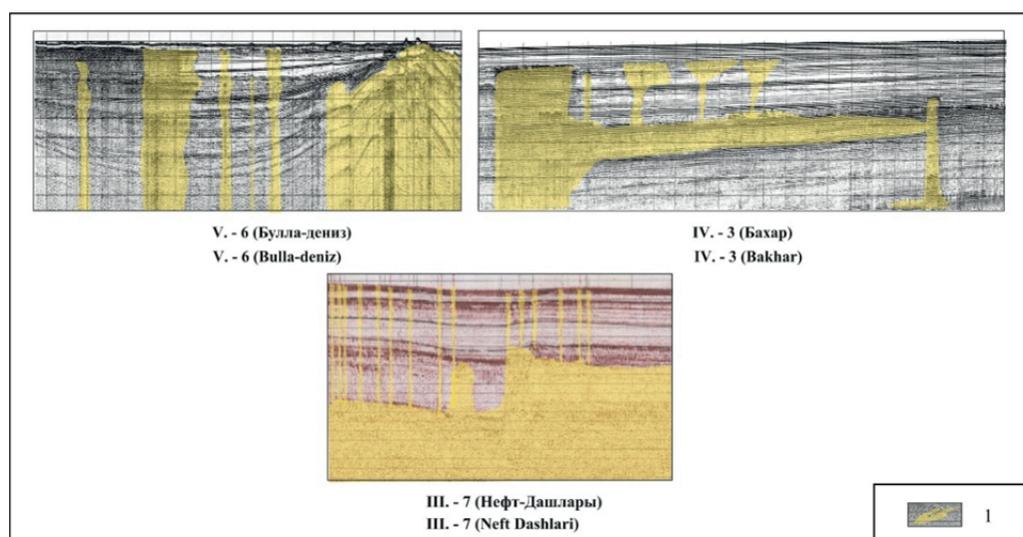
где V – объем породы, определенный по данным термодинамических исследований;  $\varnothing$  – средняя пористость в зоне газогидратов; S<sub>h</sub> – степень емкости заполнения пористости газогидратов; FV – коэффициент расширения метана при разложении газогидрата (обычно принят как 160). Вводные и расчетные данные приведены в табл. 4.

Следует отметить, что средняя величина пористости в зоне газогидратов была занижена на



**Рис. 5.** Результаты интерпретации сейсмоакустических данных (по профилю 1). 1 – области аномалий, которые соответствуют газовым проявлениям

**Fig. 5.** Results of interpretation of seismoacoustic data (by profile 1). 1 are the areas of anomalies, corresponding to gas shows



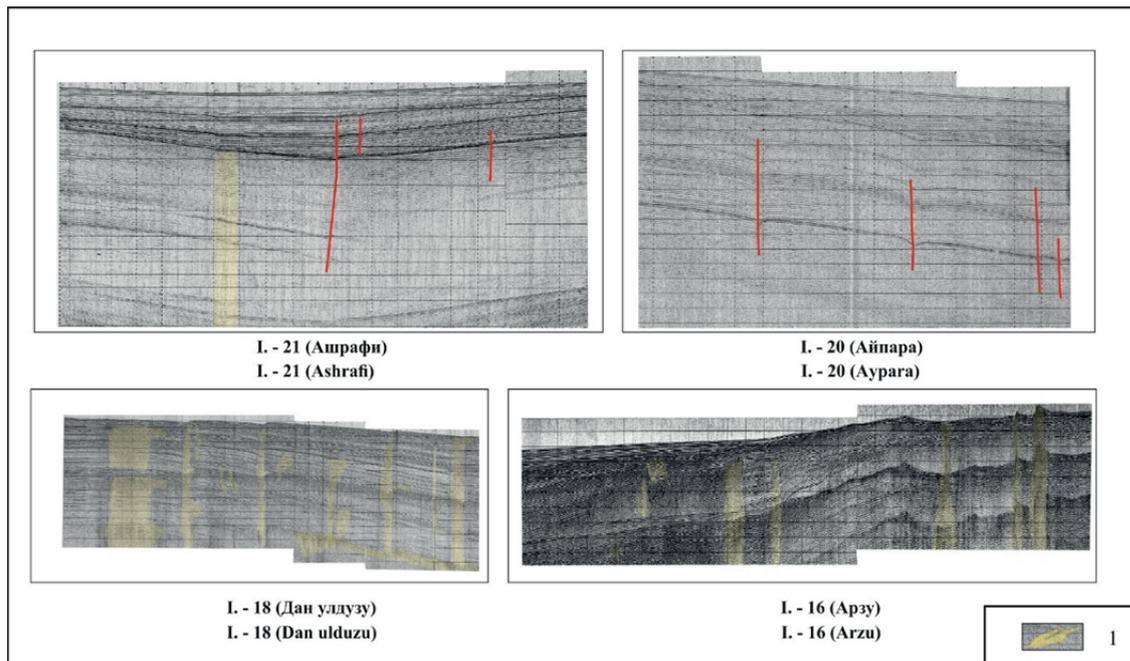
**Рис. 6.** Результаты интерпретации сейсмоакустических данных (по профилю 2). 1 – области аномалий, которые соответствуют газовым проявлениям

**Fig. 6.** Results of interpretation of seismoacoustic data (by profile 2). 1 are the areas of anomalies, corresponding to gas shows

**Таблица 4.** Расчеты объемов УВ газов в зонах газогидратов

**Table 4.** Calculations of hydrocarbon gas volumes within gas hydrate zones

Площадь исследования Area of study	Объем породы, определенный по данным сейсмических методов исследований (V) Volume of rock, determined by seismic research methods (V)	Средняя пористость в зоне газогидратов ( $\emptyset$ ) Average porosity in the gas hydrate zone ( $\emptyset$ )	Степень емкостного заполнения пористости газогидратов ( $S_n$ ) Degree of capacitive filling of porosity of gas hydrates ( $S_n$ )	Коэффициент расширения метана при разложении газогидрата (FV) Coefficient of methane expansion during decomposition of gas hydrate (FV)	Объем газа (GH) Gas volume (GH)
Общая General	9968864,727510 <sup>6</sup> м <sup>3</sup>	0,20	0,036	160	1,15·10 <sup>13</sup>



**Рис. 7.** Результаты интерпретации сейсмоакустических данных (по профилю 3). 1 – области аномалий, которые соответствуют газовым проявлениям

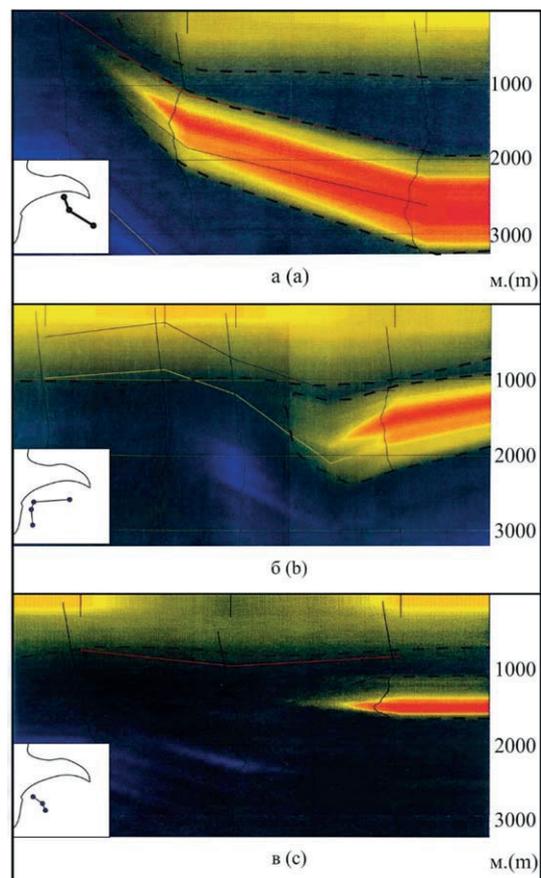
**Fig. 7.** Results of interpretation of seismoacoustic data (by profile 3). 1 are the areas of anomalies, corresponding to gas shows

50 %, что позволит более обосновано подойти к изучению объемов УВ газа газогидратов.  $S_h$  значения выбраны и использованы исходя из анализа результатов, полученных на двух скоплениях газогидратов Боздаг и Элм, а также из анализа данных [49–51]. Значение  $S_h$  для глин составляет 0,036.

Как видно из приведенных расчетов, суммарные объемы газа, рассчитанные для изучаемой площади отложений, составляют  $1,15 \cdot 10^{13} \text{ м}^3$  газа. Справедливо отметить, что генерация газа по площади неодинаковая, что подтверждается и данными сейсмических исследований.

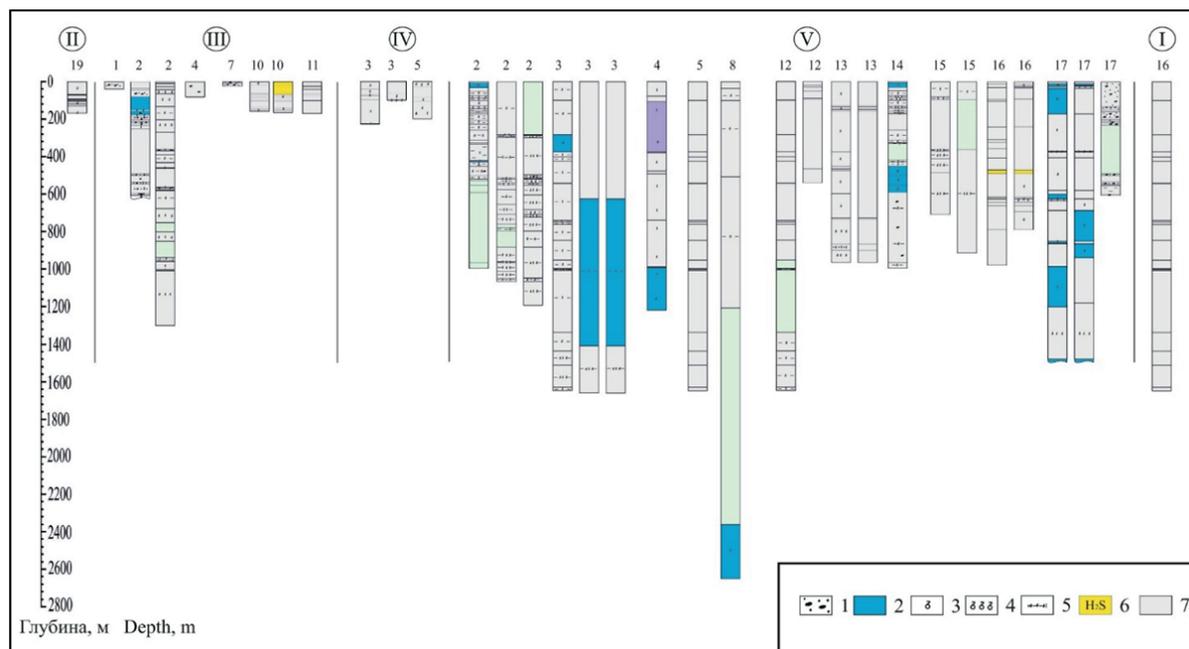
#### Выводы

Изучение методологических основ и опубликованных работ по газогидратам позволило провести анализ фазовых диаграмм гидратообразования. Анализ методических приемов интерпретации газогидратов показывает, что глубина их формирования изменяется в довольно широких пределах, но ограничена температурой в  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ . Рассмотрены фактические данные распределения температуры и давления в пределах Южного Каспия. Построена карта изменения глубины при фиксированной температуре  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ . Рассчитано термодинамическое равновесие для газов двух газогидратных скоплений – Боздаг и Элм. Скопления кристаллогидратов в акватории Южного Каспия характеризуются неравномерным распределением в породах. Положение их определяется неоднородностью температурного поля и давления по площади и разрезу.



**Рис. 8.** Интервальная скорость по профилям (а, б, в)

**Fig. 8.** Interval velocities by profiles (a, b, c)



**Рис. 9.** Газонефтепроявления в пределах Южного Каспия. Условные обозначения: 1 – присутствие нефти, 2 – наличие пластовой воды, 3 – наименее интенсивные выходы газа, 4 – наиболее интенсивные выходы газа, 5 – грязевулканическая брекчия, сильно насыщенная газом, 6 – присутствие  $H_2S$ , 7 – преимущественно глинистые отложения

**Fig. 9.** Gas shows within the South Caspian. Legends: 1 is the oil occurrence, 2 is the strata water occurrence, 3 are the least intensive gas outlets, 4 are the most intensive gas outlets, 5 is the mud-volcanic breccia, highly saturated with gas, 6 is the  $H_2S$  occurrence, 7 are the predominantly clayey deposits

Приведены результаты исследований по 160 сейсмоакустическим профилям основных нефтяных и газовых месторождений Южного Каспия. В результате интерпретации сейсмоакустических данных установлено, что аномалии, характерные для газов, выявлены практически на всех профилях. Интенсивность проявлений газа изменяется как по площади, так и с глубиной. В зонах, прилегающих к глубоководной части Южного Каспия, присутствие аномалий, характерных для газовых зон, увеличивается по сравнению с прибортовыми зонами.

В результате анализа данных по газопроявлениям ВЧР можно сделать следующие выводы:

1. Верхняя часть разреза Южного Каспия сильно обогащена газом, причем интенсивность газо-

проявлений в нижней части наиболее высокая.

2. Нефтепроявления на структурах Хали, Чилво адасы, Палчыг Пильпиля, Чираг указывают на то, что эти структуры наиболее благоприятны для поисков нефтяных залежей.
3. Пластовая вода зафиксирована в широком интервале глубин.

Полученные выводы дают основание прогнозировать поступление значительных объемов флюидов в верхнюю часть разреза глубоководной части Южного Каспия.

На основе данных термодинамического равновесия рассчитаны объемы зон газогидратов. Исходя из расчетов установлено, что суммарные объемы газа для изучаемой площади отложений составляют  $1,15 \cdot 10^{13} \text{ м}^3$  газа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бык С.Ш., Фомина В.И. Газовые гидраты // Успехи химии. – 1968. – Т. XXXVII. – № 6. – С. 1097–1135.
2. Carroll J. Natural Gas Hydrates. Second ed. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 248 p.
3. Sloan D.E., Koh C.A. Clathrate Hydrates of Natural Gases. 3<sup>rd</sup> ed. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – 721 p.
4. Макагон Ю.Ф. Гидраты природных газов. – М.: Недра, 1974. – 208 с.
5. Макагон Ю.Ф. Природные газовые гидраты // Российский химический журнал. – 2003. – Т. XLVII. – № 3. – С. 70–79.
6. Макагон Ю.Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2010. – № 2. – С. 1–17.
7. Панахов Р.А., Адуллаев Э.А., Новрузова С.Г. Газовые гидраты. – Баку: Элм, 2012. – 298 с.
8. Kalachand Sain, Harsh Gupta. Gas hydrates in India: Potential and development. – India: Gondwana Research, 2012. – V. 22. – P. 645–657.
9. Muradov Ch.S. The Area of formation of the South Caspian gas hydrates // South-Caspian basin: geology, geophysics, oil and gas content. – Baku: Nafta-Press, 2004. – P. 322–332.

10. Musakaev N.G., Khasanov M.K., Borodin S.L. The mathematical model of the gas hydrate deposit development in permafrost // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 118. – P. 455–461.
11. Şükürü M., Sotirios N.L. Numerical simulations of gas production from Class 1 hydrate and Class 3 hydrate in the Nile Delta of the Mediterranean Sea // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2018. – V. 52. – P. 248–266.
12. Geophysical characterization of a fine-grained gas hydrate reservoir in the Shenhu area, northern South China Sea: Integration of seismic data and downhole logs / Jiliang Wang, Shiguo Wu, Xiu Kong, Qingping Li, Jianxin Wang, Rong Ding // *Marine and Petroleum Geology*. – 2018. – V. 92. – P. 895–903.
13. Lorenson Th.D., Collett T.S. National Gas Hydrate Program Expedition 01 offshore India; gas hydrate systems as revealed by hydrocarbon gas geochemistry // *Marine and Petroleum Geology*. – 2018. – V. 92. – P. 477–492.
14. Estimation of seismic velocities and gas hydrate concentrations: a case study from the Shenhu area, northern South China Sea / Jie Liu, Jianzhong Zhang, Fei Ma, Ming Wang, Yunbao Sun // *Marine and Petroleum Geology*. – 2017. – V. 88. – P. 225–234.
15. High-resolution seismic characterization of the gas and gas hydrate system at Green Canyon 955, Gulf of Mexico, USA/ S.S. Haines, P.E. Hart, T.S. Collett, W. Shedd, M. Frye, P. Weimer, R. Boswell // *Marine and Petroleum Geology*. – 2017. – V. 82. – P. 220–237.
16. Yarveicy H., Ghiasi M.M., Mohammadi A.H. Determination of the gas hydrate formation limits to isenthalpic Joule-Thomson expansions // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2018. – V. 132. – P. 208–214.
17. Musakaev N.G., Khasanov M.K., Borodin S.L. The mathematical model of the gas hydrate deposit development in permafrost // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 118. – P. 455–461.
18. Geophysical characterization of a fine-grained gas hydrate reservoir in the Shenhu area, northern South China Sea: Integration of seismic data and downhole logs / Jiliang Wang, Shiguo Wu, Xiu Kong, Qingping Li, Jianxin Wang, Rong Ding // *Marine and Petroleum Geology*. – 2018. – V. 92. – P. 895–903.
19. Differential fluid migration behaviour and tectonic movement in Lower Silurian and Lower Cambrian shale gas systems in China using isotope geochemistry / Hao Xu, Wen Zhou, Qian Cao, Christopher Xiao, Qiumei Zhou, Haotian Zhang, Yeyu Zhang // *Marine and Petroleum Geology*. – 2017. – V. 89. – P. 47–57.
20. Seismic evidence and formation mechanism of gas hydrates in the Zhongjiannan Basin, Western margin of the South China Sea / Yintao Lu, Xiwu Luan, Fuliang Lyu, Bin Wang, Zhili Yang, Taotao Yang, Genshun Yao // *Marine and Petroleum Geology*. – 2017. – V. 84. – P. 274–288.
21. Genetic types of gas hydrates in China / Jinxing Dai, Yunyan Ni, Shipeng Huang, Weilong Peng, Wenxue Han, Deyu Gong, Wei Wei // *Petroleum Exploration and Development*. – 2017. – V. 44. – P. 887–898.
22. Hydrocarbon source for oil and gas indication associated with gas hydrate and its significance in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, Northwest China / Bin Cheng, Jianbing Xu, Zhenquan Lu, Yonghong Li, Weichao Wang, Shan Yang, Hu Liu, Ting Wang, Zewen Liao // *Marine and Petroleum Geology*. – 2017. – V. 89. – P. 202–215.
23. Methane source linked to gas hydrate system at hydrate drilling areas of the South China Sea: ore water geochemistry and numerical model constraints / Yu Hu, Min Luo, Linying Chen, Qianyong Liang, Dong Feng, Jun Tao, Shengxiang Yang, Duofu Chen // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2018. – V. 44. – P. 2–15.
24. Contribution of thermogenic organic matter to the formation of biogenic gas hydrate: Evidence from geochemical and microbial characteristics of hydrate-containing sediments in the Taixinan Basin, South China Sea / Junli Gong, Xiaoming Sun, Li Xu, Hongfeng Lu // *Marine and Petroleum Geology*. – 2017. – V. 80. – P. 432–449.
25. Макагон Ю.Ф., Хольсти Дж.С. Вискретные кристаллы гидраты // *Российский химический журнал*. – 2003. – Т. XLVII. – № 3. – С. 43–48.
26. Геология и геохимия нефти и газа / О.К.Баженова, Ю.К.Бурлин, Б.А.Соколов, В.Е. Хайн / под ред. Б.А. Соколова. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 384 с.
27. Якуцени В.П. Газогидраты – нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и газовые ресурсы // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2013. – Т. 8. – № 4. – С. 1–24.
28. Naresh Kumar Thakurl, Sanjeev Rajput. Exploration of Gas Hydrates Geophysical Techniques. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – 281 p.
29. Davie M.K., Zatsepina O.Y., Buffet B.A. Methane solubility in marine hydrate environment // *Marine Geology*. – 2004. – V. 203. – P. 117–184.
30. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. – М.: ВНИИОкеангеология, 1994. – 194 с.
31. Milkov A.V., Sassen R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces // *Marine and Petroleum Geology*. – 2002. – V. 19. – P. 1–11.
32. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
33. Kvenvolden K. Methane hydrate – a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? // *Chemical Geology*. – 1988. – V. 71. – P. 41–51.
34. The nature, distribution, and origin of gas hydrate in the Chile Triple Junction region / K.M. Brown, N.L. Bangs, P.N. Froelich, K.A. Kvenvolden // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1996. – V. 139. – P. 471–483.
35. High-intensity gas seepage causes rafting of shallow gas hydrates in the southeastern Black Sea / T. Pape, A. Bahr, S.A. Klapp, F. Abegg, G. Bohrmann // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2011. – V. 307. – P. 35–46.
36. Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е. Газогидраты морей и океанов – источник углеводородов будущего. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2009. – 415 с.
37. Diaconescu C.C., Kieckhefer R.M., Knapp J.H. Geophysical evidence for gas hydrates in the deep water of the South Caspian Basin, Azerbaijan // *Marine and Petroleum Geology*. – 2001. – V. 18. – P. 209–221.
38. Collett T.S., Kvenvolden K.A., Magoon L.B. Characterization of hydrocarbon gas within the stratigraphic interval of gas-hydrate stability of the North Slope of Alaska // *Applied Geochemistry*. – 1990. – V. 55. – P. 279–287.
39. Xəzər dənizinin Abşeron arxipelağı və Bakı arxipelağının şimal hissəsində Azərbaycan sektorunda kəsilişin üst hissəsinin qazlılığı və dəniz dibi qaz çıxışlarının (qaz-hidratlar) öyrənilməsi məqsədilə geoloji-geofiziki və qazma məlumatlarının ümumiləşdirilməsi, ARDNŞ. – Bakı: ARDNŞ, 2012. – 215 s.
40. Xəzər dənizinin Azərbaycan sektorunda kəsilişin üst hissəsinin qazlılığı və dənizdibi qaz çıxışları: təhlil, ümumiləşdirmə və təkliflər / Y.A. Şixəliyev, A.M. Əhmədov, A.Z. Zeynalov, Z.N. Əbdülxakova // *Azərbaycan Neft Təsərrüfatı*. – 2015. – № 5. – S. 9–15.
41. Геология Азербайджана. Нефть и газ / под ред. Ак. А. Ализаде. – Баку: Изд-во Nafta-Press, 2008. – Т. VII. – 380 с.
42. Guliyev I.S., Levin L.E., Fedorov D.L. Hydrocarbons potential of the Caspian region (System Analysis). – Baku: Nafta-Press, 2003. – 120 p.
43. Методология изучения и освоения месторождения Булла-де-низ / под ред. Ак.А. Ализаде. – Баку: Национальная Академии Наук Азербайджана, Институт глубинных проблем, 1995. – 138 с.

44. Geothermal Atlas of Azerbaijan / Ed. by A.A. Ali-Zadeh, S.A. Aliyev. – Baku, Nafta-Press, 2001. 151 p.
45. Seismic character of bottom simulating reflectors: examples from the mid-Norwegian margin / Ch. Berndt, S. Bunz, T. Clayton, J. Mienert, M. Saunders // Marine and Petroleum Geology. – 2004. – V. 21. – P. 723–733.
46. Геологические и геохимические условия сохранения углеводородных флюидов в Южно-Каспийском бассейне. – Баку: Институт Геологии Национальной Академии Наук Азербайджана, 2007. – 175 с.
47. Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г., Полетаев А.В. Изотопы углеводородных газов Азербайджана. – Баку: Nafta-Press, 2013. – 107 с.
48. Joint Research Program. Phase II. Velocity study of the Baku archipelago. – Baku: IDOGD-UNOCAL, 1994. – 44 p.
49. Подводногрязевулканический тип скоплений газовых гидратов / Г.Д. Гинсбург, И.С. Грамберг, И.С. Гулиев, Р.А. Гусейнов, А.А. Дадашев, В.Л. Иванов, А.Г. Кротов, Ч.С. Мурадов, В.А. Соловьев, Е.В. Теплепнев // Доклады Академии Наук СССР. – 1988. – Т. 300. – № 2. – С. 416–418.
50. Гусейнов Р.А., Дадашев Ф.Г. Углеводородные газы Каспийского моря. – Баку: Нафта-Пресса, 2000. – 128 с.
51. Frye M., Shedd W., Boswell R. Gas hydrate resource potential in the Terrebonne Basin, Northern Gulf of Mexico // Marine and Petroleum geology. – 2011. – V. 34. – P. 1–19.

*Поступила 18.09.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Полетаев А.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института нефти и газа Национальной Академии Наук Азербайджана.

**Полетаева Е.В.**, доктор философии по наукам о Земле, ведущий научный сотрудник Института нефти и газа Национальной Академии Наук Азербайджана.

UDC 550.3, 550.31, 550.46

## GAS HYDRATES WITHIN AZERBAIJAN SECTOR OF SOUTHERN CASPIAN: THERMODYNAMICS, SEISMOACOUSTICS AND GAS SHOWS

**Alexander V. Poletayev**<sup>1</sup>,  
avo1@mail.ru

**Yelena V. Poletayeva**<sup>1</sup>,  
yelenapv@mail.ru

<sup>1</sup> National Academy of Sciences of Azerbaijan,  
9, F. Amirov street, Baku, AZ1000, Azerbaijan.

**Relevance.** Geological structure and bathymetry of the seabed of the deep-water part of the Caspian Sea indicate the possibility of formation of significant amounts of gas hydrates. The analysis of the published and unpublished materials on Caspian gas hydrates has shown that basically all works are based only on study of Elm, Bozdag, Absheron gas hydrates accumulation, and thermodynamic factors of the region (without taking into account the actual values of temperature and pressure) in order to determine the possible zone of their accumulation.

**The aim** of the research is to calculate the volume of hydrocarbon gases of gas hydrates according to thermodynamic data, as well as to study and predict the inflow of hydrocarbon gases into the upper part of the section.

**The object** of research is deposits of the upper part of the section. Despite the large factual material available in various organizations, the upper part of the section in relation to evaluation of gas content is the least studied and described in the literature zone. This is due to the fact that the main research interval in the Southern Caspian is concentrated in areas with high oil and gas potential. This interval is the productive series and underlying deposits, which are included in the zone of intensive generation of oil and gas. The younger sediments accumulated before the Absheron regiotage, mainly consisting of clay sediments, were of no interest. In many works this zone is described as dissected series of quaternary deposits.

**Research methods** are based on modelling thermodynamic balance of hydrocarbon gases in order to establish the formation zone of gas hydrates. The authors have used the data of temperatures and pressures measured in the wells of the South Caspian, as well as the data from 160 seismic acoustic profiles, interval velocity sections as well as data on oil and gas occurrences within the shelf zone of the South Caspian.

As a result of thermodynamic equilibrium studies, the volumes of gas hydrate zones were calculated. Based on calculations, it is established that the total gas volumes for the study area are  $1,15 \cdot 10^3$  m<sup>3</sup> of gas. As a result of interpretation of seismoacoustic data, it is established that the intensity of gas manifestations varies both in area and depth. In the zones adjacent to the deep-water part of the South Caspian, the presence of anomalies characteristic of gas zones increases in comparison with the instrument zones. Based on the analysis of the data on gas manifestations, it can be concluded that the upper part of the section of the South Caspian is strongly enriched with gas, and the intensity of gas manifestations in the lower part is the highest. Oil shows within Khali, Chilov adasi, Palchig Pilpil, Chirag structures indicate that these structures are more favorable for the search for oil deposits. The reservoir water is fixed in a wide range of depths. The obtained results enable to predict the receipt of significant volumes of fluids in the upper part of the section of the deep-water part of the South Caspian.

### Key words:

Gas hydrates, seismoacoustic profiles, estimation, gas, South Caspian, oil and gas fields.

### REFERENCES

1. Byk S.Sh., Fomina V.I. Gazovyegidraty [Gashydrates]. *Uspekhi Khimii*, vol. XXXVII, 1968, no. 6, pp. 1097–1135.
2. Carroll J. *Natural Gas Hydrates*. Second ed. Boca Raton, CRC Press, 2008. 248 p.
3. Sloan D.E., Koh C.A. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Third ed. Boca Raton, CRC Press, 2007. 721 p.
4. Makagon Yu.F. *Gidraty prirodnykh gazov* [Gas hydrates of natural gases]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 208 p.
5. Makagon Yu.F. Prirodnye gazovye gidraty [Natural gashydrates]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2003, vol. XLVII, no. 3, pp. 70–79.
6. Makogon Yu.F. Gas hydrates. History of study and perspective of development. *Geology and mineral resources of the world ocean*, 2010, no. 2, pp. 1–17. In Rus.
7. Panakhov R.A., Adullaev E.A., Novruzova S.G. *Gazovyegidraty* [Gashydrates]. Baku, Elm, 2012. 298 p.
8. KalachandS ain, Harsh Gupta. Gashydrates in India: Potential and development. *Gondwana Research*, 2012, vol. 22, pp. 645–657.
9. Muradov Ch.S. *The Area of formation of the South Caspian gas hydrates. South-Caspian basin: geology, geophysics, oil and gas content*. Baku, Nafta-Press, 2004, pp. 322–332.
10. Musakaev N.G., Khasanov M.K., Borodin S.L., The mathematical model of the gas hydrate deposit development in permafrost. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 118, pp. 455–461.
11. Şükrü M., Sotirios N.L. Numerical simulations of gas production from Class 1 hydrate and Class 3 hydrate in the Nile Delta of the Mediterranean Sea. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, vol. 52, pp. 248–266.
12. Jiliang Wang, Shiguo Wu, Xiu Kong, Qingping Li, Jianxin Wang, Rong Ding. Geophysical characterization of a fine-grained gas hydrate reservoir in the Shenhu area, northern South China Sea: Integration of seismic data and downhole logs. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, vol. 92, pp. 895–903.
13. Lorenson T.D., Collett T.S. National Gas Hydrate Program Expedition 01 offshore India; gas hydrate systems as revealed by hydrocarbon gas geochemistry. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, vol. 92, pp. 477–492.
14. Jie Liu, Jianzhong Zhang, Fei Ma, Ming Wang, Yunbao Sun. Estimation of seismic velocities and gas hydrate concentrations: a case study from the Shenhu area, northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, vol. 88, pp. 225–234.
15. Haines S.S., Hart P.E., Collett T.S., Shedd W., Frye M., Weimer P., Boswell R. High-resolution seismic characterization of

- the gas and gas hydrate system at Green Canyon 955, Gulf of Mexico, USA. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, vol. 82, pp. 220–237.
16. Yarveicy H., Ghiasi M.M., Mohammadi A.H. Determination of the gas hydrate formation limits to isenthalpic Joule-Thomson expansions. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 132, pp. 208–214.
  17. Musakaev N.G., Khasanov M.K., Borodin S.L. The mathematical model of the gas hydrate deposit development in permafrost. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 118, pp. 455–461.
  18. Jiliang Wang, Shiguo Wu, Xiu Kong, Qingping Li, Jianxin Wang, Rong Ding. Geophysical characterization of a fine-grained gas hydrate reservoir in the Shenhu area, northern South China Sea: Integration of seismic data and downhole logs. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, vol. 92, pp. 895–903.
  19. Hao Xu, Wen Zhou, Qian Cao, Christopher Xiao, Qiumei Zhou, Haotian Zhang, Yeyu Zhang. Differential fluid migration behaviour and tectonic movement in Lower Silurian and Lower Cambrian shale gas systems in China using isotope geochemistry. *Mar. Pet. Geol.*, 2017, vol. 89, pp. 47–57.
  20. Yintao Lu, Xiwu Luan, Fuliang Lyu, Bin Wang, Zhili Yang, Tao-tao Yang, Genshun Yao. Seismic evidence and formation mechanism of gas hydrates in the Zhongjiannan Basin, Western margin of the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, vol. 84, pp. 2740–288.
  21. Jinxing Dai, Yunyan Ni, Shipeng Huang, Weilong Peng, Wenxue Han, Deyu Gong, Wei Wei. Genetic types of gas hydrates in China. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, vol. 44, pp. 887–898.
  22. Bin Cheng, Jianbing Xu, Zhenquan Lu, Yonghong Li, Weichao Wang, Shan Yang, Hu Liu, Ting Wang, Zewen Liao. Hydrocarbon source for oil and gas indication associated with gas hydrate and its significance in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, Northwest China. *Mar. Pet. Geol.*, 2017, vol. 89, pp. 202–215.
  23. Yu Hu, Min Luo, Linying Chen, Qianyong Liang, Dong Feng, Jun Tao, Shengxiong Yang, Duofu Chen. Methane source linked to gas hydrate system at hydrate drilling areas of the South China Sea: orewater geochemistry and numerical model constraints. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, vol. 44, pp. 2–15.
  24. Junli Gong, Xiaoming Sun, Li Xu, Hongfeng Lu. Contribution of thermogenic organic matter to the formation of biogenic gas hydrate: Evidence from geochemical and microbial characteristics of hydrate-containing sediments in the Taixinan Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, vol. 80, pp. 432–449.
  25. Makagon Yu.F., Kholsti Dzh. S. Viskret crystal gyrates. *Russian chemical journal*, 2003, vol. XLVII, no. 3, pp. 43–48. In Rus.
  26. Bazhenova O.K., Burlin Yu.K., Sokolov B.A., Khayn V.E. *Geologiya i geokhimiya nefti i gaza* [Geology and geochemistry of oil and gas]. Ed. By B.A. Sokolov. Moscow, MGU Press, 2000. 384 p.
  27. Yakutseni V.P. Gas hydrates – alternative gas source, their formation, property, location and gas potential. *Petroleum geology. Theory and practices*, 2013, vol. 8, no. 4, pp. 1–24. In Rus.
  28. Naresh Kumar Thakur, Sanjeev Rajput. *Exploration of Gas Hydrates Geophysical Techniques*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2011. 281 p.
  29. Davie M.K., Zatsepina O.Y., Buffet B.A. Methane solubility in marine hydrate environment. *Marine Geology*, 2004, vol. 203, pp. 117–184.
  30. Ginsburg G.D., Solovev V.A. *Submarinnye gazovye gidraty* [Submarine gas hydrates]. Moscow, VNIIOkeangeologiya Publ., 1994. 193 p.
  31. Milkov A.V., Sassen R. Economic geology of offshore gas hydrates accumulations and provinces. *Marine and Petroleum geology*, 2002, no. 19, pp. 1–11.
  32. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas hydrate in natural conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 236 p.
  33. Kvenvolden K. Methane hydrate – a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chemical Geology*, 1988, vol. 71, pp. 41–51.
  34. Brown K.M., Bangs N.L., Froelich P.N., Kvenvolden K.A. The nature, distribution, and origin of gas hydrate in the Chile Triple Junction region. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, vol. 139, pp. 471–483.
  35. Pape Th., Bahr A., Klapp S.A., Abegg F., Bohrmann G. High-intensity gas seepage causes rafting of shallow gas hydrates in the southeastern Black Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, vol. 307, pp. 35–46.
  36. Dmitrievskiy A.N., Balanyuk I.E. *Gazogidraty morey i okeanov – istochnik uglevodorodov budushchego* [Gas hydrates of the sea and ocean – hydrocarbon future source]. Moscow, IRTs GAZPROM LTD, 2009. 415 p.
  37. Diaconescu C.C., Kieckhefer R.M., Knapp J.H. Geophysical evidence for gas hydrates in the deep water of the South Caspian Basin, Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, vol. 18, pp. 209–221.
  38. Collett T.S., Kvenvolden K.A., Magoon L.B. Characterization of hydrocarbon gas within the stratigraphic interval of gas-hydrate stability of the North Slope of Alaska. *Applied Geochemistry*, 1990, vol. 55, pp. 279–287.
  39. Xəzər dənizinin Abşeron arxipelağı və Bakı arxipelağının şimal hissəsində Azərbaycan sektorunda kəsilişin üst hissəsinin qazlılığı və dəniz dibi qaz çıxışlarının (qaz-hidratlar) öyrənilməsi məqsədilə geoloji-geofiziki və qazma məlumatlarının ümumiləşdirilməsi [Gas hearing capacity in upper part of section and sea bottom gas shows (gas hydrates) in Absheron archipelago and northern part of Baku archipelago of Azerbaijan sector Caspian Sea with aims geological, geophysical and drilling data collection]. Baku, SOCAR Publ., 2012. 215 p. In Azeri.
  40. Şıxəliyev Y.A., Əhmədov A.M., Zeynalov A.Z., Əbdilxakova Z.N. Xəzər dənizinin Azərbaycan sektorunda kəsilişin üst hissəsinin qazlılığı və dənizdibi qaz çıxışları: təhlil, ümumiləşdirmə və təkliflər [Gas hearing capacity in upper portion of section and sea bottom gas shows in Azerbaijan sector of Caspian Sea: analysis, summary and proposals]. *Geologiya və geofizika*, 2015, vol. 5, pp. 9–15. In Azeri.
  41. *Geologiya Azərbaycan Respublikası* [Geology of Azerbaijan]. Vol. VII. Nef-tigaz [Vol. VII. Oil and gas]. Ed. by A.A. Ali-Zadeh. Baku, Nafta-Press Publ. house, 2008. 380 p.
  42. Guliyev I.S., Levin L.E., Fedorov D.L. *Hydrocarbons Potential of the Caspian Region (System Analysis)*. Baku, Nafta-Press, 2003. 120 p.
  43. *Metodologiya izucheniya i osvoeniya mestorozhdeniya Bulla-Deniz* [Methodology of study and developing the Bulla-Deniz field, the National Academy of Sciences of Azerbaijan]. Ed. by A.A. Ali-Zadeh. Baku, National Academy of Sciences of Azerbaijan, the Institute of Deep Problems, 1995. 138 p.
  44. *Geothermal Atlas of Azerbaijan*. Ed. by A.A. Ali-Zadeh, S.A. Aliyev. Baku, Nafta-Press 2001, 151 p.
  45. Berndt Ch., Bunz S., Clayton T., Mienert J., Saunders M. Seismic character of bottom simulating reflectors: examples from the mid-Norwegian margin. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, vol. 21, pp. 723–733.
  46. *Geologicheskie i geokhimicheskie usloviya sokhraneniya uglevodorodnykh flyuidov v Yuzhno-Kaspiyskom Basseyne* [Geological and geochemical conditions for conservation of hydrocarbon fluids in the South Caspian basin]. Baku, Institut Geologii Natsionalnoy Akademii Nauk Azerbaydzhana–SIW, Geology Institute of National Academy of Sciences Azerbaijan, 2007. 175 p.
  47. Guliev I.S., Dadashev F.G. Poletaev A.V. *Izotopy uglevodorodnykh gazov Azerbaydzhana* [Isotopes of hydrocarbon gases of Azerbaijan]. Baku, Nafta-Press Publ. house, 2013. 107 p.
  48. *Joint Research Program. Phase II. Velocity study of the Baku archipelago*. Baku, IDOGD-UNOCAL, 1994. 44 p.

49. Ginsburg G.D., Gramberg I.S., Guliev I.S., Guseynov R.A., Dadashev A.A., Ivanov V.L., Krotov A.G., Muradov Ch.S., Solovov V.A., Telepnev E.V. Podvodnogyazevulkanicheskiy tip skopleniy gazovykh gidratov [Subsea mud volcanoes type of the gas hydrate fields]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1988, vol. 300, no. 2, pp. 416–418.
50. Guseynov R.A., Dadashev F.G. *Uglevodorodnye gazy kaspiyskogo morya* [Hydrocarbon gases of the Caspian Sea]. Baku, Nafta-Press Publ. house, 2000. 128 p.
51. Frye M., Shedd W., Boswell R. Gas hydrate resource potential in the Terrebonne Basin, Northern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum geology*, 2011, vol. 34, pp. 1–19.

*Received: 18 September 2018.*

#### **Information about the authors**

**Alexander V. Poletayev**, Cand. Sc., leading researcher Oil and Gas Institute of National Academy of Sciences of Azerbaijan.

**Yelena V. Poletayeva**, Dr. Sc., leading researcher Oil and Gas Institute of National Academy of Sciences of Azerbaijan.

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Оценка инженерно-геокриологических условий Берегового нефтегазоконденсатного месторождения** 6  
Строкова Л.А., Пургина Д.В., Галеева Э.И., Курчатова А.Н.
- Анализ влияния геолого-технологических показателей на эффективность технологии радиального бурения на примере эксплуатационных объектов Пермского Края** 20  
Кочнев А.А., Зотиков В.И., Галкин С.В.
- Электрохимическая обработка облученного графита уран-графитовых ядерных реакторов** 30  
Павлюк А.О., Беспала Е.В., Котляревский С.Г., Волкова А.Г., Захарова Е.В.
- Нефтегазовая гидрогеохимия доюрских комплексов южных районов Обь-Иртышского междуречья** 39  
Новиков Д.А., Рыжкова С.В., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В., Сесь К.В., Ефимцев Н.А., Шохин А.Е.
- Оценка кислотообразующего/кислотонейтрализующего потенциалов отвальных пород и подвижности потенциально токсичных элементов Раздолинского рудного узла (Красноярский Край)** 55  
Бортникова С.Б., Силантьева Н.В., Запольский А.Н., Юркевич Н.В., Саева О.П., Шевко А.Я., Шуваева О.В., Еделева А.В.
- Зависимость характеристик детонационных волн в многокомпонентной пузырьковой жидкости от начального давления** 73  
Гималтдинов И.К., Левина Т.М., Кучер А.М.
- Иодсодержащие минералы ряда хлораргирит-бромаргирит в окисленных рудах золото-кварцевых рудопроявлений Хаак-саир и Тардан-2 (Тува, Россия)** 80  
Кужугет Р.В., Монгуш А.А., Ооржак Ш.Н., Бутанаев Ю.В.
- Многофункциональная оптимизация при компенсации реактивной мощности** 94  
Гонсалес П.И.А., Марреро Р.С., Балабанов М.С., Легра Л.А., Мендиолья М.Д.
- Обстановки седиментации лохков-нижнеэмских вулканокластических отложений Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала** 104  
Зайнуллин Р.И.
- О механизме химического связывания азота воздуха в условиях теплового взрыва смесей нанопорошка алюминия с оксидом тантала** 114  
Чудинова А.О., Ильин А.П., Роот Л.О., Мостовщиков А.В., Спесивцева С.В., Джин Чун Ким
- Оценка степени живучести ответственных строительных конструкций при ударно-волновом нагружении** 122  
Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю., Бутузов Е.А.
- Петрохимическая характеристика кор выветривания Ольховско-Чибизекского района** 136  
Мартыненко И.В., Ворошилов В.Г., Тимкин Т.В., Зиаи М.
- Каталитический паровой крекинг гудрона в присутствии дисперсных катализаторов на основе различных металлов** 145  
Соснин Г.А., Заикина О.О., Елецкий П.М., Яковлев В.А.
- Агрегирование предпочтений в интерпретации данных энергетических обследований** 155  
Муравьев С.В., Борисова М.А.
- Газогидраты Азербайджанского сектора Южного Каспия: термодинамика, сейсмоакустика и газопроявления** 164  
Полетаев А.В., Полетаева Е.В.
- Evaluation of engineering-geocryological conditions of the Beregovoe oil and gas condensate field** 6  
Strokova L.A., Purgina D.V., Galeeva E.I., Kurchatova A.N.
- Analysis of the influence of geological-technological parameters on the effectiveness of radial drilling technology on the example of operational objects in Perm region** 20  
Kochnev A.A., Zotikov V.I., Galkin S.V.
- Electrochemical treatment of irradiated graphite of uranium-graphite nuclear reactors** 30  
Pavlyuk A.O., Bespala E.V., Kotlyarevskiy S.G., Volkova A.G., Zakharova E.V.
- Oil and gas hydrogeochemistry of the pre-Jurassic deposits in the southern areas of Ob-Irtysh interfluves** 39  
Novikov D.A., Ryzhkova S.V., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Ses K.V., Efimtsev N.A., Shokhin A.E.
- Assessment of acid-base accounting of mine waste rocks and mobility of potentially toxic elements of the Razdolinsky ore field (Krasnoyarsk territory)** 55  
Bortnikova S.B., Silantyeva N.V., Zapolsky A.N., Yurkevich N.V., Saeva O.P., Shevko A.Ya., Shuvaeva O.V., Edelev A.V.
- Dependence of characteristics of detonation waves in multicomponent bubble liquid on initial pressure** 73  
Gimaltdinov I.K., Levina T.M., Kucher A.M.
- Iodine-bearing minerals of chlorargyrite-bromargyrite series in oxidized ores of the Khaak-sair and the Tardan-2 gold-quartz ore occurrences (Tuva, Russia)** 80  
Kuzhuget R.V., Mongush A.A., Oorzhak Sh.N., Butanaev Yu.V.
- Multiobjective optimization in reactive power compensation** 94  
Palau I.A.G., Ramirez S.M., Balabanov M.S., Lobaina A.L., Ellis D.M.
- Sedimentation of Lochkovian-Lower Emsian volcanoklastic deposits of the West-Magnitogorsk zone of the South Urals** 104  
Zainullin R.I.
- On air nitrogen chemical bonding in heat explosion of aluminum nanopowder and tantalum oxide mixtures** 114  
Chudinova A.O., Ilyin A.P., Root L.O., Mostovshchikov A.V., Spesivtseva S.V., Jin Chun Kim
- Evaluation of survivability degree of responsible building structures under shock wave loading** 122  
Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Butuzov E.A.
- Petrochemical characterization of weathering crusts of Olkhovsk-Chibizhek district** 136  
Martynenko I.V., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Ziaii M.
- Catalytic steam cracking of vacuum residue in presence of dispersed catalysts based on Mo, Ni, Fe, Co, Al metals** 145  
Sosnin G.A., Zaikina O.O., Eletsckii P.M., Yakovlev V.A.
- Preference aggregation in interpretation of energy survey data** 155  
Muravyov S.V., Borisova M.A.
- Gas hydrates within Azerbaijan sector of Southern Caspian: thermodynamics, seismoacoustics and gas shows** 164  
Poletayev A.V., Poletayeva Y.V.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 23.12.2018. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 18,96. Уч.-изд. л. 17,15.  
Заказ 274-18. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ