



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

12+

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 332, № 7, 2021

Издательство
Томского политехнического университета
2021

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Руи Д., PhD (Португалия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. г.-м. наук, проф. (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)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. 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, 2021

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 геологических объектов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке георесурсов, 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
- Экономические и социальные аспекты использования георесурсов

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, scholar.google.com

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

Volume 332, № 7, 2021

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

Editorial Board

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
Rui D., PhD (Portugal)
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
Teipel U., Dsc (Germany)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Buznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. 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)
Belozherov V.B., Dr. Sc. (Russia)
Tretiak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)
Arbuzov S.I., Dr. Sc. (Russia)
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPES

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 and transportation;
- Geo Assets deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and Geoecology issues;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea;
- Economic and social aspects of using Geo Assets.

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 two 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, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Оценка нефтегазоносности локальных поднятий Северо-Абшеронской зоны на основе петрофизических параметров (на примере локальных поднятий Гошадаш–Агбурун–Дениз–Дарвин Кюупеси–Гюргян–Дениз)**
Мухтарова Х.З. гызы, Насибова Г.Д. гызы
- Новые данные по изотопному составу ($\delta^{13}\text{C}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) рассолов Сибирской платформы**
Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Ильин А.В., Чертовских Е.О.
- Сравнительная стоимостная оценка энергетического использования древесных отходов и традиционных топлив для производства электроэнергии и тепла**
Марченко О.В., Соломин С.В.
- Комплексный подход к оценке эффективности проектируемой соляно-кислотной обработки с использованием результатов лабораторных исследований и гидродинамического моделирования**
Кривошеков С.Н., Козырев Н.Д., Вяткин К.А., Равелев К.А.
- Методы удаления пигментов из сточных вод**
Джубари М.К., Алексеева Н.В., Базияни Г.И., Таха В.С.
- Производство взрывных работ на заданный гранулометрический состав руды в рамках концепции «mine-to-mill»: современное состояние и перспективы**
Маринин М.А., Евграфов М.В., Должиков В.В.
- Определение рациональных режимов механической обработки титановых корпусных элементов нефтегазового оборудования концевыми (по ГОСТ 23248–78) и волновыми фрезами**
Коровин Г.И., Гаврилин А.Н., Петрушин С.И., Однокопылов Г.И., Кладиев С.Н.
- Иттриевые редкоземельные и редкометалльные акцессорные минералы лейкогранитов Алейско-Змеиногорского комплекса (Рудный Алтай)**
Новоселов К.Л.
- Оценка суффозионной опасности территории пос. Сабетта (полуостров Ямал)**
Строкова Л.А., Епифанова Е.А.
- Особенности петрофизических свойств сложнопостроенных карбонатных толщ по комплексным геофизическим данным**
Чучалина К.Ю., Коровин М.О.
- Тепловой поток и нефтегазоносность северо-восточной части Томской области**
Лобова Г.А., Меренкова А.С., Исаев В.И., Кузьменков С.Г.
- Экспериментальное изучение миграции ионов растворенной соли NaCl при вертикально направленном замерзании грунта**
Григорьев Б.В.
- Квазистационарный эффект свободной тепловой конвекции в водонаполненных буровых скважинах**
Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г.
- Экспериментальные исследования синтеза метанола из забалластрированного азотом синтез-газа**
Загашвили Ю.В., Кузьмин А.М., Имшенецкий В.В., Лищинер И.И., Малова О.В.
- Индикаторные показатели состояния экосистем в элементном составе волос жителей районов Северного Казахстана**
Байкенова Г.Е., Барановская Н.В., Какабаев А.А., Берсимбаев Р.И., Корогод Н.П., Наркович Д.В., Куровская В.В.
- 7 **Evaluation of oil and gas content of local uplifts in the North Absheron zone based on petrophysical parameters (local uplifts Goshadash–Agburun-Deniz–Darwin Kyupesı–Gyurgyan-Deniz as an example)**
Mukhtarova Kh.Z. kizi, Nasibova G.J. kizi
- 20 **New data on the isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of the Siberian platform brines**
Novikov D.A., Pyrayev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ilyin A.V., Chertovskikh E.O.
- 34 **Comparative cost estimation of energy use of wood waste and traditional fuels for electricity and heat production**
Marchenko O.V., Solomin S.V.
- 43 **Complex approach to estimating the efficiency of the designed hydrochloric acid treatment using the results of laboratory studies and hydrodynamic simulation**
Krivoshechekov S.N., Kozyrev N.D., Vyatkin K.A., Ravelev K.A.
- 54 **Methods for removing pigments from waste water**
Gubari M.Q., Alekseeva N.V., Baziyani G.I., Taha B.S.
- 65 **Production of blasting operations for a given granulometric composition of ore within the framework of the «mine-to-mill» concept: current state and prospects**
Marinin M.A., Evgrafov M.V., Dolzhikov V.V.
- 75 **Determining rational modes of mechanical processing of titanium body elements of oil and gas equipment by end-end machines (according to SS 23248-78) and wave-shaped cutters**
Korovin G.I., Gavrilin A.N., Petrushin S.I., Odnokopylov G.I., Kladiyev S.N.
- 85 **Yttrium rare-earth and rare-metal accessory minerals of leucogranites in the Aleysk Zmeinogorsk complex (Rudny Altay)**
Novoselov K.L.
- 95 **Assessment of suffosion in the territory of settlement Sabetta, the Yamal Peninsula**
Strokova L.A., Epifanova E.A.
- 107 **Specific features of petrophysical properties of complex carbonate reservoir by complex geophysical data**
Chuchalina K.Yu., Korovin M.O.
- 114 **Heat flow and oil and gas presence of the Tomsk region north-eastern part**
Lobova G.A., Merenkova A.S., Isaev V.I., Kuzmenkov S.G.
- 124 **Experimental study of migration of ions of dissolved salt NaCl during vertical freezing of the ground**
Grigoriev B.V.
- 131 **Quasi-stationary effect of free thermal convection in water-filled boreholes**
Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G.
- 140 **Experimental studies of methanol synthesis from nitrogen-ballasted synthesis gas**
Zagashvili Yu.V., Kuzmin A.M., Imshenetsky V.V., Lishchiner I.I., Malova O.V.
- 148 **Indicators of the state of the ecosystems based on the hair compositions of the Northern Kazakhstan residents**
Baikenova G.E., Baranovskaya N.V., Kakabaev A.A., Bersimbaev R.I., Korogod N.P., Narkovich D.V., Kurovskaya V.V.

- | | | |
|---|------------|---|
| Методика учета различных источников определения проницаемости пластов в условиях недостатка геолого-промысловой информации
Курганов Д.В. | 159 | Method of accounting different sources for permeability estimation under lack of geological and field information
Kurganov D.V. |
| Current control of Z-source four-leg inverter for autonomous photovoltaic system based on model predictive control
Boussabeur M.T., Rabhi B., Aboelsaud R., Ibrahim A., Toumi D., Zellouma L., Garganeev A.G. | 165 | Управление током Z-инвертора с четвертой стойкой для автономной фотоэлектрической системы на основе прогнозирующего управления
Буссабер М.Т., Рабхи Б., Абуэлсауд Р., Ибрагим А., Туми Д., Зеллума Л., Гарганеев А.Г. |
| Использование отходов самоспасателей на химически связанном кислороде для снижения карбонатной жесткости шахтной воды
Высоцкий С.П., Плотников Д.А., Мамаев В.В. | 172 | Use of self-rescue waste on chemically bond oxygen to reduce the carbonate hardness of mining water
Vysotskii S.P., Plotnikov D.A., Mamaev V.V. |
| Разработка способа прогнозирования остаточного ресурса электрощеток тяговых электродвигателей
Харламов В.В., Попов Д.И., Байсадыков М.Ф. | 182 | Development of a method for predicting the residual life of electric traction motor brushes
Kharlamov V.V., Popov D.I., Baysadykov M.F. |
| Оценка восстановительной динамики растительного покрова лесных гарей с использованием данных со спутников Landsat
Токарева О.С., Алшаиби А.Д.А., Пасько О.А. | 191 | Assessment of restoration dynamics of burnt forest area vegetation using Landsat satellite data
Tokareva O.S., Alshaibi A.D.A., Pasko O.A. |

УДК 553. 98(479.24): 550.8.072

ОЦЕНКА НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПОДНЯТИЙ СЕВЕРО-АБШЕРОНСКОЙ ЗОНЫ НА ОСНОВЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ (НА ПРИМЕРЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОДНЯТИЙ ГОШАДАШ–АГБУРУН-ДЕНИЗ–ДАРВИН КЮПЕСИ–ГЮРГЯН-ДЕНИЗ)

Мухтарова Хураман Зиядхан гызы¹,
mukhtarova.khuraman@mail.ru

Насибова Гюльтар Джумшуд гызы¹,
gultar_nasibova_1@yahoo.com

¹ Азербайджанский Государственный университет нефти и промышленности,
Азербайджан, AZE1010, г. Баку, пр. Азадлыг, 34.

Рассмотрены особенности изменения петрофизических параметров (гранулометрический состав и карбонатность) пород локальных поднятий Гошадаш, Агбурун-дениз, Дарвин кюпеси и Гюргян-дениз в интервале глубин 400–2650 м, и построены их диаграммы. Анализ изменения петрофизических особенностей пород по площади и глубине дает возможность определить изменение их коллекторских свойств, а также относительно объективно оценить содержание флюидов и перспективы нефтегазоносности резервуаров. Авторами по отдельности были проанализированы изменения петрофизических свойств пород площадей Гошадаш, Агбурун-дениз, Дарвин кюпеси и Гюргян-дениз до глубины 2650 м и их влияние на пористость и проницаемость. По анализу гистограмм, построенных на основании петрофизических данных, в разрезе площадей по глубине отмечаются различные процентные соотношения как псефитовых, псаммитовых, алевритовых и пелитовых фации терригенного происхождения, так и карбонатных фации. В осадочной толще, как правило, между карбонатностью, глинистостью и коллекторскими свойствами наблюдается обратная связь, а со степенью отсортированности – прямая. Эта закономерность нарушается в исключительных случаях, когда качество коллектора, вероятно, связано с увеличением вязкости в породах и образованием вторичной пористости. Образование вторичной пористости на относительно больших глубинах, в связи с этим не исключает наличия углеводородных скоплений.

Актуальность. Североабшеронская зона поднятий, расположенная вблизи с богатыми нефтегазоконденсатными месторождениями, охватывает большую территорию, берущую начало с северо-запада Абшеронского полуострова и простирающуюся в юго-восточном направлении. Здесь расположены морские поднятия Гошадаш, Агбурун-дениз, Дарвин кюпеси и Гюргян-дениз, являющиеся территорией исследования. Продуктивная толща, являющаяся основным нефтегазоносным комплексом, расположена на относительно небольшой глубине, в пределах досягаемости современной техники. Построение и анализ петрофизических моделей может сыграть важную роль в прогнозировании перспектив нефтегазоносности продуктивной толщи и нижележащих отложений, а также стать основой обнаружения новых нефтегазовых скоплений и увеличения добычи нефти.

Цель: изучение литофациальных и коллекторских свойств пород по глубине на основании петрофизических моделей, построенных согласно геолого-геофизическим данным и данным скважин.

Объекты: отложения продуктивной толщи площадей Гошадаш, Агбурун-дениз, Дарвин кюпеси и Гюргян-дениз.

Методы. Коллекторские свойства отложений интервала глубин 400–2650 м площадей Гошадаш, Агбурун-дениз, Дарвин кюпеси и Гюргян-дениз были изучены на основании исследования в лабораторных условиях образцов керн, отобранных в скважинах. Вышеуказанный интервал исследований был разбит на несколько мелких интервалов, каждый величиной в 150 м, и из каждого интервала было отобрано от 20 до 40 образцов керн, проведён анализ, установлены их гранулометрический состав, процентное содержание карбонатов, пористость, проницаемость. В результате данного анализа для каждого из интервалов в 150 м были представлены средние значения для вышеуказанных параметров, на основании которых нами были построены гистограммы.

Результаты. Между коллекторскими свойствами и карбонатностью, глинистостью пород в изучаемом интервале глубин на площадях Гошадаш, Агбурун-дениз, Дарвин кюпеси, Гюргян-дениз наблюдается в основном обратное соотношение. В особенностях изменения петрофизических параметров отложений продуктивной толщи по глубине на структурах Гошадаш, Агбурун-дениз, а также на месторождениях Дарвин кюпеси, Гюргян-дениз, за исключением некоторых коротких интервалов, не наблюдается какой-либо закономерности (т. е. линейности). На основании фонтанов нефти дебитом 42 т/сут. из подкирмакинской свиты в скважине 726, пробуренной на месторождении Дарвин кюпеси, а также дебитом 20 т/сут. из кирмакинской свиты в скважине 813, полученной во время испытательных работ 10 т/сут. нефти из подкирмакинской свиты в скважине 7, пробуренной на месторождении Гюргян-дениз, и идентичной степени изменения коллекторских свойств пород в структурах Гошадаш и Агбурун-дениз, расположенных на той же антиклинальной линии, что и вышеуказанные месторождения, можно предположить наличие и в этих структурах углеводородных скоплений в одноименных отложениях.

Ключевые слова:

Отложения, петрофизические параметры, пелиты, псаммиты, алевриты, карбонатность, пористость, проницаемость.

Введение

С тектонической точки зрения Абшеронский архипелаг охватывает северо-западную часть структурной мегаседловины субмеридионального направления, образовавшейся между складчатыми системами

Большого Кавказа и Копетдага, отделяющие Южно-Каспийскую впадину от Средне-Каспийской [1].

Окруженная богатыми нефтегазоконденсатными месторождениями Северо-Абшеронская зона поднятий занимает большую территорию Абшеронского

полуострова, протянувшуюся в направлении с северо-запада на юго-восток. В эту зону входят складки: Гошадаш, Агбурун-дениз, Абшерон кюпеси, Шимали Абшерон, Генби Абшерон, Хезри, Гилавар, Арзу, Гелгюну, Вусал, Севиндж, Дан уддузу, Новханы, Айпара, Генджлик, Эшрефи, Гелебе, Зирве, Хамдам, Гарабаг (рис. 1) [2, 3].



Рис. 1. Карта распределения локальных структур Северо-Абшеронского архипелага

Fig. 1. Map of distribution of local structures of the North Absheron archipelago

Складка Дарвин кюпеси берет свое начало в восточной части Северо-Абшеронского архипелага и протягивается в общекавказском направлении. Данная структура относится к Приабшеронской полузоне Абшероно-Балханской зоны поднятий [4].

В геологическом строении месторождения Дарвин кюпеси участвуют миоценовые-четвертичные отложения. Диатомовая свита (средний, нижний миоцен – N_1^{2+3}) сложена из песчано-слюдовых глин. Вскрытая мощность до 100 м.

Имеющий максимально вскрытую мощность в 50 м ярус понта, как и по всему Абшеронскому полуострову, литологически представлен глинами с редкими прослойками песков. Отложения понта выклиниваются в направлении к своду структуры, и в результате породы продуктивной толщи (ПТ) залегают непосредственно на пластах диатома. Имеющие максимальную мощность 1900 м породы ПТ представлены песками, песчаниками, алевритами и глинами. В результате денудации свода складки отложения ПТ представлены лишь свитами своего нижнего отдела, из которых нефтеносными являются только подкирмакинская (ПКС) и кирмакинская (КС) свиты.

Отложения акчагильской и абшеронской свит полосой охватывают восточное и западное крылья складки. Акчагильский пласт представлен глинами с пропластками песчаников небольшой мощности, в его разрезе также присутствуют слои вулканического пепла. Абшеронский ярус представлен в основном известняками.

Древнекаспийские отложения сложены гравием, конгломератами, ракушечником и песками. Разрез современных каспийских отложений представлен чередованием ракушечника и кварцевых песков.

Ось брахиантиклинальной структуры Дарвин кюпеси простирается в субмеридиональном направле-

нии, и сама структура осложнена многочисленными продольными и поперечными разломами (рис. 2, а, б).

Здесь фонтаном нефти, полученным в 1950 г. из кирмакинской свиты в скважине 735 (КС) на западном крыле структуры, было открыто месторождение и началась его разработка. Дебит скважины составлял 5 т/сут. В том же году пробуренная на этом участке скважина 726 фонтанировала из отложений ПКС дебитом 42 т/сут, а скважина 813 из отложений КС дебитом 20 т/сут [5, 6].

Нефтеносность северного и северо-восточного участков была выявлена в 1955–1962 гг. в результате проведенных разведочных работ. В соответствии с пространственным распределением залежей нефти по пластам, структура Дарвин кюпеси была разделена на четыре зоны: южная, центральная, северная и северо-восточная. Основными эксплуатационными объектами месторождения являются КС и ПКС.

Следует отметить, что в качестве эксплуатационного объекта КС была разделена на две части: верхнюю – $КС_в$, и нижнюю – $КС_н$. В первые годы разработки суточная добыча нефти составляла: по $КС_в$ – 35–41 т, по $КС_н$ – 12–21 т, а по ПКС – 6,8 т.

Надо отметить, что до недавнего времени эксплуатация нефтяных пластов ПКС велась только на южном и центральном участках структуры [7, 8].

Связанное с самостоятельным поднятием месторождение Гюрган-дениз расположено в западной части Абшеронского архипелага, с тектонической точки зрения на юго-восточном крыле складки Южный Пираллахи (рис. 1). Гюрган-дениз отделяется от Южного Пираллахи неглубокой седловиной, осложненной тектоническим нарушением амплитудой 200–250 м.

Из четырех скважин, пробуренных на месторождении, скважина 7 в 1946 г. вскрыла ПКС и в результате опробования с суточным дебитом в 10 т месторождение было введено в эксплуатацию в 1947 г., а разработка началась с 1950 г.

В геологическом разрезе месторождения Гюрган-дениз присутствуют отложения понта, ПТ, акчагиля, абшерона и четвертичного периода. На юго-западном крыле складки песчанность отложений калинской свиты ($КаС$) возрастает и встречаются слои нефтеносных песков. Эти слои, выклиниваясь на близких расстояниях, образуют линзовидные залежи. В северо-восточном крыле ПКС была вскрыта ограниченным количеством скважин и по литофациальному составу характеризуется плотными высококарбонатными породами. Эти породы общей мощностью в 140 м являются нефтеносными на юго-западном крыле и делятся на три разрабатываемых объекта: ПК-1, ПК-2, ПК-3 [9, 10].

КС представлена чередованием песчаника, слоистого, мелкозернистого песка и глин. Песчанность этих пород возрастает от северо-восточного крыла складки к юго-западному, а также от кровли к подошве. Следует отметить, что в разрезе этих отложений КС также выделены три продуктивных горизонта: КС-1, КС-2, КС-3. Песчанность растет в юго-восточном и северо-западном направлениях. Общая мощность КС на территории месторождения достигает 273 м.

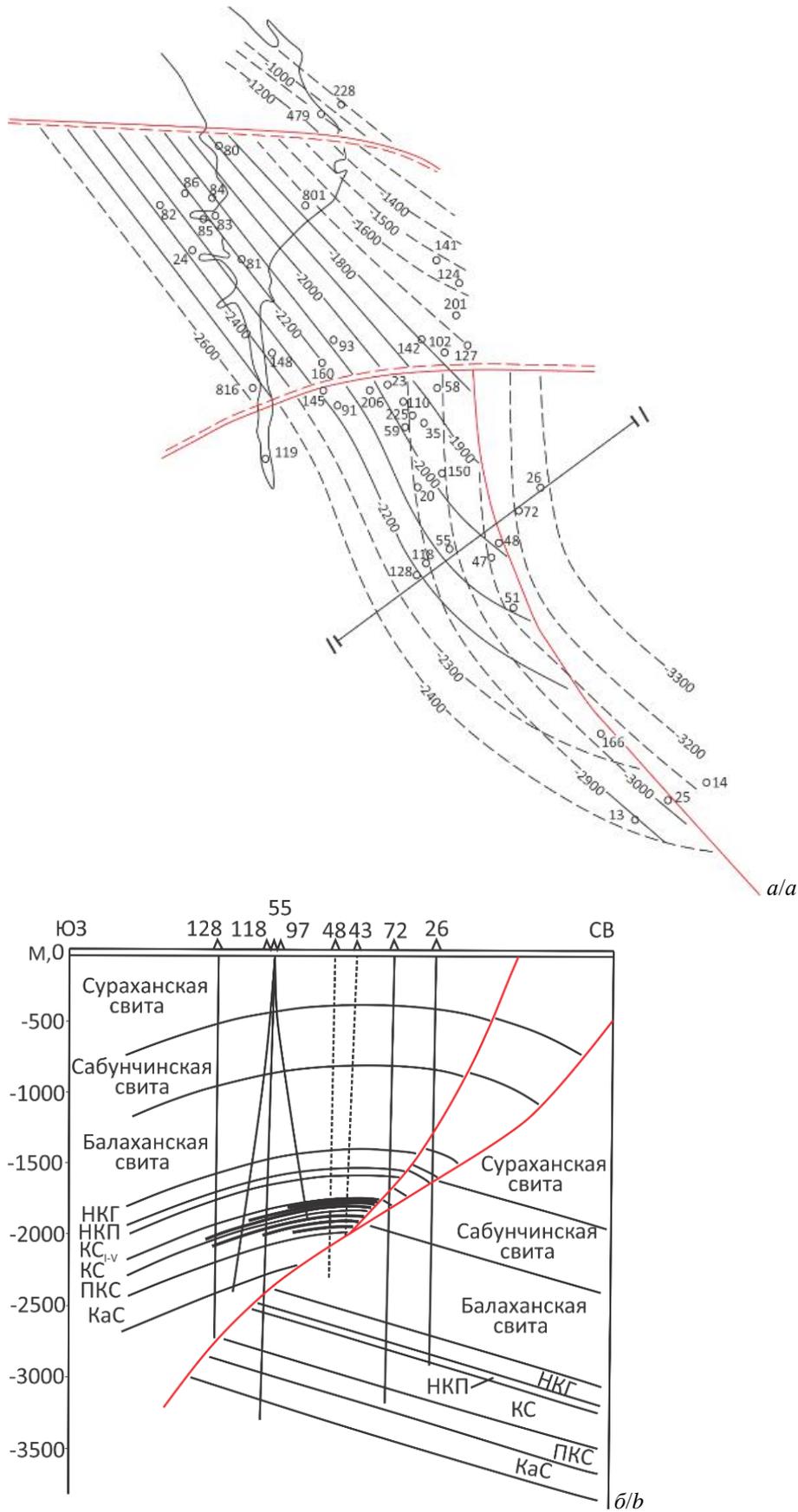


Рис. 3. Гюрган-дениз: а) структурная карта по кровли КаС ПТ; б) профиль по линии I-I
Fig. 3. Gurgan-deniz: a) structural map for the roof KaS PT roof; b) profile along line I-I

Надкирмакинская песчаная (НКП) свита представлена чередованием средне-, крупнозернистых песков и песаников с пропластками глин. Мощность достигает 40 м.

Надкирмакинская глинистая (НКГ) свита сложена глинами с песчаными пропластками. Мощность 195 м.

Свита «фасиля» мощностью в 85 м представлена песками с тонкими пропластками средне-, крупнозернистых песков и прослойками глин.

Балаханская свита характеризуется чередованием глин со средне- и мелкозернистыми песками. Мощность достигает 610 м.

Сабунчинская свита мощностью до 400 м состоит из чередования мелкозернистых песков с глинами.

Сураханская свита составлена глинами с мощными пластинами мелкозернистых песков, обнажающихся в сводовой части складки. Мощность достигает 310 м.

Отложения ачкагильского и абшеронского ярусов распространены от сводовой части складки к крыльям и в погребенной южной периклинали [10].

Поперечный разрыв амплитудой в 80 м, разделяющий месторождение Гюрган-дениз на два участка, имеет сбросовый характер (рис. 3, а, б).

Следует отметить, что юго-западное крыло складки Гюрган-дениз надвинуто на северо-восточное по продольному разрыву с вертикальной амплитудой в 750–800 м. Амплитуда надвига, увеличиваясь в южном направлении, достигает 1000 м.

Несмотря на то, что южная часть юго-западного надвинутого крыла КС (КСв-1, КСв-2, КСв-3) и КаС являются нефтеносными, запасы залежей, относящихся к данным свитам, незначительны.

В пределах как северного, так и южного участков этого же крыла ПКС является нефтеносной.

Нефтяные залежи КаС связаны с отдельными песчаными линзами, которые рассматриваются в качестве литологических ловушек.

На северо-восточном крыле складки (под надвигом) из двух скважин, вскрывших нижний отдел ПТ, была получена нефть [11].

Ловушки, в которых сформировались нефтяные залежи складки Гюрган-дениз, относятся к тектонически экранированным, литологически ограниченным и смешанным типам [8].

Поднятие Агбурун-дениз было обнаружено методом сейсморазведки в 1948 г. В последующие годы (1960–1980 гг.) наличие структуры Агбурун-дениз, расположенной вблизи юго-западного крыла Абшерон кюпеси, было подтверждено в результате проведенных с перерывами геофизических исследовательских работ [5].

Изменение петрофизических особенностей пород по глубине на изучаемых площадях.

Как известно, анализ изменения петрофизических особенностей пород по площади и глубине дает возможность определить изменение коллекторских свойств в тех же направлениях, а также оценить флюидное содержание природных резервуаров и перспективы их нефтегазоносности [12, 13].

Учитывая вышеуказанное, с целью изучения изменения петрофизических свойств пород на площадях Гошадаш, Агбурун-дениз, Дарвин-дениз, Гюрган-дениз до глубины 2800 м и их влияния на пористость и проницаемость были построены и проанализированы соответствующие диаграммы для площадей по отдельности.

Как видно из гистограммы для площади Гошадаш, в ее геологическом разрезе присутствуют как псефитовые, псаммитовые, алевроитовые, пелитовые фации терригенного происхождения, так и карбонатные фации различного содержания по глубине (рис. 4) [14].

Глубина	Псефит	Псаммит	Алевроит	Пелит	Карбонатность	Пористость	Проницаемость
400–550	34	37	18	6	5	27	680
550–700	18	20	22	16	4	21	240
700–850	23	24	23	24	6	17	200
850–1000	21	24	22	25	8	15	200
1000–1150	4	13	33	40	10	20	115
1150–1300	5	10	34	35	16	18	80
1300–1450	6	11	33	35	15	18	80
1450–1600	20	34	25	14	7	23	250
1600–1750	18	23	30	19	10	23	270
1750–1900	17	35	22	20	6	27	280
1900–2050	17	12	42	24	5	27	260
2050–2200	36	21	30	8	5	29	300
2200–2350	15	26	33	12	14	32	220
2350–2500	19	17	35	25	4	15	100
2500–2650	17	14	31	30	8	27	180

Рис. 4. Гистограммы петрофизических особенностей пород площади Гошадаш от глубины. Деление на свиты: 400–1300 – сураханская, сабунчинская, балаханская, НКГ, НКП, КС; 1200–2100 – ПКС, КаС, понтская (N²p); 2100–2600 – Мезозой (Mz)

Fig. 4. Histograms of petrophysical features of rocks Goshadash square from the depth. Division into suites: 400–1300 – Surakhan, Sabunchu, Balakhan, NKQ, NKP, KS; 1200–2100 – PKS, KaS, pont (N²p); 2100–2600 – Mesozoic (Mz)

Из гистограммы видно, что гранулометрический состав пород, сформировавшихся в интервале глубин 400–550 м, представлен до 34–36 % псефитовыми, на 37 % псаммитовыми, 18 % алевритовыми, до 6–8 % пелитовыми фациями, а карбонатность составляет 5 %. Породы данного состава характеризуются пористостью в 26–27 %, и проницаемостью 670–680 мД.

Слои пород, расположенные на следующем интервале 550–700 м, составлены в среднем на 18 % псефитами, 20 % псаммитами, 22 % алевритами, 36 % пелитами, карбонатность 4–6 %. В связи с резким увеличением пелитов и относительно малым ростом карбонатности наблюдается падение пористости до 21 %, а проницаемости – до 240 мД. Как отмечалось, причиной тому является рост карбонатности, пелитовой фации пород, а также относительно резкое уменьшение псефитовой фации.

Исследования показали, что породы интервала глубин 700–850 м характеризуются следующим составом: псефиты – 23 %, псаммиты – 24–25 %, алевриты и пелиты – 23–24 %, карбонатность – 6–8 %. В свою очередь, пористость составляет 17 %, а проницаемость чуть более 200 мД.

Уменьшение проницаемости связано с увеличением карбонатности и гранулометрически плохой отсортированностью пород [15, 16].

Слои пород, расположенные в интервале глубин 850–1000 м, имеют следующий гранулометрический состав: 21 % – псефиты, до 24–26 % – псаммиты, 22 % – алевриты, 25 % – пелиты. Как и на предыдущем интервале карбонатность здесь составляет 8 %. Пористость относительно предыдущего интервала (700–850 м) уменьшилась до 15 %, а проницаемость, незначительно уменьшившись, составила чуть более 200 мД.

В интервале 1000–1150 м комплексы пород состоят на 4–6 % из псефитов, 13–15 % – псаммитов, до 33 % – алевритов и 40–42 % – пелитов. Карбонатность выросла до 10 %. В результате пористость этих пород составляет 20 %, а проницаемость колеблется между 110–115 мД. Исследования показали, что при относительно высокой пористости настолько низкие величины проницаемости можно объяснить плохой отсортированностью зерен пород и увеличением карбонатности [14].

Комплексы пород, слагающие интервал в 1150–1300 м, до 5–6 % состоят из псефитов, 10–11 % – псаммитов, 34–35 % – алевритов и приблизительно на столько же – пелитов. Карбонатность – до 16 %. Надо отметить, что по сравнению с предыдущими интервалами этот показатель карбонатности достиг максимальных значений. Породы такого состава характеризуются уменьшением значений пористости до 17–18 %, а проницаемости – приблизительно, до 70–80 мД. Основными факторами, способствующими таким низким показателям проницаемости, являются высокое содержание карбонатности и пелитовой фации, а также падение содержания псефитовой фации до минимума в 5–6 %, и это отрицательно влияет на проницаемость.

На интервале глубин 1300–1450 м породы составлены на 6 % из псефитов, 11 % – псаммитов, 33 % –

алевритов и 35 % – пелитов. Карбонатность – около 15 %. Пористость пород данного состава – 22–23 %, а проницаемость – 240–250 мД.

На интервале глубин 1450–1600 м породы составлены на 20–22 % из псефитов, 34–36 % – псаммитов, 25–27 % – алевритов и 14–16 % – пелитов. Карбонатность – около 7–9 %. Пористость пород данного состава – 22–23 %, а проницаемость – 240–250 мД.

Комплексы пород, сформировавшиеся в интервале глубин 1600–1750 м, характеризуется следующим гранулометрическим составом: псефиты – 18 %, псаммиты – 23 %, пелиты – 19 %, алевриты – 30–33 %. При карбонатности в 10 % пористость составляет 23 %, а проницаемость – 260–270 мД.

Породы интервала 1750–1900 м характеризуются следующим составом: псефиты – 17–18 %, псаммиты – 35 %, алевриты – 22 %, пелиты – до 20 %. Карбонатность составляет – 6–7 %, пористость – 26–27 %, а проницаемость – 270–280 мД.

На глубинах 1900–2050 м фации псефита и псаммита составляют 17 и 12 %, алевриты – 42–43 %, пелиты – 24–25 %, а карбонатность – 5 %. Пористость этого комплекса пород составляет 26–27 %, а проницаемость достигает 250–260 мД. Относительно низкая проницаемость объясняется высоким содержанием пелитовой и алевритовой фаций.

Гранулометрический состав пород, сформировавшихся на глубинном интервале от 2050 до 2200 м, характеризуется следующим образом: псефиты – 36–37 %, псаммиты – 21–23 %, алевриты – до 30–32 %, всего 8–9 % пелиты. Карбонатность идентична предыдущим интервалам и составляет 5 %. Относительно высокое процентное содержание псефитовой фации, по сравнению с пелитовой и карбонатностью, стало причиной роста коэффициента пористости этих пород. Однако, несмотря на это, проницаемость пород характеризуется незначительным увеличением и достигает 300 мД.

В отложениях, соответствующих интервалу глубин 2200–2350 м, псефитовая фация составляет 15–17 %, псаммитовая – 26–29 %, алевритовая – 33–35 %. Процент пелитовой фации увеличивается, достигая 12–15 %. Карбонатность резко увеличивается до 14 %. Несмотря на то, что пористость увеличивается до 31–32 %, проницаемость уменьшается до 210–220 мД. Наиболее вероятно, что основной тому причиной является резкий рост карбонатности и уменьшение содержания псефитовой фации.

На интервале глубин 2350–2500 м содержание пелитов, незначительно увеличиваясь, достигает 19 %, тогда как содержание псаммитов падает до 17 %. Содержание алевритов и пелитов увеличивается и достигает, соответственно, 35 и 25 %. Карбонатность же пород резко падает, достигая 4–6 %. Пористость интервала составляет всего 15 %, а проницаемость колеблется между 90–100 мД.

На интервале 2500–2650 м состав пород представлен 17 % псефитами, 14 % псаммитами, 31 % алевритами и 30 % пелитами. Карбонатность увеличивается до 8 %. В результате пористость составляет 26–27 %, а проницаемость – 170–180 мД. Относительное уве-

личение проницаемости может быть обусловлено вторичной пористостью [17, 18].

При изучении изменения петрофизических свойств пород по глубине на площади *Агбурун-дениз* было выявлено, что в пластах, залегающих на глуби-

нах 400–550 м, псефиты составляют 22 %, псаммиты – 16 %, алевриты – 37 %, пелиты – 21 %, а карбонатность приблизительно равна 4 %. При таком составе пористость пород – 26–27 % и проницаемость – в среднем 773 мД (рис. 5).

Глубина	Псефит	Псаммит	Алеврит	Пелит	Карбонатность	Пористость	Проницаемость
400–550	22	16	37	21	4	27	524
550–700	23	18	25	30	4	29	773
700–850	31	24	13	27	5	16	860
850–1000	27	23	21	21	8	15	500
1000–1150	5	13	26	50	6	16	525
1150–1300	5	13	26	50	6	15	27
1300–1450	5	13	26	50	6	16	25
1450–1600	5	14	25	51	5	15	27
1600–1750	5	13	26	50	6	15	26
1750–1900	6	14	25	50	5	16	24
1900–2050	8	16	13	60	3	23	27
2050–2200	29	23	22	23	3	32	320
2200–2350	25	22	27	22	4	32	350
2350–2500	19	18	38	22	3	35	340
2500–2650	20	17	38	21	4	32	420

Рис. 5. Гистограммы изменения петрофизических особенностей пород площади *Агбурун-дениз* от глубины. Деление на свиты: 400–1200 – *сураханская, сабунчинская, балаханская*; 1200–2600 – *НКГ, НКП, КС, ПКС, КаС*

Fig. 5. Histograms of changes in petrophysical features of rocks *Aghburun-deniz* square with the depth. Division into suites: 400–1200 – *Surakhan, Sabunchu, Balakhan*; 1200–2600 – *NKQ, NKP, KS, PKS, KaS*

В осадочном комплексе следующего интервала, т. е. на глубинах 550–700 м, содержание псефитов изменяется между 23–25 %, псаммитов – 18 %, алевритов – 25–26 %, пелитов – 30–32 %, тогда как в процентном содержании карбонатов, по сравнению с предыдущим интервалом, изменений нет. Пористость таких пластов составляет 28–29 %, а проницаемость – между 850–860 мД.

На интервале глубин в 700–850 м отложения характеризуются следующим образом: псефитовая и псаммитовая фации увеличиваются, на 31 и 24 %, алевритовая и пелитовая фации уменьшаются на 13 и 27 %. В условиях относительного роста карбонатности наблюдается относительное уменьшение пористости до 15–16 % и резкое снижение проницаемости до 490–500 мД.

Вдоль всего интервала 850–1000 м породы характеризуются наличием псефитовой фации – 27 %, псаммитовой – 23 %, общим содержанием алевритовой и пелитовой фаций – 42–44 %. Карбонатность пород данного интервала повторно характеризуется ростом и достигает 8 %. Пористость в 14–15 % имеет минимальную величину именно в пределах данного интервала. Несмотря на пониженную пористость, относительно резкое сокращение пелитовой фации оказывает положительное влияние на значение проницаемости, которая, увеличиваясь, достигает 520–525 мД.

Интервалы глубин 1000–1150, 1150–1300, 1300–1450, 1600–1750 и 1750–1900 м характеризуются схожими петрофизическими показателями. В среднем эти по-

роды сложены псефитами – 5–6 %, псаммитами – 13–14 %, алевритами – 26 % и на более чем на 50–52 % пелитами. Такой высокий показатель пелитовой фации привел к резкому падению значения карбонатности (6 %) и даже пористости (15–16 %) с проницаемостью (до 27 мД).

Следующий интервал – 1900–2050 м – характерен повышением показателей псефитовой и псаммитовой фаций (8–16 %), резким понижением пелитов (60 %), и относительным уменьшением карбонатности (3 %), а алевриты составляют 13 %. В результате в данном интервале наблюдается относительный рост пористости и резкое увеличение проницаемости до отметки 320 мД [19, 20].

Кроме некоторых исключений, наблюдаются соответствующие изменения в петрофизических особенностях пород, сформировавшихся в интервалах 2050–2200, 2200–2350, 2350–2500, 2500–2650 м – уменьшение содержания пелитовой фации и карбонатности сопровождается повышением пористости и проницаемости.

С целью изучения изменения петрофизических особенностей пород на площади *Дарвин кюпеси* по глубине были исследованы отдельные глубинные интервалы [12]. Следует отметить, что процентное содержание гранулометрического состава пород глубинного интервала 400–550 м нижеследующий: псефиты – приблизительно 2 %, псаммиты – 30–32 %, алевриты – 28–30 % и пелиты – до 40 %. Карбонатность – не выше 2–3 %. Пористость пород такого со-

става – до 21–22 %, а проницаемость – до 75–80 мД (рис. 6).

В следующем интервале (550–700 м) содержание псефитов, по сравнению с предыдущим, почти не изменяется. На фоне относительного увеличения псаммитовой и алевритовой фаций, составляющих, соответственно, 36 и 45 %, наблюдается резкое уменьшение пелитовой фации до 15 %. Как видно из гисто-

грамм, низкое содержание пелитовой фации в разрезе сопровождается ростом показаний пористости и проницаемости.

В интервале 700–850 м содержание псефитов составляет 2 %, псаммитов – 3 %, алевритов и пелитов в сумме 90 %, карбонатность – около 5 %. Пористость пород с таким составом – 30–31 %, а проницаемость – 70–80 мД.

Глубина	Псефит	Псаммит	Алеврит	Пелит	Карбонатность	Пористость	Проницаемость
400–550	2	30	28	38	2	22	80
550–700	2	36	45	15	2	21	120
700–850	2	3	44	46	5	31	80
850–1000	2	10	56	27	5	33	170
1000–1150	20	20	29	25	6	27	115
1150–1300	20	20	29	25	6	27	115
1300–1450	3	31	41	20	5	25	40
1450–1600	4	20	40	26	10	23	115
1600–1750	9	48	22	18	3	23	120
1750–1900	2	32	30	31	5	26	155
1900–2050	12	27	36	17	8	23	110
2050–2200	13	30	28	25	4	22	115
2200–2350	13	30	28	25	4	22	115
2350–2500	4	24	42	21	9	25	35
2500–2650	3	27	40	20	10	27	180

Рис. 6. Гистограммы изменения петрофизических особенностей пород площади Дарвин-дениз от глубины. Деление на свиты: 400–1200 – сураханская, сабунчинская, балаханская, НКГ; 1200–2600 – НКП, КС, ПКС, КаС, N²p

Fig. 6. Histograms of changes in petrophysical characteristics of rocks of Darwin-denez square with the depth. Division into suites: 400–1200 – Surakhan, Sabunchu, Balakhan, NKQ; 1200–2600 – NKP, KS, PKS, KaS, N²p

Комплексы пород глубинного интервала 850–1000 м содержат 2–3 % псефитов, 10–12 % псаммитов, 56 % алевритов, 27–29 % пелитов, карбонатность не изменилась. Пористость, в свою очередь, составляет 33 %, а проницаемость увеличивается до 170 мД.

Несмотря на рост псефитов до 20–22 %, псаммитов до 20–21 %, в интервале 1000–1150 и 1150–1300 м наблюдается падение в содержании алевритов и пелитов (29 и 25 %). Карбонатность характеризуется определенным уменьшением пористости и проницаемости.

В интервале глубин 1300–1450 м содержание псефитов составляет 3 %, псаммитов – 31 %, алевритов – 41 % и пелитов – 20 %. Карбонатность – около 5 %. Пористость – до 24–25 %, а проницаемость – до 35–40 мД.

В следующем интервале – 1450–1600 м – фациальный состав пород, следующий: псефиты – 4–5 %, псаммиты – 20–22 %, алевриты – 40–42 %, пелиты – 26–28 %, процентное содержание карбонатности достигает 10 %, и несмотря на то, что это сопровождается уменьшением значений пористости, данное положение не оказало большого влияния на проницаемость.

В интервале 1600–1750 м содержание псефитов упало до 9 %, псаммитов – до 48–50 %, алевритов – до 22–23 %, пелитов – до 18–20 %, а карбонатность составляет 3–4 %. Пористость остается той же, что и

в предыдущем интервале, а в показаниях проницаемости наблюдается рост.

Породы интервала 1750–1900 м характеризуются минимальным процентным содержанием псефитов (1–2 %), псаммитов – до 32–33 %, алевритов и пелитов в сумме 61–63 %. Карбонатность пород данного состава – 5–6 %, пористость – 25–26 %, а проницаемость равна 150–155 мД.

Комплексы пород, расположенных на глубинах 1900–2050 м, характеризуются повторным резким (12–16 %) ростом псефитов, у псаммитов этот показатель близок к 27–30 %, у алевритов – к 36–38 %, у пелитов – к 17–20 %. Содержание карбонатов – между 8–10 %. Пористость пород данного состава близка к 22–23 %, проницаемость – около 110 мД.

В интервалах глубин 2050–2200 и 2200–2350 м наблюдается схожесть в изменениях петрофизических особенностей пород. Надо отметить, что процентное содержание псефитов составляет 13–14 %, псаммитов – 30 %, алевритов – приблизительно 28 %, а у пелитов уменьшение до 25–26 %. Показатель карбонатности также уменьшается и достигает 4 %. Относительно предыдущего интервала пористость и проницаемость незначительно уменьшаются.

На глубинах 2350–2500 м в породах процентное содержание псефитов составляет в среднем 4 %, псаммитов – 24 %, алевритов – 42 %, а пелитов – 21 %. Показатель

затель карбонатности, достигая максимума, составляет 9–11 %. Показатели пористости и проницаемости составляют, соответственно, 24–25 % и 34–35 мД.

В породах, слагающих последний интервал глубин 2500–2650 м, за исключением псаммитовой фации, вышеуказанные параметры стабильно поддерживают свои тенденции.

На площади *Гюрган-дениз* изменение петрофизических особенностей пород по глубине начинается с интервала 400–550 м. Осадочный комплекс, сформировавшийся на этом интервале, характеризуется малым суммарным содержанием псефитовой и псаммитовой фракций, составляющим приблизительно 8 %.

Надо отметить, что алевриты характеризуются относительно высоким (57 %) содержанием. Содержание же пелитов, по сравнению с последним, намного ниже – 25 %. Карбонатность на данном интервале глубин относительно высокая – 10 %. Относительно высокая пористость оказывает положительное влияние на проницаемость пород – 250–260 мД (рис. 7).

Глубина	Псефит	Псаммит	Алеврит	Пелит	Карбонатность	Пористость	Проницаемость
400–550	3	5	57	25	10	22	260
550–700	2	12	39	42	5	12	90
700–850	4	6	40	43	7	16	190
850–1000	24	33	20	11	12	21	240
1000–1150	9	13	31	31	16	19	235
1150–1300	12	42	15	30	1	16	220
1300–1450	20	21	19	31	9	25	280
1450–1600	23	24	18	25	10	25	280
1600–1750	15	21	19	34	11	23	180
1750–1900	9	25	30	29	7	18	220
1900–2050	5	26	27	27	15	17	200
2050–2200	22	21	24	21	12	22	28
2200–2350	23	22	19	22	14	21	60
2350–2500	22	21	24	21	12	15	100
2500–2650	23	21	23	21	12	27	180

Рис. 7. Гистограммы изменения петрофизических особенностей пород площади *Гюрган-дениз* от глубины. Деление на свиты: 400–1200 – сураханская, сабунчинская, балаханская; 1200–2600 – НКГ, НКП, КС, ПКС, КаС

Fig. 7. Histograms of changes in petrophysical characteristics of rocks *Gyurgan-deniz* square with the depth. Division into suites: 400–1200 – Surakhan, Sabunchu, Balakhan; 1200–2600 – NKQ, NKP, KS, PKS, KaS

Пласты пород, охватывающих интервал 550–700 м, представлены в среднем на 2–3 % псефитами, 12–15 % – псаммитами и высоким суммарным содержанием – 80–85 % – алевритовой и пелитовой фаций. Этот интервал глубин характеризуется низкими значениями пористости и проницаемости. Основной причиной, вероятно, является низкое процентное (около 5 %) содержание карбонатов на фоне высокого процентного содержания алевритов и пелитов.

Породы интервала 700–850 м представлены до 4 % псефитами, до 6 % – псаммитами, до 40 % – алевритами и до 43 % – пелитами. Вышеотмеченная тенденция наблюдается и на этом интервале. В условиях резкого различия процентного содержания крупно- и мелкозернистых частиц и определенного роста карбонатности (7 %) породы характеризуются низкими значениями пористости (15–16 %) и проницаемости (180–190 мД).

На интервале 850–1000 м комплекс пород характеризуется следующим составом: 24 % – псефиты, 33–35 % – псаммиты, алевриты и пелиты с общим содержанием в 31 %. Карбонатность составляет 12 %. Породы с данным составом характеризуется хорошей отсортированностью и, в сравнении с предыдущими интервалами, высокой пористостью, что способствует увеличению значений проницаемости, которая достигает 240 мД [21].

Породы, представляющие следующий глубинный интервал – 1000–1150 м, составлены на 9 % из псефитов, 13 % – псаммитов, 31 % – алевритов и настолько же – пелитовыми фациями. Карбонатность достигает своего максимального значения именно на этом интервале (16 %), и этот рост сопровождается понижением значений пористости и проницаемости, достигая 18–19 % и 230–235 мД.

На глубине 1150–1300 м комплекс пород характеризуется следующим гранулометрическим составом: псефиты – 12–14 %, псаммиты – 42–44 %, алевриты – 15–17 % и пелиты – приблизительно 30 %. Карбонатность резко уменьшается до 0–1 %. При таком составе пористость пород составляет 15–16 %, а проницаемость около 215–220 мД.

Породы интервала 1300–1450 м представляют собой псефиты на 20–22 %, псаммиты – 21 %, алевриты – 19 % и пелиты – 31–32 %. По сравнению с предыдущим интервалом карбонатность пород здесь, резко увеличиваясь, достигает отметки в 9 %. При таком гранулярном составе породы имеют пористость 24–25 %, и проницаемость – 270–280 мД.

Четыре фации, образующие породы интервала 1450–1600 м, характеризуются следующим содержанием: псефиты – 23 %, псаммиты – 24 %, алевриты – 18 %, пелиты – 25 %. Карбонатность – около 10 %.

Пористость и проницаемость приблизительно идентичны предыдущему интервалу.

Интервал 1600–1750 м характеризуется 15 % псефитами, 21 % – псаммитами и 19 % – алевритами и 34 % пелитами. В условиях увеличения содержания пелитовой и карбонатной фаций (11 %) значение проницаемости падает, достигая 180–185 мД.

Породы, соответствующие интервалу 1750–1900 м, составлены псефитами – 9 %, псаммитами – 25 %, алевритами – 30 % и незначительно меньшим содержанием пелитовой фации (29 %). В условиях уменьшения карбонатности (7 %) и пористости наблюдается увеличение проницаемости, значение которой достигает 215–220 мД.

Комплексы пород, представленные на интервале 1900–2050 м, характеризуются незначительным содержанием (5 %) псефитов, приблизительно равным содержанием псаммитов, алевритов и пелитов в 26, 27, 27 %. При значениях карбонатности 15 % показатели пористости и проницаемости уменьшаются, соответственно, до 15–17 % и 200 мД.

Породы в промежутке глубин 2050–2200 м составлены псефитами на 22 %, псаммитами – 21 %, алевритами – 24 % и пелитами – 21 %. Карбонатность падает до 12 %. Пористость – 21–22 %, проницаемость – 26–28 мД.

На интервалах 2200–2350 и 2500–2650 м наблюдается приблизительно одинаковое увеличение содержания псефитов, псаммитов, пелитов и карбонатности, сокращение алевритовой фации. Это положение оказывает отрицательное влияние на коллекторские свойства пород.

Из нижнего отдела ПТ (ПКС и КС) на двух месторождениях – Дарвин кюпеси и Гюрган-дениз, расположенных на исследуемой антиклинальной линии, были получены промышленные притоки нефти [10, 11]. Свиты ПТ расположены на интервале глубин исследуемых нами пород. В коллекторских свойствах

отложений ПТ в пределах интервала исследований по глубине на площадях Гошадаш, Агбурун-дениз, Дарвин кюпеси, Гюрган-дениз, расположенных на антиклинальной линии, не наблюдается (за исключением ряда интервалов) какой-либо закономерности. Учитывая вышеуказанное, можно высказать предположение о наличии скоплений углеводородов в отложениях нижнего ПТ в структурах Гошадаш и Агбурун-дениз, расположенных на той же антиклинальной линии, что и месторождения Дарвин кюпеси и Гюрган-дениз.

Выводы

1. Между коллекторскими свойствами и карбонатностью, глинистостью пород в изучаемом интервале глубин на площадях Гошадаш, Агбурун-дениз, Дарвин кюпеси, Гюрган-дениз наблюдается в основном обратное соотношение.
2. В особенностях изменения петрофизических параметров отложений продуктивной толщи по глубине на структурах Гошадаш, Агбурун-дениз, а также на месторождениях Дарвин кюпеси, Гюрган-дениз, за исключением некоторых коротких интервалов, не наблюдается какой-либо закономерности (т. е. линейности).
3. На основании фонтанов нефти дебитом 42 т/сут. из ПКС в скважине 726, пробуренной на месторождении Дарвин кюпеси, а также дебитом 20 т/сут. из КС в скважине 813, полученной во время испытательных работ 10 т/сут. нефти из ПКС в скважине 7, пробуренной на месторождении Гюрган-дениз, и идентичной степени изменения коллекторских свойств пород в структурах Гошадаш и Агбурун-дениз, расположенных на той же антиклинальной линии, что и вышеуказанные месторождения, можно предположить наличие и в этих структурах углеводородных скоплений в одноименных отложениях.
4. Subsidence history and hydrocarbon migration modeling in South Caspian Basin / К.Н. Каграманов, М.С. Бабаев, Х.З. Мухтарова, С.Г. Шпырко // Вестник Киевского национального университета имени Т. Шевченко. Геология. – 2020. – № 1 (88). – С. 82–91.
5. Мухтарова Х.З. Особенности геологического строения и перспективы некоторых месторождений Абшеронского нефтегазонасыщенного района // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2017. – № 2. – С. 3–13.
6. Мухтарова Х.З., Насибова Г.Д. Перспективы нефтегазонасыщенности Северо-Абшеронского архипелага Южно-Каспийской впадины в связи с тектоническим развитием структур // Web of Scholar. Multidisciplinary Scientific Journal. – 2019. – № 10 (40). – P. 16–23.
7. Атлас нефтегазонасыщенных и перспективных структур Азербайджана / под ред. Т.А. Исмаил-заде. – Л.: Всесоюзный НИИ, 1987. – 132 с.
8. Нариманов Н.Р., Бабаев М.С., Джахангиров Е.Х. Эффективная пористость и нефтенасыщенность ПК, КС и НКП свит площади банка Дарвина в связи с особенностями распределения их фаций // Теоретические и практические аспекты современной науки: Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. – Минск, 22 марта 2018. – Т. 2. – С. 143–149.
9. Мухтарова Х.З., Насибова Г.Д. О продуктивности и петрофизических характеристиках коллекторов северной части Бакинского архипелага // Web of Scholar. Multidisciplinary Scientific Journal. – 2019. – № 9 (39). – P. 21–29.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусейнов Б.Б., Салманов А.М., Магеррамов Б.И. Нефтегазогеологическое районирование территории суши Азербайджана. – Баку: «Марс Принт», 2019. – 308 с.
2. Нариманов Н.Р., Гурбанов В.Ш. Прогноз перспектив нефтегазонасыщенности выступов фундамента Южно-Каспийской мегавпадины // Вестник Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2016. – № 19. – Т. 15. – С. 132–144.
3. Юсифов Х.М., Асланов Б.С. Нефтегазонасыщенные бассейны Азербайджана. – Баку: Изд-во: «Марс Принт», 2018. – 324 с.
4. Нариманов Н.Р. К тектонике Абшеронского архипелага // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1992. – № 10. – С. 1–5.
5. Уточнение тектонического строения структуры Агбурун-дениз на основе новых геолого-геофизических данных, перспективности нефтегазонасыщенности и открытия мезозойских отложений / Н.А. Меджидов, М.Н. Юсифов, А.К. Омаров, М.М. Сеидов, М.А. Мамедова // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2015. – № 3. – С. 3–8.
6. Сулейманов А.М. Региональные структурно-тектонические особенности северо-западной части Абшеронского архипелага // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 3–11.
7. Мехтиев Р.Г., Омаров А.К. Нефтегазонасыщенность миоцен-палеогеновых и мезозойских отложений Абшеронского архипелага // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2004. – № 5. – С. 1–8.

14. Рыкус М.В. О влиянии вторичных преобразований на качество терригенных пород-коллекторов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2018. – № 12. – С. 40–45.
15. Cannon S. Petrophysics: a practical guide. – India: Wiley&Sons Ltd, 2015. – 224 p.
16. Tiab D., Donaldson E.C. Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. – Oklahoma: Elsevier, 2011. – 976 p.
17. Yang Shenglai. Fundamentals of Petrophysics. – China, 2017. – 471 p.
18. Buryakovskiy L.A., Chilingar G.V., Aminzadeh F. Petroleum geology of the South Caspian basin. – Boston: Butterworth-Heinemann, 2001. – 442 p.
19. Sedimentation in a discharge dominated fluvial-lacustrine system: the Neogene productive series of the south Caspian Basin, Azerbaijan / D.J. Hinds, E. Aliyeva, M.B. Allen, C.E. Davies, S.B. Kroonenberg, M.D. Simmons, S.J. Vinsent // Marine and Petroleum Geology. – 2004. – № 21. – P. 613–638.
20. Provenance patterns in a neotectonic basin: Pliocene and Quaternary sediment supply to the South Caspian / A. Morton, M. Allen, M. Simmons, F. Spathopoulos, J. Still, D. Hinds, A. Ismail-Zadeh, S. Kroonenberg // Basin Research. – 2003. – V. 15. – P. 321–337.
21. Contrasting pliocene fluvial depositional systems within the rapidly subsiding south Caspian basin: a case study of the Paleo-Volga and Paleo-Kura river systems in the Surakhany suite, upper productive series, onshore Azerbaijan / S.J. Vincent, C.E. Davies, K. Richard, E. Alieva // Marine and Petroleum Geology. – 2010. – № 27. – P. 2079–2106.

Поступила 12.05.2021 г.

Информация об авторах

Мухтарова Х.З. гызы, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Азербайджанский Государственный университет нефти и промышленности.

Насибова Г.Д. гызы, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Азербайджанский Государственный университет нефти и промышленности.

UDC 553. 98(479.24): 550.8.072

EVALUATION OF OIL AND GAS CONTENT OF LOCAL UPLIFTS IN THE NORTH ABSHERON ZONE BASED ON PETROPHYSICAL PARAMETERS (LOCAL UPLIFTS GOSHADASH–AGBURUN-DENİZ–DARWIN KYUPESI–GYURGYAN-DENİZ AS AN EXAMPLE)

Khuraman Ziyadkhan kizi Mukhtarova¹,
mukhtarova.khuraman@mail.ru

Gultar Jumshud kizi Nasibova¹,
gultar_nasibova_1@yahoo.com

¹ Azerbaijan State Oil and Industry University,
34, Azadlig avenue, Baku, AZ1010, Azerbaijan.

The paper considers the properties of changes in the rocks petrophysical parameters of the local Goshadash, Agburun-deniz, Darwin kyupesi and Gyurgyan-deniz uplifts within the 400–2650 m depths interval, and the relevant diagrams were mapped. Analysis of the areal and depth changes in the petrophysical characteristics of rocks makes it possible to determine changes in their reservoir properties, as well as to relatively objectively assess both the fluid content and the prospects for the oil and gas potential of the reservoirs. Changes in the rock petrophysical properties and their impact upon porosity and permeability of the Goshadash, Agburun-deniz, Darwin kyupesi and Gyurgyan-deniz uplifts up to 2650 m deep were individually analyzed. The diagrams drawn based on petrophysical data show that psephitic, psammitic, silt and pelitic facies of terrigenous origin, as well as carbonate facies in the section in various ratios. As a rule, there is inverse relation between carbonate and shale content and reservoir properties and direct relation with grain sorting. This pattern is breached in exceptional cases, when reservoir properties are, probably, associated with increase in rock viscosity and formation of secondary porosity. Formation of secondary porosity at relatively greater depths, therefore, does not exclude the presence of hydrocarbon accumulations.

Relevance. The North Absheron uplifts zone, located close to rich oil and gas condensate fields, covers a large territory originating from the northwest of the Absheron peninsula and extending southeastwards. Goshadash, Agburun-deniz, Darwin kyupesi and Gyurgyan-deniz offshore uplifts under study are situated here. Productive series, that are the primary oil and gas bearing complex, are located at a relatively shallow depth, within the reach of modern technology. The construction and analysis of petrophysical models can play an important role in predicting oil and gas potential of the productive series and underlying sediments. This can lead to the discovery of new oil and gas accumulations and increase in oil production.

The aim of the research is to study the lithofacies and reservoir properties of rocks along the total depth based on petrophysical models built according to geological and geophysical data and well data.

Subject: productive series sediments of the Goshadash, Agburun-deniz, Darwin kyupesi and Gyurgyan-deniz fields.

Methods. The reservoir properties of sediments in the 400–2650 m depth interval of the Goshadash, Agburun-deniz, Darwin Kupesi and Gyurgan-deniz areas were researched on the basis of a laboratory study of core samples taken in wells. The above study interval was divided into several short intervals, each 150 m deep, and 20 to 40 core samples were taken from each interval, analysis was carried out, their particle size distribution, carbonate content, porosity and permeability were established. As a result of this analysis, for each of the 150 m intervals, the average values for the above parameters were presented, on the basis of which we built histograms.

Results. The inverse relationship is mainly observed between reservoir properties and carbonate and shale content within the depth interval under investigation in the fields of Goshadash, Agburun-deniz, Darwin kyupesi, Gyurgan-deniz. With the exception of some short intervals no pattern (i. e. linearity) is observed in the variation properties of petrophysical parameters of the productive series deposits along the depth in Goshadash, Agburun structures and Darwin kyupesi, Gurgan-deniz fields as well. Based on 42 ton/day flow rate of well 726 from PKS drilled at the Darwin kyupesi field and 20 ton/day flow rate of well 813 from KS oil gushers, 10 ton/day of oil obtained from PKS while testing well 7 drilled at the Gyurgan-deniz field and identical variation degree of rock reservoir properties in the Goshadash and Agburun-deniz structures located on the same anticlinal line as the field above one can assume the presence of hydrocarbon accumulations in identical deposits of these structures.

Key words:

Sediments, petrophysical properties, pelites, psammites, silts, carbonate content, porosity, permeability.

REFERENCES

- Guseynov B.B., Salmanov A.M., Magerramov B.I. *Nefteqazogeologicheskoe rayonirovanie territorii sushi Azerbaydjana* [Oil and gas geological zoning of the land territory of Azerbaijan]. Baku, Mars-Print Publ., 2019. 308 p.
- Narimanov N.R., Gurbanov V.S. Forecast of the oil and gas potential of the basement ledges of the South Caspian megadepression. *Vesnik Permskogo Natsionalnogo issledovatel'skogo Politekhničeskogo Universiteta. Geologiya, neftegazovoe i qornoe delo*, 2016, no. 19, vol. 15, pp. 132–144. In Rus.
- Yusifov Kh.M., Aslanov B.S. *Neftegazonosnye bassejny Azerbaydjana* [Oil and gas basins of Azerbaijan]. Baku, Mars Print Publ., 2018. 324 p.
- Narimanov N.R. To the tectonics of the Absheron archipelago. *Azerbaydjanskoe Neftanoe Khozyaystvo*, 1992, no. 10, pp. 1–5. In Rus.
- Medzhidov N.A., Yusifov M.N., Omarov A.K., Seidov M.M., Mamedova M.A. Clarification of the tectonic structure of the Agburun-deniz structure based on new geological and geophysical data, oil and gas potential and the discovery of Mesozoic deposits. *Azerbaijan Oil Industry*, 2015, no. 3, pp. 3–8.
- Suleymanov A.M. Regional structural and tectonic features of the northwestern part of the Absheron archipelago. *Azerbaijan Oil Industry*, 2007, no. 4, pp. 3–11.
- Mekhtiyev R.G., Omarov A.K. Oil and gas potential of the Miocene–Paleogene and Mesozoic deposits of the Absheron archipelago. *Azerbaijan Oil Industry*, 2004, no. 5, pp. 1–8.

8. Kagramanov G.N., Babaev M.S., Mukhtarova Kh.Z., Shpirko S.G. Subsidence history and hydrocarbon migration modeling in South Caspian Basin. *Bulletin of the T. Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2020, no. 1 (88), pp. 82–91. In Rus.
9. Mukhtarova Kh.Z. Features of the geological structure and prospects of some fields of the Absheron oil and gas region. *Azerbaijan Oil Industry*, 2017, no. 2, pp. 3–13.
10. Mukhtarova Kh.Z., Nasibova G.J. Prospects for the oil and gas content of the North Absheron archipelago of the South Caspian depression in connection with the tectonic development of structures. *Web of Scholar. Multidisciplinary Scientific Journal*, 2019, no. 10 (40), pp. 16–23. In Rus.
11. *Atlas neftegazonosnykh i perspektivnykh struktur Azerbayjana* [Atlas of oil and gas and prospective structures of Azerbaijan]. Ed. by T.A. İsmail-zade. Leningrad, Vsesoyuzny NIGI, 1987. 132 p.
12. Narimanov N.R., Babaev M.S., Dzhakhangirov E.Kh. Effektivnaya poristost i neftenasishenie podkirmakinskoy (PK), kirmakinskoy (KS) i nadkirmakinskoy (NK) svit ploshchadi Darvina v svyazi s osobennostyami raspredeleniya ikh fatsiy [Effective porosity and oil saturation under the Kirmakinskaya, Kirmakinskaya and above the Kirmakinskaya formations of the Darwin Jug area due to the peculiarities of the distribution of their facies]. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty sovremennoy nauki. Materialy Mezhdunarodnoy (zaochnoy) nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theoretical and practical aspects of modern science. Materials of the International (correspondence) scientific-practical conference]. Minsk, 22 March 2018. No. 2, pp. 143–149.
13. Mukhtarova Kh.Z., Nasibova G.J. On productivity and petrophysical characteristics of reservoirs in the northern part of the Baku archipelago. *Web of Scholar. Multidisciplinary Scientific Journal*, 2019, no. 9 (39), pp. 21–29. In Rus.
14. Rikus M.V. On the influence of secondary transformations on the quality of terrigenous reservoir rocks. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2018, no. 12, pp. 40–45. In Rus.
15. Cannon S. *Petrophysics: a practical guide*. India, Wiley&Sons Ltd, 2015. – 224 p.
16. Tiab D., Donaldson E.C. *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Oklahoma, Elsevier, 2011. 976 p.
17. Yang Shenglai. *Fundamentals of petrophysics*. China, Электронная книга, 2017. 471 p.
18. Buryakovskiy L.A., Chilingar G.V., Aminzadeh F. *Petroleum geology of the South Caspian Basin*. Boston, Butterworth-Heinemann, 2001. 442 p.
19. Hinds D.J., Aliyeva E., Allen M.B., Davies C.E., Kroonenberg S.B., Simmons M.D., Vinsent S.J. Sedimentation in a discharge dominated fluvial-lacustrine system: the Neogene productive series of the south Caspian Basin, Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, no. 21, pp. 613–638.
20. Morton A., Allen M., Simmons M., Spathopoulos F., Still J., Hinds D., Ismail-Zadeh A., Kroonenberg S. Provenance patterns in a neotectonic basin: Pliocene and Quaternary sediment supply to the South Caspian. *Basin Research*, 2003, vol. 15, pp. 321–337.
21. Vincent S.J., Davies C.E., Richard K., Alieva E. Contrasting pliocene fluvial depositional systems within the rapidly subsiding south Caspian basin: a case study of the Paleo-Volga and Paleo-Kura river systems in the Surakhany suite, upper productive series, onshore Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, no. 27, pp. 2079–2106.

Received: 12 May 2021.

Information about the authors

Khuraman Ziyadkhan kizi Mukhtarova, Cand. Sc., associate professor, Azerbaijan State Oil and Industry University.
Gultar Jumshud kizi Nasibova, Cand. Sc., associate professor, Azerbaijan State Oil and Industry University.

УДК 553.76 (571.5)

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ИЗОТОПНОМУ СОСТАВУ ($\delta^{13}\text{C}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ И $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) РАССОЛОВ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Новиков Дмитрий Анатольевич^{1,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Пыряев Александр Николаевич^{3,2},
pyrayev@igm.nsc.ru

Черных Анатолий Витальевич¹,
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Дульцев Федор Федорович¹,
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Ильин Александр Владимирович⁴,
IlinAV@alrosa.ru

Чертовских Евгений Олегович⁵,
chertovskih_eo@irkutskoil.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6.

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

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

⁴ Октябрьская геологоразведочная партия, Вилюйская геологоразведочная экспедиция, АК «АЛРОСА» (ПАО), Россия, 678170, г. Мирный, ул. Ленина, 6.

⁵ Проектный офис «Рассолы», ООО «Иркутская Нефтяная Компания», Россия, 664007, г. Иркутск, пр. Большой Литейный, 4.

Актуальность исследования обусловлена получением новых данных по изотопной геохимии сверхкрепких рассолов Сибирской платформы.

Цель: выявить особенности генезиса рассолов и растворенной в них углекислоты, а также взаимодействия вод с окружением.

Методы. Полевое опробование проведено в соответствии с общепринятыми методиками. Химико-аналитические исследования выполнены методами титриметрии, ионной хроматографии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Определение δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ проводилось на приборе Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253, снабженном приставками пробоподготовки H/Device (для анализа δD) и GasBench II (для анализа $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$). Изотопные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ изучались на масс-спектрометре MI 1201T в двухленточном режиме с регистрацией на одном коллекторе.

Результаты. Представлены новые изотопно-геохимические данные по сверхкрепким рассолам Сибирской платформы широкого стратиграфического диапазона (от рифея до ордовика). Для изученных рассолов характерен широкий интервал относительных концентраций дейтерия и кислорода-18: от -133 до $-17,5$ ‰ для δD и от $-17,0$ до $-2,5$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$. На основании значений кислородных и водородных дельт рассолов предполагается их седиментационно-метаморфический генезис. Значения $\delta^{13}\text{C}$ для DIC рассолов варьируют в диапазоне от -31 до $+12,7$ ‰. Предполагается биогенное (бактериальное) происхождение растворенной в водах углекислоты. В среднем переход от более молодых комплексов к более древним сопровождается обогащением DIC легким изотопом углерода. Стронциевые отношения изученных рассолов делят их на две группы: с отношениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, близкими к значениям в водах современного океана, и со значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, существенно их превышающими. Предполагается, что для рассолов второй группы захоронение вод происходило в присутствии обломочного материала выветривания континентальной коры, обогащенного радиоактивным ^{87}Rb .

Ключевые слова:

Рассолы, относительное содержание стабильных изотопов $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, δD , изотопные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, взаимодействие в системе вода – горная порода, метаногенез, SMT-процессы, Сибирская платформа, Арктика.

Введение

Рассолы Сибирской платформы и вмещающие их горные породы привлекают огромное внимание исследователей на протяжении нескольких десятилетий как с точки зрения стабильной изотопии, так и с позиции рубидий-стронциевых отношений. Изотопные исследова-

ния проводятся с 1970-х гг. Отдельные исследования посвящены геохимии изотопов кислорода, водорода, хлора, брома и стронция рассолов [1–9]. Изучены такие аспекты, как эволюция $\delta^{13}\text{C}$ вендских карбонатов северо-востока Сибири [10], происхождение щелочных хлоридов и карбонатов в кимберлитах из трубки Удач-

ная [11–13]. Не меньшее внимание уделено аксессуарным минералам: в работе [14] изучены локальные вариации изотопов углерода в алмазах из северо-восточных россыпей, авторы работы [15] изучили изотопный состав перидотитов и гранатов трубки Удачная.

Вопросы генезиса и взаимодействия рассолов Сибирской платформы с окружением активно обсуждаются в научном сообществе. При этом немалые сложности вызывает проблема смешения рассолов разновозрастных водоносных комплексов [16–25].

Относительные концентрации стабильных изотопов кислорода и водорода вод, а также углерода растворенной углекислоты, дополненные данными по рубидий-стронциевым отношениям в водах, активно используется исследователями как современный инструмент для анализа генезиса вод, их взаимосвязей с окружающими горными породами и газами, гидрогеологической стратификации разреза и распределения осадков [26–31].

Развитие и совершенствование методов изотопного анализа позволяет с более высокой точностью и достоверностью изучить и заново осмыслить многие процессы, в том числе и процессы формирования, преобразования и смешения подземных рассолов. Совместный анализ комплекса изотопов ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) позволяет с высокой вероятностью выявлять особенности геологической эволюции рассолов Сибирской платформы.

Фактический материал и методика исследования

В 2019 г. в ходе экспедиционных работ на территории Сибирской платформы было отобрано 20 проб подземных рассолов из кимберлитовых трубок Нюрбинская (ордовикский водоносный комплекс), Удачная (верхне-, среднекембрийские водоносные горизонты) и на ряде нефтяных месторождений (венд-кембрийский, вендский и рифейский водоносные комплексы).

Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП), проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ (аналитики О.В. Чеботарева, Н.В. Бублий, А.С. Погуца, В.В. Куровская, К.Б. Кривцова, Л.А. Ракул).

Анализ комплекса величин δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ для вод и растворенного неорганического углерода (Dissolved Inorganic Carbon (DIC)) проводился в центре коллективного пользования ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device (для анализа δD) и GasBench II (для анализа $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$). Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, δD и $\delta^{18}\text{O}$ измерялись относительно мировых стандартов: VSMOW2; SLAP2; GISP – для анализа водорода и кислорода; NBS-18; NBS-19 – для анализа углерода. Ошибка определения изотопного состава стандартов по углероду и кислороду – не более 0,1 ‰, по водороду – не более 2 ‰. Изотопные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ изучались на масс-спектрометре MI 1201T в двухленточном режиме с регистрацией на одном коллекторе.

Результаты исследования и обсуждение

Особенности геохимии рассолов

Изученная коллекция представлена рассолами шести водоносных комплексов от рифейского до ордовикского, отобранных в пределах Байкитской (рифей) и Непско-Ботуобинской (венд, венд-кембрий) антеклиз, а также кимберлитовых трубок Удачная (кембрий) и Нюрбинская (ордовик) Якутской алмазонасной провинции. Рассолы рифейского водоносного комплекса преимущественно кислые (средние величины $\text{pH}=5,8$), имеют Cl Na состав с величиной общей минерализации от 327,9 до 329,8 г/дм³. Значения основных генетических коэффициентов составляют: $\text{rNa/rCl} - 0,57-0,60$; $\text{Cl/Br} - 109$; $\text{Ca/Cl} - 0,13$. Интегрированный показатель метаморфизации (по С.Л. Шварцеву) [4] S варьирует от 121 до 123, что соответствует средней степени (рис. 1, а, б). Среди исследованных рассолов вендского водоносного комплекса установлены Cl Ca и Cl Ca-Na химические типы. Величина их общей минерализации изменяется от 335,9 до 379,2 г/дм³, значения pH варьируют от 2,5 до 3,9 (сильнокислые и кислые). Величины отношения rNa/rCl изменяются от 0,10 до 0,43; $\text{Cl/Br} -$ от 54 до 73; $\text{Ca/Cl} -$ от 0,28 до 0,46; S – от 299 до 456 (сильно-метаморфизованные). В венд-кембрийском водоносном комплексе распространены Cl Ca рассолы с величиной общей минерализации 430,3 г/дм³ и pH – 5,3 (слабокислые). Значение rNa/rCl коэффициента составляет 0,1; $\text{Cl/Br} - 60$; $\text{Ca/Cl} - 0,21$; S – 459 (сильно-метаморфизованные). Среднекембрийские рассолы Cl Ca и Cl Ca-Na состава имеют величину общей минерализации от 196,7 до 391,3 г/дм³ и pH от 4,6 до 6,2 (кислые и слабокислые). Значения rNa/rCl коэффициента варьируют от 0,14 до 0,27; Cl/Br составляет от 73 до 132; $\text{Ca/Cl} -$ от 0,32 до 0,35, а интегрированный показатель метаморфизации S составляет от 278 до 316 (средне- и сильнометаморфизованные). Минерализация Cl Ca, Cl Ca-Na, Cl Ca-Mg и Cl Ca-Mg-Na рассолов верхнекембрийского водоносного комплекса изменяется в пределах от 102,9 до 192,9 г/дм³, а значения pH – от 4,9 до 6,2, составляя в среднем 5,6 (слабокислые). Значения генетических коэффициентов варьируют в широком интервале. Так, rNa/rCl коэффициент изменяется от 0,16 до 0,28; $\text{Cl/Br} -$ от 79 до 83; $\text{Ca/Cl} -$ от 0,20 до 0,31, а интегрированный показатель метаморфизации варьирует от 193 до 280 (среднеметаморфизованные). Слабые рассолы ордовикского водоносного комплекса Cl Ca-Mg-Na состава имеют общую минерализацию 76,6 г/дм³ и величину pH – 6,5 (нейтральные). Значение rNa/rCl коэффициента составляет 0,3; $\text{Cl/Br} - 69$; $\text{Ca/Cl} - 0,46$; S – 201 (среднеметаморфизованные) (рис. 1, б). Таким образом, пробы изученной коллекции представлены рассолами от слабых Cl Ca-Mg-Na до сверхкрепких Cl Ca со средней и преимущественно сильной степенью метаморфизации их химического состава. По имеющемуся спектру распределения микрокомпонентов (рис. 1, в) видна схожесть большинства изученных рассолов за исключением пробы из ордовикского водоносного комплекса трубки Нюрбинская, где пред-

полагается их значительное разбавление инфильтрационными водами. Наибольшие средние концентрации ($\text{мг}/\text{дм}^3$) убывают в ряду: $\text{Br}_{1487} > \text{S}_{933} > \text{Sr}_{593} > \text{V}_{82} > \text{Fe}_{75} > \text{Li}_{74} > \text{I}_{18} > \text{Si}_{9,2} > \text{Se}_{5,2} > \text{Mn}_{5,2} > \text{Rb}_{4,8}$. В рассолах венд-кембрийского и рифейского водоносных ком-

плексов установлены наиболее низкие концентрации Co , Ni , Cs и Tl . Слабые рассолы ордовикского комплекса за счет процессов разубоживания в меньшей степени обогащены Li , Zn , Nb , Ag , In , Ta , W , Ir , Au , Hg и Bi .

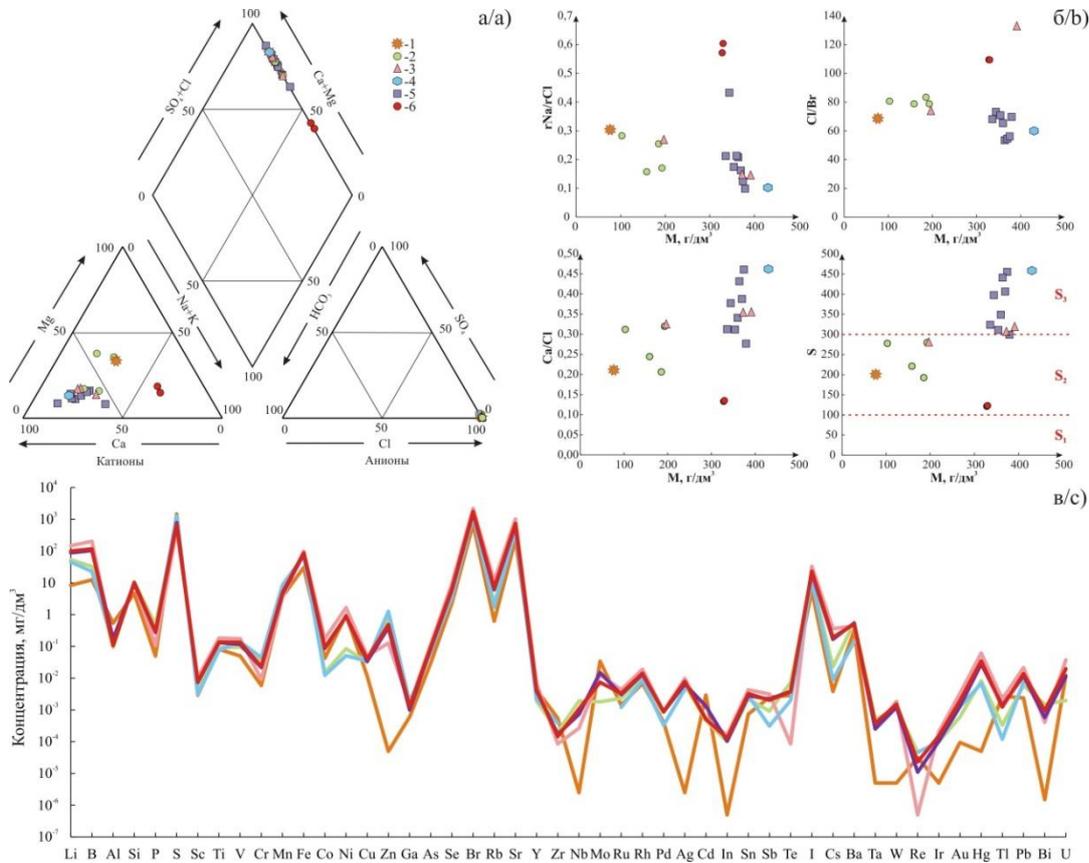


Рис. 1. Диаграмма Пайпера состава рассолов (а), зависимость основных генетических коэффициентов от величины общей минерализации (б) и спектр распределения микрокомпонентов (в). Водоносные комплексы: 1 – ордовикский; 2 – верхнекембрийский; 3 – среднекембрийский; 4 – венд-кембрийский; 5 – вендский; 6 – рифейский. Цвет линии спектра соответствует условным обозначениям проб из разных водоносных комплексов

Fig. 1. Piper diagram of brines (a), the dependence of the main genetic coefficients on the value of total mineralization (b) and the spectrum of microcomponents distribution (c). Aquifers: 1 – Ordovician; 2 – Upper Cambrian; 3 – Middle Cambrian; 4 – Vendian-Cambrian; 5 – Vendian; 6 – Riphean. The color of the spectrum line corresponds to the conventional designations of samples from different aquifers

Стабильные изотопы ($\delta^{18}\text{O}$, δD и $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) рассолов

Исследования стабильных изотопов основаны на концепции постоянства исходного изотопного состава элементов, который с течением времени изменяется под действием различных природных и/или антропогенных процессов [5]. Соотношение легких и тяжелых стабильных изотопов вещества изменяется как путем фракционирования при фазовых переходах вещества, так и при обмене изотопами с окружением. В наибольшей степени эффект фракционирования проявляется, когда различие в массах изотопов одного элемента существенно. По этой причине особенно ярко фракционирование заметно для легких элементов, так называемых «традиционных изотопов» – CHONS [32]. Стабильная изотопия находит обширное применение при исследованиях природных вод. Комплекс стабильных изотопов [$\delta^{13}\text{C} + \delta^{18}\text{O} + \delta\text{D}$] активно применяется при изучении вопросов генезиса вод [26], их взаимо-

действия с окружением: грунтами [33], породами [31, 34], атмосферой [35], загрязнения вод под воздействием антропогенных и техногенных факторов [36].

Величины $\delta^{18}\text{O}$ и δD , как правило, применяются в паре и используется для установления генезиса вод, при дополнении глобальной линии метеорных вод (Global Meteoric Water Line – GMWL), впервые предложенной Крейгом [37], и построениях локальных линий метеорных вод (Local Meteoric Water Line – LMWL) [31, 33, 36, 38], отражающих соотношение между $\delta^{18}\text{O}$ и δD , соответственно, для глобального среднегодового осадконакопления и локальных осадков в конкретном регионе. Сравнение LMWL и GMWL позволяет сделать выводы об условиях осадконакопления, особенностях температурного режима и сезонности исследуемой области, эффектах испарения вод. Фракционирование стабильных изотопов вод в процессе их фазового перехода «вода–пар» приво-

дит к насыщению паров и производных метеорных вод легкими изотопами, при этом тяжелые изотопы аккумулируются в морских и океанических водах [5]. Таким образом, значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD , а также соотношение между ними позволяет в высокой долей вероятности определить происхождение вод: инфильтрационное, седиментационное, ювенильное и др. Анализ значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD древних захороненных вод представляет особый интерес, поскольку может отражать условия их формирования. Изучение этого вопроса представляет интерес для реконструкций древнего климата, а также в поисково-разведочном отношении, как индикатор вероятных захоронений углеродсодержащих соединений.

В таблице приведены данные по изотопному составу Н и О для изученной коллекции рассолов. Относительные концентрации кислорода-18 и дейтерия в рассолах варьируют в широких диапазонах: от -133 до $-17,5$ ‰ для δD и от $-17,0$ до $-2,5$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$. Построение пар значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD исследованных вод относительно линии Крейга (рис. 2, а) показало, что для всех изученных образцов наблюдается отклонение полученных точек от GMWL, зависящее от возраста вмещающих отложений. Так, рассолы среднекембрийских, венд-кембрийских и вендских комплексов обогащены легкими изотопами кислорода, в то время как для рассолов верхнекембрийского и рифейского комплексов наблюдается «дефицит» изотопа ^{16}O : точки располагаются ниже GMWL. Принято считать [38–41], что осязаемое обеднение вод легким изотопом кислорода и, соответственно, положительный кислородный сдвиг относительно линии Крейга происходят вследствие интенсивного испарения вод, при котором легкий и более подвижный изотоп ^{16}O покидает систему в первую очередь. Величина сдвига может быть как незначительной (менее 1 ‰), так и существенной и достигать 4 ‰ при достаточно высоких температурах окружения и небольшой глубине водоема (до 1 м), с поверхности которого происходит испарение [27]. В работе [42] предложена линия седиментационно-метаморфического генезиса хлоркальциевых рассолов кимберлитовых тел. Интересно отметить, что полученные в настоящей работе значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD рассолов рифейского и верхнекембрийского комплексов располагаются очень близко к этой линии, что позволяет сделать предположение о седиментационно-метаморфическом генезисе изученных рассолов, а их изотопный состав отражает, по видимому, климатические условия на момент захоронения вод.

В ряде исследований [31, 41] положительные кислородные сдвиги объясняют взаимодействием вод с породами, обогащенными кислородом-18. В результате их изотопного обмена воды, уравнивая изотопный состав с окружением, насыщаются тяжелым изотопом кислорода. Обогащаемость вод ^{18}O главным образом определяется температурными условиями и минералогией водовмещающих пород и в большей степени проявляется в случае высокотемпературных карбонатных резервуаров [43] при температурах

50–200 °C и длительном взаимодействии вода–порода [31]. Изотопный состав кислорода кимберлитов (от +6,6 до +23,9 ‰) [11], гранатов (от +4,6 до +4,9 ‰) [15] и кальцитов (от +15,0 до +17,1 ‰) [13] трубки Удачной довольно «тяжелый». Поэтому контактное обогащение тяжелым изотопом ^{18}O вод, отобранных в скважинах этого месторождения, в ходе взаимодействия вода–порода в течение длительного периода захоронения выглядит вполне обоснованным. Таким образом, положительный сдвиг рассолов рифейских и верхнекембрийских комплексов относительно GMWL может быть объяснен двумя факторами: 1 – высокими температурами климата в заданные эпохи и, как следствие, активным испарением вод, приводящим, в свою очередь, к их обеднению легким изотопом ^{16}O до момента захоронения; 2 – соседством вод в резервуаре с породами, обогащенными изотопом ^{18}O , в течение длительного времени.

Особый интерес с точки зрения величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD представляют рассолы вендского, венд-кембрийского и среднекембрийского комплексов. Для них, в противоположность вышеописанным рассолам рифейского и верхнекембрийского комплексов, характерен профицит легкого изотопа кислорода относительно линии Крейга. Относительные концентрации дейтерия и кислорода-18 в рассолах имеют довольно узкий интервал значений: от $-58,7$ до $-34,5$ ‰ для δD и от $-12,6$ до $-8,4$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$. В целом они могут быть ограничены областью, обозначенной эллипсом (рис. 2, а). Наиболее интересными выглядят данные для проб № 11 и 14, в которых отклонения полученных точек от GMWL максимальны и достигают -6 ‰ по кислороду и примерно $+50$ ‰ по водороду. Отрицательный кислородный сдвиг относительно линии Крейга в литературе [44, 45] объясняют проявлением эффектов сезонности: смещением режимов температуры и влажности, изменением процессов вторичного испарения. Отрицательное отклонение изотопного состава кислорода достаточно распространено для осадков холодного периода года. В работе [45] отклонения $\delta^{18}\text{O}$ в холодный период (декабрь–февраль) достигают -2 ‰. Увеличение содержания легких изотопов в водах при понижении климатической температуры является хорошо изученным фактом. Наглядно это явление было продемонстрировано в работе [46] для антарктических снегов, значения $\delta^{18}\text{O}$ в которых хорошо коррелируют со среднегодовой температурой: с понижением среднегодовой температуры на каждые 10 градусов наблюдалось обогащение $\delta^{18}\text{O}$ легким изотопом кислорода на 8–10 ‰. В случае исследованных в настоящей работе вод максимальное отклонение изотопного отношения $\delta^{18}\text{O}$ достигало -6 ‰. Вероятно, подобное проявление можно интерпретировать, как снижение среднегодовой температуры в момент осадконакопления относительно современной на 5–10 °C, что является косвенным подтверждением гипотезы оледенения в вендском периоде [47], предложенной Н.М. Чумаковым в [48]. Здесь стоит упомянуть высокую вероятность смешения рассолов из разных водоносных комплексов.

Таблица. Изотопный состав H, O и C изученных рассолов Сибирской платформы

Table. Isotopic composition of H, O and C in brines of the Siberian platform

№ пробы Sample no.	Комплекс Complex	M, г/дм ³ TDS, g/l	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	δD , ‰	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\text{SD}$
1	Э ₃	158403	-0,4	-116	-14,5	0,00965	0,70909	0,00003
2	Э ₃	185343	-9,6	-109	-13,5	0,01044	0,70906	0,00003
3	Э ₃	102914	-15,9	-132	-15,7	0,01051	0,70857	0,00005
4	Э ₃	192863	-17,7	-103	-11,1	0,01664	0,70862	0,00004
5	Э ₂	372634	3,7	-53	-9,7	0,02889	0,70864	0,00003
6	Э ₂	196674	-5,3	-104	-11,5	0,02478	0,70856	0,00004
7	Э ₂	391280	12,7	-38	-10,7	0,02795	0,70926	0,00005
8	V-Э	430277	-31,0	-48	-8,4	0,01874	0,70813	0,00003
9	V	363909	4,6	-47	-11,3	0,01059	0,71440	0,00007
10	V	369655	-10,0	-44	-10,6	–	–	–
11	V	374218	4,4	-41	-12,4	0,00737	0,71222	0,00005
12	V	343978	4,4	-77	-12,6	0,00804	0,71014	0,00004
13	V	361613	-7,6	-133	-17,0	–	–	–
14	V	379249	6,3	-34	-11,5	–	–	–
15	V	353937	-7,4	-56	-10,2	–	–	–
16	V	335859	-22,5	-59	-9,7	–	–	–
17	V	359911	-15,2	-52	-10,1	0,01349	0,70955	0,00003
18	R ₂	327872	-24,1	-17	-2,5	0,01497	0,71985	0,00003
19	R ₂	329786	-22,2	-20	-2,5	0,01520	0,71984	0,00002

Примечания: «–» – не определялось; значения $\delta^{13}\text{C}$ приведены относительно стандарта VPDB, δD и $\delta^{18}\text{O}$ – относительно стандартов VSMOW-GISP-SLAP.

Notes: «–» – not determined; $\delta^{13}\text{C}$ values are given relative to the VPDB standard, δD and $\delta^{18}\text{O}$ – relative to the VSMOW-GISP-SLAP standards.

Наличие этого эффекта, очевидно, проявляется для образцов 6, 12 и 13, для которых характерно смещение изотопного состава H и O вод от области, ограниченной эллипсом, в сторону рассолов верхнекембрийских (более молодых) комплексов. Отсюда можно сделать предположение о вполне вероятном искажении значений $\delta^{18}\text{O}$ реликтовых (сингенетических) рассолов вендского комплекса в положительную сторону.

В пользу этого предположения свидетельствуют и зависимости значений $\delta^{18}\text{O}$ (б) и δD (в) изученных рассолов от величины их общей минерализации (рис. 2). Из рисунка видно, что рассолы вендских и венд-кембрийских отложений имеют не только близкие пары величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD (рис. 2, а), но и очень схожие значения общей минерализации, что является положительным аргументом в пользу гипотезы смешения рассолов. Для рассолов верхнекембрийского комплекса характерна наименьшая минерализация, что обусловлено, по-видимому, частичным разбавлением рассолов верхнекембрийского комплекса метеорными (низкоминерализованными) водами. Аналогичные выводы были сделаны авторами работ [5, 42], посвященных рассолам Сибирской платформы, в том числе и из кимберлитовых тел. При этом рассолы рифейских отложений располагаются отдельной группой, как по относительному содержанию дейтерия и ^{18}O , так и по значениям минерализации. Очевидно, что в первую очередь здесь сказывается географическая отдаленность между месторождениями и, как следствие, невозможность смешения их вод между собой. Тем не менее индивидуальность расположения точек для вод рифейских отложений на рис. 2, б позволяет предположить отсутствие паразитного заражения этих рассолов водами более молодых возрастов на момент отбора.

Изотопный состав растворенного неорганического углерода в исследованных рассолах ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) позволяет ответить на ряд вопросов, связанных со взаимодействием вод с окружением. Анализ значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ позволяет с высокой достоверностью оценить протекание таких процессов, как вымывание (выветривание) пород водами [49], изотопный обмен вод с атмосферой [28, 50, 51] и другими контактирующими газами в системе вода–порода–газ, биологическая активность растений и микроорганизмов (биогенная углекислота) [52], водных биохимических процессов и углеродных циклов [53] и др. В таблице приведены данные по изотопному составу углерода DIC исследованных рассолов. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ варьируют в очень широком интервале значений: от -31 до +12,7 ‰, что, безусловно, указывает на широкий спектр соединений и процессов, участвующих в формировании углекислоты рассолов. Принимая во внимание гипотезу седиментационно-метаморфического генезиса рассолов, основными источниками формирования в них DIC и определенных значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, по-видимому, служили жизнедеятельность микроорганизмов и изотопный обмен углекислоты с окружающими породами, поскольку процессы обмена изотопами с атмосферой, вегетационного обмена (т. е. изменение изотопного состава DIC вод за счет жизнедеятельности растений), испарения и дегазации вод в нашем случае маловероятны.

Изотопный обмен углерода DIC с породами-окружением представляется возможным в том случае, когда углерод способен переходить в водорастворимую форму. Очевидно, что органический углерод в этом случае не сможет служить источником изотопного обмена сам по себе, а наиболее подходящим кандидатом для обмена выглядят карбонат-

содержащие породы, частичное растворение которых и приводит к насыщению вод углекислотой соответствующего изотопного состава с учетом коэффициента фракционирования, значение которого определяется целым набором факторов, важнейшим из которых является температура [32]. Задавшись модельной температурой в 20 °С, при которой, согласно [54], значение коэффициента фракционирования между карбонатом и гидрокарбонат-ионом $\epsilon_{c-b}=1,85$, можно определить, что потенциальное значение $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ сформированного в случае эксклюзивного обмена углекислоты с карбо-

натными породами, сформированными в большинстве случаев из морских систем со значениями $\delta^{13}\text{C}$, близкими к нулю [32, 55], будет составлять около $-1,85\%$. Из представленных в таблице данных видно, что указанному гипотетическому значению $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ соответствует лишь образец 1, отобранный из скважины в пределах кимберлитовой трубки Удачная. Для остальных образцов наблюдаются отклонения от модельного случая ($-1,85\%$), как в сторону обогащения легким изотопом ^{12}C , так и в сторону положительных относительных концентраций ^{13}C .

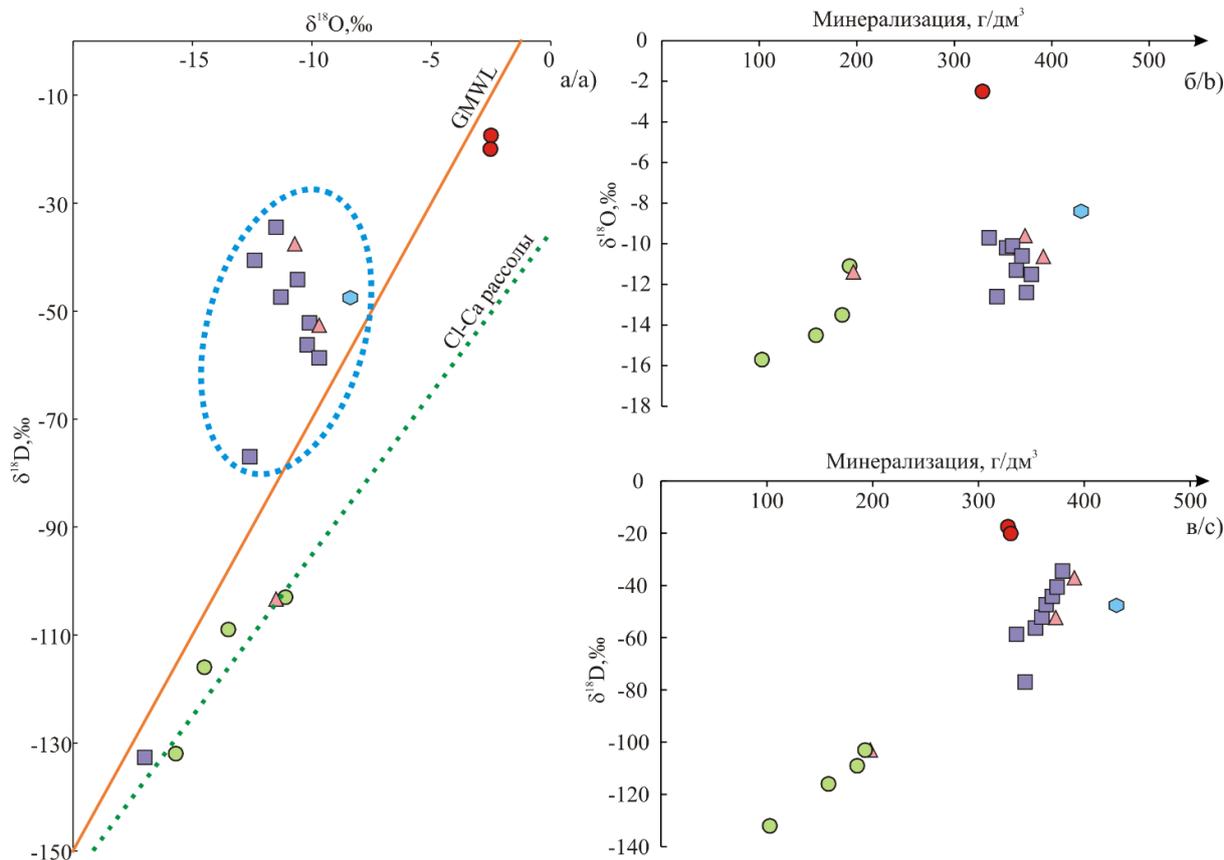


Рис. 2. $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ (а) в рассолах, зависимости $\delta^{18}\text{O}$ (б) и δD (в) от величины общей минерализации рассолов
Fig. 2. $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ (a) in brines, $\delta^{18}\text{O}$ (b) and δD (c) vs TDS

Незначительные отрицательные сдвиги (до $-9,6\%$) значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ в литературе [49] связывают с выветриванием карбонатного материала при участии углекислоты, генерируемой в ходе жизнедеятельности растений. При этом в зависимости от типа фотосинтеза, используемого растениями (C_3 или C_4), величина обеднения изотопного состава углерода DIC тяжелым изотопом различается. Считается [56], что появление растений типа C_4 произошло лишь 30 миллионов лет назад. Соответственно, участие таких растений в формировании древнего DIC (рифейских, вендских и кембрийских комплексов) исключено. Принимая гипотезу седиментационно-метаморфического генезиса исследуемых рассолов и предполагая отсутствие внешних источников DIC по меньшей мере для части из них, небольшие отрицательные экскурсы значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ могут быть объяснены участием древних рас-

тений с фотосинтезом типа C_3 . Тем не менее, принимая во внимание повсеместную распространенность бактерий и микроорганизмов, способных оказать существенное влияние на распад органического вещества и его преобразование в водорастворимую форму углерода, предположение о сохранности исходного изотопного состава углерода DIC захороненных в подземных резервуарах в течение длительного времени вод выглядит сомнительным.

В зависимости от типа бактерий и механизма переработки ими окружающей среды выходные значения изотопного состава C растворенной углекислоты могут диаметрально различаться. Наиболее обсуждаемым механизмом переработки органического вещества бактериями, пожалуй, можно назвать метаногенез [57–59], при этом сам по себе метан практически не участвует в изотопном обмене с растворенной угле-

кислотой, а изменения изотопного состава углерода DIC в первую очередь связаны с фракционированием изотопов в ходе самого метаногенеза. Образование метана сопровождается обеднением углекислоты легкими изотопами, поскольку сам метан ими насыщается [59], оставляя тяжелый изотоп ^{13}C в растворе (субстрате) [60]. Второй механизм преобразования $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ бактериями – восстановление сульфатов в ходе сульфат-метанового перехода (sulfate-methane transition – SMT) [59], при котором высвобождается углекислота, наследующая легкий изотопный состав метана. Из таблицы видно, что в наибольшей степени проявление метаногенных процессов, по-видимому, отразилось на значении $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ образца 7, достигающем аномальных +12,7 ‰. Для водоносного горизонта образца 8, напротив, явно доминируют SMT-процессы, приводящие к величине $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} = -31,0$ ‰. В целом проявление биогенных процессов с определенными акцентами характерно для большинства изученных рассолов: для образцов 5, 9, 11, 12 и 14 преобладающим является метаногенез, а для образцов 3, 4, 8, 16, 17 и рассолов рифейских комплексов (образцы 18, 19) преобладают SMT-процессы.

Интересно отметить, что переход от более молодых комплексов к более древним в среднем сопровождается обогащением DIC легким изотопом углерода (рис. 3). По-видимому, проявление SMT-процессов характерно лишь для систем, в которых уже сгенерировано необходимое количество метана, являющегося основным «топливом» для проведения сульфат-метанового перехода.

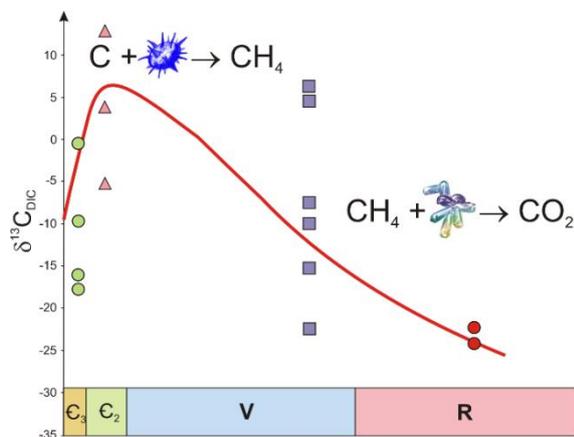


Рис. 3. Схема вариации изотопного состава углерода в рассолах разновозрастных комплексов. Длительность геологических периодов и изображения бактерий представлены условно

Fig. 3. Scheme of the carbon isotope composition variation in brines of different aquifers. The duration of geological periods and bacteria symbols are roughly depicted

Таким образом, гипотетическую эволюцию вод и изотопного состава углерода DIC можно описать следующим образом: 1 – захоронение вод с органическим веществом. Исходное значение $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ определяется обменом с атмосферой, вегетационной активностью и находится в диапазоне от 0 до -10 ‰ (в за-

висимости от исходного источника углекислоты); 2 – развитие деятельности метаногенных бактерий, заключенных в резервуаре, преобразование органических останков в метан, обеднение углекислоты легким изотопом, переход значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ в область положительных значений; 3 – формирование достаточного количества метана для развития бактериальных SMT-процессов, постепенное обогащение углекислоты легким изотопом углерода, накопление изотопно-легкого DIC. Можно предположить, что вышеописанная последовательность носит волнообразный характер, обусловленный превалированием протекания метаногенеза/SMT-процессов. Но при этом очевидно, что для протекания последних в системе, в первую очередь, должно быть синтезировано достаточное количество метана.

Отношения $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ рассолов

Соотношения изотопов $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ являются важным геохронометрическим инструментом. Геохронология системы построена на принципе увеличения отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в замкнутой системе за счет накопления тяжелого изотопа ^{87}Sr (рис. 4, а), являющегося продуктом радиоактивного распада ^{87}Rb первичного источника с течением времени. Совместная интерпретация отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ системы позволяет дать ее геохронологическую характеристику [32]. Современные значения отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ подземных вод изменяются как функция ряда особенностей пород-носителей: минералогии, возраста, генезиса пород, их зрелости, уровня измененности карбонатов, эвапоритов и фосфоритов, состава почв [61]. Учет и систематизация всех вероятных факторов воздействия окружения на величину изотопных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ очень сложен и требует отдельного глубокого исследования каждой индивидуальной пары отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$. Тем не менее применение принципа накопления изотопа ^{87}Sr в системе вода–порода позволяет ответить на ряд важных вопросов: относительный возраст вод, уровень их взаимодействия с породой, тип пород, с которыми контактируют воды.

Для большинства представленных в таблице рассолов были определены изотопные отношения $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Интерес, в первую очередь, представляли рассолы комплексов отличающихся возрастов. Из представленной гистограммы (рис. 4, б) видно, что для рассолов кембрийских и венд-кембрийских комплексов значения отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ наименьшие и составляют от 0,70813 до 0,70926. По мере увеличения возраста комплекса-резервуара возрастает и величина соотношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ рассолов: от 0,70955–0,71440 в вендских до 0,71984–0,71985 в рифейских отложениях.

Источниками радиоактивного ^{87}Rb подземных вод служат как воды палеоокеана, соотношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в котором нелинейно изменялось с течением времени [62], так и выветриваемые водами породы [63]. Необходимо также принимать во внимание, что земная кора саккумулирована в результате ряда сложных и, как правило, пересеченных/наложенных друг на друга событий: частичное плавление и фракционирование кристаллов, приводящее к завышенным отношениям

Rb/Sr в результирующих магмах, широкий спектр магматических и метаморфических эволюционных процессов, приводящих зачастую к широкому диапазону значений Rb/Sr сформированной земной коры.

Но, несмотря на эти проявления гетерогенности, в первом приближении более древние породы в среднем эволюционируют до более высоких значений отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, чем молодые породы [61].

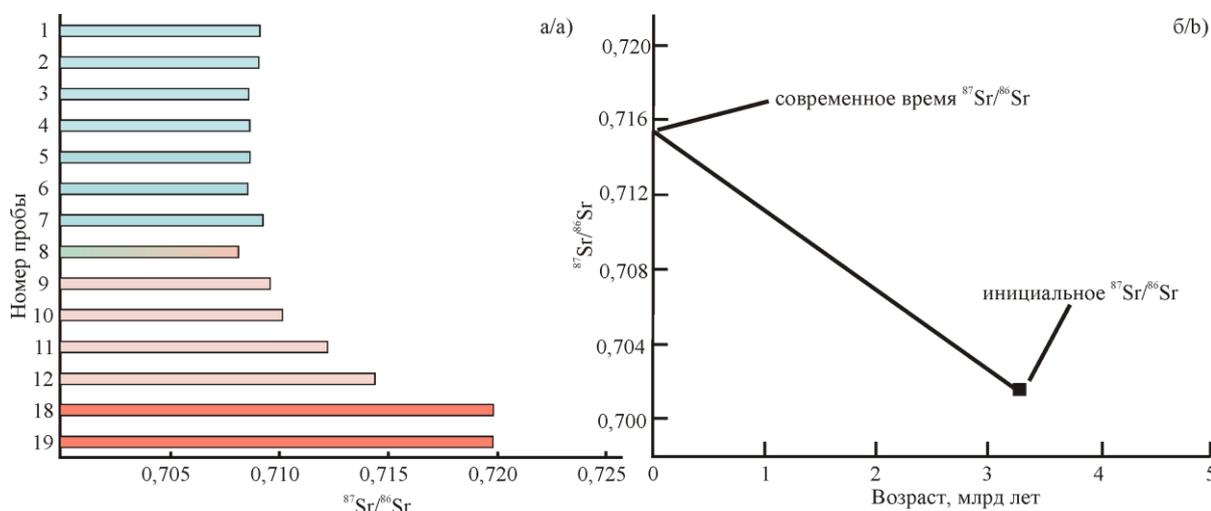


Рис. 4. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в исследованных рассолах (а), концепция накопления ^{87}Sr в замкнутом резервуаре (б) [61]. Номера проб соответствуют указанным в таблице

Fig. 4. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in brines (a), the conception of ^{87}Sr accumulation in a closed reservoir (b) [61]. Sample numbers correspond to Table

Вероятно, проявление вышеуказанных эволюционных событий земной коры и привело к некоторому колебанию значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ рассолов отложений близкого возраста. Особенно заметно проявление этого колебания для кембрийских и вендских комплексов. Тем не менее в целом по мере увеличения возраста водного резервуара закономерно возрастает и величина отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в рассолах. При их сравнении со значениями отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ вод древнего океана очевидно, что рассолы кембрийских комплексов очень хорошо вписываются в рамки вод кембрийского палеоокеана (0,7081–0,7092). Естественно предположить, что с момента захоронения, при условии полной изоляции, радиоактивный ^{87}Rb , содержащийся в водах, приводил бы к эволюции значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в сторону насыщения изотопом ^{87}Sr . Следовательно, исходя из гипотезы изолированности вод в резервуаре, можно предположить, что их исходные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ на момент захоронения были несколько ниже. При этом определенную сложность вызывает тот факт, что современные стронциевые соотношения этих вод очень близки к значениям современного океана (0,7091). Поэтому однозначно исключить вероятность смешения рассолов кембрийского комплекса с современными метеорными водами не представляется возможным. В случае вод неопротерозоя, охватывающего рифейский и вендский периоды, значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ закономерно находятся в более низком диапазоне (от 0,7073 до 0,7086). В нашем случае рассолы рифейских отложений имеют существенно более высокие значения отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Логично предположить, что при условии полной идентичности вод как по соотношению $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ в них, с учетом разницы возрастов, так и по условиям

захоронения конечное стронциевое соотношение должно быть несколько выше для более древних вод при более низких значениях величины $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$. Тем не менее совместная интерпретация данных по отношениям $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (таблица) показывает, что четкой корреляции между ними не наблюдается. Видно, что для рассолов средне-кембрийских и рифейских комплексов не проявляется закономерное снижение содержания радиоактивного ^{87}Rb в системе. В ряде случаев величина отношения $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ даже превышает эталонные значения для рассолов верхне-кембрийских комплексов. Вероятно, это указывает на привнесение и накопление ^{87}Rb в рассолах из внешних источников – окружающей породы-резервуара либо из осколочного/выветренного материала, привнесенного временными потоками и захоронившегося вместе с водами. Схожие выводы сделали авторы работы [63], обнаружившие для вод венд-кембрийских отложений ярактинского горизонта значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от 0,71252 до 0,71306. Авторы высказали гипотезу о накоплении радиоактивного ^{87}Rb и материала, обогащенного радиогенным ^{87}Sr , в резервуаре за счет привнесения обломков пород, обогащенных указанными изотопами, эрозийными потоками еще в позднем венде. Дальнейшее захоронение обломочного материала совместно с водами и постепенное вымывание и растворение ^{87}Sr в захороненных водах привело к появлению неординарных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ изученных рассолов.

Заключение

В работе изучен ряд рассолов Сибирской платформы с точки зрения стабильной изотопии и рубидий-стронциевых отношений. На основании получен-

ных данных авторами были сделаны следующие выводы: 1) Для исследованных рассолов характерен широкий интервал значений относительных концентраций дейтерия и кислорода-18: от -133 до $-17,5$ ‰ для δD и от $-17,0$ до $-2,5$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$. 2) На основании значений δD и $\delta^{18}\text{O}$ рассолы можно условно разделить на три больших группы: а) группа рассолов верхнекембрийского комплекса с положительным кислородным сдвигом относительно линии Крейга и умеренно отрицательными значениями δD и $\delta^{18}\text{O}$; б) группа рассолов вендского, венд-кембрийского и среднекембрийского комплексов с выраженным отрицательным кислородным сдвигом относительно GMWL; в) рассолы рифейского комплекса, отличающиеся положительным кислородным сдвигом относительно линии Крейга и выраженно тяжелыми значениями δD и $\delta^{18}\text{O}$. 3) На основании изотопного состава кислорода и водорода рассолов предполагается их седиментационно-метаморфический генезис. 4) Изотопный состав углерода в DIC рассолов варьирует в очень широком интервале значений: от -31 до $+12,7$ ‰. Предполагается биогенное (бактериальное)

происхождение растворенной в водах углекислоты. 5) Конечное значение $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, по-видимому, определяется соотношением метаногенеза и SMT-процессов в каждом конкретном резервуаре. В среднем переход от более молодых комплексов к более древним сопровождается обогащением DIC легким изотопом углерода, что обусловлено, очевидно, необходимым временем накопления «топлива» для протекания SMT-процессов. 6) Анализ рубидий-стронциевых отношений изученных рассолов позволил разделить их на две группы: рассолы со значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, близкими к значениям в водах современного океана, и рассолы со значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, существенно их превышающими. Предполагается, что для рассолов второй группы захоронение вод произошло в присутствии обломочного материала выветривания континентальной коры, обогащенного радиоактивным ^{87}Rb .

Исследования проводились при финансовой поддержке проектов ФНИ № 0331-2019-0025 и Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-05-70074 «Ресурсы Арктики».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изотопные отношения стронция в некоторых природных водах Сибири / С.Б. Брандт, В.Н. Борисов, В.С. Лепин, И.С. Ломоносов, Е.В. Пиннекер. – М.: Наука, 1976. – 169 с.
2. Новые данные об изотопном составе кислорода и водорода рассолов Сибирской платформы / Е.В. Пиннекер, В.Н. Борисов, Ю.И. Кустов, С.С. Брандт, Л.В. Днепровская // Водные ресурсы. – 1987. – № 3. – С. 105–115.
3. Пиннекер Е.В., Шварцев С.Л. Изотопы стронция в рассолах Сибирской платформы // Доклады РАН. – 1996. – Т. 351. – № 1. – С. 109–111.
4. Шварцев С.Л. Химический состав и изотопы стронция рассолов Тунгусского бассейна в связи с проблемой их формирования // Геохимия. – 2000. – № 11. – С. 1170–1184.
5. Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы / С.В. Алексеев, Л.П. Алексеева, В.Н. Борисов, О. Шоуакар-Сташ, Ш. Фрейл, Ф. Шабо, А.М. Кононов // Геология и Геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 3. – С. 291–304.
6. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов Западной Якутии. – Новосибирск: Изд-во «Гео», 2019. – 214 с.
7. Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes, of the deep groundwaters of the Siberian Platform, Russia / O. Shouakar-Stash, S.V. Alexeev, S.K. Frapе, L.P. Alexeeva, R.J. Drimmie // Applied Geochemistry. – 2007. – V. 22. – Iss. 3. – P. 589–605.
8. Алексеева Л.П., Алексеев С.В., Кононов А.М. Изотопное стронциевое отношение ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) в подземных льдах и водах Оленекского артезианского бассейна (западная Якутия) // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2014. – № 6 (49). – С. 97–103.
9. Изотопы хлора и брома в рассолах Западной Якутии / Л.П. Алексеева, С.В. Алексеев, А.М. Кононов, М. Тенг, Л. Юнде // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2015. – Т. 13. – С. 19–30.
10. Pelechaty S.M., Kaufman A.J., Grotzinger J.P. Evaluation of $\delta^{13}\text{C}$ chemostratigraphy for intrabasinal correlation: Vendian strata of northeast Siberia // Bulletin of the Geological Society of America. – 1996. – V. 108. – Iss. 8. – P. 992–1003.
11. Костровицкий С.И. Геохимические особенности кимберлитов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 263 с.
12. Sr, Nd, and Pb isotope evidence for a mantle origin of alkali chlorides and carbonates in the Udachnaya kimberlite, Siberia / R. Maas, M.B. Kamenetsky, A.V. Sobolev, V.S. Kamenetsky, N.V. Sobolev // Geology. – 2005. – V. 33. – Iss. 7. – P. 549–552.
13. Изотопный состав углерода и кислорода магматических кальцитов из кимберлитов трубки Удачная-Восточная, Якутия / А.А. Томиленко, Ю.В. Дублянский, Д.В. Кузьмин, Н.В. Соболев // Доклады Академии Наук. – 2017. – Т. 475. – № 3. – С. 316–319.
14. Local variations in carbon isotopes and nitrogen contents in diamonds from placers of the northeastern portion of the Siberian Platform / V.S. Shatskii, D.A. Zedgenizov, A.L. Ragozin, V.V. Kalinina, V.N. Reutskii // Doklady Earth Sciences. – 2011. – V. 440. – Iss. 1. – P. 1282–1286.
15. Перидотиты кимберлитовой трубки Удачная: «немантийные» изотопные отношения кислорода в гранатах / М.А. Горнова, А.Г. Полозов, А.В. Игнатьев, Т.А. Веливецкая // Доклады Академии Наук. – 2007. – Т. 415. – № 1. – С. 91–95.
16. Геохимия рассолов и нефтепроявлений кимберлитовой трубки Удачная (Сибирская платформа) / Д.А. Новиков, А.В. Ильин, В.А. Каширцев, А.В. Черных, А.Н. Пыряев, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Максимова, И.Н. Зуева, О.Н. Чалая // Геология и геофизика. – 2021. DOI: 10.15372/GiG2021115
17. Гидрогеохимия венда Сибирской платформы / Д.А. Новиков, А.В. Черных, Л.Н. Константинова, Ф.Ф. Дульцев, И.И. Юрчик // Геология и геофизика. – 2021. DOI: 10.15372/GiG2021115
18. Effect of trap magmatism on the geochemistry of gases in the North-Western regions of the Siberian Platform / A.O. Gordeeva, D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 666. – № 5. – article 052055.
19. Влияние траппового магматизма на геохимию рассолов нефтегазоносных отложений западных районов Курейской синеклизы (Сибирская платформа) / Д.А. Новиков, А.О. Гордеева, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, Л.М. Житова // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 6. – С. 861–881.
20. Прямые признаки нефтегазоносности и нефтематеринские отложения Суханского осадочного бассейна Сибирской платформы / В.А. Каширцев, Т.М. Парфенова, С.А. Моисеев, А.В. Черных, Д.А. Новиков, Л.М. Бурштейн, К.В. Долженко, В.И. Рогов, Д.С. Мельник, И.Н. Зуева, О.Н. Чалая // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – № 10. – С. 1472–1487.
21. Primary data on the impact from trap magmatism on the hydrogeochemistry of brines in the southwestern part of the Kureyka syncline (Siberian Platform) / D.A. Novikov, L.M. Zhitova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – article 08017.
22. 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. – V. 193. – article 012052.

23. Novikov D.A. Genetic classification of subsurface waters and brines of Arctic regions of Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 193. – article 012049.
24. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development. – 2017. – V. 44. – № 5. – P. 780–786.
25. 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. – article 63.
26. Stable water isotope modeling reveals spatio-temporal variability of glacier meltwater contributions to Ganges River headwaters / S. Boral, I.S. Sen, D. Ghosal, B. Peucker-Ehrenbrink, J.D. Hemingway // Journal of Hydrology. – 2019. – V. 577. – article 123983.
27. Wenninger J., Beza D.T., Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soil–vegetation–atmosphere system: stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration // Physics and Chemistry of the Earth. – 2010. – V. 35. – P. 565–570.
28. Sources and sinks of dissolved inorganic carbon in an urban tropical coastalbay revealed by $\delta^{13}\text{C}$ -DIC signals / L.C. Cotovicz Jr., B.A. Knoppers, L. Deirmendjian, G. Abril // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2019. – V. 220. – P. 185–195.
29. Specifying recharge zones and mechanisms of the transitional geothermal field through hydrogen and oxygen isotope analyses with consideration of water-rock interaction / R.M. Shoedarto, Y. Tada, K. Kashiwaya, K. Koike // Geothermics. – 2020. – V. 86. – article 101797.
30. Isotope (δD , $\delta^{18}\text{O}$, 3H , $\delta^{13}\text{C}$, ^{14}C) and chemical (B, Cl) constrains on water origin, mixing, water-rock interaction and age of low-temperature geothermal water / A. Stefánsson, S. Arnórsson, A.E. Sveinbjörnsdóttir, J. Heinemaier, H. Kristmannsdóttir // Applied Geochemistry. – 2019. – V. 108. – article 104380.
31. Aydin H., Karakuş H., Mutlu H. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2020. – V. 390. – article 106708.
32. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. 8th ed. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. – Cham: Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. – 460 p.
33. Using H, O, Rn isotopes and hydrometric parameters to assess the surface water-groundwater interaction in coastal wetlands associated to the marginal forest of the Río de la Plata / L. Santucci, R. Sanci, E. Carol, E. Villalba, H. Panarello // Continental Shelf Research. – 2019. – V. 186. – P. 104–110.
34. O, H, C isotope geochemistry of carbonated mineral springs in central Victoria, Australia: sources of gas and water-rock interaction during dying basaltic volcanism / I. Cartwright, T. Weaver, S. Tweed, D. Ahearne, M. Cooper, C. Czarnik, J. Tranter // Journal of Geochemical Exploration. – 2000. – V. 257–26. – P. 69–70.
35. Stream water age distributions controlled by storage dynamics and nonlinear hydrologic connectivity: modeling with high-resolution isotope data / C. Soulsby, C. Birkel, J. Geris, J. Dick, C. Tunaley, D. Tetzlaff // Water Resour. Res. – 2015. – V. 51. – P. 7759–7776.
36. Environmental controls on the carbon and water (H and O) isotopes in peatland Sphagnum mosses / Z. Xia, Y. Zheng, J.M. Stelling, J. Loisel, Y. Huang, Z. Yu // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2020. – V. 277. – P. 265–284.
37. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
38. Spatial distribution and controlling factors of surface water stable isotope values ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) across Kazakhstan, Central Asia / H. Wu, J. Wu, F. Song, J. Abuduwaili, A.S. Saporov, X. Chen, B. Shen // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 678. – P. 53–61.
39. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco) / D. Chafouq, A. El Mandour, M. Elgettafi, M. Himi, I. Chouikri, A. Casas // Journal of African Earth Sciences. – 2018. – V. 139. – P. 1–13.
40. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA // Journal of Geochemical Exploration. – 2020. – V. 210. – article 106445.
41. Genesis of formation water in the northern sedimentary basin of South China Sea: Clues from hydrochemistry and stable isotopes (D , ^{18}O , ^{37}Cl and ^{81}Br) / H. Yu, T. Ma, Y. Du, L. Chen // Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – V. 196. – P. 57–65.
42. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов криоартезианских бассейнов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2018. – № 2 (59). – С. 183–197.
43. Truesdell A.H., Hulston J.R. Isotopic evidence on environments of geothermal systems. Handbook of Environmental Isotope Chemistry. – New York: Elsevier, 1980. – V. 1. – P. 179–226.
44. Influence of rainfall quantity on the isotopic composition (^{18}O and ^2H) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain) / B. Andreo, C. Linan, F. Carrasco, C. Jimenez de Cisneros, F. Caballero, J. Mudry // Applied Geochemistry. – 2004. – V. 19. – P. 561–574.
45. Chemo-isotopes (^{18}O & ^2H) signatures and HYSPLIT model application: clues to the atmospheric moisture and air mass origins / R. Bagheri, F. Bagheri, G.H. Karami, H. Jafari // Atmospheric Environment. – 2019. – V. 215. – article 116892.
46. Stable isotopic composition in snowpack along the traverse from a coastal location to Dome A (East Antarctica): results from observations and numerical modeling / T. Ma, L. Li, Y. Li, C. An, J. Yu, H. Ma, S. Jiang // Polar Science. – 2020. – V. 24. – article 100510.
47. McCall G.J.H. The Vendian (Ediacaran) in the geological record: enigmas in geology's prelude to the Cambrian explosion // Earth-Science Reviews. – 2006. – V. 77. – P. 1–229.
48. Соколов Б.С., Федонкин М.А. Вендская система. Т. 2. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Стратиграфия и геологические процессы. – М.: Наука, 1985. – 246 с.
49. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: Sources of DIC and their magnitudes // Earth and Planetary Science Letters. – 2005. – V. 236. – Iss. 1–2. – P. 419–429.
50. Liu Z., Dreybrodt W., Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget: considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms // Earth-Science Reviews. – 2010. – V. 99. – № 3–4. – P. 162–172.
51. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO₂ // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – Iss. 1. – P. 107–114.
52. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO₂ / M. Górka, P.E. Sauer, D. Lewicka-Szczebak, M.-O. Jędrzysek // Environmental Pollution Volume. – 2011. – V. 159. – № 1. – P. 294–301.
53. Simultaneous determination of dissolved inorganic carbon (DIC) concentration and stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ -DIC) by Cavity Ring-Down Spectroscopy: application to study carbonate dynamics in the Chesapeake Bay / J. Su, W.-J. Cai, N. Hussain, J. Brodeur, B. Chen, K. Huang // Marine Chemistry. – 2019. – V. 215. – article 103689.
54. Emrich K., Ehhalt D.H., Vogel J.C. Carbon isotope fractionation during the precipitation of calcium carbonate // Earth and Planetary Science Letters. – 1970. – V. 8. – Iss. 5. – P. 363–371.
55. Keith M.L., Weber J.N. Isotopic composition and environmental classification of selected limestone and fossils // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1964. – V. 28. – P. 1787–1816.
56. Sage R.F., Stata M. Photosynthetic diversity meets biodiversity: the C4 plant example // Journal of Plant Physiology. – 2015. – V. 172. – P. 104–119.
57. Stable carbon isotope fractionation, carbon flux partitioning and priming effects in anoxic soils during methanogenic degradation of straw and soil organic matter / R. Conrad, M. Klose, Q. Yuan, Y. Lu, A. Chidthaisong // Soil Biology and Biochemistry. – 2012. – V. 49. – P. 193–199.
58. Factors controlling the carbon isotope composition of dissolved inorganic carbon and methane in marine porewater: an evaluation by reactiontransport modelling / P. Meister, B. Liu, A. Khalili,

- M.E. Böttcher, B.B. Jørgensen // Journal of Marine Systems. – 2019. – V. 200. – article 103227.
59. Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico / J.W. Pohlman, C. Ruppel, D.R. Hutchinson, R. Downer, R.B. Coffin // Marine and Petroleum Geology. – 2008. – V. 25. – P. 942–951.
60. Stable carbon isotope fractionation between substrates and products of *Methanosarcina barkeri* / K.L. Londry, K.G. Dawson, H.D. Grover, R.E. Summons, A.S. Bradley // Organic Geochemistry. – 2008. – V. 39. – P. 608–621.
61. Banner J.L. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy // Earth-Sci. Rev. – 2004. – V. 65. – Iss. 3–4. – P. 141–194.
62. McArthur J.M., Howarth R.J., Shields G.A. The geologic time scale. Ch. 7. Strontium Isotope Stratigraphy. – Amsterdam: Elsevier, 2012. 18 p.
63. Alexeev S., Alexeeva L., Shouakar-Stash O. Strontium isotopic ratio in brines from the north-east of the Angara-Lenskiy artesian basin // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – article 12001.

Поступила 26.08.2020 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 СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Пыряев А.Н., кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории изотопно-аналитической геохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; старший преподаватель кафедры химической и биологической физики Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

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

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

Ильин А.В., главный гидрогеолог, Октябрьская геологоразведочная партия, Вилуйская геологоразведочная экспедиция, АК «АЛРОСА» (ПАО).

Чертовских Е.О., руководитель службы нефтепромысловой химии и контроля качества УВС – руководитель проекта, проектный офис «Рассолы», ООО «Иркутская Нефтяная Компания».

UDK 553.76 (571.5)

NEW DATA ON THE ISOTOPIC COMPOSITION ($\delta^{13}\text{C}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ AND $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) OF THE SIBERIAN PLATFORM BRINES

Dmitry A. Novikov^{1,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Aleksandr N. Pyrayev^{3,2},
pyrayev@igm.nsc.ru

Anatoliy V. Chernykh¹,
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Fedor F. Dultsev¹,
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Alexander V. Ilyin⁴,
IlyinAV@alrosa.ru

Evgeny O. Chertovskikh⁵,
chertovskih_eo@irkutskoil.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS,
3/6, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ Institute of Geology and Mineralogy of SB RAS,
3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

⁴ Oktyabrskaya Exploration Party, Vilyuyskaya Exploration Expedition, PJSC ALROSA,
6, Lenin street, Mirny, 678170, Russia.

⁵ Project office «Brines», Irkutsk Oil Company LLC,
4, Bolshoi Liteiny avenue, Irkutsk, 664007, Russia.

The relevance of the study is caused by obtaining new isotope-geochemical data for the Siberian platform brines.

The aim of the research is to reveal the genesis of the brines and dissolved inorganic carbon as well as investigation of the water–environment interactions.

Methods. Field sampling was carried out using common methods. Chemical analysis of brines was carried out by titrimetry, ion chromatography and inductively coupled plasma mass spectrometry. The analysis of the stable isotope composition (δD , $\delta^{18}\text{O}$, and $\delta^{13}\text{C}$) was carried out using the Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan TM MAT 253 equipped with H/Device (for δD analysis) and GasBench II (for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ analysis). The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratios were studied using the MI 1201T mass spectrometer in a two-strip mode with registration on one collector.

Results. The new isotope-geochemical data on the Siberian platform supersaturated brines of a wide stratigraphic range (from Riphean to Ordovician) are presented. There is a wide range of oxygen and hydrogen stable isotope composition in the studied brines: from -133 to -17.5 ‰ for δD and from -17.0 to -2.5 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$. The δD and $\delta^{18}\text{O}$ values point on the sedimentation-metamorphic genesis of the brines. The carbon isotope composition of the DIC in brines range from -31 to $+12.7$ ‰. It is supposed that DIC has the biogenic (bacterial) origin. The youngest brine DIC has the heaviest carbon isotope composition whereas the oldest brine DIC has the biggest concentration of ^{12}C . The strontium ratios of the studied brines divide them into two groups: with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios, close to those of the modern ocean waters, and brines with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values significantly exceeding modern ocean strontium ratios. It is assumed that the burial of the brines of the second group took place in the presence of clastic material of the continental crust, with a high content of radioactive ^{87}Rb .

Key words:

Brines, stable isotope composition $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, δD , isotopic ratios $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, water–rock interaction, methanogenesis, SMT processes, Siberian platform, Arctic.

The research was financially supported by the FSR no. 0331-2019-0025 and the Russian Foundation for Basic Research as part of the scientific project no. 18-05-70074 «Arctic Resources».

REFERENCES

1. Brandt S.B., Borisov V.N., Lepin V.S., Lomonosov I.S., Pinneker E.V. *Izotopnye otnosheniya strontsiya v nekotorykh prirodnykh vodakh Sibiri* [Isotope ratios of strontium in some natural waters of Siberia]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 169 p.
2. Pinneker E.V., Borisov V.N., Kustov Yu.I., Brandt S.S., Dnieper L.V. New data on the isotopic composition of oxygen and brines of the Siberian platform. *Water Resources*, 1987, no. 3, pp. 105–115. In Rus.
3. Pinneker E.V., Shvaptsev S.L. Isotopes of strontium in the waters of the Siberian. *Doklady Akademii Nauk*, 1996, vol. 351, no. 1, pp. 109–111. In Rus.

4. Shvaptsev S.L. The chemical composition and isotopes of the solids of the Tunguska Bassein in connection with the problem of their formation. *Geokhimiya*, 2000, no. 11, pp. 1170–1184. In Rus.
5. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Borisov V.N., Shouakar-Stash O., Frapce S.K., Chabaux F., Kononov A.M. Isotopic composition (H, O, Cl, Sr) of ground brines of the Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 3, pp. 291–304. In Rus.
6. Alexeeva L.P., Alexeev S.V. *Geokhimiya podzemnykh ldov, solenyykh vod i rassolov Zapadnoy Yakutii* [Geochemistry of ground ice, salt water and brines in Western Yakutia]. Novosibirsk, Geo Publ. house, 2019. 214 p.
7. Shouakar-Stash O., Alexeev S.V., Frapce S.K., Alexeeva L.P., Drimmie R.J. Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes, of the deep groundwaters of the Siberian Platform, Russia. *Applied Geochemistry*, 2007, vol. 22, Iss. 3, pp. 589–605.
8. Alexeeva L.P., Alexeev S.V., Kononov A.M. Isotopic strontium ratio ($^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$) in ground ice and waters of the Olenek artesian basin (western Yakutia). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya RAYEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdeniy*, 2014, no. 6 (49), pp. 97–103. In Rus.
9. Alexeeva L.P., Alexeev S.V., Kononov A.M., Teng M., Yunde L. Chlorine and Bromine Isotops in Brines of the Western Yakutia. *Bulletin of the Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*, 2015, vol. 13, pp. 19–30. In Rus.
10. Pelechaty S.M., Kaufman A.J., Grotzinger J.P. Evaluation of $\delta^{13}\text{C}$ chemostratigraphy for intrabasin correlation: Vendian strata of northeast Siberia. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1996, vol. 108, Iss. 8, pp. 992–1003.
11. Kostrovitsky S.I. *Geokhimicheskie osobennosti kimberlitov* [Geochemical features of kimberlites]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 263 p.
12. Maas R., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Kamenetsky V.S., Sobolev N.V. Sr, Nd, and Pb isotope evidence for a mantle origin of alkali chlorides and carbonates in the Udachnaya kimberlite, Siberia. *Geology*, 2005, vol. 33, Iss. 7, pp. 549–552.
13. Tomilenko A.A., Dublyansky Yu.V., Kuzmin V., Sobolev N.V. Isotope compositions of C and O of magmatic calcites from the Udachnaya-East pipe kimberlite, Yakutia. *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 475, Iss. 1, pp. 828–831. In Rus.
14. Shatskii V.S., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Kalinina V.V., Reutskii V.N. Local variations in carbon isotopes and nitrogen contents in diamonds from placers of the northeastern portion of the Siberian Platform. *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 440, Iss. 1, pp. 1282–1286.
15. Gornova M.A., Polozov A.G., Ignatev A.V., Velivetskaya T.A. Peridotite nodules from the Udachnaya kimberlite pipe: «Nonmantle» oxygen isotope ratios in garnets. *Doklady Earth Sciences*, 2007, vol. 415, Iss. 5, pp. 777–781. In Rus.
16. Novikov D.A., Ilyin A.V., Kashirtsev V.A., Chernykh A.V., Pyryaev A.N., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Zueva I.N., Chalaya O.N. Geochemistry of brines and petroleum occurrences in the Udachnaya kimberlite pipe (Siberian platform). *Russian Geology and Geophysics*, 2021. DOI: 10.15372/GiG2021115.
17. Novikov D.A., Chernykh A.V., Konstantinova L.N., Dultsev F.F., Yurchik I.I. Hydrogeochemistry of Vendian sequences of the Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*, 2021. DOI: 10.15372/GiG2021115.
18. Gordeeva A.O., Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Effect of Trap Magmatism on the Geochemistry of Gases in the North-Western Regions of the Siberian Platform. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. vol. 666, no. 5, article 052055.
19. Novikov D.A., Gordeeva A.O., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Zhitova L.M. The influence of trap magmatism on the geochemical composition of brines of petroliferous deposits in the Western areas of the Kureika syncline (Siberian Platform). *Russian Geology and Geophysics*, 2021, vol. 62, no. 6, pp. 701–719.
20. Kashirtsev V.A., Parfenova T.M., Moiseev S.A., Chernykh A.V., Novikov D.A., Burshtein L.M., Dolzhenko K.V., Rogov V.I., Melnik D.S., Zueva I.N., Chalaya O.N. The Sukhana Sedimentary Basin, Siberian Platform: Source Rock Characterization and Direct Evidence of Oil and Gas Presence. *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60, no. 10, pp. 1175–1187.
21. Novikov D.A., Zhitova L.M., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Primary data on the impact from trap magmatism on the hydrogeochemistry of brines in the southwestern part of the Kureika syncline (Siberian Platform). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, article 08017.
22. 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, vol. 193, article 012052.
23. Novikov D.A. Genetic classification of subsurface waters and brines of Arctic regions of Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 193, article 012049.
24. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, vol. 44, no. 5, pp. 780–786.
25. 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, article 63.
26. Boral S., Sen I.S., Ghosal D., Peucker-Ehrenbrink B., Hemingway J.D. Stable water isotope modeling reveals spatio-temporal variability of glacier meltwater contributions to Ganges River headwaters. *Journal of Hydrology*, 2019, vol. 577, article no. 123983.
27. Wenninger J., Beza D.T., Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soil-vegetation-atmosphere system: stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010, vol. 35, pp. 565–570.
28. Cotovicz Jr. L.C., Knoppers B.A., Deirmendjian L., Abril G. Sources and sinks of dissolved inorganic carbon in an urban tropical coastal bay revealed by $\delta^{13}\text{C}$ -DIC signals. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, vol. 220, pp. 185–195.
29. Shoedarto R.M., Tada Y., Kashiwaya K., Koike K. Specifying recharge zones and mechanisms of the transitional geothermal field through hydrogen and oxygen isotope analyses with consideration of water-rock interaction. *Geothermics*, 2020, vol. 86, article no. 101797.
30. Stefánsson A., Arnórsson S., Sveinbjörnsdóttir A.E., Heinemaier J., Kristmannsdóttir H. Isotope (δD , $\delta^{18}\text{O}$, ^3H , $\delta^{13}\text{C}$, ^{14}C) and chemical (B, Cl) Constrains on water origin, mixing, water-rock interaction and age of low-temperature geothermal water. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 108, article no. 104380.
31. Aydın H., Karakuş H., Mutlu H. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, vol. 390, article no. 106708.
32. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. *Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment*. Cham, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. 460 p.
33. Santucci L., Sancı R., Carol E., Villalba E., Panarello H. Using H, O, Rn isotopes and hydrometric parameters to assess the surface water-groundwater interaction in coastal wetlands associated to the marginal forest of the Río de la Plata. *Continental Shelf Research*, 2019, vol. 186, pp. 104–110.
34. Cartwright I., Weaver T., Tweed S., Ahearne D., Cooper M., Czapnik C., Tranter J. O, H, C isotope geochemistry of carbonated mineral springs in central Victoria, Australia: sources of gas and water-rock interaction during dying basaltic volcanism. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, vol. 257–26, pp. 69–70.
35. Soulsby C., Birkel C., Geris J., Dick J., Tunaley C., Tetzlaff D. Stream water age distributions controlled by storage dynamics and nonlinear hydrologic connectivity: modeling with high-resolution isotope data. *Water Resources Research*, 2015, vol. 51, pp. 7759–7776.
36. Xia Z., Zheng Y., Stelling J.M., Loisel J., Huang Y., Yu Z. Environmental controls on the carbon and water (H and O) isotopes in peatland Sphagnum mosses. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, vol. 277, pp. 265–284.
37. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
38. Wu H., Wu J., Song F., Abuduwaili J., Saparov A.S., Chen X., Shen B. Spatial distribution and controlling factors of surface water stable isotope values ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) across Kazakhstan, Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 678, pp. 53–61.

39. Chafouq D., El Mandour A., Elgettafi M., Himi M., Choukri I., Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 2018, vol. 139, pp. 1–13.
40. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 210, article no. 106445.
41. Yu H., Ma T., Du Y., Chen L. Genesis of formation water in the northern sedimentary basin of South China Sea: clues from hydrochemistry and stable isotopes (D, ^{18}O , ^{37}Cl and ^{81}Br). *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 196, pp. 57–65.
42. Alexeeva L.P., Alexeev S.V. Geochemistry of ground ice, saline groundwater, and brines in the cryoartesian basins of the north-eastern Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, pp. 144–156.
43. Truesdell A.H., Hulston J.R. *Isotopic evidence on environments of geothermal systems. Handbook of Environmental Isotope Chemistry*. New York, Elsevier Publ., 1980. Vol. 1, pp. 179–226.
44. Andreo B., Linan C., Carrasco F., Jimenez de Cisneros C., Caballero F., Mudry J. Influence of rainfall quantity on the isotopic composition (^{18}O and ^2H) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain). *Applied Geochemistry*, 2004, vol. 19, pp. 561–574.
45. Bagheri R., Bagheri F., Karami G.H., Jafari H. Chemo-isotopes (^{18}O & ^2H) signatures and HYSPLIT model application: clues to the atmospheric moisture and air mass origins. *Atmospheric Environment*, 2019, vol. 215, article no. 116892.
46. Ma T., Li L., Li Y., An C., Yu J., Ma H., Jiang S. Stable isotopic composition in snowpack along the traverse from a coastal location to Dome A (East Antarctica): Results from observations and numerical modeling. *Polar Science*, 2020, vol. 24, article no. 100510.
47. McCall G.J.H. The Vendian (Ediacaran) in the geological record: enigmas in geology's prelude to the Cambrian explosion. *Earth-Science Reviews*, 2006, vol. 77, pp. 1–229.
48. Sokolov B.S., Fedonkin M.A. *Vendская система. Том 2. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Стратиграфия и геологические процессы* [Vendian system. Vol. 2. Historical, geological and paleontological substantiation. Stratigraphy and geological processes]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 246 p.
49. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, vol. 236, Iss. 1–2, pp. 419–429.
50. Liu Z., Dreybrodt W., Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO_2 budget: considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms. *Earth-Science Reviews*, 2010, vol. 99, Iss. 3–4, pp. 162–172.
51. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO_2 . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, Iss. 1, pp. 107–114.
52. Górka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczębak D., Jędrysek M.-O. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO_2 . *Environmental Pollution Volume*, 2011, vol. 159, Iss. 1, pp. 294–301.
53. Su J., Cai W.-J., Hussain N., Brodeur J., Chen B., Huang K. Simultaneous determination of dissolved inorganic carbon (DIC) concentration and stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ -DIC) by Cavity Ring-Down Spectroscopy: application to study carbonate dynamics in the Chesapeake Bay. *Marine Chemistry*, 2019, vol. 215, article no. 103689.
54. Emrich K., Ehhalt D.H., Vogel J.C. Carbon isotope fractionation during the precipitation of calcium carbonate. *Earth and Planetary Science Letters*, 1970, vol. 8, Iss. 5, pp. 363–371.
55. Keith M.L., Weber J.N. Isotopic composition and environmental classification of selected limestone and fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, vol. 28, pp. 1787–1816.
56. Sage R.F., Stata M. Photosynthetic diversity meets biodiversity: the C4 plant example. *Journal of Plant Physiology*, 2015, vol. 172, pp. 104–119.
57. Conrad R., Klose M., Yuan Q., Lu Y., Chidthaisong A. Stable carbon isotope fractionation, carbon flux partitioning and priming effects in anoxic soils during methanogenic degradation of straw and soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, vol. 49, pp. 193–199.
58. Meister P., Liu B., Khalili A., Böttcher M.E., Jørgensen B.B. Factors controlling the carbon isotope composition of dissolved inorganic carbon and methane in marine porewater: An evaluation by reaction-transport modelling. *Journal of Marine Systems*, 2019, vol. 200, article no. 103227.
59. Pohlman J.W., Ruppel C., Hutchinson D.R., Downer R., Coffin R.B. Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, vol. 25, pp. 942–951.
60. Londry K.L., Dawson K.G., Grover H.D., Summons R.E., Bradley A.S. Stable carbon isotope fractionation between substrates and products of *Methanosarcina barkeri*. *Organic Geochemistry*, 2008, vol. 39, pp. 608–621.
61. Banner J.L. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Sci. Rev.*, 2004, vol. 65, Iss. 3–4, pp. 141–194.
62. McArthur J.M., Howarth R.J., Shields G.A. *The Geologic Time Scale. Ch. 7. Strontium Isotope Stratigraphy*. Amsterdam, Elsevier, 2012, 18 p.
63. Alexeev S., Alexeeva L., Shouakar-Stash O. Strontium isotopic ratio in brines from the north-east of the Angara-Lenskiy artesian basin. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, article no. 12001.

Received: 26 August 2020.

Information about the authors

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics; associate professor, Novosibirsk State University.

Aleksandr N. Pyrayev, Cand. Sc., Institute of Geology and Mineralogy of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; senior lecturer, Novosibirsk State University.

Anatoliy V. Chernykh, research associate, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Fedor F. Dultsev, research associate, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Alexander V. Ilyin, chief hydrogeologist, Oktyabrskaya Exploration Party, Vilyuyskaya Exploration Expedition, PJSC ALROSA.

Evgeny O. Chertovskikh, head of the oilfield chemistry and quality control service of hydrocarbons, project manager, project office «Brines», Irkutsk Oil Company LLC.

УДК 620.91

СРАВНИТЕЛЬНАЯ СТОИМОСТНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ И ТРАДИЦИОННЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ТЕПЛА

Марченко Олег Владимирович¹,
marchenko@isem.irk.ru

Соломин Сергей Владимирович¹,
solomin@isem.irk.ru

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Актуальность. Древесная биомасса является важным источником возобновляемой энергии. В процессе утилизации и энергетического использования древесины высвобождается углерод, который поглощается деревьями из атмосферы. В связи с этим баланс углерода в атмосфере сохраняется примерно постоянным, что способствует предотвращению глобального неблагоприятного изменения климата. Утилизация древесных отходов и их энергетическое использование положительно влияет на экологическую ситуацию, а также позволяет повысить надежность и экономичность тепло- и электроснабжения потребителей.

Цель: оценка экономической эффективности газогенераторных энергетических установок на древесном топливе в условиях Иркутской области и сравнение их с системами когенерации электрической и тепловой энергии других типов.

Методы. Получены аналитические зависимости для расчета стоимости электрической энергии при заданной стоимости тепла и наоборот, тепловой энергии при заданной стоимости электрической энергии, проведена оценка эффективности энергоисточников разных типов по критерию стоимости производимой энергии. Полученные зависимости применены для оценок экономической эффективности и сопоставления энергоустановок, работающих на разных видах топлива: древесной щепе и топливных гранулах (пеллетах), на угле, природном газе и жидком (дизельном) топливе.

Результаты. Показано, что стоимость энергии при использовании древесного топлива существенно меньше стоимости энергии дизельной электростанции за счет использования более дешевого топлива. Системы когенерации энергии на основе газификации древесной биомассы могут также успешно конкурировать с энергоустановками на угле и газе при наличии в месте их размещения дешевой топливной щепы. При введении налога на выбросы диоксида углерода конкурентоспособным по сравнению с углем и газом становится использование не только древесной щепы, но и пеллет.

Ключевые слова:

Древесные отходы, энергоснабжение, когенерация, мини-ТЭЦ на древесном топливе, экономическая эффективность, стоимость энергии.

Введение

В последние десятилетия в мировой энергетике происходит значительное повышение роли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1]. В перспективе до 2050 г. их доля в энергобалансе будет расти существенно более быстрыми темпами, чем доля традиционных энергоисточников [2–4]. Это обусловлено стремлением снизить негативное влияние энергетике на окружающую среду, в том числе уменьшить антропогенное влияние на климат, вызванное выбросами углекислого газа в промышленности и энергетике. Одним из вариантов сокращения выбросов CO₂ может быть замена ископаемого топлива возобновляемыми альтернативами [5–7].

Более сотни стран имеют программы стимулирования внедрения ВИЭ, применяемых для электро- и теплоснабжения потребителей [1]. Для этого применяются различные экономические механизмы: фиксированные тарифы на энергию ВИЭ, субсидии инвесторам, введение квот на «зеленую энергию» и организация рынка «зеленых сертификатов». Достаточно эффективным способом стимулирования внедрения ВИЭ служат экологические налоги на выбросы CO₂ и системы торговли квотами на эмиссию диоксида углерода. Налоги на эмиссию энергоисточников на ис-

копаемом топливе изменяют соотношение стоимости производимой энергии в пользу возобновляемых источников энергии. В разных странах величина налога колеблется в пределах нескольких десятков долларов США на 1 т CO₂. Особенно большое внимание экологическим проблемам энергетике уделяется в странах Европейского Союза. Последние изменения в политической ситуации США также приведут, как ожидается, к ускорению движения энергетике как США, так и мира, в направлении перехода к ВИЭ, в том числе посредством введения налогов на эмиссию диоксида углерода. В России введение налога на эмиссию диоксида углерода также возможно в перспективе.

Значительным потенциалом среди ВИЭ, наряду с получившими широкое развитие гидроэнергетикой, ветровой и солнечной энергетикой, обладает древесная биомасса. Внедрение технологий энергетического использования биомассы положительно влияет на экологическую ситуацию в региональном и глобальном масштабах, а также на эффективность систем энергетике и развитие экономики [8].

Разными авторами предложены методики оценки энергетического использования топлива с учетом затрат, связанных с выбросами других вредных веществ, кроме диоксида углерода (диоксида серы, окислов

азота и др.) [7, 9]. Изучение воздействия других загрязнителей на природу и здоровье людей требует учета местной специфики и возможно только на локальном уровне. В то же время выбросы диоксида углерода объектами энергетики легче поддаются учету, а их суммарный объем оказывает глобальное влияние на климат. При этом наиболее принципиальным отличием биомассы от традиционных органических топлив является ее возобновляемость и CO_2 -нейтральность в течение жизненного цикла [10, 11].

Энергетическое использование древесины (сжигание или химическая переработка во вторичное топливо – жидкое или газообразное) высвобождает углерод, который поглощается растениями из атмосферы. В связи с этим баланс углерода в атмосфере сохраняется примерно постоянным, что минимизирует вклад высвобождающегося диоксида углерода в процесс глобального потепления. Одновременно с этим меньше, по сравнению со сжиганием ископаемого топлива (угля и нефтепродуктов), выбрасывается в атмосферу и некоторых других вредных веществ, в частности, окислов серы и азота [10, 11]. Энергетическое использование отходов лесозаготовки и лесопереработки, не только не наносит ущерба лесам, но и улучшает экологическую ситуацию. Снижается пожароопасность, захламливание и загрязнение территории, поверхностных и подземных водных ресурсов.

Древесную биомассу, а также другие сельскохозяйственные отходы традиционно используют для отопления и приготовления пищи путем сжигания в простых и малоэффективных печах. Вместе с тем в настоящее время существуют новые технологии энергетического использования древесной биомассы. К ним относится технология газификации [12–17]. В Институте систем энергетики СО РАН разработана установка многоступенчатой газификации древесного топлива [18]. При многоступенчатом процессе газификации экзотермическая стадия внутреннего горения происходит в отдельном реакторе (или зоне), полученный горючий газ полностью или частично сжигается в камере сгорания, а продукты сгорания используются в качестве газифицирующего агента во втором реакторе, куда подается древесный уголь из первого реактора. Такая установка позволяет получить очищенный от вредных примесей (смолы) генераторный газ, пригодный для выработки тепловой и электрической энергии в экономичных системах тепло- и электроснабжения.

Важным фактором, определяющим целесообразность и масштабы развития энергетики на основе использования биомассы, является экономическая эффективность установок. В работе [19] была исследована конкурентоспособность биомассы для крупномасштабных систем централизованного теплоснабжения. Показано, что в большинстве случаев теплоснабжающие установки на биомассе могут конкурировать с традиционными энергоисточниками на угле и газе только при условии введения налога на эмиссию диоксида углерода в размере 40–60 евро (€) за тонну CO_2 . Для конкурентоспособности когенерационных установок, производящих одновременно и

тепловую, и электрическую энергию, требуются еще большие значения платы за выбросы углерода.

В системах распределенной генерации энергии малой мощности степень конкурентоспособности установок на биомассе повышается. В этом случае установки на биомассе при определенных условиях оказываются эффективными по сравнению с энергоисточниками на дорогом (вследствие необходимости его транспортировки на значительные расстояния) привозном дизельном топливе [20]. Для повышения экономической эффективности энергоснабжения в таких районах целесообразно применение источников энергии разных типов, в том числе, использующих в качестве топлива древесную биомассу, значительные запасы которой имеются на севере Европейской части России (Архангельская область) и в Сибири (Иркутская область, Красноярский край). Наибольший объем лесозаготовок – в Иркутской области (13–17 % общероссийских), там же сосредоточены основные ресурсы отходов (около 17–18 млн $\text{м}^3/\text{год}$) [18].

Отходы лесопереработки могут быть использованы в энергетике непосредственно в виде щепы. Более дорогое, но и более эффективное топливо – пеллеты (топливные гранулы). Пеллеты в настоящее время используются во многих странах в качестве топлива для производства тепловой и электрической энергии как путем сжигания, так и путем пиролиза и газификации в установках, производящих тепловую и электрическую энергию.

Важным вопросом при экономическом анализе и сравнении когенерационных установок является учет одновременной выработки двух видов энергии – тепловой и электрической [21, 22]. Для этого применяют различные методы разделения суммарных затрат по видам продукции. Так, например, в [23] для оценки стоимости производимой электрической и тепловой энергии предлагается распределять затраты пропорционально ценам на электроэнергию и тепло. В [24] в качестве основного продукта выбрано отпускаемое потребителями тепло, а вырабатываемая электроэнергия рассматривается как побочный продукт. Это позволяет получить аналитическое выражение для расчета стоимости тепловой энергии при заданной стоимости электрической энергии. В [16] в качестве основного продукта предлагается выбирать электрическую энергию, поскольку она всегда дороже тепловой.

Постановка задачи

Цель работы – оценка экономической эффективности мини-ТЭЦ (энергоустановок с одновременным производством электрической и тепловой энергии) на древесном топливе в условиях России (Иркутская область) и сравнение ее с системами когенерации электрической и тепловой энергии других типов. В качестве критерия использована стоимость производимой энергии. Получены аналитические соотношения для определения стоимости (удельных затрат на производство) электрической энергии при заданной стоимости тепла и наоборот, тепловой энергии при заданной стоимости электрической энергии, которые являются обобщением подходов [16, 24].

Они применены для оценок экономической эффективности и сопоставления энергоустановок малой мощности (до 200–500 кВт). Газогенераторные мини-ТЭЦ, использующие древесную биомассу (древесную щепу или топливные гранулы (пеллеты)), сопоставлялись по критерию стоимости производимой энергии с энергоустановками, работающими на других видах топлива: ТЭЦ на угле и электростанциями на природном газе и жидком (дизельном) топливе. Последние снабжены котлами-утилизаторами и отпускают одновременно с электрической также и тепловую энергию.

Методика оценки экономической эффективности

Для оценки конкурентоспособности мини-ТЭЦ, использующей древесные отходы, необходимо сравнить показатели проекта ее строительства и эксплуатации с показателями проектов конкурирующих энергоисточников. Обычно в качестве критерия эффективности инвестиционного проекта используют чистый дисконтированный доход (ЧДД). При неотрицательном ЧДД целесообразно инвестировать в проект, наилучший из нескольких проектов – проект с максимальным ЧДД.

Следует отметить, что ЧДД существенно зависит от масштаба проекта, поэтому с его помощью оценивается эффективность вариантов вложения капитала. Для сравнения энергетических технологий целесообразно исключить влияние фактора масштаба, поэтому во многих исследованиях используют более удобный критерий – стоимость энергии (удельные дисконтированные затраты на производство) [25]. Минимум стоимости энергии соответствует максимуму ЧДД.

При отпуске потребителям одновременно и электрической, и тепловой энергии возникает проблема выбора единого показателя для сравнения энергоисточников. В принципе, зная характеристики всех присутствующих на рынке энергоустановок, можно, решив задачу математического программирования, одновременно найти цены как электрической, так и тепловой энергии. Однако весь набор требуемой для этого информации часто либо неполон, либо недоступен.

В связи с этим ниже получены аналитические выражения для определения стоимости электроэнергии в случае, когда стоимость тепла задана. Одновременно найдены зависимости для расчета стоимости тепла, когда задана стоимость электроэнергии. Выбор одного из этих вариантов определяется тем, какие виды энергии производит оцениваемый энергоисточник, а при одновременном производстве электрической и тепловой энергии – какую из них целесообразно выбрать в качестве критерия для сопоставления энергоустановок.

ЧДД проекта строительства и эксплуатации источника электрической и тепловой энергии определяется следующей зависимостью:

$$\hat{E} = \int_{-\Delta T_0}^{\Delta T + \Delta T_1} E(\tau) e^{-\sigma \tau} d\tau.$$

Здесь использованы обозначения: ΔT_0 – время строительства, ΔT – время работы в номинальном режиме, ΔT_1 – продолжительность демонтажа, $E(\tau)$ –

финансовый поток, $\sigma = \ln(1+d)$ – непрерывная, а d – годовая норма дисконта [26].

Предположим, для простоты, что затраты K_0 и K_1 (на строительство и демонтаж) распределены равномерно, непредвиденные затраты K_0^* условно приведены к моменту пуска, а финансовый поток имеет вид $E(\tau) = E_0 + E_1 e^{\mu \tau}$, т. е. представляет собой сумму постоянной величины E_0 и экспоненциальной функции $E_1 e^{\mu \tau}$. Последняя функция возрастает с темпом $\mu = \ln(1+\mu^*)$ и учитывает изменения характеристик проекта в период эксплуатации: увеличение цен на электроэнергию и тепло, экологических налогов и др. с годовым темпом прироста μ^* . Тогда

$$\hat{E} = \int_{-\Delta T_0}^0 \left(-\frac{K_0}{\Delta T_0} \right) e^{-\sigma \tau} d\tau - K_0^* + \int_0^{\Delta T} (E_0 + E_1 e^{\mu \tau}) e^{-\sigma \tau} d\tau + \int_{\Delta T}^{\Delta T + \Delta T_1} \left(-\frac{K_1}{\Delta T_1} \right) e^{-\sigma \tau} d\tau.$$

Интегрируя, получим

$$\hat{E} = -K_0 \varphi(\sigma \Delta T_0) - K_0^* + E_0 \Delta T \psi(\sigma \Delta T) + E_1 \Delta T \psi((\sigma - \mu) \Delta T) - K_1 e^{-\sigma \Delta T} \psi(\sigma \Delta T_1).$$

Введенные здесь функции $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ удобно представить в виде степенных рядов:

$$\varphi(x) = \frac{e^x - 1}{x} = 1 + \frac{x}{2!} + \frac{x^2}{3!} + \frac{x^3}{4!} + \dots$$

$$\psi(x) = \frac{1 - e^{-x}}{x} = 1 - \frac{x}{2!} + \frac{x^2}{3!} - \frac{x^3}{4!} + \dots$$

Эти ряды могут использоваться для оценок при малых параметрах, а также в некоторых предельных случаях, когда эти параметры (например, сроки строительства или демонтажа) можно принять равными нулю.

Инвестиции в первом приближении равны производству удельных капиталовложений на установленную мощность W , где W – либо электрическая, либо тепловая мощность:

$$K_0 = k_0 W, \quad K_0^* = k_0^* W, \quad K_1 = k_1 W.$$

Финансовый поток $E(\tau)$ в период эксплуатации равен разности выручки и затрат. Выручка – от реализации производимой энергии (электрической и тепловой), затраты – на топливо, эксплуатационные издержки, а также экологические штрафы и налоги, например, за эмиссию парниковых газов:

$$E(\tau) = p_e e^{\mu_e \tau} Q_e + p_h e^{\mu_h \tau} Q_h - p_f e^{\mu_f \tau} F - p_c e^{\mu_c \tau} F - \delta K_0,$$

где p – цена; μ – темп ее роста; Q – отпуск энергии; F – расход топлива; δ – доля постоянных затрат. Индексы e, h, f и c относятся соответственно к электрической и тепловой энергии, топливу и эмиссии вредных веществ. Предполагается, что в общем случае разные цены могут возрастать с разными темпами.

Учитывая балансы энергии (рис. 1)

$$Q_e = (1 - \beta_e) \eta_e F,$$

$$Q_h = (1 - \beta_h)(1 - \eta_e) \eta_h F$$

и приравнявая ЧДД нулю, находим стоимость электрической или тепловой энергии при известном значении стоимости энергии другого вида:

$$p_e = \frac{1}{(1-\beta_e)\eta_e\psi_e} \left[\Omega - p_h(1-\beta_h)(1-\eta_e)\eta_h\psi_h \right],$$

$$p_h = \frac{1}{(1-\beta_h)(1-\eta_e)\eta_h\psi_h} \left[\Omega - p_e(1-\beta_e)\eta_e\psi_e \right].$$

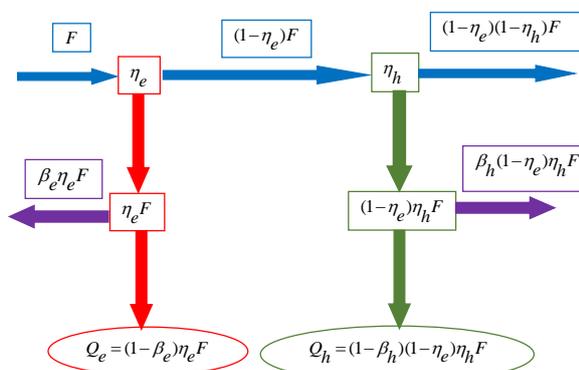


Рис. 1. Схема потоков энергии. F – топливо, η – КПД, β – потери, Q – полезная энергия; индексы e и h – электрическая и тепловая энергия

Fig. 1. Scheme of energy flows. F – fuel, η – efficiency, β – losses (or energy costs for the plant's own needs), Q – useful energy; indices: e – electrical energy, h – heat energy

Здесь введены обозначения

$$\Omega = \frac{k_0}{\xi} \frac{1}{\Delta T} \varphi(\sigma\Delta T_0) + \frac{k_0^*}{\xi} \frac{1}{\Delta T} + \delta \frac{k_0}{\xi} \psi(\sigma\Delta T) + p_f\psi_f + p_c\psi_c + \frac{k_1}{\xi} \frac{e^{-\sigma\Delta T}}{\Delta T} \psi(\sigma\Delta T_1),$$

$$\psi_i = \psi((\sigma - \mu_i)\Delta T), \quad i = e, h, f, c,$$

а величина ξ вычисляется по формуле

$$\xi = \frac{h_e}{\eta_e},$$

если W – электрическая мощность, или по формуле

$$\xi = \frac{h_h}{(1-\eta_e)\eta_h},$$

если W – тепловая мощность.

Таблица. Техничко-экономические показатели (когенерация электрической и тепловой энергии)

Table. Technical and economic indicators (cogeneration of electricity and heat)

Топливо Fuel	k , \$/кВт \$/kW	δ , 1/год 1/year	η_e	η_h	ΔT , лет years	Цена топлива, \$/т у.т. Fuel price, \$/tce
Щепа/Chips	1200–1400	0,11	0,26...0,28	0,49...0,54	20	25–55
Пеллеты/Pellets	900–1000	0,07	0,27...0,30	0,50...0,55	20	107–145
Уголь/Coal	1050–1300	0,08	0,29...0,31	0,51...0,54	20	27–43
Газ/Gas	670–720	0,04	0,29...0,31	0,54...0,55	15	66–75
Дизтопливо/Diesel fuel	470–560	0,08	0,31...0,33	0,39...0,49	15	500–700

В последних зависимостях h – число часов использования мощности W .

Исходные данные для расчетов

Полученные соотношения были использованы для оценок экономической эффективности и сопоставления энергоустановок малой мощности: ТЭЦ на биомассе (щепа, пеллеты) и угле, а также электростанции на газе и жидком топливе с отпуском тепла. Техничко-экономические показатели энергоустановок на основе анализа литературных данных [16, 18, 26–28] представлены в таблице. Для учета погрешностей некоторых параметров они заданы в виде интервала неопределенности.

В качестве мини-ТЭЦ на биомассе рассматривалась установка с многоступенчатой газификацией древесного топлива, очисткой синтез-газа и его использованием для электро- и теплоснабжения [16, 18]. При оценке эффективности работы установки для газификации твердого топлива в [29] предложено использовать предельные возможности процесса, т. е. максимальные показатели, к которым следует стремиться при оптимизации технологических режимов для работы с данным составом топлива. Таким показателем может быть предельный по термодинамическим ограничениям химический КПД газификации данного топлива, зависящий от термодинамически достижимого состава получаемого синтез-газа, который, в свою очередь, зависит от параметров технологического процесса [28]. Экспериментальные данные и теоретические оценки показывают возможность достижения химического КПД преобразования древесного топлива порядка 80–90 % [29, 30]. С учетом этого КПД лучших установок по производству электроэнергии из биомассы может достигать 30 % [28, 31].

При выборе технико-экономических показателей энергоисточников предполагалось, что затраты (на строительство, топливо и эксплуатационные издержки) близки к аналогичным характеристикам объектов в Иркутской области. Годовое число часов использования электрической мощности – 6100, тепловой – 5200. Стоимость выбросов диоксида углерода варьировалась в интервале 0–30 \$ на тонну на основании данных работы [25]. В качестве критерия эффективности, по которому сравнивались установки, выбрана стоимость электрической энергии. Стоимость тепловой энергии равна 1 цент/кВт·ч (по результатам оценки [16]), годовая норма дисконта – 5–7 %.

Результаты расчетов и их анализ

Результаты расчета стоимости электрической энергии показаны на рис. 2, а, б для вариантов без платы за выбросы CO₂ и с платой в размере 30 \$/т CO₂. Для последнего варианта на рис. 3, 4 показана структура составляющих стоимости (капитальная, эксплуатационная, топливная и связанная с платой за выбросы) в абсолютных и относительных единицах соответственно.

Несмотря на существенно более низкую теплоту сгорания пеллет (в 2,5 раза по сравнению с дизельным топливом [27]), более чем десятикратная разница в стоимости (60–80 \$/т для пеллет и 800–1000 \$/т для дизельного топлива) приводит к тому, что топливные составляющие стоимости электроэнергии дизельной электростанции и мини-ТЭЦ на древесном топливе (пеллеты) различаются приблизительно в 5 раз. Еще

больше разница для случая использования более дешевых древесных отходов. В связи с этим мини-ТЭЦ, использующая древесную биомассу, значительно эффективнее дизельной электростанции, особенно в автономных системах малой мощности, расположенных в пунктах лесозаготовок. Здесь целесообразно применение не дизельных электростанций с преобладанием топливной составляющей в структуре затрат, а газогенераторных ТЭЦ.

В зависимости от конкретных условий в пункте размещения газогенераторная мини-ТЭЦ может оказаться как более, так и менее эффективной по сравнению с электростанциями на угле и газе. Без налога на эмиссию CO₂ энергоисточники на древесном топливе в среднем уступают конкурирующим мини-ТЭЦ на угле и газе, кроме варианта использования дешевой топливной щепы ценой 25–35 \$/т у.т. (рис. 2, а).

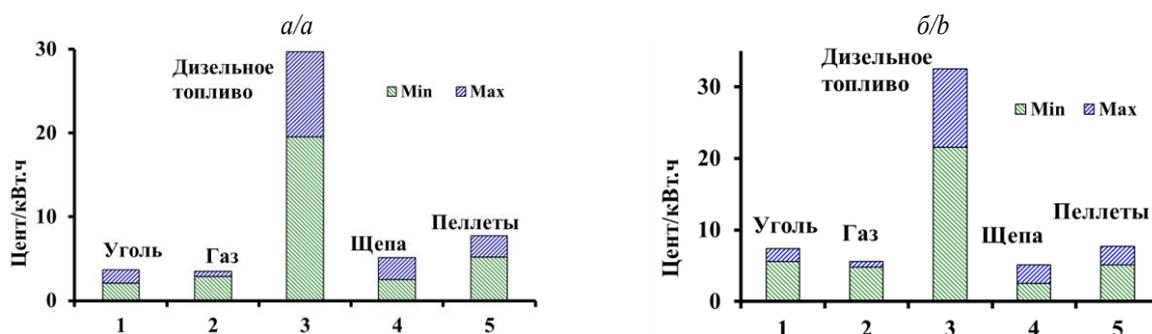


Рис. 2. Стоимость электрической энергии конкурирующих энергоисточников: а) без налога на эмиссию CO₂; б) с налогом на эмиссию

Fig. 2. Cost of electric energy from various types of fuel sources: a) without carbon tax; b) with carbon tax

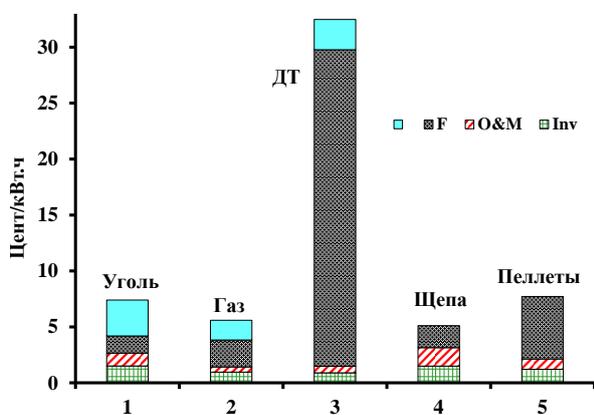


Рис. 3. Составляющие стоимости энергии в абсолютных единицах (Inv – инвестиционная, связанная с капитальными затратами, O&M – эксплуатационная, F – топливная, CO₂ – связанная с платой за эмиссию диоксида углерода)

Fig. 3. Energy cost components in absolute units (Inv is investment, associated with specific capital costs, O&M is operation & maintenance, F is fuel, CO₂ associated with the payment for carbon dioxide emissions)

При введении платы за выбросы в размере 30 \$/т CO₂ зона конкурентоспособности энергоустановок на древесном топливе расширяется. Мини-ТЭЦ на щепе в этом случае эффективнее угольных, а в некоторых

случаях – газовых энергоустановок (рис. 2, б). Это обусловлено тем, что стоимость энергии существенно возрастает при использовании ископаемого топлива, особенно угля, за счет составляющей, связанной с платой за выбросы (рис. 3, 4).

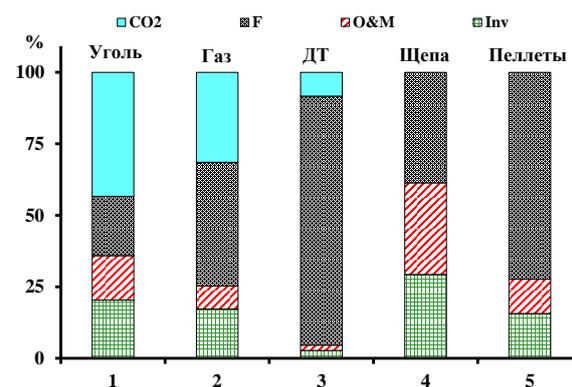


Рис. 4. Составляющие стоимости энергии в относительных единицах (Inv – инвестиционная, связанная с капитальными затратами, O&M – эксплуатационная, F – топливная, CO₂ – связанная с платой за эмиссию диоксида углерода)

Fig. 4. Energy cost components in relative units (Inv is investment, associated with specific capital costs, O&M is operation & maintenance, F is fuel, CO₂ associated with the payment for carbon dioxide emissions)

Энергоустановки на пеллетах будут конкурентоспособными с дизельными электростанциями во всем диапазоне изменения параметров, а с угольными и газовыми – при введении платы за выбросы и при относительно дешевых пеллетах (примерно 100–110 \$/т у.т.). Это обстоятельство обеспечивает свободу в выборе места расположения, в том числе и вдали от мест лесозаготовки.

Заключение

Проведена оценка экономической эффективности газогенераторной мини-ТЭЦ, использующей древесную биомассу, и ее сравнение с энергоисточниками на угле, природном газе и дизельном топливе. Получены аналитические соотношения для определения стоимости (удельных затрат на производство) электроэнергии при заданной стоимости тепла и наоборот, тепловой энергии при заданной стоимости электрической энергии.

Эти соотношения использованы для сопоставления экономической эффективности энергоустановок малой мощности, работающих на разных видах топлива, для условий Иркутской области. Рассмотрены варианты без введения налога на эмиссию диоксида углерода и с введением такого налога.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Renewables 2020. Global Energy Status Report / T. Andre, F. Appavou, A. Brown, G. Ellis, B. Epp, D. Gibb, F. Guerra, F. Joubert, R. Kamara, B. Kondev, R. Levin, H.E. Murdock, J.L. Sawin, K. Seyboth, J. Skeen, F. Sverrisson, G. Wright. – Paris: REN21 Secretariat, 2020. – 367 p.
2. Belyaev L.S., Marchenko O.V., Solomin S.V. Studies on competitiveness of space and terrestrial solar power plants using global energy model // *Global Energy Issues*. – 2006. – V. 57. – P. 94–108.
3. World Energy Outlook 2019 / S. Bouckaert, T.-Y. Kim, K. McNamara, B. Wanner, K. McGlade, P. Olejarnik, Z. Adam, L. Arboleya Sarazola, Y. Arsalane, B. Baruah, S. Bennett, M. Cappannelli, O. Chen, A. Contejean, H.C. Coulibaly, D. Crow, D. D'Ambrosio, A. Dasgupta, J.C. Donovan, M. dos Santos, L. Gallarati, T. Goodson, L.Y. Lee, J. Liu, W. Matsumura, Y. Nobuoka, S. Papapanagiotou, C. Pavarini, D. Perugia, A. Petropoulos, A. Rouget, M. Ruiz de Chavez Velez, A. Schröder, G. Sondak, L. Staas, A. Toril, M. Waldron, M.A. Walton, W. Yu, P. Zeniewski. – Paris: International Energy Agency, 2019. – 810 p.
4. Global Energy Outlook 2020: energy transition or energy addition? / R. Newell, D. Raimi, D. Villanueva, B. Prest. – Washington: RFF, 2020. – 58 p.
5. Johansson M.T. Bio-synthetic natural gas as fuel in steel industry reheating furnace – a case study of economic performance and effects on global CO₂ // *Energy*. – 2013. – V. 57. – P. 699–708.
6. Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry / I. Malico, R. Nepomuceno Pereira, A.C. Gonçalves, A.M.O. Sousa // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – V. 112. – P. 960–977.
7. Безруких П.П., Карабанов С.М., Безруких П.П. (мл.). Эффективность возобновляемой энергетики. Мифы и факты // *Энергия: Экономика, техника, экология*. – 2016. – № 6. – С. 11–24.
8. Bildirici M. Economic growth and biomass energy // *Biomass and Bioenergy*. – 2013. – V. 50. – P. 19–24.
9. Morris J. Recycle, bury, or burn wood waste biomass? LCA answer depends on carbon accounting, emissions controls, displaced fuels, and impact costs // *Journal of Industrial Ecology*. – 2017. – V. 21. – № 4. – P. 844–856.
10. Relative environmental, economic, and energy performance indicators of fuel compositions with biomass / D. Glushkov,

Показано, что мини-ТЭЦ, использующая древесную биомассу, значительно эффективнее дизельной электростанции (стоимость электроэнергии значительно меньше) вследствие дешевизны топлива. По сравнению с энергоисточниками на угле и газе газогенераторная мини-ТЭЦ может оказаться как более, так и менее эффективной.

При введении налога на выбросы диоксида углерода мини-ТЭЦ на щепе экономичнее энергоисточников, использующих ископаемое топливо, на пеллетах – приблизительно равноэкономичны с ними при относительно дешевых топливных гранулах.

При отсутствии налога на выбросы диоксида углерода экономически эффективно применение энергоустановок на дешевой щепе, при введении платы за выбросы зона их эффективности расширяется, и они эффективнее угольных и во многих случаях газовых энергоисточников. Установки на пеллетах эффективны при конкуренции с дизельным топливом во всем диапазоне параметров, а также с углем и газом при введении платы за выбросы.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

- G. Nyashina, V. Medvedev, K. Vershinina // *Applied Sciences*. – 2020. – V. 10. – № 6. – Art. no. 2092. – P. 1–17.
11. Assessing the gasification performance of biomass: a review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation / A.A. Ahmad, N.A. Zawawi, F.H. Kasim, A. Inayat, A. Khasri // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 53. – P. 1333–1347.
12. Molino A., Chianese S., Musmarra D. Biomass gasification technology: the state of the art overview // *Journal of Energy Chemistry*. – 2016. – V. 25. – № 1. – P. 10–25.
13. Progress and prospects in the field of biomass and waste to energy and added-value materials / M. Castaldi, J. van Deventer, J.M. Lavoie, J. Legrand, A. Nzihou, Y. Pontikes, X. Py, C. Vandecasteele, P.T. Vasudevan, W. Verstraete // *Waste and Biomass Valorization*. – 2017. – V. 8. – № 6. – P. 1875–1884.
14. Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review / Y.A. Situmorang, Z. Zhao, A. Yoshida, A. Abudula, G. Guan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – V. 117. – Art. no. 109486. – P. 1–14.
15. Susastriawan A.A.P., Saptoadi H., Purnomo. Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – V. 76. – P. 989–1003.
16. Development of a multi-stage biomass gasification technology to produce quality gas / A. Kozlov, D. Svishev, O. Marchenko, S. Solomin, V. Shamansky, A. Keiko // *25th European Biomass Conference. Proceedings of the International Conference*. – Stockholm, 2017. – V. 25thEUBCE. – P. 776–781.
17. Kozlov A., Marchenko O., Solomin S. The modern state of wood biomass gasification technologies and their economic efficiency // *Energy Procedia*. – 2019. – V. 158. – P. 1004–1008.
18. Марченко О.В., Соломин С.В., Козлов А.Н. Возможность использования древесных отходов в энергетике России // *Экология и промышленность России*. – 2019. – Т. 23. – № 6. – С. 17–21.
19. Carpena L., Bertrand V., Olivier T. Comparing biomass-based and conventional heating systems with costly CO₂ emissions: cost estimations and breakeven prices for large-scale district heating schemes // *International Journal of Global Energy Issues*. – 2017. – V. 40. – № 1/2. – P. 20–42.
20. Arun P. Optimum design of biomass gasifier integrated hybrid energy systems // *International Journal of Renewable Energy Research*. – 2015. – V. 5. – № 3. – P. 892–895.
21. Пиир А.Э., Кунтыш В.Б. Определение показателей тепловой и экономической эффективности ТЭЦ без разделения расхода

- топлива и оборудования по видам продукции // Теплоэнергетика. – 2006. – № 5. – С. 66–68.
22. Сравнительная оценка отечественных и зарубежных методов разделения расхода топлива и формирование тарифов на ТЭЦ / Л.С. Хрилев, В.А. Малафеев, А.А. Хараим, И.М. Лившиц // Теплоэнергетика. – 2003. – № 4. – С. 66–68.
 23. Nussbaumer T., Neuenschwander P. A new method for an economic assessment of heat and power plants using dimensionless numbers // Biomass and Bioenergy. – 2000. – V. 18. – P. 181–188.
 24. Sartor K., Quoilin S., Dewalle P. Simulation and optimization of a CHP biomass plant and district heating network // Applied Energy. – 2014. – V. 130. – P. 474–483.
 25. Projected costs of generating electricity / M. Wittenstein, G. Rothwell, C. Yu, M. Defferenes, H. Paillere, U. Remme, C. Nam, M. Cometto, S. Mueller, M. Baritaud, J.H. Keppler – Paris: International Energy Agency/Nuclear Energy Agency, 2015. – 215 p.
 26. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of hybrid renewable energy systems in Russia // International Journal of Renewable Energy Research. – 2017. – V. 7. – № 4. – P. 1561–1569.
 27. Пиир А.Э., Мелехов В.И., Кунтыш В.Б. Выбор древесного топлива для малой энергетики // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. – 2014. – № 1. – С. 101–108.
 28. Economic efficiency assessment of using wood waste in cogeneration plants with multi-stage gasification / O. Marchenko, S. Solomin, A. Kozlov, V. Shamanskiy, I. Donskoy // Applied Sciences (Switzerland). – 2020. – V. 10. – № 21. – Art. no. 7600. – P. 1–15.
 29. Расчетное исследование эффективности ступенчатого процесса газификации влажной древесины / И.Г. Донской, А.Н. Козлов, Д.А. Свищев, В.А. Шаманский // Теплоэнергетика. – 2017. – № 4. – С. 21–29.
 30. Validation of a continuous combined heat and power (CHP) operation of a two-stage biomass gasifier / J. Ahrenfeldt, U. Henriksen, T.K. Jensen, B. Gobel, L. Wiese, A. Kather, H. Egsgaard // Energy & Fuels. – 2006. – V. 20. – P. 2672–2680.
 31. Engine power generation and emission performance of syngas generated from low-density biomass / N. Indrawan, S. Thapa, P.R. Bhoi, R.L. Huhnke, A. Kumar // Energy Conversion and Management. – 2017. – V. 148. – P. 593–603.

Поступила 08.12.2020 г.

Информация об авторах

Марченко Олег Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Соломин Сергей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 620.91

COMPARATIVE COST ESTIMATION OF ENERGY USE OF WOOD WASTE AND TRADITIONAL FUELS FOR ELECTRICITY AND HEAT PRODUCTION

Oleg V. Marchenko¹,
marchenko@isem.irk.ru

Sergei V. Solomin¹,
solomin@isem.irk.ru

¹ Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.

Relevance. Wood biomass is an important source of renewable energy. When wood is recycled and used for energy, carbon, which is absorbed by trees from the atmosphere, is released. In this regard, carbon balance in the atmosphere remains approximately constant, which helps to prevent global unfavorable climate change. Utilization of wood waste and its energy use have positive impact on the environmental situation, as well as improve the reliability and efficiency of heat and electricity supply to consumers.

The aim of the research is to assess the economic efficiency of wood-fired gas-based power plants in the Irkutsk region and compare them with other types of electric and thermal energy cogeneration systems.

Methods. Analytical dependences were obtained for calculating the cost of electrical energy at a given cost of heat and vice versa, thermal energy at a given cost of electrical energy; the efficiency of different types of energy sources was assessed by the criterion of the cost of energy. The dependences obtained are used to assess the economic efficiency and compare power plants operating on different types of fuel: wood chips and fuel pellets (pellets), coal, natural gas and liquid (diesel) fuel.

Results. It is shown that energy cost when using wood fuel is significantly less than its cost from a diesel power plant due to the use of cheaper fuel. Cogeneration systems based on gasification of woody biomass can also successfully compete with coal and gas power plants if cheap fuel chips are available at the location. With the introduction of a fee for carbon dioxide emissions, the use of not only wood chips, but also pellets becomes competitive compared to coal and gas.

Key words:

Wood waste, energy use, cogeneration, wood-based mini-CHP, economic efficiency, energy cost.

The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0001) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021–2030.

REFERENCES

- Andre T., Appavou F., Brown A., Ellis G., Epp B., Gibb D., Guerra F., Joubert F., Kamara R., Kondev B., Levin R., Murdock H.E., Sawin J.L., Seyboth K., Skeen J., Sverrisson F., Wright G. *Renewables 2020. Global Energy Status Report*. Paris, REN21 Secretariat, 2020. 367 p.
- Belyaev L.S., Marchenko O.V., Solomin S.V. Studies on competitiveness of space and terrestrial solar power plants using global energy model. *Global Energy Issues*, 2006, vol. 57, pp. 94–108.
- Bouckaert S., Kim T.-Y., McNamara K., Wanner B., McGlade K., Olejarnik P., Adam Z., Arboleya Sarazola L., Arsalane Y., Baruah B., Bennett S., Cappannelli M., Chen O., Contejean A., Coulbaly H.C., Crow D., D'Ambrosio D., Dasgupta A., Donovan J.C., Dos Santos M., Gallarati L., Goodson T., Lee L.Y., Liu J., Matsuura W., Nobuoka Y., Papapanagiotou S., Pavarini C., Perugia D., Petropoulos A., Rouget A., Ruiz de Chavez Velez M., Schröder A., Sondak G., Staas L., Toril A., Waldron M., Walton M.A., Yu W., Zeniewski P. *World Energy Outlook 2019*. Paris, International Energy Agency, 2019. 810 p.
- Newell R., Raimi D., Villanueva D., Prest B. *Global Energy Outlook 2020: energy transition or energy addition?* Washington, RFF, 2020. 58 p.
- Johansson M.T. Bio-synthetic natural gas as fuel in steel industry reheating furnace – a case study of economic performance and effects on global CO₂. *Energy*, 2013, vol. 57, pp. 699–708.
- Malico I., Nepomuceno Pereira R., Gonçalves A.C., Sousa A.M.O. Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 112, pp. 960–977.
- Bezrukih P.P., Karabanov S.M., Bezrukih P.P. (ml.). Effektivnost vozobnovlyаемoy energetiki. Mify i fakty [Renewable energy efficiency. Myths and facts]. *Energiya: Ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2016, no. 6, pp. 11–24.
- Bildirici M. Economic growth and biomass energy. *Biomass and Bioenergy*, 2013, vol. 50, pp. 19–24.
- Morris J. Recycle, bury, or burn wood waste biomass? LCA answer depends on carbon accounting, emissions controls, displaced fuels, and impact costs. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 844–856.
- Glushkov D., Nyashina G., Medvedev V., Verzhinina K. Relative environmental, economic, and energy performance indicators of fuel compositions with biomass. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 6, art. no. 2092, pp. 1–17.
- Ahmad A.A., Zawawi N.A., Kasim F.H., Inayat A., Khasri A. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 53, pp. 1333–1347.
- Molino A., Chianese S., Musmarra D. Biomass gasification technology: the state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 10–25.
- Castaldi M., Van Deventer J., Lavoie J.M., Legrand J., Nzihou A., Pontikes Y., Py X., Vandecasteele C., Vasudevan P.T., Verstraete W. Progress and prospects in the field of biomass and waste to energy and added-value materials. *Waste and Biomass Valorization*, 2017, vol. 8, no.6, pp. 1875–1884.
- Situmorang Y.A., Zhao Z., Yoshida A., Abudula A., Guan G. Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 117, art. no. 109486, pp. 1–14.
- Susastriawan A.A.P., Saptoadi H., Purnomo. Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 76, pp. 989–1003.
- Kozlov A., Svishchev D., Marchenko O., Solomin S., Shamansky V., Keiko A. Development of a multi-stage biomass gasification technology to produce quality gas. *25th European Biomass Conference*.

- Proceedings of the International Conference*. Stockholm, 2017. Vol. 25thEUBCE, pp. 776–781.
17. Kozlov A., Marchenko O., Solomin S. The modern state of wood biomass gasification technologies and their economic efficiency. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 1004–1008.
 18. Marchenko O.V., Solomin S.V., Kozlov A.N. Possibilities of use of wood wastes in the power industry of Russia. *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 17–21. In Rus.
 19. Carpené L., Bertrand V., Olivier T. Comparing biomass-based and conventional heating systems with costly CO₂ emissions: cost estimations and breakeven prices for large-scale district heating schemes. *International Journal of Global Energy Issues*, 2017, vol. 40, no. 1–2, pp. 20–42.
 20. Arun P. Optimum design of biomass gasifier integrated hybrid energy systems. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2015, vol. 5, no.3, pp. 892–895.
 21. Piir A.E., Kunttysh V.B. Determination of indexes of the thermal and economic efficiencies of a cogeneration power plant without dividing fuel consumption and the equipment between two kinds of plants production. *Thermal Engineering*, 2006, vol. 53, no. 5, pp. 399–402. In Rus.
 22. Khrilev L.S., Malafeev V.A., Haraim A.A., Livshic I.M. Comparative assessment of domestic and foreign methods of separating fuel consumption and the formation of tariffs for CHP. *Thermal Engineering*, 2003, vol. 50, no. 4, pp. 66–68. In Rus.
 23. Nussbaumer T., Neuenschwander P. A new method for an economic assessment of heat and power plants using dimensionless numbers. *Biomass and Bioenergy*, 2000, vol. 18, pp. 181–188.
 24. Sartor K., Quoilin S., Dewallef P. Simulation and optimization of a CHP biomass plant and district heating network. *Applied Energy*, 2014, vol. 130, pp. 474–483.
 25. Wittenstein M., Rothwell G., Yu C., Defferenes M., Paillere H., Remme U., Nam C., Cometto M., Mueller S., Baritaud M., Keppler J.H. *Projected costs of generating electricity*. Paris, International Energy Agency/Nuclear Energy Agency, 2015. 215 p.
 26. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of hybrid renewable energy systems in Russia. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2017, vol. 7, no. 4, pp. 1561–1569.
 27. Piir A.E., Melekhov V.I., Kunttysh V.B. Choice of wood fuel for small-scale power generation. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*, 2014, no. 1, pp. 101–108. In Rus.
 28. Marchenko O., Solomin S., Kozlov A., Shamanskiy V., Donskoy I. Economic efficiency assessment of using wood waste in cogeneration plants with multi-stage gasification. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2020, vol. 10, no. 21, art. no. 7600, pp. 1–15.
 29. Donskoi I.G., Kozlov A.N., Svishev D.A., Shamanskii V.A. Numerical investigation of the staged gasification of wet wood. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 4, pp. 258–264. In Rus.
 30. Ahrenfeldt J., Henriksen U., Jensen T.K., Gobel B., Wiese L., Kather A., Egsgaard H. Validation of a continuous combined heat and power (CHP) operation of a two-stage biomass gasifier. *Energy & Fuels*, 2006, vol. 20, pp. 2672–2680.
 31. Indrawan N., Thapa S., Bhoi P.R., Huhnke R.L., Kumar A. Engine power generation and emission performance of syngas generated from low-density biomass. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 148, pp. 593–603.

Received: 8 December 2020.

Information about the authors

Oleg V. Marchenko, Cand. Sc, senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Sergei V. Solomin, Cand. Sc, senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 622.276.63

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМОЙ СОЛЯНО-КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кривошеков Сергей Николаевич¹,
Krivoshchekov@gmail.com

Козырев Никита Дмитриевич^{1,2},
Nikita.Kozyrev@pnn.lukoil.com

Вяткин Кирилл Андреевич¹,
Kirill.Vyatkin@girngm.ru

Равелев Кирилл Алексеевич¹,
Kirill.Ravelev@pstu.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

² Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПинефть» в г. Пермь,
Россия, 614000, г. Пермь, ул. Советской Армии, 29.

Актуальность научной работы обусловлена тем, что в настоящее время высокая доля соляно-кислотных обработок не обеспечивают ожидаемого результата на нефтяных месторождениях Пермского края. Данная проблема непосредственно связана с действующим подходом к проектированию технологических операций по стимуляции притока нефти и недостаточной изученностью большинства факторов, существенно влияющих на эффективность обработок призабойной зоны кислотными составами. Востребованность усовершенствования технологий кислотного воздействия на призабойную зону карбонатных коллекторов и способов прогнозирования его эффективности обуславливается низкой себестоимостью проведения данной операции и возможностью достижения высоких показателей продуктивности скважины при качественном проектировании и проведении операции.

Цель: разработка методического подхода к прогнозированию технологического эффекта проектируемой соляно-кислотной обработки на основе комбинирования результатов лабораторных исследований и гидродинамического моделирования.

Объектами исследования являются технологии повышения нефтеотдачи пластов, литологически представленных карбонатными разностями. В пределах основных нефтегазоносных провинции России большая часть месторождений находится на завершающей стадии разработки, вследствие чего отмечается низкая продуктивность скважин. Поэтому совершенствование методов увеличения нефтеотдачи является важным и актуальным направлением исследования в нефтегазовой отрасли.

Методы: лабораторные исследования, заключающиеся в определении карбонатности изучаемых отложений, а также свойств кислотных составов, применяемых при проведении соляно-кислотных обработок на месторождениях Пермского края. Данные исследования необходимы для установления численного значения изменения скин-фактора на рассматриваемых объектах. Гидродинамическое моделирование с учетом данного скин-фактора для определения технологической эффективности проектируемой технологии обработки призабойной зоны продуктивного пласта.

Результаты. По итогам настоящего исследования отмечается высокое соответствие фактических изменений скин-фактора на 18 объектах после кислотного воздействия, полученных при анализе баз данных гидродинамических исследований скважин на территории Пермского края, и прогнозируемых значений по описанной методике предварительной оценки технологического эффекта от соляно-кислотной обработки. Приведен сравнительный анализ фактических значений дебита целевой скважины, зафиксированных в течение пяти месяцев эксплуатации, и прогнозируемых с помощью гидродинамического моделирования полностью описанного дизайна кислотного воздействия, в основе которого заложено расчетное значение изменения скин-фактора. По результатам анализа получено, что предлагаемый комплексный подход к прогнозированию эффективности соляно-кислотной обработки имеет небольшую погрешность в пределах 5 %. С использованием гидродинамической модели рассчитан технологический эффект спроектированной кислотной обработки на целевом объекте до 2030 г. и сделан вывод об успешности применения данного геолого-технического мероприятия. С внедрением предлагаемого комплексного подхода в нефтяные компании возможно увеличение результативности мероприятий по повышению нефтеотдачи пластов.

Ключевые слова:

Соляно-кислотная обработка, комплексный подход, гидродинамический симулятор, скин-фактор, эффективность мероприятия.

Введение

На всем протяжении эксплуатации скважины состояние призабойной зоны пласта (ПЗП) ухудшается вследствие кольматации каналов фильтрации различными частицами. Загрязненная зона вблизи скважины

снижает гидродинамическую связь с пластом, тем самым продуктивность скважины не достигает возможного максимального значения, тогда как карбонатные породы и без этого характеризуются низкими фильтрационными свойствами. Необходимость детального

изучения свойств и методов разработки карбонатных коллекторов обуславливается наличием в них от одной трети до половины запасов углеводородного сырья по всему миру [1].

Наиболее эффективным и экономически выгодным методом интенсификации добычи нефти при ухудшенном состоянии околоскважинной зоны пласта (ОЗП) на сегодняшний день является соляно-кислотная обработка (СКО) [2–6]. Кислотное воздействие не всегда достигает планируемых результатов вследствие недоучтенности таких ключевых факторов, как фильтрационных свойств пласта, структуры ПЗП и ее параметров до стимуляции скважины, а также их характера поведения в процессе обработки кислотным составом (КС).

Успешность проведения химического воздействия на ОЗП характеризуется отрицательным изменением скин-фактора S , который принято рассчитывать по формуле Hawkins (1) [7]:

$$S = \left(\frac{k}{k_d} - 1 \right) \ln \frac{r_d}{r_w}, \quad (1)$$

где k – коэффициент проницаемости удаленной зоны пласта; k_d – коэффициент проницаемости приближенной зоны пласта; r_d – радиус ПЗП; r_w – радиус скважины.

Выражение (1) учитывает различие проницаемостей приближенной и удаленной зон пласта, за счет чего производится оценка степени загрязнения ПЗП.

Процесс кислотной обработки считается достаточно сложным и необъяснимым в деталях протекания растворения соляной кислотой минералов карбонатных пород-коллекторов. Поэтому при прогнозировании технологического эффекта от рассматриваемого метода по интенсификации добычи углеводородов возникает множество проблем [8], связанных с невозможностью предсказания характера изменения пустотного пространства продуктивного пласта вблизи скважины. В настоящее время ученые стремятся найти способ решения этих проблем, одним из них является проведение фильтрационных исследований на керне при пластовых условиях [9–11]. С помощью компьютерной томографии определяется изменение порового пространства, а именно размеры и положение прорвавшегося сквозь образец высокопроводящего канала фильтрации, называемого «червоточинкой». Однако в статье [12] авторы указывают на недостоверность результатов, полученных при проведении исследований на стандартных образцах горной выработки с использованием фильтрационной установки, по отношению к реальным кислотным обработкам на нефтепромысле, что связано с высокой анизотропией коллекторских свойств карбонатных нефтегазонасыщенных пород.

Наибольшее количество научно-исследовательских работ направлено на изучение процесса формирования «червоточин», создающихся под воздействием КС в горных породах. Авторы работы [13] провели анализ существующих моделей, описывающих данный процесс в деталях. Применение изученных моделей рассматривается в публикации [14], где использованы полуэмпирические модели Гонга, Фарая, Бьюд-

жиса, позволяющие спрогнозировать направление распространения КС в поровом пространстве ПЗП и оценить прирост коэффициента проницаемости в данной зоне. Полученные фильтрационные характеристики дают возможность рассчитать дополнительный приток флюида с помощью известных формул плоскорадиального движения жидкостей к гидродинамически несовершенным скважинам за счет снижения дополнительного фильтрационного сопротивления, обеспечивающегося изменением скин-фактора.

Пример предварительной оценки эффективности СКО карбонатных горных пород также приводится в работе [15], авторы которой разработали симулятор моделирования кислотного воздействия, позволяющий рассчитать изменение структуры горной породы вблизи скважины. Программа основана на развитии «червоточины» в процессе обработки КС, в качестве модели которой использована полуэмпирическая модель, предложенная M. Vuijse и G. Glasbergen [16]. Рассмотренное изобретение включает в модель все фильтрационно-емкостные свойства нефтенасыщенных пропластков и моделирует их изменение при имитировании нагнетания КС. Успешность проведения СКО также оценивается через снижение фильтрационного сопротивления в ОЗП.

Таким образом, исходя из анализа публикаций, можно сделать вывод, что существующие способы прогнозирования эффективности кислотной обработки в основном строятся на определении изменения скин-фактора, который, в свою очередь, изменяется на основании увеличения коэффициента проницаемости ПЗП. Для более точной оценки эффективности проектируемых геолого-технических мероприятий применяют гидродинамическое моделирование, позволяющее произвести расчет и оценить увеличение продуктивности скважин. В Пермском крае сегодня при проектировании дизайна кислотного воздействия на нефтедобывающих скважинах в большинстве случаев включены в основу промысловые данные с ранее проведенных геолого-технических мероприятий на этом же месторождении либо на месторождениях-аналогах. Тем самым объясняется несоответствие фактических и прогнозных значений дебита нефти из-за неправильного подхода к созданию модели СКО, осуществляемому при интерпретации степени изменения скин-фактора с предыдущих химических обработок коллекторов.

Описание комплексного подхода к оценке эффективности проектируемой соляно-кислотной обработки

В настоящей работе для прогнозирования эффективности СКО карбонатных отложений предлагается с помощью гидродинамического моделирования определить прирост дополнительной добычи нефти и продолжительность эффекта, основываясь на теоретических расчетах снижения скин-фактора. Эксперименты, проведенные G. Daccord и R. Lenormand и заключающиеся в исследовании взаимодействия КС и горной породы, привели к эмпирическому уравнению (2), позволяющему оценить изменение скин-фактора

после кислотного воздействия на призабойную зону пласта [17]:

$$\Delta S = -\frac{1}{d} \ln \left(1 + N_{ac} N_{pe}^{-1/3} \frac{bV}{\pi h m r_w^d} \right), \quad (2)$$

где d – фрактальная размерность образовавшейся в ПЗП структуры порового пространства; N_{ac} – кислотное число, д. ед.; N_{pe} – число Пекле; b – константа, принимая равной $1,7 \cdot 10^4 \text{ м}^{d-2}$; V – объем закачиваемого КС, м^3 ; h – перфорированная толщина пласта, м; m – пористость, %.

При вычислении фрактальной размерности d следует учесть количественные содержания известняка и доломита в карбонатной породе. Ниже приведено выражение для определения значения фрактальной размерности (3):

$$d = \frac{1,6x + 2y}{x + y}, \quad (3)$$

где x , y – содержание известняка и доломита в породе, соответственно, %.

Для определения процентного соотношения кальцита и доломита в горной породе необходимо провести лабораторные исследования с применением прибора, например, карбонатомера КМ-04М, позволяющего определять массовое содержание кальцита, доломита и нерастворимого минерального остатка в измельченном образце породы.

Кислотное число определяется соотношением, приведенным в выражении (4):

$$N_{ac} = \frac{m C_{\text{HCl}}}{C_{\text{кол}} \vartheta}, \quad (4)$$

где C_{HCl} – концентрация соляной кислоты в кислотном составе, моль/л; $C_{\text{кол}}$ – концентрация породы коллектора, моль/л; ϑ – стехиометрический коэффициент породы коллектора, д. ед.

Концентрация хлороводородной кислоты вычисляется согласно данным из паспорта КС (5):

$$C_{\text{HCl}} = \frac{m_{\text{HCl}} \rho_{\text{КС}}}{M_{\text{HCl}} z}, \quad (5)$$

где m_{HCl} – масса соляной кислоты в 100 г КС, г; $\rho_{\text{КС}}$ – плотность КС, г/л; M_{HCl} – молярная масса HCl, г/моль; z – константа, принимаемая равной 100 г.

Значение концентрации коллектора зависит от процентных соотношений известняка и доломита в интересующей породе и определяется следующим равенством (6):

$$C_{\text{кол}} = \frac{C_{\text{CaCO}_3} x + C_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2} y}{x + y}, \quad (6)$$

где C_{CaCO_3} – концентрация чистого известняка, моль/л; $C_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2}$ – концентрация чистого доломита, моль/л.

Для определения концентраций из справочных данных используются значения молекулярных масс пород, вступающих в реакцию, т. е. чистого известняка M_{CaCO_3} , доломита $M_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2}$. Концентрация соответствующего вещества рассчитывается по выражению (7):

$$C = \frac{\rho}{M}, \quad (7)$$

где ρ – плотность вещества, г/л; M – молекулярная масса вещества, г/моль.

По справочным данным плотности кальцита и доломита принимаются равными 2710 и 2880 г/л, соответственно, а их молекулярные массы – 100,086 и 184,399 г/моль.

Исходя из уравнений реакций, стехиометрический коэффициент для известняка принимается равным $\vartheta_{\text{CaCO}_3}=2$, а для доломита $\vartheta_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2}=4$, следовательно, стехиометрический коэффициент коллектора определяется подобно фрактальной величине (8):

$$\vartheta = \frac{\vartheta_{\text{CaCO}_3} x + \vartheta_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2} y}{x + y}. \quad (8)$$

С целью определения числа Пекле необходимо воспользоваться выражением (9):

$$N_{pe} = \frac{q}{Dh}, \quad (9)$$

где q – темп закачки кислотного состава, $\text{м}^3/\text{с}$; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

В настоящей работе предлагается оценивать коэффициент диффузии кислоты с использованием формулы Стокса–Эйнштейна [18, 19], которая имеет широкое применение для определения значения D в жидкостях (10):

$$D = \frac{kT}{6\pi\mu r}, \quad (10)$$

где $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К; μ – коэффициент динамической вязкости КС, Па·с; r – радиус диффундирующей частицы, м.

Один из вариантов определения динамической вязкости КС – это метод, используемый в соответствии с ГОСТ 33768-2015 с помощью вискозиметра типа Пинкевича (ВПЖ-4), представленный на рис. 1. Радиус диффундирующей частицы можно установить при помощи бинокулярного микроскопа.



Рис. 1. Вискозиметр типа Пинкевича (ВПЖ-4)

Fig. 1. VPZh-4 viscometer

Для прогнозирования определения эффективности соляно-кислотного воздействия рассчитанное значение изменения скин-фактора, полученное при решении выражения (2) и при проведении рассмотренного ряда лабораторных исследований, заносится в гидродинамическую модель эксплуатационного объекта, после чего производится расчет основных технологических параметров работы целевой нефтескважины. В результате проведенных гидродинамических расчетов при помощи специализированных симуляторов выгружаются графики изменения годовой добычи нефти и воды по целевой скважине по базовому варианту и после проведения проектируемого мероприятия. На основании изменения годовой добычи нефти и воды делается заключение о прогнозной эффективности применения кислотного воздействия на целевой нефтескважине.

Статистический анализ опыта применения соляно-кислотных обработок на месторождениях Пермского края

Для интенсификации добычи нефти из карбонатных пластов в Пермском крае применяются СКО. С целью определения возможности практического применения выражения (2) для прогнозирования эффективности от проектируемого кислотного воздействия проведен статистический анализ. В работе рассмотрен опыт 18 технологических операций по кислотному воздействию на месторождениях Пермского края. Для каждой из рассматриваемых операций определено ожидаемое изменение скин-фактора, рассчитанное по представленной методике прогнозирования изменения скин-фактора после СКО. В табл. 1 приведено сравнение фактического изменения скин-фактора по рассматриваемым скважинам и прогнозного значения, полученного по представленной методике.

Таблица 1. Сравнение фактического изменения скин-фактора с прогнозными значениями

Table 1. Comparison of skin factor actual change with predicted values

№ технологической операции Job no.	Месторождение Deposit	Пласт Formation	Фактическое изменение скин-фактора Skin factor actual change	Прогнозное изменение скин-фактора Skin factor predicted change	Отклонение, % Deviation, %
1	Озерное Ozernoe	Бш-Срп Bashkirian-Serpukhovian	-3,40	-3,27	3,82
2	Уньвинское Unvinskoe	Бш-Срп Bashkirian-Serpukhovian	-2,80	-2,90	3,57
3	Змеевское Zmееvskoe	Т Tournaisian	-3,20	-2,94	8,13
4	Юрчукское Yurchukское	Фм Famennian	-2,50	-2,74	9,60
5	Юрчукское Yurchukское	Бш Bashkirian	-2,70	-2,53	6,30
6	Логовское Logovskoe	Т-Фм Tournaisian-Famennian	-2,60	-2,84	9,23
7	Павловское Pavlovskoe	Т Tournaisian	-2,40	-2,57	7,08
8	Шагиртско-Гожанское Shagirtsko-Gozhanskoe	В ₃ В ₄ Vereiskian (V3V4)	-2,90	-2,71	6,55
9	Дороховское Dorokhovskoe	Т Tournaisian	-2,80	-2,83	1,07
10	Павловское Pavlovskoe	Т Tournaisian	-3,00	-2,96	1,33
11	Сибирское Sibirskoe	Бш-Срп Bashkirian-Serpukhovian	-2,90	-2,70	6,90
12	Чураковское Churakovskoe	Т Tournaisian	-2,80	-2,58	7,86
13	Рассветное Rassvetnoe	Бш Bashkirian	-3,10	-3,26	5,16
14	Рассветное Rassvetnoe	Бш Bashkirian	-2,50	-2,79	11,60
15	Курбатовское Kurbatovskoe	Т Tournaisian	-2,60	-2,77	6,54
16	Юрчукское Yurchukское	Бш-Срп Bashkirian-Serpukhovian	-2,80	-2,68	4,29
17	Юрчукское Yurchukское	Бш-Срп Bashkirian-Serpukhovian	-2,90	-2,64	8,97
18	Чиклаевское Chikulaevskoe	Т Tournaisian	-2,70	-2,85	5,56

Как видно, относительные погрешности, представленные в табл. 1, изменяются в диапазоне от 1,07 до 11,60 %, что является вполне допустимым отклонением. Для более точного анализа и установления значимости связи между двумя совокупностями значений, т. е. фактическими и рассчитанными изменениями скин-фактора, необходимо воспользоваться основными статистическими показателями. В ходе проведения расчетов с помощью программного продукта STATISTICA получено, что критерий Стьюдента и достигаемый уровень значимости составляют 0,079 и 0,937, соответственно, а стандартные отклонения также не выходят за рамки допустимых значений, т. е. разброс значений выборки относительно среднего незначителен. Проведенный анализ позволяет сказать о большой значимости связи между фактическими и проектными данными, что свидетельствует об эффективном подходе к прогнозированию результатов СКО с использованием предложенной методики.

Сравнительный анализ реальных и проектных результатов подвел авторов настоящей работы к уверенности в идее об использовании в основе прогнозирования успешности кислотной обработки формулы Даккорда и Ленорманда. Пример практического применения предложенного комплексного подхода на действующей скважине, заключающегося в определении эффективности проведения СКО при помощи гидродинамического моделирования, приведен в настоящей работе. А также оценены отклонения от фактических данных, приведенных за пять месяцев эксплуатации после кислотного воздействия на нефтенасыщенный пласт.

Дизайн соляно-кислотного воздействия на целевом объекте и прогнозная оценка эффективности мероприятия с применением гидродинамического моделирования

Целевым объектом в марте 2020 г. для проведения СКО определена нефтедобывающая скважина Кокуйского нефтяного месторождения Пермского края, вскрывающая турнейский пласт. С целью установления совершенства предложенного подхода к прогнозированию эффективности кислотного воздействия авторами данного исследования приведено сравнение фактических и проектных показателей добычи за следующие пять месяцев эксплуатации рассматриваемой скважины. А также с помощью программного продукта Tempst (Rohar), позволяющего сформировать дизайн геолого-технического мероприятия, проанализирован технологический эффект от запланированной кислотной обработки ПЗП на ближайшие десять лет.

В качестве реагента подобран кислотный состав «ФЛАКСОКОР-210», отлично зарекомендовавший себя по промысловому опыту применения методов повышения нефтеотдачи пластов и показавший хорошие результаты в лабораторных исследованиях, представленных в работе [20]. По результатам гидродинамических исследований целевой нефтедобывающей скважины, проведенных за 4 месяца до кислот-

ного воздействия, установлено значение скин-фактора, равное $-1,4$. Авторами данной работы был проведен расчет снижения фильтрационного сопротивления в околоскважинной зоне пласта по представленной выше методике, позволяющий в дальнейшем на гидродинамической модели рассчитать увеличение дебита целевой скважины после обработки кислотным составом.

Перед кислотным воздействием на продуктивный пласт для устранения нежелательных последствий целесообразным является проведение лабораторных исследований по совместимости КС с флюидами, поступающими с целевого объекта. Изучение их взаимодействия играет важную роль при дизайне СКО, так как в случае плохой совместимости возможно образование высоковязкой эмульсии, сгустков, хлопьев, осадков, приводящих к кольтации пустотного пространства. С этой целью в лабораторных условиях выполнено тестирование с 15 различными вариантами соотношений нефти, воды и кислотного состава. Вначале достигалось возникновение стабильной водонефтяной эмульсии из отобранных проб нефти и воды с рассматриваемой целевой скважины, после чего в полученную эмульсию добавлялся тестируемый КС. В результате состояние полученной смеси оценивалось визуально на наличие осадка и расслоения фаз при выдержке в течение нескольких минут, а также полученная смесь фильтровалась через сито с ячейкой 100 меш с фиксацией присутствия/отсутствия не фильтруемого остатка. В табл. 2 приведен пример некоторых результатов проведенных лабораторных исследований по изучению совместимости тестируемого КС с флюидами, отобранными с целевой скважины.

В результате проведения лабораторных исследований по изучению совместимости пластовых флюидов с КС можно сделать вывод о хорошей совместимости пластовых жидкостей и кислотной композиции, поскольку во всех случаях отмечается отсутствие каких-либо признаков образования остатков при фильтрации полученных смесей. Следовательно, состав «ФЛАКСОКОР-210 марки Р» можно считать применимым к данным условиям по характеру взаимодействия с флюидами. Изучая паспорт данного КС, определена массовая доля хлористого водорода, составляющая 12,7 %, которая находится в допустимых пределах по ТУ 2122-075-53501222-2009.

Для определения прогнозного изменения скин-фактора по выражению (2) проведен ряд лабораторных исследований для получения исходных данных для расчета. Таким образом, получены такие данные, как массовые доли кальцита и доломита, содержащиеся в горной породе (89,7 и 1,2 %, соответственно), что характерно для турнейского яруса на территории Пермского края [21]. Значение вязкости кислотного состава «ФЛАКСОКОР-210», определенное как среднее из нескольких проведенных экспериментов, составило 1,37 мПа·с. Радиус диффундирующей частицы КС, установленный на микроскопе «Микмед-5», составил 1 мкм.

Информация о пластовом давлении дает понимание о требуемом темпе закачки кислоты в пласт.

Процесс СКО происходит зачастую с использованием насосного агрегата АЗИНмаш-30, технические характеристики которого приведены в табл. 3 [22, 23].

Таблица 2. Результаты исследования совместимости пластовых флюидов, отобранных с целевой скважины, с тестируемым кислотным составом

Table 2. Results of study of compatibility of formation fluids collected from the target well, with the acid composition under test

Приготавливаемая смесь Prepared mixture	Характер продуктов взаимодействия Composition of interacting products	
Вода/Water – 0 % Нефть/Oil – 25 % КС/АС – 75 %		
Вода/Water – 33,33 % Нефть/Oil – 33,33 % КС/АС – 33,34 %		
Вода/Water – 25 % Нефть/Oil – 50 % КС/АС – 25 %		

Согласно табл. 3 темп закачки кислотного состава определен равным 9,36 л/с. Температура на забое скважины, установленная с данных систем телеметрии, равна 28 °С. Диаметр скважины составляет 146 мм.

Пласт, эксплуатирующийся целевой нефтедобывающей скважиной, по проведенным гидродинамическим исследованиям характеризуется сильной неоднородностью и малой проницаемостью. Вследствие этого рекомендуется применить большеобъемную соляно-кислотную обработку (БСКО), что позволит до-

стичь наилучшего эффекта. В работе [24] сообщается о том, что объем кислотного состава на 1 м интервала обработки варьируется в диапазоне 3–5 м³ при использовании технологии БСКО карбонатных отложений. Следовательно, исходя из значительной вскрытой толщины пласта, было принято решение – закачивать кислоту объемом 45 м³ для максимально возможного увеличения проницаемости ПЗП.

Таблица 3. Производительность и давление, развиваемые агрегатом тупа АЗИНмаш-30

Table 3. Pumping rate and pressure developed by AzINmash-30 unit

Скорости Speed	Диаметр плунжера, мм Plunger diameter, mm			
	100		120	
	Производи- тельность, л/с Pumping rate, l/s	Давление, МПа Pressure, MPa	Производи- тельность, л/с Pumping rate, l/s	Давление, МПа Pressure, MPa
II	2,24	50,0	3,23	34,4
III	4,28	25,9	6,16	18,0
IV	6,50	17,1	9,36	11,8
V	9,78	11,3	14,08	1,9

Все полученные значения параметров, влияющие на эффективность проведения СКО, анализируются, и с помощью вычислений в конечном итоге определяется ΔS по выражению (2). В результате прогнозное уменьшение скин-фактора составляет 2,4, что несет существенное влияние на изменение количества флюида, добываемого из данной скважины. Проведенный расчет по установлению прогнозного значения скин-фактора, равного $S = -1,4 - 24 = -3,8$, после кислотного воздействия на рассматриваемом целевом объекте позволяет провести сравнительный анализ между фактическими значениями дебита нефти и жидкости, полученными в течение пяти месяцев со скважины, и прогнозируемыми с помощью гидродинамического симулятора, представленными в табл. 4. Гидродинамическая модель, соответствующая окончанию 2030 г., представлена на рис. 2.

Согласно табл. 4, наблюдается практически полное соответствие прогнозируемых дебитов нефти и жидкости его фактическим значениям, так как в среднем отклонения составляют 5,03 и 5,29, соответственно, а среднеквадратические отклонения равны 0,38 и 0,31. Следовательно, можно отметить высокую точность прогнозирования дебитов по разработанной методике, которая позволит оценивать эффективность кислотного воздействия на продуктивные отложения, литологически представленные карбонатными разностями.

При дальнейших расчетах на гидродинамической модели можно проанализировать дополнительную добычу углеводородов на несколько лет вперед, т. е. сделать заключение об успешности метода повышения нефтеотдачи пласта. Ниже проведен анализ эффективности проектируемого мероприятия на целевом объекте в сравнении с базовым вариантом с помощью гидродинамического моделирования, результаты которого представлены в табл. 5. Расчет проводился до 2030 г.

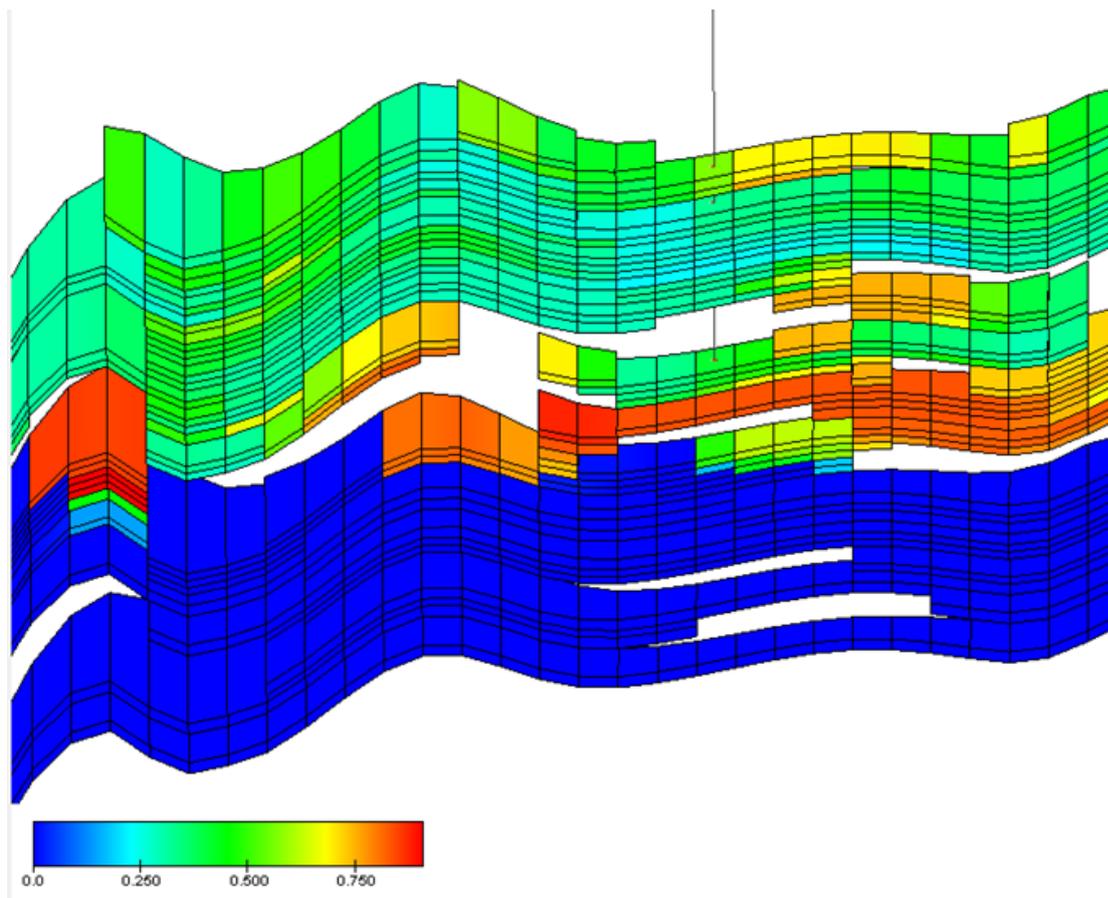


Рис. 2. Гидродинамическая модель

Fig. 2. Hydrodynamic model

Таблица 4. Сравнение фактического и прогнозируемого дебита рассматриваемой скважины

Table 4. Comparison of actual and predicted flow rates of the well under study

Дата Date	Дебит нефти, м ³ /сут Oil flow rate, m ³ /day		Отклонения по дебиту нефти, % Deviations in oil flow rate, %	Дебит жидкости, м ³ /сут Liquid flow rate, m ³ /day		Отклонения по дебиту жидкости, % Deviations in liquid flow rate, %
	Фактический Actual	Проектный Design		Фактический Actual	Проектный Design	
03.2020	7,4028	7,4028	–	19,2090	19,2090	–
04.2020	15,9274	15,1492	4,89	21,1629	20,0937	5,05
05.2020	15,6722	14,8356	5,34	21,1096	20,0741	4,91
06.2020	15,4255	14,7529	4,36	21,0568	19,9116	5,44
07.2020	15,1868	14,3710	5,37	21,0044	19,9007	5,25
08.2020	14,9561	14,1783	5,20	20,9526	19,7418	5,78

Таблица 5. Результаты моделирования базового и прогнозируемого вариантов

Table 5. Results of simulation of the basic and design variants

Дата Date	Дебит нефти, м ³ /сут Oil flow rate, m ³ /day		Накопленная добыча нефти, тыс. м ³ Cumulative oil production, thous. m ³		Дебит жидкости, м ³ /сут Liquid flow rate, m ³ /day		Накопленная добыча жидкости, тыс. м ³ Cumulative liquid production, thous. m ³	
	Базовый Basic	Проект- ный Design	Базовый Basic	Проектный Design	Базовый Basic	Проектный Design	Базовый Basic	Проектный Design
01.2020	7,5505	7,5505	33,6657	33,6657	19,2090	19,2090	59,9883	59,9883
01.2021	6,7576	13,8806	36,2659	36,5846	19,2090	20,6834	67,0188	67,1032
01.2022	6,1463	12,1480	38,6065	41,2754	19,2090	20,2897	74,0301	74,5926
01.2023	5,6373	10,5697	40,7473	45,3639	19,2090	19,6713	81,0414	81,8445
01.2024	5,1861	9,7903	42,7141	49,0617	19,2090	19,5334	88,0526	88,9977
01.2025	4,7905	9,0952	44,5315	52,5027	19,2090	19,3793	95,0831	96,1147
01.2026	4,4549	8,4170	46,2116	55,6935	19,2090	19,1928	102,0940	103,1550
01.2027	4,1683	7,6169	47,7799	58,6000	19,2090	18,9866	109,1060	110,1140
01.2028	3,9105	7,1231	49,2494	61,2759	19,2090	18,9334	116,1170	117,0320
01.2029	3,6740	6,7406	50,6334	63,8055	19,2090	18,8832	123,1470	123,9520
01.2030	3,4460	6,4022	51,9293	66,1973	19,2090	18,8363	130,1590	130,8350

Анализируя данные, приведенные в табл. 4, 5, можно сделать вывод, что после проведения кислотного воздействия на целевой нефтесодержащей скважине ожидается значительный прирост добычи нефти – более чем в 2 раза. На основании реализованного прогноза после проведения СКО на целевой нефтесодержащей скважине накопленная добыча нефти к началу 2030 г. увеличится на 14,27 тыс. м³, а накопленная добыча жидкости – на 0,68 тыс. м³. Исходя из представленных величин, можно сказать об эффективности проектируемого мероприятия на выбранном целевом объекте.

Заключение

Предложенный в настоящей работе комплексный подход к определению эффективности моделируемой СКО позволяет с небольшой погрешностью прогнозировать технологическую эффективность проектируемого мероприятия. Суть методики заключается в

определении технологической эффективности с применением гидродинамического моделирования, в основу которого заложено расчетное значение изменения скин-фактора с использованием исходных данных, полученных в результате лабораторных исследований. Применение предлагаемого подхода позволит повысить точность технико-экономической оценки, проводимой при принятии решения о проведении геолого-технологического мероприятия. А также в методику включены параметры, с помощью которых возможно давать рекомендации по выбору кислотного состава и технологии его нагнетания в пласт для наибольшего эффекта от кислотного воздействия на карбонатные коллектора.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2020-0027).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование воздействия кислотогенерирующего состава на керны продуктивных отложений Куюмбинского лицензионного участка / Г.П. Хижняк, А.М. Амиров, Е.А. Гладких, В.А. Колесов, А.Г. Захарян, А.Е. Чикин, Р. Харрис // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 3. – С. 31–35.
2. Stimulation of calcite-rich shales using nanoparticle-microencapsulated acids / R. Singh, S. Tong, K. Panthi, K. Mohanty // SPE Journal. – 2019. – V. 24. – P. 2671–2680.
3. Influence of transport conditions on optimal injection rate for acid jetting in carbonate reservoirs / D. Ridner, T. Frick, D. Zhu, A.D. Hill, R. Angeles, N. Vishnumolakala, C.E. Shuchart // SPE Production and Operations. – 2019. – V. 35. – P. 137–146.
4. A novel cationic polymer system that improves acid diversion in heterogeneous carbonate reservoirs / A. Sarmah, A. Farid Ibrahim, H.A. Nasr-El-Din, J. Jackson // SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. – Mumbai, 2019. – P. 2281–2295.
5. Acid stimulation improvement with the use of new particulate base diverter to improve zonal coverage in HPHT carbonate reservoirs / F. Moid, R. Rodoplu, A.M. Nutaifi, R. Kayumov // International Petroleum Technology Conference. – Dhahran, 2020. – URL: <https://onepetro.org/IPTCONF/proceedings-abstract/20IPTC/3-20IPTC/D033S088R001/154728> (дата обращения 15.04.2021).
6. Effects of pre-existing fractures on carbonate matrix stimulation studied by large-scale radial acidizing experiments / G. Aidagulov, D. Gwaba, R. Kayumov, A. Sultan, M. Aly, X. Qiu, H. Almajed, M. Abbad // SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. – Manama, 2019.
7. Hawkins M.F. A note on the skin effect // Journal of Petroleum Technology. – 1956. – V. 8. – P. 65–66.
8. Ali M.T., Ezzat A.A., Nasr-El-Din H.A. A model to simulate matrix-acid stimulation for wells in dolomite reservoirs with vugs and natural fractures // SPE Journal. – 2019. – V. 25. – P. 609–631.
9. Acid stimulation-best practices for design, selection and testing of acid recipes in low permeability carbonate reservoirs / B. Hall-Thompson, A.R. Ernesto, N. Abdulrahman, A. Alsuhaime // International Petroleum Technology Conference. – Dhahran, 2020.
10. Integration of latest laboratory, software and retarded acid technologies to increase efficiency of acid treatments in carbonates: case studies from Central Asia / D. Abdrazakov, M. Ziauddin, D. Vernigora, A. Beletskaya, I. Yakimchuk, O. Olennikova, D. Usoltsev, M. Nikolaev, M. Panga, A. Burlibayev // International Petroleum Technology Conference. – Beijing, 2019.
11. Мартюшев Д.А. Лабораторные исследования кислотных составов для обработки коллекторов, характеризующихся различной карбонатностью и структурой пустотного пространства горных пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 6–12.
12. Особенности изучения фильтрационных характеристик ориентированного керна сложнопостроенных карбонатных коллекторов / И.П. Гурбатова, В.В. Плотников, Н.А. Попов, И.В. Сысоев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 9. – С. 19–28.
13. Каневская Р.Д., Новиков А.В. Методы моделирования червоточин при соляно-кислотном воздействии на карбонатные пласты // Нефтепромышленное дело. – 2018. – № 3. – С. 19–28.
14. Complex approach to the design of acid treatment of carbonate reservoirs / Y. Trushin, A. Aleshchenko, K. Danilin, A. Folomeev, A. Haydar, A. Gorin, A. Sharifullin // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, 2019.
15. Khuzin R., Shevko N., Melnikov S. Improving well stimulation technology based on acid stimulation modeling, lab and field data integration // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, 2019.
16. Buijse M., Glasbergen G. A semi-empirical model to calculate wormhole growth in carbonate acidizing // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Dallas, 2005. – P. 3539–3552.
17. Daccord G., Touboul E., Lenormand R. Carbonate acidizing: toward a quantitative model of the wormholing phenomenon // SPE production engineering. – 1989. – V. 4. – P. 63–68.
18. Воробьев А.Х. Диффузионные задачи в химической кинетике. – М.: Изд-во Московского университета, 2003. – 98 с.
19. Chordia M., Trivedi J.J. Diffusion in naturally fractured reservoirs – a review // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. – Brisbane, 2010. – P. 1906–1937.
20. Равелев К.А. Сравнительный анализ эффективности применения кислотных составов для проведения соляно-кислотной обработки призабойной зоны карбонатного пласта // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2019. – Т. 1. – С. 194–196.
21. Потехин Д.В. Оптимизация технологии многовариантного трехмерного геологического моделирования залежей нефти и газа: дис. ... канд. тех. наук. – Пермь, 2014. – 151 с.
22. Иолчуев А.М., Савенков О.В. Анализ метода борьбы с солеотложениями путем периодической закачки ингибитора солеотложений в призабойную зону пласта // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2018. – № 4. – С. 53–71.
23. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 816 с.
24. Повышение эффективности пенокислотных и большеобъемных селективных обработок на карбонатных месторождениях ПАО «Татнефть» / М.Х. Мусабилов, А.Ю. Дмитриева, Р.Ф. Хусаинов, Э.М. Абусалимов, Б.Г. Ганиев, Ф.З. Исмагилов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 11. – С. 116–119.

Поступила 26.04.2021 г.

Информация об авторах

Кривощев С.Н., кандидат технических наук, заместитель декана по научно-исследовательской работе Горно-нефтяного факультета, доцент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Козырев Н.Д., аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета; инженер 1-й категории отдела гидродинамического моделирования филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

Вяткин К.А., аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Равелев К.А., студент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276.63

COMPLEX APPROACH TO ESTIMATING THE EFFICIENCY OF THE DESIGNED HYDROCHLORIC ACID TREATMENT USING THE RESULTS OF LABORATORY STUDIES AND HYDRODYNAMIC SIMULATION

Sergey N. Krivoshchekov¹,
Krivoshchekov@gmail.com

Nikita D. Kozyrev^{1,2},
Nikita.Kozyrev@pnn.lukoil.com

Kirill A. Vyatkin¹,
Kirill.Vyatkin@girngm.ru

Kirill A. Ravelev¹,
Kirill.Ravelev@pstu.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

² Branch of OOO «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm,
29, Sovetskiy Armii street, Perm, 614000, Russia.

The relevance of scientific work is caused by the fact that at present a high proportion of hydrochloric acid treatments do not provide the expected result in the oil fields of the Perm krai. This problem is directly related to the current approach to the design of technological operations to stimulate oil flow and insufficient knowledge of most of the factors that significantly affect the efficiency of treatment of the bottomhole zone with acid compositions. The demand for improving technologies for acid stimulation of the bottomhole zone of carbonate reservoirs and methods for predicting its effectiveness is caused by the low cost of this operation and the possibility of achieving high well productivity indicators with high-quality design and operation.

The main aim of the research is to develop an integrated approach for predicting the technological effect of the projected hydrochloric acid treatment based on a combination of laboratory research results and hydrodynamic modeling.

Objects of the research are technologies for enhancing oil recovery of reservoirs, lithologically represented by carbonate varieties. Within the main oil and gas provinces of Russia, most of the fields are at the final stage of development, as a result of which there is a low productivity of wells. Therefore, the improvement of methods for enhancing oil recovery is an important and relevant area of research in the oil and gas industry.

Methods: laboratory studies, consisting in determining the carbonate content of the studied sediments, as well as the properties of acid compositions used when carrying out hydrochloric acid treatments at the deposits of the Perm krai. These studies are necessary to establish the numerical value of the change in the skin factor on the objects under consideration. Hydrodynamic modeling taking into account this skin factor to determine the technological efficiency of the projected technology for treating the bottomhole zone of the productive formation.

Results. Based on the results of this study, there is a high correspondence between the actual changes in the skin factor at 18 objects after acid treatment, obtained from the analysis of the databases of hydrodynamic studies of wells in the Perm krai, and the predicted values according to the described method of preliminary assessment of the technological effect of hydrochloric acid treatment. The paper introduces the comparative analysis of the actual values of the target well flow rate, recorded during five months of operation, and predicted ones using hydrodynamic modeling of the fully described acid stimulation design, based on the calculated value of the skin factor change. Based on the analysis results, it was found that the proposed comprehensive approach to predicting the effectiveness of hydrochloric acid treatment has a small error within 5 %. Using a hydrodynamic model, the technological effect of the projected acid treatment at the target object until 2030 was calculated and a conclusion was made about the success of this geological and technical measure. With the introduction of the proposed integrated approach to oil companies, it is possible to increase the effectiveness of measures to increase oil recovery.

Key words:

Hydrochloric acid treatment, complex approach, hydrodynamic simulator, skin factor, effectiveness of measures.

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FSNM-2020-0027).

REFERENCES

1. Khizhnyak G.P., Amirov E.A., Gladkikh E.A., Kolesov V.A., Zakharyan A.G., Kharris R. Study of the acid-generating composition effect on the cores of the productive deposits of the Kuyumbinskiy license area. *Oil Industry*, 2015, no. 3, pp. 31–35. In Rus.
2. Singh R., Tong S., Panthi K., Mohanty K. Stimulation of calcite-rich shales using nanoparticle-microencapsulated acids. *SPE Journal*, 2019, vol. 24, pp. 2671–2680.
3. Ridner D., Frick T., Zhu D., Hill A.D., Angeles R., Vishnumolakala N., Shuchart C.E. Influence of transport conditions on optimal injection rate for acid jetting in carbonate reservoirs. *SPE Production and Operations*, 2019, vol. 35, pp. 137–146.

4. Sarmah A., Farid Ibrahim A., Nasr-El-Din H.A., Jackson J. A novel cationic polymer system that improves acid diversion in heterogeneous carbonate reservoirs. *SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition*. Mumbai, 2019, pp. 2281–2295.
5. Moid F., Rodoplu R., Nutaifi A.M., Kayumov R. Acid stimulation improvement with the use of new particulate base diverter to improve zonal coverage in HPHT carbonate reservoirs. *International Petroleum Technology Conference*. Dhahran, 2020.
6. Aidagulov G., Gwaba D., Kayumov R., Sultan A., Aly M., Qiu X., Almajed H., Abbad M. Effects of pre-existing fractures on carbonate matrix stimulation studied by large-scale radial acidizing experiments. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. Manama, 2019.
7. Hawkins M.F. A note on the skin effect. *Journal of Petroleum Technology*, 1956, vol. 8, pp. 65–66.
8. Ali M.T., Ezzat A.A., Nasr-El-Din H.A. A Model to simulate matrix-acid stimulation for wells in dolomite reservoirs with vugs and natural fractures. *SPE Journal*, 2019, vol. 25, pp. 609–631.
9. Hall-Thompson B., Ernesto A.R., Abdulrahman N., Alsuhaimi A. Acid stimulation-best practices for design, selection and testing of acid recipes in low permeability carbonate reservoirs. *International Petroleum Technology Conference*. Dhahran, 2020.
10. Abdrazakov D., Ziauddin M., Vernigora D., Beletskaya A., Yakimchuk I., Olenkova O., Usoltsev D., Nikolaev M., Panga M., Burlibayev A. Integration of latest laboratory, software and retarded acid technologies to increase efficiency of acid treatments in carbonates: case studies from Central Asia. *International Petroleum Technology Conference*. Beijing, 2019.
11. Martyshev D.A. Laboratory studies of acid compositions for treating reservoir, characterized by various carbonate content and void structure of rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 6–12. In Rus.
12. Gurbatova I.P., Plotnikov V.V., Popov N.A., Sysoev I.V. Peculiarities of research of filtration characteristics of the oriented core from complex carbonate reservoirs. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas and Mining*, 2013, no. 9, pp. 19–28. In Rus.
13. Kanevskaya R.D., Novikov A.V. Methods of wormholes simulation under hydrochloric acid impact on carbonate formations. *Oil-field engineering*, 2018, no. 3, pp. 19–28. In Rus.
14. Trushin Y., Aleshchenko A., Danilin K., Folomeev A., Haydar A., Gorin A., Sharifullin A. Complex approach to the design of acid treatment of carbonate reservoirs. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, 2019.
15. Khuzin R., Shevko N., Melnikov S. Improving well stimulation technology based on acid stimulation modeling, lab and field data integration. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, 2019.
16. Buijse M., Glasbergen G. A semi-empirical model to calculate wormhole growth in carbonate acidizing. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Dallas, 2005, pp. 3539–3552.
17. Daccord G., Touboul E., Lenormand R. Carbonate acidizing: toward a quantitative model of the wormholing phenomenon. *SPE production engineering*, 1989, vol. 4, pp. 63–68.
18. Vorobiev A.Kh. *Diffuzionnye zadachi v khimicheskoy kinetike* [Diffusion tasks in chemical kinetics]. Moscow, Moscow University Publ., 2003. 98 p.
19. Chordia M., Trivedi J.J. Diffusion in naturally fractured reservoirs – a review. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Brisbane, 2010, pp. 1906–1937.
20. Ravelev K.A. Sravnitelny analiz effektivnosti primeneniya kislotnykh sostavov dlya provedeniya solyano-kislotnoy obrabotki prizaboynoy zony karbonatnogo plasta [Comparative analysis of effectiveness of acid compositions application for hydrochloric acid treatment of bottomhole zone of a carbonate reservoir]. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopayemykh* [Problems of development of hydrocarbon and ore mineral deposits]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ., 2019. pp. 194–196.
21. Potekhin D.V. *Optimizatsiya tekhnologii mnogovariantnogo trekhmernogo geologicheskogo modelirovaniya zalezhey nefi i gaza*. Diss. Kand. nauk [Optimization of the technology of multivariate three-dimensional geological modeling of oil and gas deposits. Cand. Diss.]. Perm, 2014. 151 p.
22. Iolchuev A.M., Savenok O.V. Analysis of the method for controlling scale deposition by periodically injecting the scale inhibitor into the bottomhole formation zone. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*, 2018, no. 4, pp. 53–71. In Rus.
23. Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefi* [Borehole oil production]. Moscow, «Oil and Gas» RSU of Oil and Gas nam. I.M. Gubkina Publ., 2003. 816 p.
24. Musabirov M.Kh., Dmitrieva A.Yu., Khusainov R.F., Abusalimov E.M., Ganiev B.G., Ismagilov F.Z. Efficiency improvement of foam-acid treatments and selective large-volume acidizing at carbonate reservoirs of Tatneft PJSC. *Oil Industry*, 2019, no. 11, pp. 116–119. In Rus.

Received: 26 April 2021.

Information about the authors

Sergey N. Krivoshchekov, Cand. Sc., Deputy Dean for research of Mining and Petroleum Faculty, associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Nikita D. Kozyrev, postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University; 1st category engineer, branch of OOO «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.

Kirill A. Vyatkin, postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University.

Kirill A. Ravelev, student, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 66.067

МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ПИГМЕНТОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД

Джубари Мохаммед Кадер¹,
mohammedqader1983@gmail.com

Алексеева Надежда Вячеславовна²,
alexejewa.nadja@gmail.com

Базиани Гашин Ибрахим³,
gasheenbazeany@gmail.com

Таха Виляль Саад⁴,
bilasaad_t@yahoo.com

¹ Северный технический университет,
Ирак, 36001, г. Мосул, ул. Аль-Саяда, 1530.

² Тамбовский государственный технический университет,
Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106.

³ Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33.

⁴ Завод по очистке воды Кармат Али, Басра ойл компани,
Ирак, 61001, Басра, ул. Баб-Аль-Зубайр, 520.

Актуальность. Красители и пигменты – это природные и ксенобиотические соединения, которые находят широкое применение в различных областях деятельности человека за счет способности придавать объектам цвет. В ходе реализации технологического процесса производства с применением пигментов образуются промывные воды, содержащие пигмент, которые чаще всего являются сточными водами. В результате предприятие теряет часть ценных пигментов и красителей, а окружающая среда подвергается техногенному воздействию. Различные красители, присутствующие в воде, оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Следовательно, очистка сточных вод от пигментов является актуальной проблемой.

Цель: нахождение наиболее эффективного и экономически выгодного технологического процесса очистки сточных вод от пигментов и красителей.

Методы: сбор, обобщение и комплексный анализ данных по методам очистки сточных вод от красителей и пигментов.

Результаты. Рассмотрены существующие технологии очистки сточных вод, содержащих пигменты и красители. Приведены примеры российского и зарубежного опыта. Показана невозможность создания единой технологии очистки сточных вод, содержащих пигменты и красители, так как на выбор конкретного процесса очистки влияют характеристики сточных вод, обусловленные технологией производства и видом пигментов и красителей. Тем не менее можно систематизировать существующие технологии для более удобного и быстрого выбора необходимого технологического процесса. Описаны механические, массообменные, химические и биологические процессы очистки. Проведен анализ отдельных процессов и комбинации нескольких. Использование нескольких процессов в одной технологической стадии разделения сточных вод является наиболее эффективным и экономически выгодным решением.

Ключевые слова:

Текстильные сточные воды, красители, физическая очистка, биодegradация, адсорбция, мембранная очистка.

Введение

Очистка воды в настоящее время представляет собой одно из важнейших направлений прикладной науки. Сбросы сточных вод сложного состава, содержащих пигменты, вызывают серьёзную обеспокоенность у природоохранных регулирующих органов [1]. Неиспользованные в производстве вещества сбрасываются со сточными водами, которые характеризуются высокими показателями цветности, биохимического потребления кислорода (БПК), химического потребления кислорода (ХПК), рН, температуры, мутности и содержания токсичных химических веществ. Ряд промышленных сточных вод содержат различные типы красителей, которые из-за высокой молекулярной массы и сложной структуры имеют очень низкую

биоразлагаемость [2, 3]. Кроме того, прямой сброс таких вод в канализационные сети приводит к нарушению процессов биологической очистки. Такие сточные воды могут иметь широкий диапазон значений рН, высокие концентрации солей, таких как Na_2SO_4 и NaCl , а также карбонаты [4]. Таким образом, эти стоки с высокими концентрациями неорганических солей, кислот и оснований в биологических реакторах вызывают увеличение затрат на очистку [5]. Существует ряд методов, которые используются для удаления красителей. К ним относятся: биологическая обработка, коагуляция/флокуляция, химическое окисление и фотокаталитические процессы, озонобработка, мембранные процессы и адсорбция [6]. Рассмотрим указанные методы более подробно.

Красители и пигменты

Цвет вводится в красящие материалы с использованием красителей и пигментов. Красители можно определить как растворимые окрашенные вещества, которые применяются в виде растворов, в то время как пигменты – это нерастворимые соединения, интегрированные в результате диспергирования в такие продукты, как краски, печатные краски и пластмассы [7]. Красители классифицируют на катионные, анионные и неионные. Хромофорами в анионных и неионных красителях являются в основном азогруппа или антрахиноны. В результате разрушения азо-связи в сточных водах образуются токсичные амины [8].

По мнению М.В. Vogacki и др. [9], пигменты можно разделить на две категории: гомогенные пигменты и смеси. Однородные пигменты содержат частицы пигментов аналогичного типа, например цветные оксиды металлов и металлические порошки. Вторую группу – смеси – получают химическим окрашиванием подходящего носителя, такого как активный высокодисперсный кремнезем, осажденный карбонат кальция. Смеси также могут быть получены механическим смешиванием интенсивно окрашивающего пигмента с наполнителем.

Следует отметить, что объемы производства промышленности и ее сточных вод увеличиваются пропорционально, что делает ее одним из основных источников серьезных проблем загрязнения во всем мире. В частности, выброс окрашенных сточных вод в

окружающую среду нежелателен не только из-за их окраски, но и потому, что многие красители из сточных вод и продукты их распада токсичны и/или являются мутагенами [10]. Было подсчитано, что более 10–15 % общего количества красителей, используемых в производстве, выбрасываются в окружающую среду в процессе синтеза и окрашивания [11]. Без адекватной обработки красители стабильны и могут оставаться в окружающей среде в течение длительного периода времени [12]. Помимо проблемы загрязнения, промышленность связывает с потреблением большого количества питьевой воды (в некоторых случаях до 3000 м³/сут) [11]. Во многих странах, где питьевая вода в дефиците, такое высокое ее потребление невозможно, и было рекомендовано перерабатывать сточные воды для их повторного использования. Большое значение с точки зрения охраны окружающей среды имеет и состав красящих веществ.

Применение пигментов и красителей

Человечество использовало красители на протяжении тысяч лет. Считается, что неандерталец был первым человеком, который использовал красители около 180000 лет назад. В 1856 г. William Henry Perkin открыл первый в мире коммерчески успешный синтетический краситель, и к концу XIX в. было разработано и изготовлено уже 10000 новых синтетических красителей [13].

Таблица 1. Основные характеристики красителей [7]

Table 1. Main characteristics of dyes [7]

Класс красителей Dye class	Описание Description	Виды загрязнителей, связанных с различными красителями Types of pollutants associated with various dyes
Кислотный Acid	Анионные соединения с высокой растворимостью в воде Anionic compounds with high water solubility	Цвет; органические кислоты; незафиксированные красители Colour; organic acids; unfixed dyes
Основной Basic	Очень яркие водорастворимые катионные красители, которые используются в слабокислых красящих ваннах Very bright dyes, water-soluble cationic dyes, applied in weakly acidic dye baths	Цвет; органические кислоты; незафиксированные красители Colour; organic acids; unfixed dyes
Прямой Direct	Водорастворимые анионные соединения можно наносить непосредственно на целлюлозу без фиксатора красителя Water-soluble, anionic compounds can be applied directly to cellulosic without mordants (a substance that will form a coordination complex with the dye. Useful in setting dyes on fabrics)	Цвет; соль; незафиксированный краситель; катионные фиксирующие агенты; поверхностно-активное вещество; пеногаситель; выравнивающие и замедляющие агенты; отделка; разбавители Colour; salt; unfixed dye; cationic fixing agents; surfactant; defoamer; leveling and retarding agents; finish; diluents
Дисперсный Disperse	Нерастворимы в воде Water insoluble	Цвет; органические кислоты; носители; выравнивающие агенты; фосфаты; пеногасители; смазки; диспергаторы; разбавители Colour; organic acids; carriers; leveling agents; phosphates; defoamers; lubricants; dispersants; diluents
Протравной Mordant	Окончательный цвет во многом зависит от выбора фиксатора красителя (протравы). Примером протравы является дихромат калия Final colour is largely dependent on the choice of mordant. An example of mordant is potassium dichromate	Фиксатор красителя (особенно в категориях тяжелых металлов) высоко токсичен Mordants (particularly in heavy metals categories) will cause hazardous to health
Активный Reactive	Водорастворимые анионные соединения, самый большой класс красителей Water-soluble, anionic compounds, the largest dye class	Цвет; соль; щелочи; незафиксированный краситель; поверхностно-активные вещества; пеногасители; разбавители; отделка Colour; salt; alkali; unfixed dye; surfactants; defoamer; diluents; finish
Сернистый Sulphur	Органические соединения, содержащие серу или сульфид натрия Organic compounds containing sulphur or sodium sulphide	Цвет; щелочи; окислители; восстановители; незафиксированный краситель Colour; alkali; oxidizing agents; reducing agent; unfixed dye
Кубовый Vat	Самые старые красители, химически более сложные, нерастворимы в воде Oldest dyes, more chemically complex, water insoluble	Цвет; щелочь; окислители; восстановители Colour; alkali; oxidizing agents; reducing agent

Синтетические красители – исключительно стойкие органические соединения. Они широко применяются в различных отраслях текстильной [14], целлюлозно-бумажной [15], кожевенной и дубильно-экстрактной [16], пищевой промышленности [17], в сельском хозяйстве [18], при окраске волос [19] и др. Синтетические красители применяются для контроля эффективности очистки сточных вод [20], отслеживания подземных вод [21] и определения площади поверхности активного ила [20].

Химические классы красителей, которые наиболее часто используются в промышленных масштабах, – это производные азо-, антрахинона, серы, трифенилметила и фталоцианина, индигоиды [22]. Существует более 100000 коммерческих красителей с приблизительной оценкой производства $7 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$ т в год [23]. Свойства и токсичность красителей, содержащихся в сточных водах, были широко изучены. Классы и описание красителей, типичные загрязнители, связанные с красителями, приведены в табл. 1.

Доступные технологии удаления красителей

Очистка промышленных сточных вод включает в себя четыре процесса, а именно: предварительную обработку, первичную очистку, вторичную очистку и третичную очистку. Процесс предварительной обработки включает стабилизацию и нейтрализацию промышленных сточных вод перед сбросом в муниципальные канализационные системы или в центральную промышленную канализационную систему. После стадии предварительной обработки используются физические или химические методы разделения (первичная очистка) для удаления взвешенных веществ в сточных водах с последующей вторичной очисткой. Вторичная биологическая обработка использует микроорганизмы для стабилизации компонентов отходов перед переходом к третичной обработке. Третичные процессы (физико-химическая обработка) включают адсорбцию, ионный обмен, химическое окисление и мембранное разделение. Заключительными стадиями процесса очистки сточных вод являются стадии переработки и удаления осадка [24].

Для удаления красителей из промышленных сточных вод используются различные химические, физические и биологические методы [25]. Эти методы могут использоваться отдельно или совместно в различных комбинациях. Обработка может сочетать две или более технологий для обеспечения эффективности процесса. Однако эксплуатационные расходы и время, необходимое для достижения желаемой степени очистки, являются основными критериями выбора подходящего способа удаления красителя из сточных вод. Остановимся на методах очистки подробнее.

Физические методы

Физическая обработка включает в себя процессы разделения частиц; никаких значительных химических или биологических изменений не происходит. Примерами процессов физической обработки являются адсорбция, мембранная фильтрация и ионный обмен. Эти процессы зависят от размера частиц [26].

Адсорбция

Степень адсорбции зависит от природы адсорбата (его молекулярной массы, молекулярной структуры, размера молекул, полярности и концентрации раствора). Она также зависит от поверхностных свойств адсорбента, таких как размер частиц, площадь поверхности, поверхностный заряд и т. д. Эффективность процесса адсорбции определяется физико-химическими свойствами адсорбента и адсорбата. Кроме того, механизмы адсорбции можно разделить на физические и химические. При физической адсорбции загрязняющие вещества накапливаются на поверхности адсорбента в результате вышеуказанных взаимодействий. При химической адсорбции адсорбат химически связан с поверхностью адсорбента за счет электронного обмена [27].

Количество адсорбента для удаления красителя сильно зависит от начальной концентрации красителя. Влияние начальной концентрации красителя определяется непосредственным соотношением между концентрацией красителя и площадью поверхности адсорбента. В общем случае процент удаления красителя уменьшается с увеличением начальной концентрации красителя, что может быть связано с насыщением адсорбционных центров на поверхности адсорбента. С другой стороны, увеличение начальной концентрации красителя вызовет увеличение емкости адсорбента, и это может быть связано с высокой движущей силой массопереноса при высокой начальной концентрации красителя [28]. Еще одним существенным физико-химическим параметром процесса является температура, так как она изменяет адсорбционную емкость адсорбента [29].

Несколько лет назад было установлено, что использование активированного угля в качестве адсорбента в процессе адсорбции эффективно при очистке сточных вод, но стоимость активированного угля слишком высока. Поэтому возникает необходимость поиска более дешевых и эффективных адсорбентов. В последнее время ряд исследований был сосредоточен на недорогом адсорбенте, который может разрушать и поглощать красители из сточных вод [30].

Мембранная фильтрация

Мембранная фильтрация – это метод, который использует мембранные микропоры для фильтрации и селективные проницаемые мембраны для разделения определенных веществ в сточных водах. В настоящее время процесс мембранного разделения часто используется для извлечения красителей из сточных вод, в основном это баромембранные процессы (микро-фильтрация, ультрафильтрация, нанофильтрация и обратный осмос). Мембранный процесс разделения – это новая технология очистки с высокой эффективностью отделения, низким энергопотреблением, простая в эксплуатации и обладающая рядом других преимуществ [31]. В текстильной промышленности эти методы могут использоваться как для фильтрации, так и для рециркуляции богатых пигментами потоков, для мерсеризации и отбеливания сточных вод [32]. Отме-

чено [33], что методы фильтрации пригодны для рециркуляции воды на текстильном производстве при низкой концентрации красителей в сточных водах, но не способны снизить содержание растворенных твердых веществ, что затрудняет повторное использование воды.

Ультрафильтрация успешно применяется для утилизации и переработки отходов и нерастворимых красителей (например, индиго, диспергированных), вспомогательных химических веществ (поливиниловый спирт) и воды. При этом ультрафильтрация не удаляет низкомолекулярные и растворимые красители (кислотные, реактивные, основные и др.). Эффективное удаление цвета достигается с помощью нанофильтрации и обратного осмоса [34]. Кроме того, повторное использование воды окрашенных сточных вод стало возможно благодаря обратному осмосу. Но для того, чтобы избежать мембранного обрастания, необходима предварительная обработка с коагуляцией и микрофильтрацией [32].

Специфическая температура и химический состав сточных вод определяют тип и пористость используемого фильтра [35]. Наконец, основными недостатками мембранной технологии являются высокие экономические затраты, загрязнение мембран и производство концентрированного красящего раствора, который необходимо обрабатывать [31]. Следует отметить, что экстрагирование из мембран концентратов, таких как гидроксид натрия, используемый на стадии мерсеризации, или проклеивающих агентов, таких как поливиниловый спирт (ПВС), может снизить затраты на обработку [36].

Ионообменный метод

Процесс ионного обмена обычно используется для удаления неорганических солей и некоторых специфических органических анионных компонентов [8]. В то же время ионный обмен не получил широкого применения для очистки окрашенных сточных вод, главным образом из-за мнения, что ионообменники не могут быть использованы для широкого спектра красителей [37]. Сточные воды пропускают через ионообменную смолу до тех пор, пока доступные активные участки не будут насыщены. Таким образом, из содержащих краситель сточных вод можно удалять как катионные, так и анионные красители. К преимуществам этого способа можно отнести химическую стойкость ионообменных смол, получение вод, не содержащих красители, и возможность удаления растворимых красителей. Главным недостатком этого метода является стоимость. Органические растворители дороги, а метод ионного обмена не очень эффективен для дисперсных красителей [38].

Кроме того, можно разработать сорбционный способ очистки сточных вод от красителей с использованием анионообменных смол. Однако многие детали, такие как точная процедура регенеративной обработки, утилизация или ограничения относительно типа сточных вод, в которых он может быть использован, требуют уточнения [39].

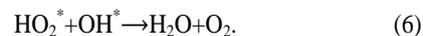
Химические методы

Метод химической обработки используется для удаления красителей из сточных вод с добавлением химических реактивов.

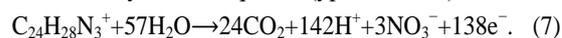
Процесс Фентона (H_2O_2 -Fe (II))

Реагент Фентона является подходящим реактивом для очистки сточных вод [40]. Он представляет собой раствор пероксида водорода H_2O_2 (окислитель), в который в качестве катализатора добавлены катионы Fe^{2+} . Разложение пероксида водорода сопровождается образованием гидроксильных радикалов [41].

S. Hashemian и др. [42] провели исследование, в котором Фентоновское окисление метилового фиолетового в водном растворе описали уравнениями (1)–(6):



Общее уравнение деградации метилового фиолетового и образования углекислого газа и нитрат-иона выглядит следующим образом (уравнение 7):



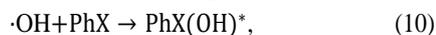
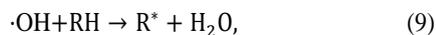
Реакция Фентона эффективна в обесцвечивании как растворимых, так и нерастворимых красителей. Одним из основных недостатков этого метода является образование осадка в результате флокуляции реагента и молекул красителя. Осадок, который содержит концентрированные примеси, все еще требует удаления. Обычно он сжигается с получением энергии, но некоторые считают, что такое удаление отнюдь не безвредно для окружающей среды. Производительность метода зависит от конечного состава осадка, хотя катионные красители вообще не коагулируют. Кислотные, прямые, кубовый, протравной и реактивные красители обычно коагулируют, но полученная масса плохо оседает, давая неудовлетворительные результаты [43].

Процесс окисления

Окисление представляет собой наиболее часто используемый химический метод удаления красителей. В основном это связано с простотой его применения. Основным окислителем является перекись водорода (H_2O_2) [44]. Этот агент должен быть активирован, например, ультрафиолетовым светом. Химические способы удаления красителя варьируются в зависимости от способа, которым активируют H_2O_2 [40]. Окисление красителя в сточных водах сопровождается расщеплением ароматических колец его молекул [43].

Процесс окисления включает в себя перенос электронов (8), дегидрирование (9) и электрофильное присоединение к системам π (гидроксилирование) (10). В результате этих реакций образуются органические радикалы и запускаются цепные процессы, в том числе реакции с кислородом (образование пероксид-

ных радикалов), а полученные промежуточные продукты реакции подвергаются дальнейшему окислению частицами $\cdot\text{OH}$, HO_2^* , H_2O_2 до тех пор, пока органические загрязнители полностью не минерализуются [41].



где RX и PhX – алифатические и ароматические галогены соответственно.

Озонирование

Озон в качестве окислителя был впервые использован в начале 1970-х гг. Он является хорошим окислителем из-за высокой нестабильности (окислительный потенциал 2,07) по сравнению с пероксидом водорода H_2O_2 (1,78). Восстанавливаясь, озон разлагает хлорированные углеводороды, фенолы, пестициды и ароматические углеводороды [33].

Озон обладает высоким окислительным потенциалом и селективностью по отношению к органическим загрязнителям и генерирует OH^* по уравнениям (11)–(13) [45].



Таким образом, процесс озонирования приводит к усиленному образованию OH^* , тем самым повышая эффективность удаления красителя.

Количество озона, необходимое для окисления сточных вод, содержащих красители, зависит от об-

щей цветности и остаточного ХПК, подлежащего удалению без формирования осадка и токсичных метаболитов [46]. Озонирование обесцвечивает сточные воды, делает их пригодными для сброса в природные водоемы. Этот метод предпочтителен для красителей с двойными связями в молекулах [40]. Одним из главных преимуществ озона является то, что он может использоваться в газообразном состоянии и поэтому не увеличивает объем сточных вод и осадков. Недостаток озонирования – его короткий период полураспада, обычно 20 минут. Это время уменьшается, если присутствуют красители, в то время как стабильность зависит от присутствия солей, pH и температуры [33].

Биологические методы

Биологические методы очистки используют микроорганизмы, главным образом бактерии, для разложения органических веществ в сточных водах. Этот метод обработки относительно недорог, имеет низкие эксплуатационные расходы, а конечные продукты полной минерализации нетоксичны и стабильны [23]. По сравнению с химическими и физическими методами обработки, биологические методы требуют меньше энергии и химических реактивов [47]. Как правило, биологические методы обработки делят на аэробные (с участием кислорода) и анаэробные (бескислородные) [48]. В аэробных системах в качестве акцептора электронов выступает кислород. А в анаэробной системе акцептором электронов является органическое вещество. На рис. 1 показаны принципы функционирования двух процессов биологической очистки [49].

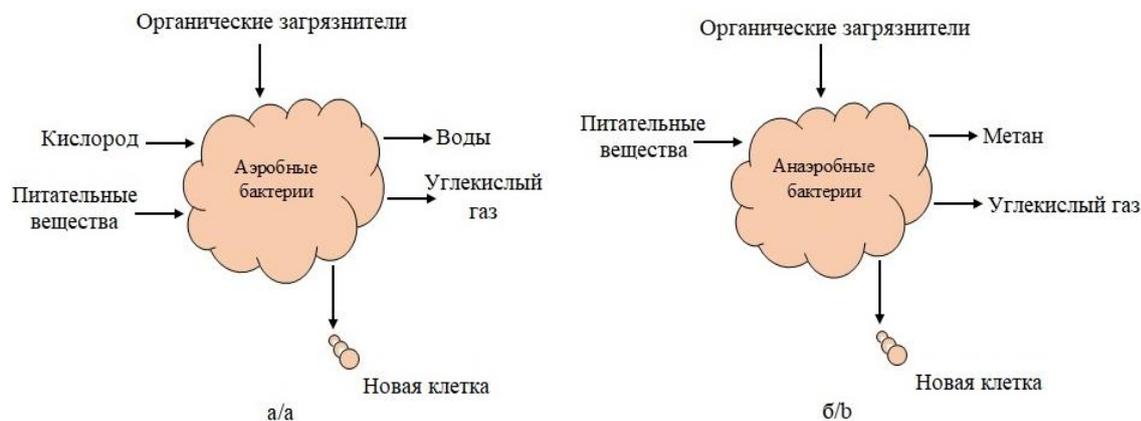


Рис. 1. Аэробная (а) и анаэробная (б) биологическая очистка сточных вод

Fig. 1. Aerobic (a) and anaerobic (b) biological wastewater treatment

Кислород используется в качестве окислителя органических веществ, а конечными продуктами в аэробной системе являются углекислый газ, вода и новые клетки. В анаэробной системе воздух отсутствует (следовательно, молекулярного свободного кислорода нет), и конечные продукты – метан, углекислый газ и новые клетки [49].

В то же время в литературе имеется много данных о способности чистых культур обесцвечивать красители [50, 51], но они не находят большого примене-

ния в системах очистки промышленных сточных вод из-за неоднородности компонентов в сточных водах в зависимости от графика производства.

На самом деле эффективность методов биологической деградации зависит от адаптивности выбранных микробов и активности ферментов. Поэтому большое количество микроорганизмов и ферментов выделялось и испытывалось на разложение сразу нескольких красителей.

Аэробная очистка

Аэробная биологическая обработка может очистить воду с помощью аэробных бактерий и факультативных бактерий в анаэробной среде. Эта очистка включает в себя два типа процессов: процессы в активном иле и процессы в биопленке.

Бактериальная обработка

Использование бактерий для разложения азокрасителей началось в 1970-х гг. с сообщений о *Bacillus subtilis*, *Aeromonas hydrophila* и *Bacillus cereus* [52]. E. Idaka и др. [53] также описывали использование бактерий для биодegradации азокрасителей. Показано, что аэробная обработка с использованием бактерий эффективна для обесцвечивания более 80 % промышленных сточных вод, содержащих азокрасители.

Грибковая обработка

Использование грибов в очистке сточных вод основано на потреблении ими органических веществ, что снижает ХПК и БПК сточных вод. Другой целью

является получение некоторого полезного продукта, такого как грибковая биомасса, обогащенная белком, для корма животных или некоторые специфические грибковые метаболиты [13]. Некоторые исследователи изучали способность штаммов грибов обесцвечивать азо- и трифенилметан.

Анаэробная обработка

Использование анаэробного процесса при очистке сточных вод от красителей также изучалось с начала 1970-х гг. [23]. Неоднократно описывалась эффективность анаэробной обработки при разложении широкого спектра синтетических красителей [20]. Этот процесс обработки дешевле, чем аэробная очистка, потому что отсутствует дорогая аэрация и осадок при обработке не увеличивается в объеме. Анаэробная обработка помогает в обесцвечивании красителей, подготавливая их к дальнейшей аэробной обработке и деградации [54]. Как правило, при анаэробном разложении образуются метан и сероводород [55].

Таблица 2. Сравнение методов удаления красителей из сточных вод

Table 2. Comparison of methods for removing dyes from wastewater

Методы Methods	Преимущества Advantages	Недостатки Disadvantages	Типы красителей Dye types	Ссылка Reference
Адсорбция Adsorption	Удаление широкого спектра красителей Removal of wide variety of dyes	Необходимы дорогостоящие расходные материалы (адсорбентов) с последующей их регенерацией или утилизацией Very expensive	Щелочные красители Basic dyes	[60]
Мембранная фильтрация Membrane filtration	Удаляет все типы красителей Removes all dye types	Образование слоя осадка в процессе разделения Concentrated sludge production	Кислотные красители Acid dyes	[61]
Ионный обмен Ion exchange	Возможность многократного использования адсорбентов Regeneration: no adsorbent loss	Ограниченная область применения Not effective for all dyes	Активные красители Reactive dyes	[62]
Окисление Oxidation	Быстрый и эффективный процесс Rapid and efficient process	Энергозатратно, расходы на реактивы High energy cost, chemicals required	Кислотный, активный, прямой, катионный, дисперсный и кубовый красители Acid, reactive, direct, cationic, disperse, and vat dye	[63]
Озонирование Ozonation	Применяется газообразный озон, не приводит к увеличению объема сточных вод и осадка Ozone can be applied in its gaseous state and does not increase the volume of wastewater and sludge	Короткий период полураспада озона Short half-life	Активные красители Reactive dyes	[64]
Аэробная обработка Aerobic treatment	Низкие эксплуатационные расходы и невысокое количество образующегося шлама Lower running costs and produce less sludge	Невысокая скорость обработки катионных красителей Under aerobic conditions cationic dyes are not readily metabolized	Азокрасители Azodyes	[65]
Анаэробная обработка Anaerobic treatment	Позволяет обесцвечивать азо- и другие водорастворимые красители Allows azo- and other water-soluble dyes to be decolorised	Выделяются метан и сероводород Anaerobic break down yields methane and hydrogen sulphide	Азокрасители Azodyes	[65]
Коагуляция Coagulation	Низкая себестоимость очищенной воды Low cost of treated water	Образование большого количества осадка High sludge production	Дисперсные красители Disperse dyes	[66]
Электрохимическое разрушение Electrochemical destruction	Не используются химикаты, не образуется шлам No consumption of chemicals and no sludge build up	Относительно высокие скорости потока снижают степень удаления красителя Relatively high flow rates cause a direct decrease in dye removal	Активные красители Reactive dyes	[67]

Большое внимание уделялось изучению влияния различных современных технологий на скорость разложения красителей и присутствия других соединений в средах. Так, было установлено, что разработка высокоскоростных систем, в которых гидравлическое время удержания не связано со временем удержания твердых частиц, облегчает удаление красителей из сточных вод текстильной промышленности [20]. Другое исследование доказало целесообразность использования анаэробного гранулированного осадка для полного удаления 20 азокрасителей [56]. Было показано, что применение редокс-медиатора антрахинона-2,6-дисульфоновой кислоты сильно ускоряет разложение азокрасителей [57]. С.М. Carliell и др. изучено влияние присутствия солей (нитратов и сульфатов) на скорость разложения азокрасителя Реактивного красного 141 в анаэробных условиях. Результаты показали, что нитрат задерживает начало разложения, в то время как сульфат не влияет на процесс биodeградации [58].

В анаэробных условиях красители легко расщепляются, образуя ароматические амины, которые являются стабильным продуктом метаболизма. Органический углерод/источник энергии необходим для удаления красителей в метаногенных условиях. Для удаления красителей использовались простые субстраты, такие как глюкоза, крахмал, ацетат, этанол, сыворотка и тапиока [11]. G. Gnana Pragasam и др. [59] изучали очистку текстильных сточных вод в иловом реакторе выше по течению. При 6,81 кг ХПК/м³/сут. удаление ХПК и красителя составило 96 и 93 % соответственно с производством газа 355 л/сут. Исследователи показали, что ацидогенные, а также метаногенные бактерии способствуют удалению красителей.

В табл. 2 представлены преимущества и недостатки каждого рассмотренного метода, а также тип

красителя, для которого этот метод может быть применен.

Сочетание физико-химических методов

Вообще, физические и химические методы на практике трудно разделить. Оба типа методов применяют химические реакции для улучшения качества воды. Коагуляция, мембранная фильтрация и передовые окислительные процессы, такие как озонирование, система H₂O₂/пиридин/Cu, процесс Фентона, фотокатализ и ультразвуковое облучение, объединяют и физико-химические, и химические методы обработки. Обычно физико-химические и химические процессы обработки экономически целесообразны, но иногда они весьма дорогостоящие из-за химических реактивов [68].

Красители обладают канцерогенными, мутагенными, аллергенными и токсическими свойствами. Также они являются причиной загрязнения окружающей среды. Высокие значения БПК и ХПК красителя, pH и присутствие металлов затрудняют очистку текстильных сточных вод. По этим причинам необходимо сочетать физические, химические и биологические процессы очистки [69].

Кроме того, при физических и химических методах используются коагулянты, такие как соли железа или полихлорид алюминия, для образования комплексов с красителями, которые затем отделяются фильтрацией или осаждением. Полиэлектролит можно также дозировать во время фазы флокуляции для улучшения свойств. Метод коагуляции-флокуляции является одним из наиболее широко используемых процессов на текстильных очистных сооружениях во многих странах, таких как Германия и Франция [70]. Элементы традиционной физико-химической обработки представлены на рис. 2 [8].

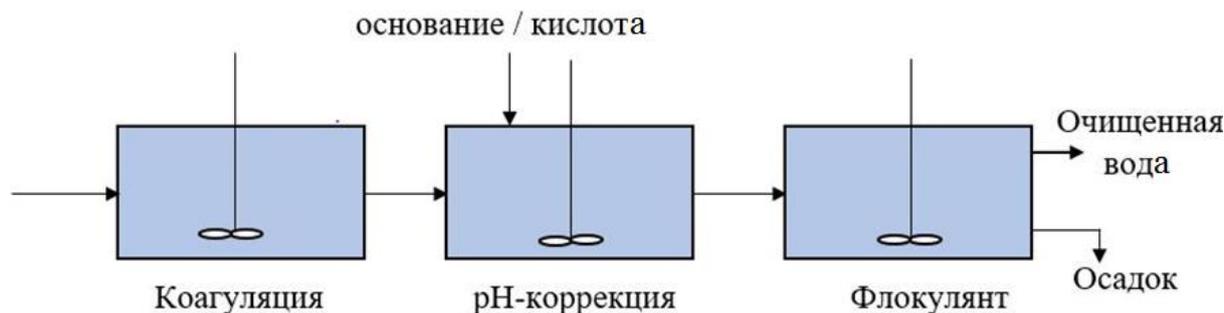


Рис. 2. Элементы традиционной физико-химической обработки
Fig. 2. Components of conventional physico-chemical treatment

В табл. 3 показаны некоторые экономически выгодные и высоко энергоэффективные сочетания физических, химических и биологических методов очистки окрашенных сточных вод, характеризующихся высокими значениями ХПК и высокими концентрациями органических соединений, таких как фенолы, красители и тензоактивные вещества [24].

Таким образом, было предложено использовать комбинированные процессы для нивелирования недостатков отдельных процессов.

Заключение

В данной работе описаны различные методы обезвреживания промышленных сточных вод – физические, химические и биологические. Отмечено, что экономически эффективное удаление цвета сточных вод остается актуальной проблемой. Экологические проблемы, порождаемые промышленностью, все чаще привлекают повышенное внимание из-за загрязненных сточных вод, которые в основном образуются в процессе крашения.

Таблица 3. Комбинация различных методов очистки

Table 3. Combination of various treatment methods

Комбинированный метод Mixed method	Процесс Process
Физико-химический (коагуляция/адсорбция) Physical/chemical or chemical/physical Coagulation/adsorption	Коагуляция использовалась в качестве основного процесса очистки с последующей адсорбцией для удаления активных красителей (С. I. Реактивный Красный 45и С. I. Реактивный Зеленый 8) из синтетических сточных вод. Coagulation was used as a main treatment process followed by adsorption for the removal of reactive dyes (C.I. Reactive Red 45 and C.I. Reactive Green 8) from synthetic wastewater
Коагуляция-флокуляция/адсорбция Coagulation-flocculation/adsorption	Удаление Черного 5 и оранжевого 16 исследовали комбинированным методом коагуляции-флокуляции/адсорбции. Removal of Black 5 and Orange 16 was investigated using combined coagulation-flocculation/adsorption method
Коагуляция-флокуляция/нанофильтрация Coagulation-flocculation/nanofiltration	В раствор FeCl ₃ был использован в качестве коагулянта для удаления Ремазол черный 133 Б, Procion Малиновый Н-EXL, Procion Темно-синий Н-EXL, Procion Желтый Н-EXL, Procion Синий Н-EXL. FeCl ₃ was used as coagulant agent for removal of Remazol Black 133 B, Procion Crimson H-EXL, Procion Navy H-EXL, Procion Yellow H-EXL, Procion Blue H-EXL
Процесс Фентона/Нанофильтрация Fenton's process/nanofiltration	Исследованы три комбинации процесса Фентона и нанофильтрации с использованием синтетического раствора красителя эозина: например, реакция Фентона, за которой следует нанофильтрация; нанофильтрация, за которой следует реакция Фентона. Three combinations of Fenton's process and nanofiltration are studied using a synthetic solution of eosin dye: for example, Fenton's process followed by nanofiltration; Nanofiltration followed by Fenton's process; Scheme 3 is two steps of nanofiltration
Химический/биологический или биологический/химический Фотокаталитический/анаэробный Chemical/biological or biological/chemical Photocatalytic/anaerobic	Фотокаталитический процесс на основе иммобилизованного диоксида титана был использован в качестве метода пред-/пост-биологической анаэробной обработки для обработки азо-, антрахиноновых и фталоцианиновых текстильных красителей. Photocatalytic process based on immobilized titanium dioxide was used as pre/posttreatment method to biological anaerobic treatment for the treatment of azo, anthraquinone, and phthalocyanine textile dyes
Озонирование/биологическая деградация с использованием биопленки Ozonation/biological degradation with biofilm	Очистка сточных вод от красителей с помощью озонирования, приводящая к образованию токсичных и канцерогенных побочных продуктов. Treatment of dye wastewater using ozonation produces toxic and carcinogenic by-products

Выбор способа удаления красителя будет зависеть от характеристик сточных вод, таких как класс и концентрация красителя, pH, соленость и токсичность соединений. Большинство промышленных сточных вод, содержащих анионные и катионные красители, очищаются адсорбцией. Недорогие, доступные на местном уровне и эффективные материалы могут использоваться в качестве адсорбентов вместо дорогостоящего коммерческого активированного угля для удаления красителей из водного раствора. Недорогие адсорбенты имеют ряд преимуществ для коммерческого использования в будущем.

Методы химической обработки, такие как усовершенствованные процессы окисления и коагуляции-флокуляции, эффективны при обработке широкого спектра водных растворов красителей, но удаление

осадка все еще остается проблемой. Озонирование, фотокаталитические и сонокаталитические методы деградации все чаще используются в очистке сточных вод, поскольку они не увеличивают объем сточных вод и осадков, но образование токсичных побочных продуктов препятствует их широкому распространению.

Использование бактерий и грибов не соответствует требованиям процессов очистки из-за их короткого срока службы и неустойчивого характера в присутствии токсичных текстильных стоков. Наиболее перспективным процессом является использование комбинированных методов удаления красителей из сточных вод благодаря высокому качеству очищенной воды. Таким образом, все методы обесцвечивания, описанные в данном обзоре, имеют свои преимущества и недостатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Deaconu M., Senin R., Stoica R., Athanasiu A., Crudu M., Oproiu L., Ruse M., Filipescu C. Adsorption decolorization technique of textile/leather-dye containing effluents. *International Journal of Waste Resources*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 1–7.
2. Queiroz M.T.A., Queiroz C.A., Alvim L.B., Sabará M.G., Leão M.M.D., De Amorim C.C. Restructuring in the flow of textile wastewater treatment and its relationship with water quality in Doce River, MG, Brazil. *Gestão&Produção*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 1–14.
3. Pala A., Tokat E. Color removal from cotton textile industry wastewater in an activated sludge system with various additives. *Water research*, 2002, vol. 36, no. 11, pp. 2920–2925.
4. Karcher S., Kommüller A., Jekel M. Anion exchange resins for removal of reactive dyes from textile wastewaters. *Water Research*, 2002, vol. 36, no. 19, pp. 4717–4724.
5. Yaseen D.A., Scholz M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 1193–1226.
6. Ahmad A., Mohd-Setapar S.H., Chuong C.S., Khatoon A., Wani W.A., Kumar R., Rafatullah M. Recent advances in new generation dye removal technologies: novel search for approaches to reprocess wastewater. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, no. 39, pp. 30801–30818.
7. Teng T.T., Low L.W. Removal of Dyes and Pigments from Industrial Effluents. *Advances in Water Treatment and Pollution Prevention*. Dordrecht, Springer, 2012. 460 p.
8. Mostafa M. Waste water treatment in textile industries – the concept and current removal technologies. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 501–525.
9. Bogacki M.B., Michalska I., Krystafkiewicz A. Application of experimental design for optimization of physicochemical proper-

- ties of the inorganic pigment, iron(III) silicate. *Dyes and Pigments*, 2004, vol. 61, no. 2, pp. 149–164.
10. Khan S., Malik A. Environmental and health effects of textile industry wastewater. *Environmental deterioration and human health*. Dordrecht, Springer, 2014. 421 p.
 11. Sarayu K., Sandhya S. Current technologies for biological treatment of textile wastewater – a review. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, vol. 167, no. 3, pp. 645–661.
 12. Carmen Z., Daniela S. Textile organic dyes – characteristics, polluting effects and separation/elimination procedures from industrial effluents – a critical overview. *Organic pollutants ten years after the Stockholm convention-environmental and analytical update*, 2012, vol. 10, pp. 1–33.
 13. Sharma S.K., Sanghi R. *Advances in water treatment and pollution prevention*. Dordrecht, Springer Science & Business Media, 2012. 460 p.
 14. Firmino P.I.M., Da Silva M.E.R., Cervantes F.J., Dos Santos A.B. Colour removal of dyes from synthetic and real textile wastewaters in one- and two-stage anaerobic systems. *Bioresource Technology*, 2010, vol. 101, no. 20, pp. 7773–7779.
 15. Tahir U., Yasmin A., Khan U.H. Phytoremediation: potential flora for synthetic dyestuff metabolism. *Journal of King Saud University – Science*, 2016, vol. 28, no. 2, pp. 119–130.
 16. Misra M., Akansha K., Sachan A., Sachan S.G. Removal of dyes from industrial effluents by application of combined biological and physicochemical treatment approaches. In: *Combined Application of Physico-Chemical & Microbiological Processes for Industrial Effluent Treatment Plant*. Singapore, Springer, 2020. 406 p.
 17. Ntrallou K., Gika H., Tsochatzis E. Analytical and sample preparation techniques for the determination of food colorants in food matrices. *Foods*, 2020, vol. 9, no. 1, pp. 1–27.
 18. Berber-Villamar N.K., Netzahuatl-Muñoz A.R., Morales-Barrera L., Chávez-Camarillo G.M., Flores-Ortiz C.M., Cristiani-Urbina E. Corncob as an effective, eco-friendly, and economic biosorbent for removing the azo dye Direct Yellow 27 from aqueous solutions. *PLOS ONE*, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 1–30.
 19. Jayanthi C.R., Divyashree R.N., Vijayalakshmi, Dharani S., Soumya R. A cross sectional study of hair dye use among doctors and nurses working at a tertiary care centre. *International Journal of Research in Pharmacology & Pharmacotherapeutics*, 2018, vol. 7, no. 1, pp. 85–96.
 20. Forgacs E., Cserháti T., Oros G. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*, 2004, vol. 30, no. 7, pp. 953–971.
 21. Cowie R., Williams M., Wireman M., Runkel R. Use of natural and applied tracers to guide targeted remediation efforts in an acid mine drainage system, Colorado Rockies, USA. *Water*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 745–777.
 22. Benkhaya S., Mrabet S., El Harfi A. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. *Inorganic Chemistry Communications*, 2020, vol. 115, no. 7, pp. 1–35.
 23. Gupta V.K. Application of low-cost adsorbents for dye removal – a review. *Journal of Environmental Management*, 2009, vol. 90, no. 8, pp. 2313–2342.
 24. Englande Jr A.J., Krenkel P., Shamas J. Wastewater treatment & water reclamation. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Amsterdam, Elsevier, 2015. 32 p.
 25. Collivignarelli M.C., Abbà A., Carnevale Miino M., Damiani S. Treatments for color removal from wastewater: state of the art. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 236, pp. 727–745.
 26. Drioli E., Giorno L. *Membrane operations: innovative separations and transformations*. Weinheim, Germany, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. 578 p.
 27. Dawood S., Sen T. Review on dye removal from its aqueous solution into alternative cost effective and non-conventional adsorbents. *Journal of Chemical and Process Engineering*, 2014, vol. 1, no. 104, pp. 1–11.
 28. Idan I.J., Abdullah L.C., Choong T.S., Jamil S.N.A.B.M. Equilibrium, kinetics and thermodynamic adsorption studies of acid dyes on adsorbent developed from kenaf core fiber. *Adsorption Science & Technology*, 2017, vol. 36, no. 1–2, pp. 694–712.
 29. Jiang L., Yu H.-T., Pei L., Hou X. The Effect of temperatures on the synergistic effect between a magnetic field and functionalized graphene oxide-carbon nanotube composite for Pb²⁺ and phenol adsorption. *Journal of Nanomaterials*, 2018, vol. 2018, pp. 1–13.
 30. Wong S., Ngadi N., Inuwa I.M., Hassan O. Recent advances in applications of activated carbon from biowaste for wastewater treatment: a short review. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 175, pp. 361–375.
 31. Obotey Ezugbe E., Rathilal S. Membrane technologies in wastewater treatment: a review. *Membranes*, 2020, vol. 10, no. 5, pp. 1–28.
 32. Dos Santos A.B. *Reductive decolourisation of dyes by thermophilic anaerobic granular sludge*. PhD-Thesis. Wageningen, The Netherlands, 2005. 176 p.
 33. Warade A.R., Gaikwad R.W., Sapkal R.S., Sapkal V.S. Study of removal techniques for dyes by adsorption: a review. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 2016, vol. 2, pp. 3851–3869.
 34. Ji L., Zhang Y., Liu E., Zhang Y., Xiao C. Separation behavior of NF membrane for dye/salt mixtures. *Desalination and Water Treatment*, 2013, vol. 51, no. (19–21), pp. 3721–3727.
 35. Volmajer J., Marechal A., Vajnhandl S., Jeric T., Simon E. Water in the textile industry. *Treatise on Water Science*, 2011, vol. 4, pp. 685–706.
 36. Cervantes F.J. *Environmental technologies to treat nitrogen pollution*. London, IWA publ., 2009. 420 p.
 37. Anjaneyulu Y., Sreedhara Chary N., Samuel Suman Raj D. Decolorization of industrial effluents – available methods and emerging technologies – a review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2005, vol. 4, no. 4, pp. 245–273.
 38. Atul K., Pratibha C., Poonam V. A comparative study on the treatment methods of textile dye effluents. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 763–771.
 39. International Atomic Energy Agency. *Application of ion exchange processes for treatment of radioactive waste and management of spent ion exchangers*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2002. 115 p.
 40. Slokar Y.M., Le Marechal A.M. Methods of decoloration of textile wastewaters. *Dyes and pigments*, 1998, vol. 37, no. 4, pp. 335–356.
 41. Nidheesh P.V., Zhou M., Oturan M.A. An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 2018, vol. 197, pp. 210–227.
 42. Hashemian S., Tabatabaee M., Gafari M. Fenton oxidation of methyl violet in aqueous solution. *Journal of Chemistry*, 2013, vol. 2013, pp. 1–6.
 43. Raghavacharya C. Colour removal from industrial effluents: a comparative review of available technologies. *Chemical engineering world*, 1997, vol. 32, no. 7, pp. 53–54.
 44. Rosario L.C., Abel G.E., Marta I.L. Photodegradation of an azo dye of the textile industry. *Chemosphere*, 2002, vol. 48, pp. 393–399.
 45. Rekhate C.V., Srivastava J.K. Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater – a review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2020, vol. 3, pp. 1–84.
 46. Gähr F., Hermanutz F., Oppermann W. Ozonation an important technique to comply with new German law for textile wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 1994, vol. 30, no. 3, pp. 255–263.
 47. Samer M. Biological and chemical wastewater treatment processes. *Wastewater Treatment Engineering*, 2015, vol. 150, 212 p.
 48. Zheng C., Zhao L., Zhou X., Fu Z., Li A. Treatment technologies for organic wastewater. *Water Treatment*, 2013, vol. 11, pp. 250–286.
 49. Kumbasar E.A., Korlu A. *Textile wastewater treatment*. Croatia, InTechOpen, 2016. 124 p.
 50. Murty S.D., Patel S.D., Soni R., Bhatt N. Isolation and identification of bacterial culture for azo dye degrading capability. *International Journal of Research in Chemistry and Environment (IJRCE)*, 2012, vol. 2, no. 4, pp. 69–79.
 51. Jamee R., Siddique R. Biodegradation of synthetic dyes of textile effluent by microorganisms: an environmentally and economically sustainable approach. *European journal of microbiology & immunology*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 114–118.
 52. Horitsu H., Takada M., Idaka E., Tomoyeda M., Ogawa T. Degradation of p-aminoazobenzene by *Bacillus subtilis*. *European journal of applied microbiology and biotechnology*, 1977, vol. 4, no. 3, pp. 217–224.
 53. Idaka E., Ogawa T., Horitsu H., Tomoyeda M. Degradation of azo compounds by *Aeromonas hydrophila* var. 24B. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 1978, vol. 94, no. 3, pp. 91–94.
 54. Anjaneyulu Y., Chary N.S., Raj D.S.S. Decolorization of industrial effluents – available methods and emerging technologies – a

- review. *Reviews in Environmental Science and BioTechnology*, 2005, vol. 4, no. 4, pp. 245–273.
55. Choudhury A., Lansing S. Methane and hydrogen sulfide production from Co-digestion of gummy waste with a food waste, grease waste, and dairy manure mixture. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 23, pp. 1–12.
 56. Van der Zee F.P., Lettinga G., Field J.A. Azo dye decolourisation by anaerobic granular sludge. *Chemosphere*, 2001, vol. 44, no. 5, pp. 1169–1176.
 57. Van der Zee F.P., Bouwman R.H.M., Strik D.P.B.T.B., Lettinga G., Field J.A. Application of redox mediators to accelerate the transformation of reactive azo dyes in anaerobic bioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 2001, vol. 75, no. 6, pp. 691–701.
 58. Carliell C.M., Barclay S.J., Shaw C., Wheatley A.D., Buckley C.A. The effect of salts used in textile dyeing on microbial decolourisation of a reactive azo dye. *Environmental Technology*, 1998, vol. 19, no. 11, pp. 1133–1137.
 59. Gnanapragasam G., Senthilkumar M., Arutchelvan V., Sivarajan P., Nagarajan S. Recycle in upflow anaerobic sludge blanket reactor on treatment of real textile dye effluent. *World journal of microbiology and biotechnology*, 2010, vol. 26, no. 6, pp. 1093–1098.
 60. Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S., Ang H.M. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014, vol. 209, pp. 172–184.
 61. Capar G., Yetis U., Yilmaz L. Membrane based strategies for the pre-treatment of acid dye bath wastewaters. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, vol. 135, no. (1–3), pp. 423–430.
 62. Hassan M.M., Carr C.M. A critical review on recent advancements of the removal of reactive dyes from dyehouse effluent by ion-exchange adsorbents. *Chemosphere*, 2018, vol. 209, pp. 201–219.
 63. Xu X.-R., Li H.-B., Wang W.-H., Gu J.-D. Degradation of dyes in aqueous solutions by the Fenton process. *Chemosphere*, 2004, vol. 57, no. 7, pp. 595–600.
 64. Sundrarajan M., Vishnu G., Joseph K. Ozonation of light-shaded exhausted reactive dye bath for reuse. *Dyes and Pigments*, 2007, vol. 75, no. 2, pp. 273–278.
 65. Popli S., Patel U.D. Destruction of azo dyes by anaerobic–aerobic sequential biological treatment: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 12, no. 1, pp. 405–420.
 66. Dos Santos A.B., Cervantes F.J., Van Lier J.B. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresource technology*, 2007, vol. 98, no. 12, pp. 2369–2385.
 67. Sala M., Gutiérrez-Bouzán M.C. Electrochemical techniques in textile processes and wastewater treatment. *International Journal of Photoenergy*, 2012, vol. 2012, pp. 1–12.
 68. Lee J.-W., Choi S.-P., Thiruvengatachari R., Shim W.-G., Moon H. Evaluation of the performance of adsorption and coagulation processes for the maximum removal of reactive dyes. *Dyes and Pigments*, 2006, vol. 69, no. 3, pp. 196–203.
 69. Arslan S., Eyvaz M., Gürbulak E., Yüksel E. A review of state-of-the-art technologies in dye-containing wastewater treatment – the textile industry case. *Textile wastewater treatment*, 2016. 124 p.
 70. Cervantes F.J., Pavlostathis S.G., Van Haandel A. *Advanced biological treatment processes for industrial wastewaters*. London, IWA publ., 2006. 360 p.

Поступила 26.04.2021 г.

Информация об авторах

Джубари Мохаммед Кадер, ассистент-лектор, кафедра топливно-энергетических технологий, Северный технический университет.

Алексеева Н.В., доцент кафедры технологических процессов, аппаратов и техносферной безопасности, Тамбовский государственный технический университет.

Базияни Гашип Ибрахим, магистрант, кафедра химии, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина.

Таха Виляль Саад, инженер-технолог, Завод по очистке воды Кармат Али, Басра ойл компани.

UDC 66.067

METHODS FOR REMOVING PIGMENTS FROM WASTE WATER

Mohammed Q. Gubari¹,
mohammedqader1983@gmail.com

Nadezda V. Alekseeva²,
alexejew.nadja@gmail.com

Gasheen I. Baziyani³,
gasheenbazeany@gmail.com

Bilal S. Taha⁴,
bilalsaad_t@yahoo.com

¹ Northern Technical University,
1530, Al-Sayada street, Mosul, 36001, Iraq.

² Tambov State Technical University,
106, Sovetskaya street, Tambov, 392000, Russia.

³ Tambov State University named after G.R. Derzhavin,
33, Internatsionalnaya street, Tambov, 392000, Russia.

⁴ Qarmat Ali Water Treatment Plant, Basra Oil Company, 5
20, Bab Al Zubair street, Basra, 61001, Iraq.

Relevance. *Dyes and pigments are natural and xenobiotic compounds that are widely used in various fields of human activity due to their ability to impart color to objects. During the implementation of production with the use of pigments, wash water containing pigment is formed, which is most often waste water. As a result, the enterprise loses some of its valuable pigments and dyes, and the environment is exposed to technogenic impact. Various colorants in water have an adverse effect on the environment. Therefore, purification of waste water from pigments is an urgent problem.*

Aim: *finding the most efficient and cost-effective technological process for wastewater treatment from pigments and dyes.*

Methods: *collection, generalization and comprehensive analysis of data on methods of wastewater treatment from dyes and pigments.*

Results. *The paper considers the existing technologies of treatment of wastewater containing pigments and dyes and introduces the examples of Russian and foreign experience. It is shown that it is impossible to create a unified treatment technology of wastewater containing pigments and dyes, since the choice of a specific treatment is influenced by the characteristics of wastewater due to the production technology and the type of pigments and dyes. Nevertheless, it is possible to systematize the existing technologies for a more convenient and quick selection of the required technological process. The authors have described the mechanical, mass transfer, chemical and biological purification processes and analyzed both individual processes and a combination of several ones. The use of several processes in one technological stage of wastewater separation is the most efficient and cost-effective solution.*

Key words:

Textile wastewater, dyes, physical treatment, biodegradation, adsorption, membrane treatment.

Information about the authors

Mohammed Q. Gubari, assistant lecturer, Northern Technical University.

Nadezda V. Alekseeva, associate professor, Tambov State Technical University.

Gasheen I. Baziyani, master student, Tambov State University named after G.R. Derzhavin.

Bilal S. Taha, process engineer, Qarmat Ali Water Treatment Plant, Basra Oil Company.

Received: 26 April 2021.

УДК 622.06

ПРОИЗВОДСТВО ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ЗАДАННЫЙ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ РУДЫ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ «MINE-TO-MILL»: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Маринин Михаил Анатольевич¹,
marinin_ma@pers.spmi.ru

Евграфов Матвей Вячеславович¹,
mevgrafov@mail.ru

Должиков Вадим Владимирович¹,
dolzhikov_vv@pers.spmi.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, 2.

Актуальность. Условия снижения содержания полезного компонента в руде, увеличения глубины отработки и уменьшения нераспределенного фонда месторождений обуславливают необходимость разработки эффективных решений процесса «карьер–фабрика», которые должны быть адаптированы под каждое конкретное горное предприятие и позволят оптимизировать производственные затраты.

Целью исследования явилась разработка методологического подхода оценки влияния технологических факторов на производственную цепочку формирования затрат от добычи до измельчения руды.

Объекты: золоторудные месторождения России, разрабатываемые открытым способом.

Методы: анализ лучших технологических практик золотодобычи, включая анализ зарубежного и отечественного опыта организации процессов добычи и рудоподготовки; оценка влияния гранулометрического состава руды на технологические и эксплуатационные параметры и показатели работы выемочного оборудования карьера, дробильно-сортировочного комплекса и помольного оборудования золотоизвлекательной фабрики (производительность, анализ цикла, расхода электроэнергии и нормируемых материалов).

Результаты. Приведен обзор современного состояния вопроса производства буровзрывных работ на заданный гранулометрический состав в рамках концепции «mine-to-mill» для условий открытой разработки месторождений рудного золота. Научное исследование направлено на достижение максимальной производительности горнотранспортного оборудования карьера, дробильно-сортировочного комплекса и помольного оборудования золотоизвлекательной фабрики. Это позволит не только получить стабильное качество извлекаемого сырья, оптимизировать расходы на дальнейшую рудоподготовку, но и повысить полноту извлечения полезного ископаемого в соответствии с принципами рационального недропользования. Исходя из опыта мировой практики производства буровзрывных работ, приведен комплекс рекомендательных мероприятий при подготовке и производстве взрывных работ на заданный гранулометрический состав руды в рамках концепции «mine-to-mill».

Ключевые слова:

Буровзрывные работы, mine-to-mill, гранулометрический состав взорванной горной массы, карьер, добыча рудного золота, оптимизация затрат.

Введение

Современное состояние открытой разработки рудных месторождений характеризуется ростом глубины карьера, повышением коэффициента вскрыши, снижением содержания полезных компонентов. При этом скорость продвижения забоев увеличивается вследствие высокой производительности оборудования.

Горнотранспортное оборудование становится все более грузоподъемным и более «прожорливым», при этом большая грузоподъемность оборудования эффективна только при максимальных значениях загрузки и коэффициента использования, что достигается при слаженной работе комплекса буровзрывные работы (БВР) – экскавация.

В данном случае рост производительности горного предприятия предполагает высокий КПД погрузочно-оборудования. Основная задача БВР при этом направлена на достижение максимально эффективно использования основных средств за счет: качественного планирования, минимального воздействия

взрыва на окружающий массив, формирования развала взорванной горной массы заданной формы и фрагментации.

В золотодобывающей промышленности эффективность перерабатывающих производств в наибольшей степени зависит от типа и физико-механических свойств добываемого сырья, что, в свою очередь, определяет способы организации и ведения добычных работ и рудоподготовки, применяемую технику и технологии.

В процессе разработки рудных участков золоторудных месторождений параметры технологии добычи, принятые при проектировании, могут не соответствовать варьирующимся физико-механическим свойствам руд, что на практике приводит к преждевременному износу оборудования, незапланированным ремонтам, недозагрузке перерабатывающих мощностей, росту эксплуатационных затрат на всех стадиях производственного процесса и снижению эффективности производства в целом.

Поэтому оптимизация параметров технологических процессов, увязка технологической производительности и экономической эффективности с применением современных методов управления затратами является актуальной научной задачей.

Практика деятельности горнорудных предприятий, в том числе разрабатывающих золоторудные месторождения открытым способом, зачастую показывает отсутствие общей взаимосвязи энергозатрат технологических процессов карьера и золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ). Это обуславливает необходимость выявления и анализа факторов, влияющих на параметры функционирования оборудования на добыче, экскавации, транспортировании, измельчении и обогащении, в разработке моделей оптимизации параметров работы оборудования во взаимосвязанных производственных процессах, в обосновании технологической и экономической эффективности выбранных организационно-технических решений с применением методов кост-инжиниринга [1].

Концепция «mine-to-mill»

Задача горного производства – оптимизировать всю технологическую цепочку этапов добычи и переработки полезных ископаемых, при этом в рамках решения задачи необходимо рассматривать каждый технологический процесс как отдельно, так и в комплексе. В зарубежной практике процесс оптимизации добычи и переработки носит название «mine-to-mill» (M2M). Например, компания Motion Metrics дает такое пояснение концепции M2M – это целостный подход к минимизации энергетических и эксплуатационных затрат при переработке полезного ископаемого путем оптимизации всех стадий процесса измельчения [2].

Концепция M2M формировалась начиная с 1990 гг., и в ее основе лежит задача эффективного объединения процессов добычи и обогащения на основе общей стоимости производства, а не на стоимости отдельных операций. В работах D. McKee [3] и P. Cameron [4] довольно полно описан зарубежный опыт развития концепции M2M. Отдельно стоит отметить исследования австралийских авторов [5–9]. Приведем на рис. 1 некоторые из направлений исследований M2M, условно разбив их на временные этапы.

В работе [3] D. McKee приводит технические шаги реализации проекта M2M, а также делает акцент на нетехнических факторах, которые также могут иметь решающее значение, – это поддержка со стороны руководства, наличие персонала со специальными навыками и благоприятная организационная структура работы.

Ранние исследования в большей степени были сосредоточены на оптимизации операций как отдельных частей или по определенному параметру. Как показали исследования специалистов Фрайбергской горной академии и Университета Миссури в Канзас-Сити [10], комплексная оптимизация в отличие от детерминистского подхода может быть более эффективна.

Оптимизация процессов горнодобывающего комбината в рамках концепции M2M дает результат по

снижению на 7–22 % общих затрат на бурение и взрывание, увеличению на 10–30 % производительности дробильно-сортировочного комплекса, снижению на 17–31 % себестоимости тонны руды. Оптимизация была реализована для условий золоторудных предприятий при привлечении таких консалтинговых компаний, как Esen Mining Consulting, под руководством S. Esen [11–13], Hatch и Metso PTI под руководством W. Valery, K.A. Duffy, A. Jankovic [14–16].

Разновидностью направления M2M является технология Pit-to-Plant (P2P), которая объединяет различные дисциплины геологии, горного дела, обогащения и металлургии с целью оптимизации процесса измельчения. В компании MorilaGoldMine (западная Африка) применение технологии P2P позволило увеличить производительность мельницы с 365 до 400 т/ч (примерно на 10 % увеличение пропускной способности) с помощью цифрового онлайн анализа размера куска горной массы.

Исследования [3] установили, что значительная часть энергии (53 %), расходуемой на горном предприятии, направлена на измельчение руды на фабрике, в то время как всего 2 % расходуется на БВР. Исходя из данного заключения, приведем несколько примеров эффективной оптимизации горного производства за счет незначительного увеличения энергозатрат на БВР.

В работах G. Brent [17, 18], L. Workman и J. Eloranta [19], специалистов компании Maxam [20] доказано, что увеличение производительности возможно за счет большей энергии взрыва и, как следствие, уменьшения размера куска при питании мельницы и сокращения энергозатрат на измельчение. Так, компания Orica на золотодобывающем карьере MtRawdon (Австралия) для увеличения производительности предприятия внедрила высозергетические взрывчатые вещества [21]. MtRawdon добывает руду с низким содержанием золота (0,71–1,0 г/т). В 2014 г. компания начала поиск возможностей по увеличению производительности мельниц без значительных капитальных затрат и модификации существующего оборудования обогатительной фабрики. Анализ показал, что значительное влияние на производительность мельниц оказывает тип руды – расхождение достигало 30 % для различных типов руд. На основе данного анализа были выявлены две первоочередные цели: увеличить содержание руды класса минус 13 мм при питании мельницы и уменьшить объем руды, попадающий на рециркуляцию.

На участках карьера с наиболее крепкими породами был проведен ряд опытных взрывов с увеличенным в 2 раза удельным расходом штатного ВВ. Увеличенное воздействие взрыва на массив привело к появлению негабаритов по периметру блока и переизмельчению в ближней зоне дробления, итоговое снижение производительности мельницы на 4 т/ч. Также сложные горные условия и ограниченность парка бурового оборудования означало неприемлемость сужения сетки скважин. В данном случае стандартный подход увеличения удельного расхода ВВ не работает!

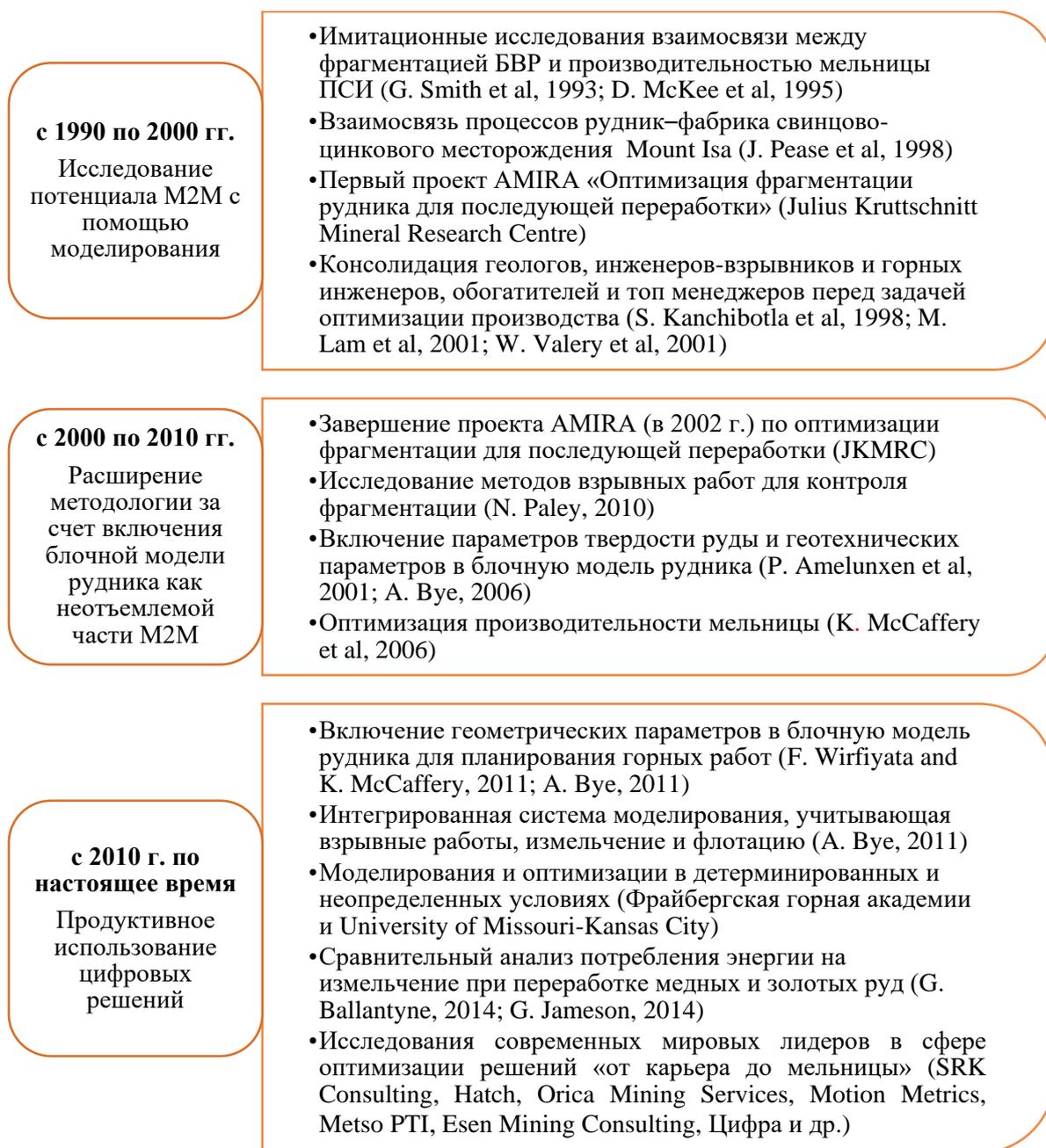


Рис. 1. Этапы развития концепции M2M

Fig. 1. Stages of development of the M2M concept

Внедрение высокоэнергетических непатронированных эмульсионных взрывчатых веществ позволило решить данную задачу. При плотности ЭВВ 1,35 г/см³ энергия взрыва на 55 % выше без изменения параметров БВР. Экспериментальные блоки взрывались парно с блоками со стандартным типом ВВ и оценивались по следующим показателям эффективности: фрагментационный состав, производительность экскаватора, производительность мельницы (т/ч), потребление электроэнергии (кВт/т). В результате, в зависимости от типов пород, сетка скважин была увеличена на 45–60 % без последующего снижения производительности экскавации; парк буровых станков был сокращен с 4 до 3 единиц; производительность мельницы увеличилась на 5,9 %; потребление элек-

троэнергии мельницей сократилось на 7,3 %; количество рециркуляционного продукта ПСИ сократилось с 17,4 до 13,8 %.

Классический пример увеличения удельного расхода ВВ в рамках опытно-промышленных испытаний и последующего моделирования представлен в работе [22]. Увеличение колонки заряда ВВ или сближение сетки скважин, изменение угла инициирования или интервалов поверхностных замедлений бывают достаточными операциями для улучшения количественного выхода заданной фракции.

Еще один пример оптимизации – применение современных электрических детонаторов с программируемым электронным замедлением для поддержания заданного гранулометрического состава [23]. Так,

применяя электронные детонаторы, карьер по добыче известняка Nongtarai в Индии смог увеличить производительность дробильного оборудования и снизить затраты на БВР. За счет подбора соответствующих замедлений между скважинами удалось снизить выход негабарита на 13 %. Выход кондиционной фракции составил 83 % от объема взорванной горной массы вместо 70 %, ранее получаемых в результате применения неэлектрических систем инициирования.

Трудами отечественных ученых были заложены основы и в настоящее время учениками продолжается совершенствование решений одной из главных проблем горного производства – обеспечение равномерного и качественного дробления горных пород взрывом. Значительный вклад в развитие методов определения параметров буровзрывных работ на заданный гранулометрический состав взорванной горной массы внесли: на основе деформационного зонирования взрываемых уступов [24], для сложноструктурных массивов горных пород [25–28], на основе инвариантов процесса дробления горных пород (Ю.И. Виноградов), на основе сопряжения зон разрушения (М.Г. Менжулин) и многие другие.

В 1970–1980-х гг. под руководством И.А. Тангаева [29] на базе накопленного объема данных по энергоемкости процессов бурения, взрывания и экскавации на карьерах Калмакырском, Кургашиканском, Кунрадском и Саяк-1, их статистической и графической обработки установлено, что величина удельной энергоемкости шарошечного бурения взрывных скважин позволяет осуществлять количественную оценку буримости горных пород, определять их взрываемость (с коэффициентом корреляции 0,8–0,9) и даже прогнозировать энергоемкость процесса экскавации с корреляцией 0,6–0,7. Были получены первые математические зависимости для обоснованного расчета удельного расхода и «сетки» взрывных скважин. В результате намечилось решение одной из самых сложных задач в технологии открытых горных работ – расчета и выбора параметров БВР с учетом пространственной неоднородности горных пород в пределах технологических блоков и месторождения в целом.

В 1989 г. в журнале «Mining Science and Technology» в статье профессора С.О. Brawner из Университета Британской Колумбии [30] излагались результаты исследований во многом аналогичные результатам И.А. Тангаева. Канадские ученые пришли к аналогичным выводам, проведя оценку буримости и взрываемости горных пород по удельным затратам энергии в процессе бурения, при этом одни из первых в исследованиях в горном деле применили электронно-вычислительную технику (устройство регистрации расхода энергии, основанное на использовании процессора Z80).

В дальнейшем мощный задел исследований по энергоемкости процессов добычи позволил группе киргизских специалистов разработать прибор, предназначенный для сбора и первичной обработки данных с буровых станков [31, 32]. Контроллер бурового станка «Кобус» был испытан на высокогорном золо-

торудном карьере Кумтор. На основании успешных испытаний был разработан программно-технический комплекс САПР БВР «Blast Maker». Таким образом, реализован принцип проектирования БВР на основе оперативной информации о взрываемости пород. Экономический эффект при этом выражается в снижении затрат на комплекс БВР до 10 % и повышении производительности горнотранспортного оборудования до 8 % [33, 34].

В зарубежной практике измерения во время бурения носят название «measurement while drilling» (MWD). Исследования [35, 36] доказывают, что практика внедрения MWD позволяет наиболее качественно подготавливать массив к взрыву на заданную фрагментацию.

Таким образом, качество взрывной подготовки горных пород к выемке оказывает влияние на экономические показатели всех технологических процессов горнодобывающего предприятия, причем влияние для различных технологических процессов будет различным. На основе трудов Ю.И. Виноградова [37, 38] можно подчеркнуть вывод, что существует такой оптимальный гранулометрический показатель взорванной горной массы, который для определенной технологической схемы горнодобывающего предприятия обеспечивает минимальную себестоимость добычи полезного ископаемого.

Обсуждение

На основе анализа данных горнодобывающих предприятий, разрабатывающих месторождения рудного золота открытым способом в условиях Крайнего Севера на рис. 2 приведены усредненные соотношения удельных затрат по основным технологическим операциям на 1 м³ рудной массы. На долю БВР приходится порядка 8–12 % от всех затрат. Затраты на взрывание выше затрат на бурение. На рис. 3 приведены удельные затраты по проведению взрывных работ. Основная доля затрат приходится на взрывчатое вещество. На средства инициирования и боевики приходится до 10 % затрат, при этом они играют значительную роль в формировании заданной фрагментации и соответственно влияют на эффективность последующих процессов, что подтверждается исследованиями [39]. Также, например, незначительные локальные увеличения затрат на применение зарядных рукавов [40], производство качественной забойки, шахматной схемы бурения и прочее позволяют достичь значительных сокращений энергозатрат при последующем переделе рудного компонента.

Для условий открытых горных работ месторождений Олимпиадинское, Благодатное и Вернинское группы компаний «Полюс» специалистами международной консалтинговой фирмы Hatch за текущие несколько лет проделана большая работа по увеличению производительности и повышению эффективности технологических процессов «от карьера до фабрики». Проведены исследования, включающие изучение характеристик руды, аудит технологических процессов, анализ данных, моделирование, расчет мощности мельницы (Morrell), опыт эксплуатации и ана-

лиз затрат были использованы для выявления возможностей увеличения производства (пропускной

способности и извлечения) при минимизации затрат и энергопотребления на тонну концентрата [41, 42].

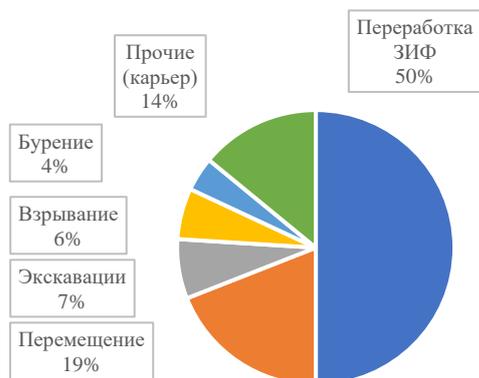


Рис. 2. Структура удельных затрат по основным технологическим операциям на 1 м³ рудной массы

Fig. 2. Structure of unit costs for the main technological operations per 1 m³ of ore mass



Рис. 3. Структура удельных затрат при производстве взрывных работ

Fig. 3. Structure of unit costs in production of blasting operations

Исходя из опыта мировой практики производства буровзрывных работ, в том числе лидеров отрасли компании Orica и Maham, применения современных средств измерения параметров, использования программных продуктов для моделирования процессов и проектирования параметров буровзрывных работ ниже приводим рекомендованный комплекс мероприятий при подготовке и производстве БВР на заданный гранулометрический состав руды в рамках концепции M2M (рис. 4).

Что касается электронных систем инициирования, то в настоящее время горная промышленность России активно внедряет более точные электронные программируемые детонаторы [39, 43–47] и не только для минимизации сейсмоздействия, а также для улучшения качества фрагментации. Так, лидерами по применению детонаторов с электронным программируемым устройством являются Кузбасские угольные разрезы. В золоторудной отрасли в последние годы проведены значительные исследования по влиянию электронных систем инициирования, а именно их точности срабатывания и вариативности шага замедления, на качество выхода гранулометрического состава взорванной рудной массы.

Из практики взрывного дела мы знаем, что вариативная (заводская) ошибка срабатывания систем НСИ может достигать до 10 % от номинала замедления [48–51]. И инженерам проектировщикам невозможно предугадать, в каком детонаторе и как поведет себя пиротехническое вещество, при этом ошибка может быть как в поверхностном, так и в скважинном капсюле.

Поэтому для условий горных работ, где точность срабатывания и вариативность замедлений значительно влияет на качество гранулометрического состава руды, внедрение современных систем иници-

рования неизбежно. Для российского рынка это аналогично вытеснению электрического взрывания и детонирующих шнуров неэлектрическими системами инициирования типа «Нонель». Главный сдерживающий фактор сейчас – это стоимость электронного детонатора, как отечественного производства (Искра), так и импортного (I-kon, Daveutronic). Доля применения данных систем инициирования некоторыми горными компаниями Австралии, Латинской и Северной Америки достигает 80 %, при этом стоимость применения детонатора ЭСИ к НСИ – 4/1. Для российского рынка это соотношение доходит до 20/1.

Заключение

По данным Минфина производство золота в России за 2019 г. составило 343,54 т (2018 – 314,42 т), и в ближайшей перспективе данный показатель будет только увеличиваться. Приведем некоторые новые проекты крупнейших золотодобывающих компаний России до 2025 г. Так, в планах лидера отрасли нарастить объемы добычи и переработки руд месторождения Благодатное (Северо-Енисейский район, Красноярский край) до 17 млн т руды в год (в настоящее время 9 млн т). Также на одном из крупнейших месторождений мира Сухой Лог (Бодайбинский район, Иркутская область) уже на финальной стадии геологоразведочные работы и технико-экономическое обоснование проекта. К 2022 г. планируется выход на производственную мощность ГОК четвертого по величине месторождения золота в России Нежданинское (Республика Саха-Якутия). Строительство ГОКа для месторождения Высокое (Северо-Енисейский район, Красноярский край) и выход его на проектную мощность планируется в 2023 г. Таким образом, ближайшая перспектива развития золоторудной отрасли России выглядит достаточно уверенно.

Районирование карьерного поля по взрываемости

- Сбор и анализ данных по трещиноватости, крепости горных пород и залеганию рудных тел
- Применение экспресс методов определения блочности взрываемого массива (Sirovision)
- Применение экспресс методов на испытание точечной нагрузки (PLT)
- Районирование по энергоемкости во время бурения
- Постоянная актуализация цифровой модели карьера по взрываемости

Проектирование массового взрыва

- Оценка поверхности подготавливаемого массива
- Лазерное профилирование откоса уступа для четкого определения выноски первого ряда взрывных скважин
- Подбор конструкции заряда и интервалов замедлений
- Оконтуривание рудных тел по сортовым показателям
- Определение оптимального соотношения расстояния между рядами и скважинами в ряду
- Применение высочайших ВВ
- Применение узкоспециализированных программных продуктов для задач БВР (ShotPlus, I-Blast, BMM Explorer, BLADES, RIOBLAST, Геомикс Развал)

Средства и схемы инициирования

- Применение боевиков со скоростью детонации и теплотой взрыва большей, чем у штатных ВВ
- Применение электронных детонаторов, исключающих погрешность срабатывания и увеличивающих вариативность схем замедлений

Контроль качества до взрыва

- Оценка качества пробуренных скважин (инклинометрия, глубина)
- Оценка качества зарядки скважин (размещение боевика, масса ВВ)
- Производство забойки (*оптимальным размером забоечного материала считается щебень размером 10–15 % от диаметра скважины*)

Контроль качества после взрыва

- Оценка параметров развала взорванной рудной массы
- Мониторинг взорванной рудной массы методом фотопланометрии при экскавации в ковше экскаватора или на стадии транспортирования в кузове автосамосвала/по ленте конвейера (PowerSieve, PortaMetrics, WipFrag)
- Оценка времени цикла работы оборудования, занятого при экскавации
- Оценка степени износа рабочих органов оборудования, занятого на экскавации
- Оценка производительности дробильного и помольного оборудования

Рис. 4. Мероприятия при подготовке и производстве БВР на заданный гранулометрический состав руды в рамках концепции M2M

Fig. 4. Measures in preparation and production of blasting operations for a given ore grain size composition within the framework of the M2M concept

При этом на стадии проектирования открытой разработки новых месторождений рудного золота России, в том числе приведенных выше, целесообразно учитывать опыт комбинатов, прошедших путь оптимизации технологических процессов в рамках кон-

цепции «M2M». Проектные решения уже должны учитывать комплекс мероприятий, направленных на производство БВР на заданный гранулометрический состав руды для конкретных горно-геологических условий вновь разрабатываемого месторождения.

Именно качественно подготовленный и проведенный комплекс БВР, как начальный технологический процесс, определяет энергоемкость всех последующих процессов передела рудной массы. Сегодня горные предприятия пришли к пониманию, что стремление к оптимизации отдельных технологических процессов (таких как бурение, взрывание, экскавация и далее) не всегда приводит к оптимизации комплекса рудного передела в целом.

Выводы

В данной работе приведен обзор современного состояния вопроса производства буровзрывных работ на заданный гранулометрический состав в рамках концепции «mine-to-mill» для условий открытой разработки месторождений рудного золота. Научное исследование направлено на достижение максимальной производительности горнотранспортного оборудования карьера, дробильно-сортировочного комплекса и помольного оборудования золотоизвлекательной фабрики. Это позволит не только получить стабильное качество извлекаемого сырья, оптимизировать расходы на дальнейшую рудоподготовку, но и повысить полноту извлечения полезного ископаемого в соответствии с принципами рационального недропользования. Ниже приведены основные выводы:

1. В условиях работы горно-обогатительного комбината существует оптимальный кусок взорванной рудной массы, обеспечивающий минимальные

энергозатраты при его экскавации, транспортировании, вторичном дроблении и последующем фабричном переделе.

2. Анализ энергозатрат технологических процессов открытой разработки месторождений рудного золота (буровзрывная подготовка к выемке, экскавация и измельчение на ДСК и ЗИФ) при различных вариациях гранулометрического состава исходной руды позволяет определить оптимальный кусок взорванной рудной массы, обеспечивающий минимальные удельные энергозатраты при его переделе.
3. Накопленный мировой опыт, современные средства измерения, проектирования и моделирования позволяют обеспечить ведение буровзрывных работ на заданный гранулометрический состав в конкретных горно-геологических условиях открытой разработки месторождений рудного золота.
4. Для оценки эффективности работы технологических процессов горно-обогатительного комбината требуется постоянный гранулометрический контроль взорванной рудной массы на всех этапах передела.
5. На стадии проектирования горно-обогатительного комплекса вновь разрабатываемых месторождений рудного золота России целесообразно учитывать опыт комбинатов, прошедших путь оптимизации технологических процессов в рамках концепции «M2M».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marinina O., Nevskaya M. Cost management of mining project life cycle // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – Sofia Bulgaria, 2017. – V. 17 (13). – P. 175–179.
2. Mine-to-mill optimization // Motion Metrics. URL: <https://www.motionmetrics.com/mine-to-mill-optimization/> (дата обращения: 01.10.2020).
3. McKee D. Understanding mine to mill. – Brisbane Australia: Co-operative research centre for optimising resource extraction, 2013. – 96 p.
4. Cameron P., Drinkwater D., Pease J. The ABC of Mine to Mill and metal price cycles // Proc. 13th AusIMM Mill Operators' Conference. – Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2016. – P. 349–358.
5. An integrated geology-mine-plant and eco-efficiency simulator for anglo platinum's evaluation and operational improvement initiatives / M. Ziemiński, A. Bye, N. Plint, M. Cole, A. Tordoir // XXV International Mineral Processing Congress. – Brisbane, 2010. – V. 5. – P. 3629–3638.
6. Bye A. The strategic and tactical value of a 3D geotechnical model for mining optimization, Anglo Platinum, Sandsloot open pit // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2006. – V. 106. – № 2. – P. 97–104.
7. Integration and optimisation of Blasting and Comminution Processes / S. Esen, D. LaRosa, A. Dance, W. Valery, A. Jankovic // EXPLO. – Australia, 2007. – P. 95–103.
8. Ballantyne G.R., Powell M.S. Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores // Minerals Engineering. – 2014. – V. 65. – P. 109–114.
9. Curry J.A., Ismay M.J.L., Jameson G.J. Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding // Minerals Engineering. – 2014. – V. 56. – P. 70–80.
10. Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling / H. Abbaspour, C. Drebenstedt, M. Badroddin, A. Maghamini // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018. – V. 28. – P. 839–848.
11. Esen S. Fragmentation modelling and the effects of ROM fragmentation on comminution circuits // 23rd International Mining Congress & Exhibition. – Turkey, 2013. – P. 252–260.
12. Esen S. Evaluating the fragmentation data from copper and gold mines // 43rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique. – Florida, 2017. – P. 1–13.
13. Improving final wall and waste blasting results at altynalmas pustynnoye gold mine / B. Bachramov, B. Myrzakasyrov, A. Kalmatayev, S. Esen // IMCET 2019 – Proceedings of the 26th International Mining Congress and Exhibition. – Turkey, 2019. – P. 391–398.
14. Bulk ore sorting cut-off estimation methodology: Phu Kham Mine case study / A. Reple, A.C. Chieregati, W. Valery, F. Prati // Minerals Engineering. – 2020. – V. 149. – P. 1–4.
15. Techno-economic evaluation of bulk ore sorting for copper ore at the panaust phu kham operation / W. Valery, K. Duffy, P. Holtham, A. Reple, P. Walker, P. Rosario // IMPC 2016 – 28th International Mineral Processing Congress. – Canada, 2016. – P. 1–11.
16. Valery W., Rybinski E. Optimization process at antamina boosts production and energy efficiency // Engineering and Mining Journal. – 2015. – V. 213. – P. 116–120.
17. Ultra-high-intensity blasting – a new paradigm in mining / G. Brent, P. Dare-Bryan, S. Hawke, M. Rothery // AusIMM Bulletin. – 2014. – V. 5. – P. 395–400.
18. Ultra-high intensity blasting for improved ore comminution / G.F. Brent, M.D. Rothery, P.C. Dare-Bryan, S.J. Hawke, R. Gomez, I. Humeres // Proc. of the 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. – India, 2013. – P. 163–169.
19. Workman L., Eloranta J. The effects of blasting on crushing and grinding efficiency and energy consumption // Proc. of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. – USA, 2003. – P. 131–140.
20. Couceiro P., Santos B. The influence of blasting energy factor on the loading performance // International journal of engineering research & technology (IJERT). – 2019. – V. 8. – P. 731–734.

21. Wallace G., Morton D. High energy bulk explosives and mine to mill focus – the Mt Rawdon Story // Proc. Ninth AusIMM Open Pit Operators' Conference. – Australia, 2016. – P. 60–69.
22. Using process integration & optimization to provide integrated process solutions for mining operations, from mine to mill / E. Isokangas, W. Valery, A. Jankovic, B. Sönmez // 26th International Mineral Processing Congress. – India, 2012. – P. 2224–2234.
23. Сафронов М. Uni Tronic™ для БВР. Как сделать буровзрывные работы более эффективными // Журнал Глобус. – 2020. – Т. 60. – С. 180–182.
24. Кузнецов В.А. Прогнозирование грансостава взорванной массы на основе структурно-деформационного зонирования взрываеваемых полигонов // Взрывное дело. – 2001. – Т. 93. – С. 47–55.
25. Белин В.А., Потресов Д.К., Сапожников С.И. Оптимизация показателей производства взрывных работ на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S7. – С. 89–97.
26. Эквист Б.В. Оптимизация взрывных работ при разрушении неоднородных массивов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 2. – С. 376–383.
27. Рахманов Р.А. Совершенствование технологии буровзрывных работ при дроблении разнопрочных горных массивов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S1-1. – С. 453–465.
28. Норов Ю.Д., Бибик И.П., Заиров Ш.Ш. Управление эффективными параметрами буровзрывных работ по критерию качества взорванной горной массы // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2016. – № 1. – С. 87–93.
29. Тангаев И.А. Буримость и взрываемость горных пород. – М.: Недра, 1978. – 184 с.
30. Ringwald J.P., Brawner C.O. Reinforcing concrete model pillars with grouted rock bolts // Mining Science and Technology. – 1989. – V. 8. – P. 31–47.
31. Коваленко В.А., Тангаев И.А. Энергетический принцип контроля и оптимизации технологических процессов на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – Т. 10. – С. 293–301.
32. Коваленко В.А. Автоматизированная подготовка производства на карьерах // Вестник КРСУ. – 2009. – Т. 9. – № 11. – С. 118–123.
33. Современные информационные технологии в подготовке и проведении БВР на угольных разрезах СУЭК / В.Б. Артемьев, В.Б. Коваленко, В.А. Артемьев, П.И. Опанасенко, А.Б. Исайченков // Уголь. – 2012. – № 11. – С. 6–13.
34. Опанасенко П.И., Исайченков А.Б. Результаты применения программно-технологического комплекса «Blast Maker» для проектирования параметров БВР на разрезе «Тугнуйский» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – Т. 2. – С. 38–57.
35. Ishveyskiy V., Sanchidrián J.A. Prospects of applying MWD technology for quality management of drilling and blasting operations at mining enterprises // Minerals. – 2020. – V. 10. – P. 1–17.
36. Application of drill-monitoring for chargeability assessment in sublevel caving / J. Navarro, H. Schunnesson, R. Ghosh, P. Segarra, D. Johansson, J.Á Sanchidrián. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 119. – P. 180–192.
37. Виноградов Ю.И. Инвариантный метод расчета параметров БВР на заданный гранулометрический состав взорванной горной массы // Кременчук. – 2010. – Т. 5. – С. 97–107.
38. Определение оптимальной степени дробления при переходе на циклично-поточную технологию в условиях Оленегорского ГОКа / Ю.И. Виноградов, И.Н. Гринберг, В.П. Макарьев, В.Г. Прокопова, Е.А. Деев // Горный журнал. – 1976. – С. 28–31.
39. Белин В.А., Горбонос М.Г., Митков В.Е. Влияние качества взрывчатых веществ и средств инициирования на эффективность дробления горной массы взрывом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № S1. – С. 72–80.
40. Оверченко М.Н., Толстунов С.А., Мозер С.П. Влияние горно-геологических условий и техногенных факторов на устойчивость взрывных скважин при открытой разработке апатит-нефелиновых руд // Записки Горного Института. – 2018. – Т. 231. – С. 239–244.
41. Increasing production at polyus gold Blagodatnoye with holistic optimization from mine-to-plant / A. Tokarenko, I. Timofeyev, S. Kilin, W. Valery, R. Valle, K. Duffy // Procemin 2017: 13th International Mineral Processing Conference. – Chile, 2017. – P. 1–9.
42. Improving profitability, sustainability and the overall operating efficiency from mine to process in Russian operations / W. Valery, K. Duffy, R. Faveere, R. Hayashida, A. Jankovic, E. Tabosa, I. Yelkin // IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress. – Russia, 2018. – P. 1346–1354.
43. Беляев А. Г., Набиулин М. Ф. Опыт работы ООО «Азот-Черниговец»: применение систем электронного взрывания «DAVEYTRONIC» на горнодобывающих предприятиях // Уголь. – 2013. – № 10. – С. 4–6.
44. Кондратьев А.С., Мартынушкин Е.А., Баженов В.Е. Опыт применения электронных детонаторов ЭДЭЗ-с в условиях ООО «Ресурс» и ООО «Инвест-Углесбыт» // Взрывное дело. – 2020. – № 129-86. – С. 105–115.
45. Масаев Ю.А., Доманов В.П. Электродетонаторы с электронным замедлением (опыт промышленного применения) // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 2 (78). – С. 102–106.
46. О перспективных направлениях использования экспериментальных данных сейсмо-деформационного мониторинга в буровзрывных работах на карьерах / В.Н. Опарин, В.Ф. Юшкин, А.Н. Гришин, А.В. Богатырев, Н.Н. Пороховский, Д.Е. Рублев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 7. – С. 104–122.
47. Современные средства инициирования АО «НМЗ "Искра"» / С.А. Кондратьев, С.А. Поздняков, А.С. Иванов, К.А. Вандакуров // Взрывное дело. – 2019. – № 123-80. – С. 136–143.
48. Новые технологии ведения взрывных работ / В.А. Белин, М.Г. Горбонос, С.К. Мангуш, Б.В. Эквист // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S1. – С. 87–102.
49. Белин В.А., Горбонос М.Г., Астахов Е.О. Влияние средств инициирования на эффективность и безопасность взрывных работ // Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 63–67.
50. Сысоев А.А., Кондратьев С.А., Катанов И.Б. Сравнительная оценка пиротехнических и электронных капсулей-детонаторов на основе вероятностной модели инициирования системы скважинных зарядов // Взрывное дело. – 2020. – № 126-83. – С. 85–98.
51. Оптимизация параметров взрывных работ увеличением интервалов замедления / Ю.А. Митюшкин, Ю.А. Лысак, А.Ю. Плотников, А.В. Ружицкий, Е.Б. Шевкун, А.В. Лещинский // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 4. – С. 341–348.

Поступила 26.04.2021 г.

Информация об авторах

Маринин М.А., кандидат технических наук, доцент кафедры взрывного дела Санкт-Петербургского горного университета.

Евграфов М.В., аспирант, Санкт-Петербургский горный университет.

Должиков В.В., кандидат технических наук, доцент кафедры взрывного дела Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 622.06

PRODUCTION OF BLASTING OPERATIONS FOR A GIVEN GRANULOMETRIC COMPOSITION OF ORE WITHIN THE FRAMEWORK OF THE «MINE-TO-MILL» CONCEPT: CURRENT STATE AND PROSPECTS

Mikhail A. Marinin¹,
marinin_ma@pers.spmi.ru

Matvey V. Evgrafov¹,
mevgrafov@mail.ru

Vadim V. Dolzhikov¹,
dolzhikov_vv@pers.spmi.ru

¹ Saint-Petersburg Mining University,
2, 21 line, St. Petersburg, 199106, Russia.

Relevance. The conditions for reducing the content of the valuable component in the ore, increasing the depth of mining and reducing the unallocated fund of deposits induce the necessity of development of effective solutions for the «mine-to-mill» process, which must be adapted for each specific mining enterprise and will optimize production costs.

The aim of the study was to develop a methodological approach to assess the influence of technological factors on the production chain of cost formation from mining to grinding ore.

The objects of the research are open-cut gold deposits in Russia.

Methods: analysis of the best technological practices of gold mining, including the analysis of foreign and domestic experience in organizing mining and ore preparation processes; impact assessment of the particle size distribution of ore on the technological and operational parameters and performance of the mining equipment in the open pit, crushing and screening complex and grinding equipment of the gold processing plant (productivity, cycle analysis, energy consumption and standard materials).

Results. We provide an overview of the current state of the issue of drilling and blasting operations for a particle size distribution within the «mine-to-mill» concept for the conditions of opencast mining of ore gold. Scientific research is focused on achieving maximum productivity of the mining and conveyor equipment of the quarry, the crushing and screening complex and the grinding equipment of the gold processing plant. This will allow not only obtaining a stable quality of recovered raw materials, optimizing the costs of further ore preparation, but also increasing the recovery ratio according to the principles of sustainable subsurface use. Basing on the experience of world practice in the production of drilling and blasting operations, we provide blasting design recommendations for a target particle size distribution within «mine-to-mill» concept.

Key words:

Drilling and blasting, mine-to-mill, particle size distribution, quarry, mining of ore gold, cost optimization.

REFERENCES

- Marinina O., Nevskaya M. Cost management of mining project life cycle. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Bulgaria, 2017. Vol. 17, pp. 175–179.
- Mine-to-mill optimization. *Motion Metrics*. Available at: <https://www.motionmetrics.com/mine-to-mill-optimization/> (accessed: 1 October 2020).
- McKee D. *Understanding mine to mill*. Brisbane Australia, Cooperative research centre for optimising resource extraction, 2013. 96 p.
- Cameron P., Drinkwater D., Pease J. The ABC of Mine to Mill and metal price cycles. *Proceedings 13th AusIMM Mill Operators' Conference*. Melbourne, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2016. pp. 349–358.
- Ziemski M., Bye A., Plint N., Cole M., Tordoir A. An integrated geology-mine-plant and eco-efficiency simulator for anglo platinum's evaluation and operational improvement initiatives. *XXV International Mineral Processing Congress*. Brisbane, 2010. Vol. 5, pp. 3629–3638.
- Bye A. The strategic and tactical value of a 3D geotechnical model for mining optimization, Anglo Platinum, Sandsloot open pit. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2006, vol. 106, no. 2, pp. 97–104.
- Esen S., LaRosa D., Dance A., Valery W., Jankovic A. Integration and optimisation of Blasting and Comminution Processes. *EXPLO*. Australia, 2007. pp. 95–103.
- Ballantyne G.R., Powell M.S. Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. *Minerals Engineering*, 2014, vol. 65, pp. 109–114.
- Curry J.A., Ismay M.J.L., Jameson G.J. Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding. *Minerals Engineering*, 2014, vol. 56, pp. 70–80.
- Abbaspour H., Drebenstedt C., Badroddin M., Maghaminik A. Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, vol. 28, pp. 839–848.
- Esen S. Fragmentation modelling and the effects of ROM fragmentation on comminution circuits. *23rd International Mining Congress & Exhibition*. Turkey, 2013. pp. 252–260.
- Esen S. Evaluating the fragmentation data from copper and gold mines. *43rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique*. Florida, 2017. pp. 1–13.
- Bachramov B., Myrzakasymov B., Kalmatayev A., Esen S. Improving final wall and waste blasting results at altynalmas Pustynnoye gold mine. *IMCET 2019 - Proceedings of the 26th International Mining Congress and Exhibition*. Turkey, 2019. pp. 391–398.
- Reple A., Chieregati A.C., Valery W., Prati F. Bulk ore sorting cut-off estimation methodology: Phu Kham Mine case study. *Minerals Engineering*, 2020, vol. 149, pp. 1–4.
- Valery W., Duffy K., Holtham P., Reple A., Walker P., Rosario P. Techno-economic evaluation of bulk ore sorting for copper ore at the panaust phu kham operation. *IMPC 2016 – 28th International Mineral Processing Congress*. Canada, 2016. pp. 1–11.
- Valery W., Rybinski E. Optimization process at antamina boosts production and energy efficiency. *Engineering and Mining Journal*, 2015, vol. 213, pp. 116–120.
- Brent G., Dare-Bryan P., Hawke S., Rothery M. Ultra-high-intensity blasting – a new paradigm in mining. *AusIMM Bulletin*, 2014, vol. 5, 395–400.
- Brent G.F., Rothery M.D., Dare-Bryan P.C., Hawke S.J., Gomez R., Humeres I. Ultra-high intensity blasting for improved ore comminution. *Proceedings of the 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. India, 2013. pp. 163–169.

19. Workman L., Eloranta J. The effects of blasting on crushing and grinding efficiency and energy consumption. *Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*. USA, 2003. pp. 131–140.
20. Couceiro P., Santos B. The influence of blasting energy factor on the loading performance. *International journal of engineering research & technology (IJERT)*, 2019, vol. 8, pp. 731–734.
21. Wallace G., Morton D. High energy bulk explosives and mine to mill focus – the Mt Rawdon Story. *Proceedings Ninth AusIMM Open Pit Operators' Conference*. Australia, 2016. pp. 60–69.
22. Isokangas E., Valery W., Jankovic A., Sönmez B. Using process integration & optimization to provide integrated process solutions for mining operations, from mine to mill. *26th International Mineral Processing Congress*. India, 2012. pp. 2224–2234.
23. Safronov M. Uni Tronic™ dlya BVR. Kak sdelat burovzryvnye raboty bolee effektivnymi [Uni Tronic for drilling and blasting. How to make drilling and blasting more efficient]. *Journal Globus*, 2020, vol. 60, pp. 180–182.
24. Kuznetsov V.A. Prognozirovaniye gransostava vzorvannoy massy na osnove strukturno-deformatsionnogo zonirovaniya vzryvayemykh poligonov [Prediction of the particle size distribution of the blasted mass based on the structural-deformation zoning of the blasted landfills]. *Vzryvnoye delo*, 2001, vol. 93, pp. 47–55.
25. Belin V.A., Potresov D.K., Sapozhnikov S.I. Optimizatsiya pokazatelye proizvodstva vzryvnykh rabot na karerakh [Optimization production indicators of blasting operations in open pits]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2007, no. S7, pp. 89–97.
26. Ekvist B.V. Optimization of blasting operations in the destruction of heterogeneous massifs. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2017, no. 2, pp. 376–383. In Rus.
27. Rakhmanov R.A. Improving the technology of drilling and blasting operations during crushing of different-strength rock massifs. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2015, no. S1-1, pp.453–465. In Rus.
28. Norov Yu.D., Bibik I.P., Zairov Sh.Sh. Management of effective parameters of drilling and blasting operations according to the quality criterion of blasted rock mass. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*, 2016, no. 1, pp. 87–93. In Rus.
29. Tangayev I.A. *Burimost i vzryvaemost gornykh porod* [Drillability and explosiveness of rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 184 p.
30. Ringwald J.P., Brawner C.O. Reinforcing concrete model pillars with grouted rock bolts. *Mining Science and Technology*, 1989, vol. 8, pp. 31–47.
31. Kovalenko V.A., Tangayev I.A. Energeticheskiy printsip kontrolya i optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov na karyerakh [Energy control principle and optimization of technological processes in open pits]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2008, vol. 10, pp. 293–301.
32. Kovalenko V.A. Automated preparation of production in quarries. *Vestnik KRSU*, 2009, vol. 9, no. 11, pp.118–123. In Rus.
33. Artemyev V.B., Kovalenko V.A., Opanasenko P.I., Isaychenkov A.B. Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii v podgotovke i provedenii BVR na ugolnykh razrezakh SUEK [Modern information technologies in preparation and conduction of blasting operations at SUEK coal mines]. *Ugol*, 2012, vol. 11, pp. 6–13.
34. Opanasenko P.I., Isaychenkov A.B. The results of the application of the Blast Maker software and technological complex for the blasting design at the Tugnuisky open-pit mine. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (naychno-tehnicheskij zhurnal)*, 2013, vol. 2, pp. 38–57. In Rus.
35. Isheyskiy V., Sanchidrián J.A. Prospects of applying MWD technology for quality management of drilling and blasting operations at mining enterprises. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 1–17.
36. Navarro J., Schunnesson H., Ghosh R., Segarra P., Johansson D., Sanchidrián J.A. Application of drill-monitoring for chargeability assessment in sublevel caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 119, pp. 180–192.
37. Vinogradov Yu.I. Invariantnyy metod rascheta parametrov BVR na zadanny granulometricheskij sostav vzorvannoy gornoy massy [An invariant method for calculating the blasting design for a particle-size distribution of the blasted rock mass]. *Kremenchuk*, 2010, vol. 5, pp. 97–107.
38. Vinogradov Yu.I., Grinberg I.N., Makaryev V.P., Prokopova V.G., Deev E.A. Opredeleniye optimalnoy stepeni drobeniya pri perekhode na tsiklichno-potochnuyu tekhnologiyu v usloviyakh Olenegorskogo GOKa [Determination of the optimal degree of crushing when switching to cyclic-flow technology in the conditions of the Olenegorsk MPP]. *Gornyy zhurnal*, 1976, vol. 7, pp. 28–31.
39. Belin V.A., Gorbonos M.G., Mitkov V.E. Influence of the quality of explosives and initiating systems on the efficiency of rock crushing by the explosion. *Mining informational and analytical bulletin*, 2016, no. S1, pp. 72–80. In Rus.
40. Overchenko M.N., Tolstunov S.A., Mozer S.P. Influence of mining-geological conditions and technogenic factors on blastholes stability during open mining of apatite-nepheline ores. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 231, pp. 239–244.
41. Tokarenko A., Timofeyev I., Kilin S., Valery W., Valle R., Duffy K. Increasing production at polyus gold Blagodatnoye with holistic optimization from mine-to-plant. *Procemin 2017: 13th International Mineral Processing Conference*. Chile, 2017. pp. 1–9.
42. Valery W., Duffy K., Faveere R., Hayashida R., Jankovic A., Tabosa E., Yelkin I. Improving profitability, sustainability and the overall operating efficiency from mine to process in Russian operations. *IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress*. Russia, 2018. pp. 1346–1354.
43. Belyayev A.G. Experience of LLC «Azot-Chernigovets»: use of DAVEYTRONIC Electronic Blast Systems in Mining Facilities. *Ugol*, 2013, no. 10, pp. 4–9.
44. Kondratyev A.S., Martynushkin E.A., Bazhenov V.E. Experience of using electronic detonators EDEZ-s in the conditions of OOO «Resource» and OOO «Invest-Uglesbyt». *Vzryvnoye delo*, 2020, no. 129-86, pp. 105–115. In Rus.
45. Masaev Yu.A., Domanov V.P. Elektrodetonatory s elektronnym zamedleniem (opyt promyshlennogo primeneniya) [Electric detonators with electronic timing (experience of industrial application)]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 2 (78), pp.102–106.
46. Oparin V.N., Yushkin V.F., Grishin A.N., Bogatyrev A.V., Porokhovskiy N.N., Rublev D.E. On promising directions of using experimental data of seismic-deformation monitoring in drilling and blasting operations in open pits. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2019, no. 7, pp. 104–122. In Rus.
47. Kondrat'ev S.A., Pozdnyakov S.A., Ivanov A.S., Vandakurov K.A. Sovremennyye sredstva initsirovaniya AO «NMZ "Iskra"» [Modern means of initiation of JSC «NMZ "Iskra"»]. *Vzryvnoye delo*, 2019, no. 123-80, pp. 136–143.
48. Belin V.A., Gorbonos M.G., Mangush S.K., Ekvist B.V. New technologies for blasting operations. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2015, no. S1, pp. 87–102. In Rus.
49. Belin V.A., Gorbonos M.G., Astakhov E.O. Vliyaniye sredstv initsirovaniya na effektivnost i bezopasnost vzryvnykh rabot [Influence of initiation means on the efficiency and safety of blasting operations]. *Gornyy zhurnal*, 2017, no. 7, pp. 63–67.
50. Sysoev A.A., Kondratev S.A., Katanov I.B. Comparative evaluation of pyrotechnic and electronic blasting caps on the basis of a probabilistic model of initiation of a borehole charge system. *Vzryvnoye delo*, 2020, no. 126-83, pp. 85–98. In Rus.
51. Mityushkin Yu.A., Lysak Yu.A., Plotnikov A.Yu., Ruzhitskiy A.V., Shevkun E.B., Leshchinskiy A.V. Optimization of blasting parameters by increasing spacing intervals. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2015, no. 4, pp. 341–348. In Rus.

Received: 26 April 2021.

Information about the authors

Mikhail A. Marinin, Cand. Sc., associate professor, Saint-Petersburg Mining University.

Matvey V. Evgrafov, postgraduate student, Saint-Petersburg Mining University.

Vadim V. Dolzhikov, Cand. Sc., associate professor, Saint-Petersburg Mining University.

УДК 621.9.025.19:621.9.02-589.22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОНЦЕВЫМИ (ПО ГОСТ 23248–78) И ВОЛНОВЫМИ ФРЕЗАМИ

Коровин Георгий Иванович¹,
korovin9@yandex.ru

Гаврилин Алексей Николаевич²,
gawral@tpu.ru

Петрушин Сергей Игоревич³,
victory_28@mail.ru

Однокопылов Георгий Иванович²,
ogiz@yandex.ru

Кладиев Сергей Николаевич²,
kladiev@tpu.ru

¹ ООО ПК «МИОН»,
Россия, 634034, г. Томск, ул. Вершинина, 46/5, а/я 427.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ Кузбасский государственный технический университет,
Россия, 652000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Актуальность исследования обусловлена тем, что одним из важнейших факторов безотказной работы нефтегазового оборудования являются требования к коррозионной стойкости. Свойства титановых сплавов: высокая коррозионная стойкость в агрессивных средах, высокая прочность в сочетании с малой плотностью, позволяют получать изделия с большой прочностью и малой массой при работе в условиях агрессивных сред. Однако применение титановых сплавов при изготовлении деталей, работающих в условиях агрессивной среды, в том числе для нефтегазового оборудования, ограничено вследствие неудовлетворительной обрабатываемости резанием, что обусловлено малой теплопроводностью таких сплавов, а также склонностью к интенсивным вибрациям.

Объект: производительность и экономическая эффективность от применения фрез при изготовлении детали типа «корпус» из титанового сплава.

Цель: разработка рациональных режимов механообработки и геометрии инструмента для фрезерования корпусных элементов из титановых сплавов. Рациональные режимы и геометрия фрезы должны обеспечивать максимальную стойкость инструмента, качество механообработки, производительность и экономическую эффективность.

Методы: проведение производственных испытаний фрез с разной геометрией их режущих кромок методом многофакторного эксперимента с использованием вибродиагностического комплекса для определения зон с минимальным уровнем вибрации при механообработке детали типа «корпус» из титанового сплава.

Результаты. Разработаны рекомендации по снижению вибрации при фрезеровании корпусных элементов из титановых сплавов. Методика позволяет в условиях производства, в стадии отладки технологического процесса, определить рациональные режимы резания по критериям наибольшей производительности и максимальной стойкости инструмента.

Ключевые слова:

Нефтегазовое оборудование, титановые сплавы, фрезерование, фрезы концевые, производительность, качество механообработки, уровень вибрации, вибродиагностический комплекс, время стойкости инструмента.

Введение

Высокая коррозионная стойкость титановых сплавов в кислотах позволяет использовать их в нефтегазовом и химическом машиностроении при механообработке: форсунок, работающих в морской воде, секток фильтров, теплообменников, работающих в азотной кислоте, крыльчатки для центробежных насосов, паровых диффузоров и т. д. Все вышеперечисленные детали изготовлены из нержавеющей стали и при сопоставимой стоимости имеют срок службы в 4...5 раз меньше, чем детали из титановых сплавов.

Положительные качества титановых сплавов, такие как: высокая коррозионная стойкость в агрессивных средах, высокая прочность в сочетании с малой плотностью, позволяют получать изделия с большой удельной прочностью и малой массой.

Применение титановых сплавов при изготовлении деталей, работающих в условиях агрессивной среды, в том числе для нефтегазового оборудования [1], ограничено вследствие неудовлетворительной обрабатываемости резанием, что обусловлено малой теплопроводностью таких сплавов, а также склонностью к интенсивным вибрациям, что объясняется значи-

тельными величинами радиальной составляющей силы резания. Следует также отметить, что неустойчивое наростообразование, схватывание выступают дополнительными источниками возбуждения колебаний. Снижение уровня вибраций в элементах системы Деталь–Инструмент–Приспособление–Станок (ДИПС) достигается применением комплекса технологически-конструкционных способов виброзащиты, а именно: рациональным подбором режимов механообработки и геометрии инструмента, а также следующими техническими решениями [2–27]:

- 1) увеличение виброустойчивости и повышение динамических характеристик станков и их узлов;
- 2) создание виброгасителей для конкретных технологических операций (фрикционных, динамических, гидравлических и т. д.);
- 3) создание новых методов управления автоколебаниями для увеличения производительности механической обработки, повышения стойкости режущего инструмента и качества обрабатываемой поверхности;
- 4) проектирование и изготовление режущего инструмента, устойчивого к вибрациям, определение безвибрационных зон режимов резания и т. д.

Зависимость стойкости инструмента или свойства его живучести от интенсивности колебаний ДИПС изучали зарубежные [2–20] и отечественные исследователи [21, 22, 28–29].

Подобные зависимости качественных показателей рабочего процесса от нежелательных колебаний возникают и в сложных электромеханических системах с программным управлением или при передаче энергии переменного тока по кабельной линии для удаленного технологического оборудования, рассматриваемых, например, в публикациях [23–27].

В большинстве исследований получали криволинейную зависимость стойкости от амплитуды колебаний, где с ростом амплитуды стойкость падает.

У некоторых исследователей эта зависимость имеет экстремальный характер, максимальную стойкость получали при амплитуде колебаний 10...50 мкм для быстрорежущего инструмента. Так, увеличение амплитуды автоколебаний в механической системе более некоторых предельных значений приводит к резкому снижению стойкости фрезерного инструмента [2–22, 29].

Методика и результаты исследования

В данной работе показан многолетний опыт инструментального завода Промышленная Компания (ПК) «МИОН», г. Томск в определении рациональных режимов механообработки на оборудовании заказчика при внедрении производимого компанией инструмента на машиностроительные предприятия. В большинстве случаев при проектировании и изготовлении режущего инструмента под конкретного заказчика конструктору известна только модель станка, в редких случаях – конструкция приспособления, детали, их масса и способы закрепления на станке. Поэтому для проведения испытаний на предприятиях заказчика инструмента для обработки конкретного материала изготавливаются 3...5 фрез с разными гео-

метрическими параметрами: окружной шаг, шаг спирали, шаг волны для волновых фрез и т. д.

Далее испытания на оборудовании заказчика проводятся по двум направлениям:

1. В существующий технологический процесс изготовления детали устанавливаются фрезы ПК «МИОН», датчики-акселерометры. Измерения осуществляются с помощью вибродиагностического комплекса «Виброрегилятор-Ф» [30, 31]. При изменении режимов механообработки определяются зоны с минимальным или допусковым уровнем вибрации. В таблицу параметров заносятся геометрические параметры фрезы. В автоматическом режиме рассчитываются следующие параметры: среднее сечение стружки, число одновременно работающих зубьев, угол встречи с заготовкой, место контакта зуба с заготовкой (точка, линия, пятно контакта), объем снимаемого материала, а также СКЗ амплитуды (виброускорение, виброскорость, виброперемещение).
2. Обработка тестовой партии деталей при серийном производстве. В этом случае имеется возможность влиять на стратегию обработки, изменяя при этом диаметр инструмента, ширину и глубину фрезерования, а также скорость и подачу. В этом случае строится номограмма: ширина фрезы – глубина фрезерования – скорость резания – виброперемещение, с учетом соблюдения критерия допустимого износа инструмента.

На рис. 1 приведена схема механообработки заготовки из титанового сплава испытываемыми фрезами.

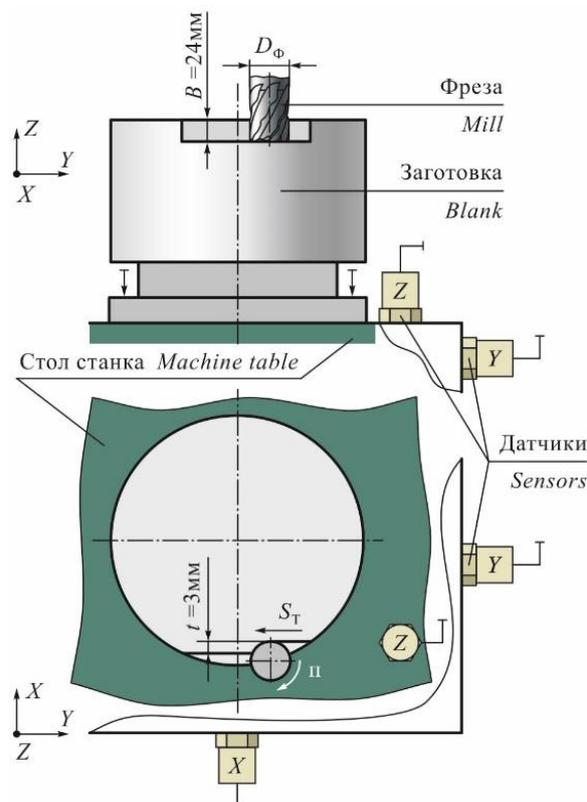


Рис. 1. Схема механообработки заготовки из титанового сплава

Fig. 1. Scheme of machining a titanium alloy blank

На рис. 2 приведено расположение датчиков на заготовке при фрезеровании на станке MCV-400.

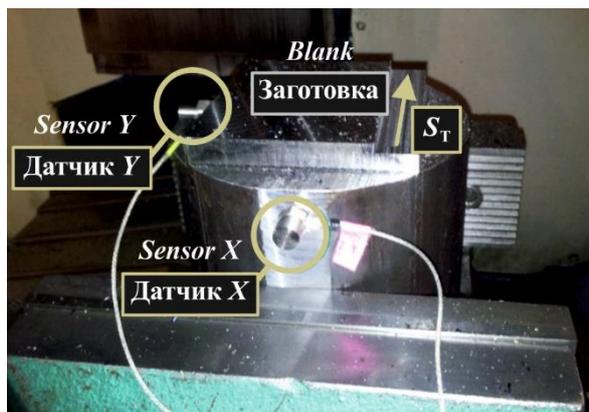


Рис. 2. Расположение датчиков на заготовке при фрезеровании на станке MCV-400

Fig. 2. Sensors location on the blank during milling on the MCV-400 machine

На рис. 3 приведены фото: а) волновой фрезы $\varnothing 20$ мм (слева) б) фрезы ТК572 ГОСТ 23248–78 $\varnothing 20$ мм, в) конструкция волновой фрезы [30].

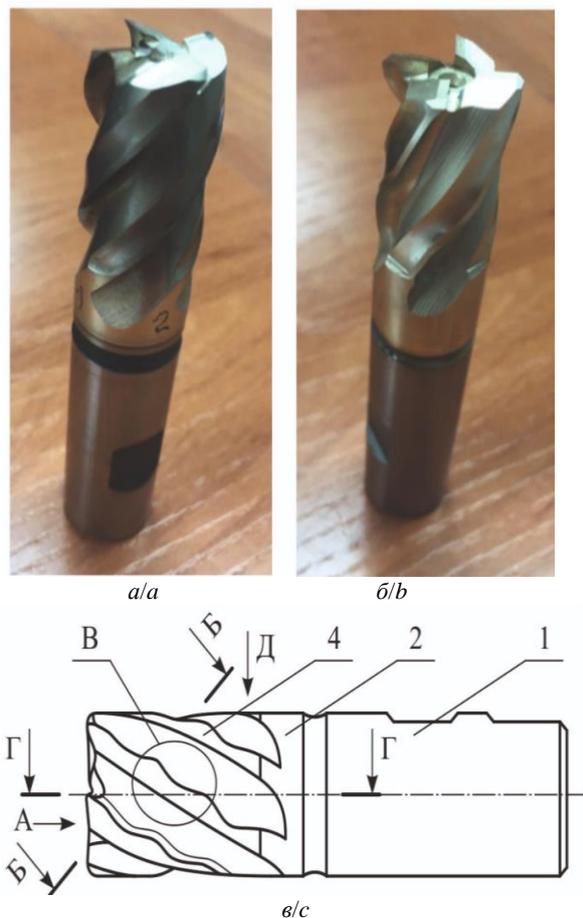


Рис. 3. а) волновая фреза $\varnothing 20$ мм; б) фреза ТК572 ГОСТ 23248–78 $\varnothing 20$ мм; в) конструкция волновой фрезы

Fig. 3. а) «Wave type» mill $\varnothing 20$ mm; б) ТК572 mill according to SS 23248–78 $\varnothing 20$ mm; в) «Wave type» mill design

Определение рациональных режимов резания для фрез концевых из быстрорежущей стали Р6М5К5 $\varnothing 20$ мм ГОСТ 23248–78 и волновых фрез $\varnothing 20$ мм для изготовления детали «корпус»

Задачи исследования

1. Определить величину виброактивности технологической системы ДИПС, выполнив фрезерование двумя фрезами: по ГОСТ 23248–78 $\varnothing 20$ мм и волновой фрезой $\varnothing 20$ мм с разной шириной, глубиной фрезерования и скоростью резания при подаче на зуб 0,1 мм.
2. На основании данных вибродиагностического комплекса построить номограммы: ширина фрезерования – B (мм), глубина фрезерования – t (мм), скорость резания – V (м/мин),
3. $S^{\text{сум СКЗ}}$ – виброперемещение, вычисляемое по зависимости $S^{\text{сум СКЗ}} = (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2)^{0,5}$ для каждой из фрез.
4. По номограммам $B - t - V - S^{\text{сум СКЗ}}$ определить зону режимов обработки (10...50 мкм) с минимальным или допускаемыми параметрами вибрации [21, 22, 29].
5. По выбранным режимам резания провести механическую обработку деталей «корпус».
6. Рассчитать экономический эффект от использования волновых фрез $\varnothing 20$ мм и фрез по ГОСТ 23248–78 при изготовлении детали «корпус».
7. Данная последовательность действий применяется при внедрении инструмента и его испытании на промышленных предприятиях РФ.

Применяемое оборудование и инструменты

Для определения рациональных режимов резания для изготовления детали «корпус» из титанового сплава ОТ 4 используется следующее оборудование и инструменты:

- станок: фрезерно-расточной четырёхкоординатный, обрабатывающий центр модели MCV-400. Мощность главного привода 12 кВт, вес – 11 т, выпуск 2014 г. Станок соответствует нормам точности, жесткости, осуществлена выборка люфтов в соответствии с паспортными данными станка;
- приспособление: тиски станочные, длина губок 160 мм;
- материал: круг 180×200 мм (поковка) из титанового сплава ОТ 4;
- режущий инструмент: фрезы производства завода ПК «МИОН», г. Томск: фреза ГОСТ 23248–78 $\varnothing 20 \times 30 \times 130$ КМЗ $Z=4 \gamma_{\text{н}}=15^\circ \alpha_{\text{н}}=12^\circ \omega=30^\circ$; фреза волновая $\varnothing 20 \times 30 \times 100$ $Z=4 \gamma_{\text{н}}=15^\circ \alpha_{\text{н}}=12^\circ$ [28, 29]. Фрезы, используемые в работе, изготавливались методом «вышлифовки и заточки по целому» за одну установку на заточном обрабатывающем центре Walter Power (Германия). Радиальное и осевое биение фрез 2 мкм;
- оправки W20 и КМЗ фирмы «Бизон» (Польша);
- вибродиагностический комплекс «Виброрегистратор-Ф» [31]. Данный комплекс предназначен для регистрации сигналов, поступающих с акселерометров измерительного комплекса в процессе

проведения испытания фрез, отображения сигналов на мониторе компьютера в виде графиков данных виброускорения, виброперемещения, виброскорости. Частотный диапазон измеряемой вибрации – 5...5000 Гц, частота оцифровки данных – 25 кГц, число используемых каналов – 4;

- датчики-акселерометры модели AP2037 «Глобал Тест».

Схема установки детали, схема фрезерования и места установки акселерометров показаны на рис. 1.

Ход работы и полученные результаты

Предварительно режимы резания выбирались из практических соображений и данных в работах [2–22, 29] для обработки титановых сплавов ОТ4 быстрорежущими фрезами. Эксперименты проводились по соответствующему плану со скоростями резания: $V=20, 30, 35, 40$ м/мин (Фрезерование попутное, биение фрез на максимальном вылете 2 мкм).

При каждой ширине фрезерования: $B=12, 14, 20, 24$ мм изменялась глубина фрезерования $t=2; 4; 5; 5,75; 6,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10$ мм. В память виброкомплекса заносились: геометрические параметры фрезы, вылет фрезы, режимы резания, марка обрабатываемого материала и инструмента. Программное обеспечение комплекса рассчитывает: среднее сечение стружки, число эффективных зубьев, угол встречи с заготовкой, точку или пятно контакта торцевого участка зуба с заготовкой.

Таблица 1. Данные виброперемещений в зависимости от режимов резания

Table 1. Vibration displacement data depending on cutting conditions

B, мм (mm)	t, мм (mm)	V, м/мин (m/min)	Фреза волновая Ø20 мм Wave mill Ø20 mm	Фреза по ГОСТ 23248–78 Ø20 мм State Standard mill Ø20 mm
			Виброперемещение Vibration displacement S^{sum} , мкм (micron)	
12	2	40	29	40
	4		15	22
	5		29	35
	5,75		32	25
	6,5		35	22
	8		39	26
24	10	20	25	25
	2		23	1536
	4		12	1030
	5		15	320
	5,75		14	257
	6,5		20	253
	8	13	656	
	10	49	223	
	40	2	26	39
		4	31	25
		5	47	28
		5,75	29	22
		6,5	39	48
		8	30	28
14	10	30	15	120
	9,5		14	912
20	10	35	20	420
	9		20	420
24	10	40	10	75
	9,5		10	75
24	10	20	11	200
	8,5		11	200

По данным виброактивности программным обеспечением комплекса рассчитываются среднеквадратичные значения (СКЗ виброперемещения, виброскорости и виброускорения) на исследуемом диапазоне частот. В проведенных экспериментах виброактивность проявлялась на зубцовых частотах в полосе 20...45 Гц. В табл. 1 приведены данные виброперемещений $S^{sum}_{СКЗ}$, в зависимости от режимов резания, при которых соответственно изменяются качество механообработки и время стойкости фрезы.

По данным табл. 1 строим номограммы виброактивности для каждой из фрез: фрезы Ø20 мм по ГОСТ 23248–78 и волновой фрезы Ø20 мм.

На номограммах рис. 4, а, б наблюдается «облако» точек пересечения прямых. Для наглядности точки соединены линиями. Данное «облако» ограничиваем четырехугольником *EMHG*, левая сторона которого – максимальная граница вибрации, правая – минимальная граница вибрации, нижняя сторона – минимальная ширина и глубина фрезерования, верхняя – максимальная ширина и глубина фрезерования. Таким образом, в четырехугольнике *EMHG* находятся рекомендуемые режимы резания с соответствующими допускаемыми уровнями вибрации [21, 22]. Данный диапазон впоследствии можно расширить или уменьшить в зависимости от стойкостных испытаний.

Алгоритм построения номограмм

Алгоритм нанесения точек на номограмму, по данным из табл. 1:

1. На оси «*B*, мм» (ширина фрезерования) отмечаем необходимую точку *A=24* мм.
2. На оси «*t*, мм» (глубина фрезерования) отмечаем необходимую точку *C=9,5* мм.
3. Соединяем в номограмме точки *A* и *C*. Получаем отрезок *AC*.
4. На оси «*V*, м/мин» (скорость резания) отмечаем необходимую точку *D=40* м/мин.
5. На оси « $\log_2 S^{sum}_{СКЗ}$, мкм» (виброперемещение) отмечаем необходимую точку *E=5* мм.
6. Соединяем в номограмме точки *D* и *E*. Получаем отрезок *DE*.
7. Пересечение отрезков *AC* и *DE* дает точку *F*.
8. Полученная точка *F* входит в область *ENHG*.
9. Внутри области *ENHG* находится виброустойчивая зона режимов резания.
10. Область *ENHG* на номограмме (рис. 4) построена по следующему алгоритму:
 - 10.1. На оси «*B*» (ширина фрезерования), в соответствии с принятой шириной фрезерования (диапазон значений $B=12, 14, 20, 24$ мм), отмечаем точку $L=12$ мм – минимальное, и $A=24$ мм – максимальное значение ширины фрезерования.
 - 10.2. На оси «*t*, мм» (глубина фрезерования) в соответствии с принятой глубиной фрезерования (диапазон значений $t=2; 4; 5; 5,75; 6,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10$ мм) отмечаем $K=2$ мм – минимальное, и $P=10$ мм – максимальное значение глубины фрезерования.
 - 10.3. Соединяем точки *L* и *K*. Получаем отрезок *LK*.

- 10.4. Соединяем точки *A* и *P*. Получаем отрезок *AP*.
 10.5. На оси «*V*» (скорость резания), в соответствии с принятой скоростью резания (диапазон значений $V=20, 30, 35, 40$ м/мин), откладываем $X=20$ м/мин – минимальное, и $J=40$ м/мин – максимальное значение скорости резания.
 10.6. На оси « $\log_2 S^{\text{сум СКЗ}}$, мкм» (виброперемещение), в соответствии с зоной рациональных по критерию стойкости амплитуд автоколебаний для быстрорежущего инструмента (фрезы концевые), откладываем $Z=2$ мкм – минимальное, $S^{\text{сум СКЗ}}=10$ мкм и $S^{\text{сум СКЗ}}=50$ мкм – максимальные значения виброперемещения [21].

- 10.7. Соединяем точки *X* и *Z*. Получаем отрезок *XZ*.
 10.8. Соединяем точки *J* и *S*. Получаем отрезок *JS*.
 10.9. Пересечение отрезков *AP* и *JS* дает точку *E*.
 Пересечение отрезков *AP* и *XZ* дает точку *M*.
 Пересечение отрезков *LK* и *JS* дает точку *G*.
 Пересечение отрезков *LK* и *XZ* дает точку *H*.
 10.10. Соединяем точки *E* и *M*, получаем отрезок *EM*.
 10.11. Соединяем точки *M* и *H*, получаем отрезок *MH*.
 10.12. Соединяем точки *H* и *G*, получаем отрезок *HG*.
 10.13. Соединяем точки *G* и *E*, получаем отрезок *GE*.
 10.14. В результате соединения отрезков получаем область рациональных значений режимов резания *EMHG*.

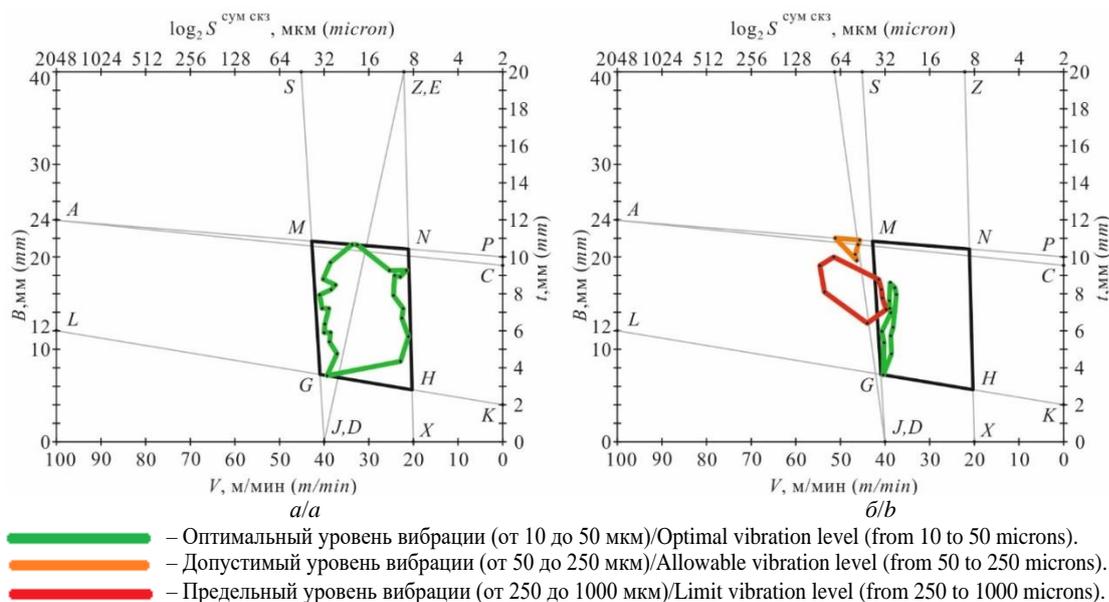


Рис. 4. Номограммы: а) для волновой фрезы; б) для фрезы по ГОСТ ТК 572
Fig. 4. Nomograms: a) for a wave type mill; b) for a mill according to SS TK 572

Из анализа номограмм рис. 4, а, б можно сделать вывод о том, что применение волновой фрезы при черновой механообработке и максимальной производительности с заданными ограничениями уровней вибрации $S^{\text{сум СКЗ}}=10...50$ мкм дает возможность повышения стойкости инструмента $T_{\text{ст}}$ (или $L_{\text{ст}}$) (табл. 2) более чем в 3 раза для получения необходимого качества поверхности обработанной детали из титана в пределах $R_z=10...60$ мкм по сравнению со стандартной фрезой. Следует отметить, что при указанных режимах и производительности механообработки качество обработанной детали стандартной фрезой составляло $R_z=50...180$ мкм. Полученные номограммы (рис. 4) остаются у технологов предприятия-заказчика инструмента и могут впоследствии дополняться виброустойчивыми зонами при осевом врезании, врезании под углом, при обходах радиусов и т. д.

Рекомендации по снижению вибрации системы ДИПС

1. Жесткость системы ДИПС должна быть не менее 20...100 Н/мкм.
2. Требуется контроль параметров: скорость резания V (м/мин), ширина фрезерования B (мм), глубина фрезерования t (мм) и СКЗ вибрации $S^{\text{сум СКЗ}}$ (мкм).

При возрастании вибрации $S^{\text{сум СКЗ}}$ выше допускаемых 10...50 мкм изменять указанные параметры в соответствии с табл. 1 или номограммой рис. 4.

Следует отметить, что полученные номограммы будут являться действительными только для конкретной технологической системы, включая вылет инструмента и качество обрабатываемого материала, т. е. экономически выгодны для серийного, крупносерийного и массового производства.

Для дальнейшей работы выбирались режимы механообработки по критерию наибольшей производительности и фрезы, имеющие минимальную виброактивность. Данными фрезами выполнялись работы по удалению основного припуска для придания необходимой формы детали «корпус». На этом этапе будет определяться стойкость фрез.

Для дальнейшей работы были выбраны два типа фрез с режимами обработки, где наблюдалась минимальная виброактивность: волновая фреза $\varnothing 20$ мм и фреза $\varnothing 20$ мм по ГОСТ 23248–78.

В дальнейшем данные фрезы с соответствующими режимами резания (табл. 1) использовались в технологическом процессе изготовления детали «корпус». Заготовкой являлась поковка $\varnothing 180 \times 25$ из титанового

сплава ОТ4 производства Верхне-Салдинского Металлургического Комбината (ВСМПО). Предельным износом являлся износ по задней грани, равный 0,3 мм. Стойкость фрез в минутах $T_{ст}$ и миллиметрах $L_{ст}$ показана в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительная эффективность двух фрез
Table 2. Comparative efficiency of two mills

Обозначение фрезы Mill type		Волновая фреза Wave mill Ø20 мм (mm)	Фреза Ø20 мм ГОСТ 23248–78 State Standard mill
Режимы обработки Machining modes	V , м/мин (m/min)	40	
	B , мм (mm)	24	
	T , мм (mm)	9,5	
	S_z , мм/зуб mm (tooth mill)	0,1	
$S_{сум СКЗ}$, мкм (micron) Виброперемещение Vibration displacement		5	15
Π_d , мм (mm) Путь при изготовлении одной детали Distance during a detail manufacturing		520	520
Q_d , шт. (itm.) Количество деталей за период стойкости Parts number for the period of life		35,2	11,4
$T_{ст}$, мин (min) Время стойкости Durability time		71,8	23,3
$L_{ст}$, мм (mm) Стойкость в пройденном расстоянии Durability in the distance		18298	5932

Экономическая эффективность от применения фрез ГОСТ 23248–78 Ø20 мм и волновых фрез Ø20 мм при изготовлении детали «корпус» из титанового сплава ОТ4

Из табл. 1, 2 видно, что режимы обработки практически одинаковы для всех фрез (припуск по контуру 0,5 мм для фрез волновых Ø20 мм и ГОСТ 23248–78 Ø20 мм оставлен на чистовую операцию), поэтому в расчётах использован путь, пройденный каждой фрезой за время обработки одной детали – $\Pi_d=520$ мм.

Определим путь (расстояние) $L_{ст}$, пройденный каждой из фрез до износа $h_3=0,3$ мм (табл. 2):

$$L_{ст} = S_{мин} \cdot T_{ст},$$

где $S_{мин}$ – минутная подача, мм/мин; $T_{ст}$ – стойкость фрезы, мин.

$$S_{мин} = S_z \cdot Z \cdot n,$$

где S_z – подача на зуб, мм; Z – число зубьев фрезы; n – число оборотов шпинделя, об/мин;

Количество деталей Q_d , обработанных каждой фрезой за период стойкости, определено по формуле:

$$Q_d = L_{ст} / \Pi_d,$$

где Π_d – путь, пройденный фрезой при изготовлении одной детали, мм (табл. 2).

Количество фрез $K_{фр}$, необходимых для изготовления партии деталей $N=100$ штук.

$$K_{фр} = N / Q_d,$$

$$K_{волна} = 100 / 35,2 = 2,84 \text{ фрезы};$$

$$K_{ГОСТ} = 100 / 11,4 = 8,77 \text{ фрезы}.$$

Стоимость $C_{фр}$ фрез, произведённых на предприятии ООО ПК «МИОН»:

$$C_{волна} = 5590 \text{ р.}; C_{ГОСТ} = 2442 \text{ р.}$$

где $C_{волна}$, $C_{ГОСТ}$ – стоимость волновой и стандартной фрез соответственно.

Затраты Z_i на инструмент при черновом фрезеровании детали «корпус» определяются по формуле:

$$Z_i = K_{фр} \cdot C,$$

где $K_{фр}$ – количество фрез, необходимых для изготовления партии деталей; $C_{фр}$ – цена фрезы (р.).

$$Z_{волна} = 2,84 \times 5590 = 17011,6 \text{ р.};$$

$$Z_{ГОСТ} = 8,77 \times 2442 = 21416,34 \text{ р.}$$

Экономическая эффективность \mathcal{E} от использования волновой фрезы Ø20 мм с режимами обработки по сравнению с фрезой Ø20 мм ГОСТ 23248–78 с режимами обработки (табл. 1) при изготовлении партии деталей:

$$\mathcal{E}_{волна} = Z_{ГОСТ} / Z_{волна};$$

$$\mathcal{E}_{волна} = 21416,34 / 17011,6 = 1,259.$$

По результатам работы и многочисленным ресурсным испытаниям на ВСМПО-АВИСМА г. Верхняя Салда и др. внесена поправка в ГОСТ 23248–78 «Фрезы концевые для обработки деталей из высокопрочных сталей и титановых сплавов на станках с программным управлением»: «...2. Фрезы с длиной режущей части $l=3D$ рекомендуются для применения с волнообразной режущей кромкой по технической документации, утверждённой в установленном порядке» [30]. Также разработаны технические условия на волновые фрезы ТУ 3918-018-36293294-2015.

Следует отметить, что при механообработке жаропрочных и титановых сплавов в точке соприкосновения инструмента и детали выделяется значительное количество тепла, обусловленное адгезионными процессами, малой теплопроводностью таких сплавов, а также значительными величинами радиальной составляющей силы резания и неустойчивым наростообразованием, схватыванием.

Это отмечено во введении, при этом указанные факторы выступают дополнительными источниками возбуждения автоколебаний.

Выводы

1. Разработанная методика с использованием вибродиагностического комплекса «Виброрегистратор-Ф» для построения номограмм позволяет в условиях производства на стадии отладки технологического процесса определить рациональные режимы резания по критериям наибольшей производительности и максимальной стойкости инструмента.

2. Экономический эффект от применения предложенного технического решения, посчитанный по формуле (6), непосредственно связан с параметрами виброактивности технологической системы: чем ниже виброактивность, тем выше стойкость инструмента и тем больший эффект от его использования. Снижение виброактивности волновых фрез по сравнению с фрезами по ГОСТ 23248–78, в свою очередь, связано с работой каждого зуба по менее наклёпанному слою.
 3. На техническое решение по волновой фрезе получен патент на изобретение № 2601525 РФ, а также по инициативе ООО «Промышленная компания «МИОН» внесена поправка в ГОСТ 23248–78
- «Фрезы концевые для обработки деталей из высокопрочных сталей и титановых сплавов на станках с программным управлением».
4. Предложенное техническое решение позволяет повысить эффективность механообработки титановых сплавов корпусных элементов не только для нефтегазового оборудования, но и для других отраслей промышленности: медицинской, авиационной, атомной и т. д.
 5. Особенности геометрии волновой фрезы и выбор оптимальных режимов механообработки титановых сплавов с её участием позволяют значительно снизить уровень вибрации в системе «деталь–инструмент», что является предметом «ноу-хау».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокурова И.М., Коротов В.В. Использование титановых сплавов в целях повышения эксплуатационных параметров нефтегазового оборудования // *Современные тенденции развития науки и технологий.* – 2016. – № 11-3. – С. 28–33.
2. Investigation of tool wear and chip morphology in dry trochoidal milling of titanium alloy Ti-6Al-4V / D. Liu, Y. Zhang, M. Luo, D. Zhang // *Materials.* – 2019. – V. 12. – Iss. 12. – P. 1937–1949. URL: <https://doi.org/10.3390/ma12121937> (дата обращения 15.05.2021).
3. Investigation on wear behavior of cryogenically treated Ti-6Al-4V titanium alloy under dry and wet conditions / Y. Li, X. Wang, S. Yang, L. Hou, Y. Wei, Z. Zhang, X. Yang // *Materials.* – 2019. – V. 12. – Iss. 18. – P. 2850–2863. URL: <https://doi.org/10.3390/ma12182850> (дата обращения 15.05.2021).
4. Investigation of cutting force in longitudinal-torsional ultrasonic-assisted milling of Ti-6Al-4V / Y. Niu, F. Jiao, B. Zhao, G. Gao // *Materials.* – 2019. – V. 12. – Iss. 12. – P. 1955–1969. URL: <https://doi.org/10.3390/ma12121955>
5. Bari P., Law M., Vakhi P. Geometric models of non-standard toothed end mills // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2020. – V. 111. – Iss. 11–12. – P. 3319–3342.
6. Modelling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V / Sandip Patil, Shashikant Joshi, Asim Tewari, Suhas S Joshi // *Affiliations expand.* – 2014. – V. 54. – Iss. 2. – P. 694–705.
7. Feasibility study of ultrasonic elliptical vibration-assisted reaming of carbon fiber reinforced plastics/titanium alloy stacks / D. Geng, D. Zhang, Z. Li, D. Liu // *Ultrasonics.* – 2017. – V. 75. – P. 80–90.
8. Eun Jung Kim, Choon Man Lee. A study on the optimal machining parameters of the induction assisted milling with Inconel 718 // *Materials.* – 2019. – V. 12. – Iss. 2. – P. 233–248. URL: <https://doi.org/10.3390/ma12020233> (дата обращения 15.05.2021).
9. Machining of titanium metal matrix composites: progress overview / C. Escaich, Z. Shi, L. Baron, M. Balazinski // *Materials.* – 2020. – V. 13. – Iss. 21. – P. 5011–5026. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13215011> (дата обращения 15.05.2021).
10. Study of the effects of initial cutting conditions and transition period on ultimate tool life when machining Inconel 718 / M. Memarianpour, S.A. Niknam, S. Turenne, M. Balazinski // *Materials.* – 2021. – V. 14. – Iss. 3. – P. 592–604. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14030592> (дата обращения 15.05.2021).
11. Rao Charitha, Rao Shrikantha, Herbert Mervin. Performance improvement studies for cutting tools with a perforated surface when turning titanium alloy // *MATEC Web of Conferences.* – 2018. – V. 144, 03003. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814403003> (дата обращения 15.05.2021).
12. Experimental characterization of tool wear morphology and cutting force profile in dry and wet turning of titanium metal matrix composites (Ti-MMCs) / M. Safavi, M. Balazinski, H. Mehmanparast, S.A. Niknam // *Metals.* – 2020. – V. 10. – Iss. 11. – P. 1459–1472. URL: <https://doi.org/10.3390/met10111459> (дата обращения 15.05.2021).
13. Erol Kilickap, Ahmet Yardimeden, Yahya Hışman Çelik. Mathematical modelling and optimization of cutting force, tool wear and surface roughness by using artificial neural network and response surface methodology in milling of Ti-6242S // *Applied Sciences.* – 2017. – V. 7. – Iss. 10. – P. 1064–1075. URL: <https://doi.org/10.3390/app7101064> (дата обращения 15.05.2021).
14. Ramesh Rudrapati, Pradip Kumar Pal, Asish Bandyopadhyay. Vibration in traverse cut cylindrical grinding – experiments and analysis // *Advanced Materials Research.* – 2011. – V. 264–265. – P. 1124–1129.
15. Çelik Y.H., Yildiz H., Özek H.C. Effect of cutting parameters on workpiece and tool properties during drilling of Ti-6Al-4V // *Materials Testing.* – 2016. – V. 58. – Iss. 6. – P. 519–525.
16. Tehranizadeh F., Koca R., Budak E. Investigating effects of serration geometry on milling forces and chatter stability for their optimal selection // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2019. – V. 144. – art. N. 103425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2019.103425> (дата обращения 15.05.2021).
17. Bari P., Law M., Wahi P. Improved chip thickness model for serrated end milling // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology.* – 2019. – V. 25. – P. 36–49. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.03.001> (дата обращения 15.05.2021).
18. Guo Y., Lin B., Wang W. Modeling of cutting forces with a serrated end mill // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2019. – V. 144. – art. N. 103425. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/1796926> (дата обращения 15.05.2021).
19. Dombovari Z., Altintas Y., Stepan G. The effect of serration on mechanics and stability of milling cutters // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2010. – V. 50. – Iss. 6. – P. 511–520. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2010.03.006> (дата обращения 15.05.2021).
20. Experimental studies of stabilization of boring cutter form – building top oscillation / M.R. Sikhimbaev, K.T. Sherov, O.M. Zharkevich, A.K. Sherov, Y.O. Tkachyova // *Journal of Vibroengineering.* – 2012. – V. 14. – Iss. 2. – P. 661–670.
21. Application of integrated methods to improve the technological properties of steel / S.N. Fedoseev, D.V. Valuev, R.A. Mamadaliev, P.N. Sokolov // *Key Engineering Materials.* – 2017. – V. 736. – P. 110–115. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.736.110> (дата обращения 15.05.2021).
22. Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Вищенко М.В. Исследование пространственных вибраций и сил при высокопроизводительном фрезеровании // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона.* – 2017. – Т. 2. – С. 598–603.
23. Bukreev V.G., Lyapushkin S.V., Edgulov M.M. Accuracy enhancement of automated system for multicomponent batching of bulk materials // *MATEC Web of Conferences.* – 2015. – V. 37. – 01012.
24. Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 119–131.

25. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope / V.M. Rulevskiy, V.G. Bukreev, E.O. Kuleshova, S.M. Shandarov, Yu.Z. Vasilyeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 177 (1). – 012098.
26. Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V. Transformation of vermiculite energy into mechanical transformation energy during firing in electric furnaces with a «zero» module // Refractories and Industrial Ceramics. – 2016. – V. 57. – Iss. 3. – P. 239–245.
27. Influence of design methods a discrete model of separately excited DC motor on parameters estimation / I. Vajda, A. Glazyrin, I. Ustinova, E. Bolovin // Acta Polytechnica Hungarica. – 2018. – V. 15. – Iss. 6. – P. 219–233.
28. Фреза концевая для обработки титановых сплавов: пат. RU 2014127926 А. Рос. Федерация № 2014127926/02; заявл. 07.07.14; опубл. 27.01.2016. – Бюл. № 3. – 1 с.
29. Korovin G.I., Petrushin S.I., Gubaidulina R.H. Machining of titanium alloys with wave milling cutters // Materials Science Forum. – 2018. – 927. – P. 79–85.
30. Фрезы концевые из быстрорежущей стали для обработки титановых сплавов. Официальный сайт ООО ПК «МИОН». URL: <http://pkmion.ru/catalog/dlya-obrabotki-titanovykh-splavov/710-dlya-obrabotki-titanovykh-splavov/> (дата обращения 15.05.2021).
31. Гаврилин А.Н., Виноградов А.А., Серебряков К.В. Виброрегистратор-Ф. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ Российской Федерации № 2014661189. Дата регистрации 24.10.2014.

Поступила 09.06.2021 г.

Информация об авторах

Коровин Г.И., технический директор ООО ПК «МИОН».

Гаврилин А.Н., кандидат технических наук, доцент отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Петрушин С.И., доктор технических наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет.

Однокопылов Г.И., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кладиев С.Н., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.9.025.19:621.9.02-589.22

DETERMINING RATIONAL MODES OF MECHANICAL PROCESSING OF TITANIUM BODY ELEMENTS OF OIL AND GAS EQUIPMENT BY END-END MACHINES (ACCORDING TO SS 23248-78) AND WAVE-SHAPED CUTTERS

Georgy I. Korovin¹,
korovin9@yandex.ru

Alexey N. Gavrilin²,
gawral@tpu.ru

Sergey I. Petrushin³,
victory_28@mail.ru

Georgy I. Odnokopylov²,
ogiz@yandex.ru

Sergey N. Kladiev²,
kladiev@tpu.ru

¹ Industrial Company LLC « MION»,
46/5, Vershinin street, Tomsk, 634034, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Kuzbass State Technical University,
28, Vesennya street, Kemerovo, 650000, Russia.

The relevance of the research is caused by the fact that one of the most important factors in the failure-free operation of oil and gas equipment is the corrosion resistance requirements. Titanium alloys properties like high corrosion resistance in corrosive environments and high strength combined with low density make it possible to obtain products with high strength and low weight when operating in corrosive environments. However, titanium alloys usage in the manufacture of details that operate in an aggressive environment, including for oil and gas equipment, is limited due to both low machinability and low thermal conductivity, as well as the technological system predisposition to intense fluctuations.

Object: productivity and economic efficiency from using mills for manufacturing hull details like «case» type from titanium alloy.

The main aim of the research is a development of rational machining modes and tool geometry for milling hull elements from titanium alloys. That can ensure maximum tool life, machining quality, productivity and economic efficiency.

Methods: production tests of mills with different geometry of cutting edges by the multifactor experiment method using a vibro-diagnostic complex for determine the minimum vibration level zones during machining of the «case» type part from titanium alloy.

Results. The authors have developed the recommendations to reducing vibration during milling hull elements from titanium alloys. This method allows finding the rational cutting conditions according to both the highest productivity and maximum tool life criteria in production conditions during the stage of debugging the technological process.

Key words:

Oil and gas equipment, titanium alloys, milling, end mills, productivity, machining quality, vibration level, vibro-diagnostic complex, tool life.

REFERENCES

- Vinokurova I.M., Korotov V.V. Ispolzovanie titanovykh splavov v tselyakh povysheniya ekspluatatsionnykh parametrov neftegazovogo oborudovaniya [Titanium alloys using in order to improve the operational parameters of oil and gas equipment]. *Modern trends in the development of science and technologies*, 2016, no. 11-3, pp. 28–33.
- Liu D., Zhang Y., Luo M., Zhang D. Investigation of tool wear and chip morphology in dry trochoidal milling of titanium alloy Ti–6Al–4V. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 12, pp. 1937–1949. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma12121937> (accessed 15 May 2021).
- Li Y., Wang X., Yang S., Hou L., Wei Y., Zhang Z., Yang X. Investigation on wear behavior of cryogenically treated Ti–6Al–4V titanium alloy under dry and wet conditions. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 18, pp. 2850–2863. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma12182850>
- Niu Y., Jiao F., Zhao B., Gao G. Investigation of cutting force in longitudinal-torsional ultrasonic-assisted milling of Ti–6Al–4V. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 12, pp. 1955–1969. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma12121955> (accessed 15 May 2021).
- Bari P., Law M., Vakhi P. Geometric models of non-standard toothed end mills. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 111, no. 11–12, pp. 3319–3342.
- Sandip Patil, Shashikant Joshi, Asim Tewari, Suhas S Joshi. Modeling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V. *Affiliations expand*, 2014, vol. 54, no. 2, pp. 694–705.
- Geng D., Zhang D., Li Z., Liu D. Feasibility study of ultrasonic elliptical vibration-assisted reaming of carbon fiber reinforced plastics/titanium alloy stacks. *Ultrasonics*, 2017, vol. 75, pp. 80–90.
- Eun Jung Kim, Choon Man Lee. A study on the optimal machining parameters of the induction assisted milling with Inconel 718. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 233–248. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma12020233> (accessed 15 May 2021).
- Escaich C., Shi Z., Baron L., Balazinski M. Machining of titanium metal matrix composites: progress overview. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 21, pp. 5011–5026. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma13215011> (accessed 15 May 2021).
- Memarianpour M., Niknam S.A., Turenne S., Balazinski M. Study of the effects of initial cutting conditions and transition period on ultimate tool life when machining Inconel 718. *Materials*, 2021,

- vol. 14, no. 3, pp. 592–604. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma14030592>
11. Rao Charitha, Rao Shrikantha, Herbert Mervin. Performance improvement studies for cutting tools with a perforated surface when turning titanium alloy. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 144, 03003. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814403003> (accessed 15 May 2021).
 12. Safavi M., Balazinski M., Mehmanparast H., Niknam S.A. Experimental characterization of tool wear morphology and cutting force profile in dry and wet turning of titanium metal matrix composites (Ti-MMCs). *Metals*, 2020, vol. 10, no. 11, pp. 1459–1472. Available at: <https://doi.org/10.3390/met10111459>
 13. Erol Kilickap, Ahmet Yardimeden, Yahya Hışman Çelik. Mathematical modelling and optimization of cutting force, tool wear and surface roughness by using artificial neural network and response surface methodology in milling of Ti-6Al-4V. *Applied Sciences*, vol. 7, no. 10, pp. 1064–1075. Available at: <https://doi.org/10.3390/app7101064> (accessed 15 May 2021).
 14. Ramesh Rudrapati, Pradip Kumar Pal, Asish Bandyopadhyay. Vibration in Traverse Cut Cylindrical Grinding – Experiments and Analysis. *Advanced Materials Research*, 2011, no. 264–265, pp. 1124–1129.
 15. Çelik Y.H., Yildiz H., Özek H.C. Effect of cutting parameters on workpiece and tool properties during drilling of Ti-6Al-4V. *Materials Testing*, 2016, vol. 58, no. 6, pp. 519–525.
 16. Tehranizadeh F., Koca R., Budak E. Investigating effects of serration geometry on milling forces and chatter stability for their optimal selection. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, vol. 144, art. no. 103425. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2019.103425> (accessed 15 May 2021).
 17. Bari P., Law M., Wahi P. Improved chip thickness model for serrated end milling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2019, vol. 25, pp. 36–49. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.03.001> (accessed 15 May 2021).
 18. Guo Y., Lin B., Wang W. Modeling of cutting forces with a serrated end mill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, vol. 144, art. no. 103425. Available at: <https://doi.org/10.1155/2019/1796926> (accessed 15 May 2021).
 19. Dombovari Z., Altintas Y., Stepan G. The effect of serration on mechanics and stability of milling cutters. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, no. 6, pp. 511–520. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2010.03.006> (accessed 15 May 2021).
 20. Sikhimbaev M.R., Sherov K.T., Zharkevich O.M., Sherov A.K., Tkachyova Y.O. Experimental studies of stabilization of boring cutter form – building top oscillation. *Journal of Vibroengineering*, 2012, vol. 14, no. 2, pp. 661–670.
 21. Fedoseev S.N., Valuev D.V., Mamadaliev R.A., Sokolov P.N. Application of integrated methods to improve the technological properties of steel. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 110–115. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.736.110> (accessed 15 May 2021).
 22. Lukyanov A.V., Aleynikov D.P., Vishchenko M.V. Issledovanie prostranstvennykh vibratsiy i sil pri vysokoproizvoditelnom frezerovanii [Study of spatial vibrations and forces in high performance milling]. *Transportation infrastructure of the Siberian region*, 2017, vol. 2, pp. 598–603.
 23. Bukreev V.G., Lyapushkin S.V., Edgulov M.M. Accuracy enhancement of automated system for multicomponent batching of bulk materials. *MATEC Web of Conferences*, 2015, vol. 37, 01012.
 24. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M. Power supply system model of remote processing equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 119–131. In Rus.
 25. Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Kuleshova E.O., Shandarov S.M., Vasilyeva Yu.Z. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177 (1), 012098.
 26. Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V. Transformation of vermiculite energy into mechanical transformation energy during firing in electric furnaces with a «zero» module. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2016, vol. 57, no. 3, pp. 239–245.
 27. Vajda I., Glazyrin A., Ustinova I., Bolovin E. Influence of design methods a discrete model of separately excited DC motor on parameters estimation. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2018, vol. 15, no. 6, pp. 219–233.
 28. Korovin G.I., Zolotuhin D.V., Rozhkov P.S. *Freza kontsevaya dlya obrabotki titanovykh splavov* [End milling cutter for treatment of titanium alloys]. Patent RF no. 2014127926/02, 2016.
 29. Korovin G.I., Petrushin S.I., Gubaidulina R.H. Machining of titanium alloys with wave milling cutters. *Materials Science Forum*, 2018, 927, pp. 79–85.
 30. Frezy kontsevye iz bystrorezhushchey stali dlya obrabotki titanovykh splavov [HSS end mills for titanium alloys]. Available at: <http://pkmion.ru/catalog/dlya-obrabotki-titanovykh-splavov/710-dlya-obrabotki-titanovykh-splavov/> (accessed 15 May 2021).
 31. Gavrilin A.N., Vinogradov A.A., Serebryakov K.V. *Vibroregistrator-F. Svidetelstvo o registratsii programmy dlya EVM Rossiyskoy Federatsii № 2014661189* [Federal registration certificate of the computer program of the Russian Federation No. 2014661189]. Registration date 24.10.2014.

Received: 9 June 2021.

Information about the authors

Georgy I. Korovin, technical director, Industrial Company LLC « MION».

Alexey N. Gavrilin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey I. Petrushin, Dr. Sc., professor, Kuzbass State Technical University.

Georgy I. Odnokopylov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey N. Kladiyev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 549:553.493.66(571.151)

ИТТРИЕВЫЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ И РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ АКЦЕССОРНЫЕ МИНЕРАЛЫ ЛЕЙКОГРАНИТОВ АЛЕЙСКО-ЗМЕИНОГОРСКОГО КОМПЛЕКСА (РУДНЫЙ АЛТАЙ)

Новоселов Константин Леонидович,
novoselov@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность и цель исследования. Изучением гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса впервые установлено в естественной пробе лейкогранитов четвёртой фазы внедрения присутствие редких акцессорных минералов иттрия (приорит, фергюсонит), генезис которых, по существующим данным, пегматитовый, пневматолито-гидротермально метасоматический, но формирование их на магматическом этапе становления интрузии считается наименее типичным. Цель работы состоит в выяснении условий генезиса приорита, фергюсонита в алейско-змеиногорских лейкогранитах. Кроме того, требует решения вопрос источника иттрия и сопутствующих редкоземельных элементов лишь на единственном участке внедрения пород.

Методы исследования включают традиционные минералого-петрографические исследования, выделение акцессорных минералов и изучение их видового состава в искусственных протолочках, начальный вес которых составлял 5...8 кг; аналитические исследования минералов выполнены в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350+ (аналитик мл. науч. сотр. М.В. Хлестов) и на рентгено-флуоресцентном микроскопе (отделение геологии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ, аналитик канд. геол.-минерал. наук М.А. Рудмин).

Результаты. Впервые в гранитоидах алейско-змеиногорского комплекса встречен комплекс редких акцессорных минералов иттрий-ниобиевого, иттрий-титанового состава наряду с ранее отмечавшимися минералами иттрия (ксенотим), редкоземельным монацитом, ниобатами (колумбит, ильменорутил).

Выводы. Присутствие приорита и фергюсонита в единичном штоке лейкогранитов IV интрузивной фазы позволяет рассматривать данный шток как результат деятельности длительно существовавшего канала поступления вещества последовательных фаз внедрения интрузии. Вероятно, свободное поступление материала из первичного магматического очага стало благоприятным фактором для насыщения пород данного участка иттрием, РЗЭ, редкими металлами. Выделение акцессорных минералов соответствующего состава произошло на завершающей стадии формирования интрузива в результате автоматоматоза апикальной и краевых частей.

Ключевые слова:

Рудный Алтай, гранитоиды, акцессорные минералы, приорит, фергюсонит, ксенотим, торит, ториацит, монацит.

Введение

Алейско-змеиногорский комплекс (D₂₋₃) включает три крупных гранитоидных массива – Новониколаевский, Алейский, Устьянский, и ряд более мелких тел, локализованных в структурах северной части Алейского поднятия Рудного Алтая [1]. Наибольшую площадь (более 1000 км²) занимает полифазный Новониколаевский массив, который расположен в северном окончании Алейского антиклинория, имеет субшироко удлиненную форму, с севера ограничен крупным Варшавским разломом. Массив имеет пятифазное строение с гомодромной последовательностью пород от габброидов до лейкогранитов (рис. 1). Изучаемые гранитоиды четвёртой фазы внедрения представлены натриевыми и калиево-натриевыми биотитовыми лейкогранитами, которые образуют крупные штоки, прорывающие породы трёх предшествующих интрузивных фаз.

Методика исследования

Методика отбора проб гранитоидов и последующая их обработка соответствует общепринятой – дробление пород, «отмучивание», отмывка, разделение в тяжёлых жидкостях, магнитная и электромагнитная сепарация, исследование фракций под бинокулярной лупой, диагностика минералов и отбор зёрен для проведения анализов. Аналитические исследования выпол-

нены в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350+ (анализы выполнены мл. науч. сотр. М.В. Хлестовым при участии автора статьи), на электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBU, оснащённом приставкой для рентгено-флуоресцентного энерго-дисперсионного анализа (ЭДС) OXFORD X-Max 50 с Si/Li кристаллическим детектором (отделение геологии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ, аналитик канд. геол.-минерал. наук М.А. Рудмин), на рентгено-флуоресцентном микроскопе (отделение геологии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ, аналитик канд. геол.-минерал. наук М.А. Рудмин). Интерпретация химического состава и определение минералов проводились с применением системы идентификации минералов на основе их стехиометрии (разработана С.В. Канакиным в Геологическом институте СО РАН, г. Улан-Удэ), а также (для редких минералов, не вошедших в базу данных) непосредственным сопоставлением нормативного состава, набора элементов-примесей предполагаемых минералов с полученными данными анализов. Приведённые в работе таблицы химического состава минералов отражают полный набор примесных элементов, без исключения возможного влияния соседних минералов.

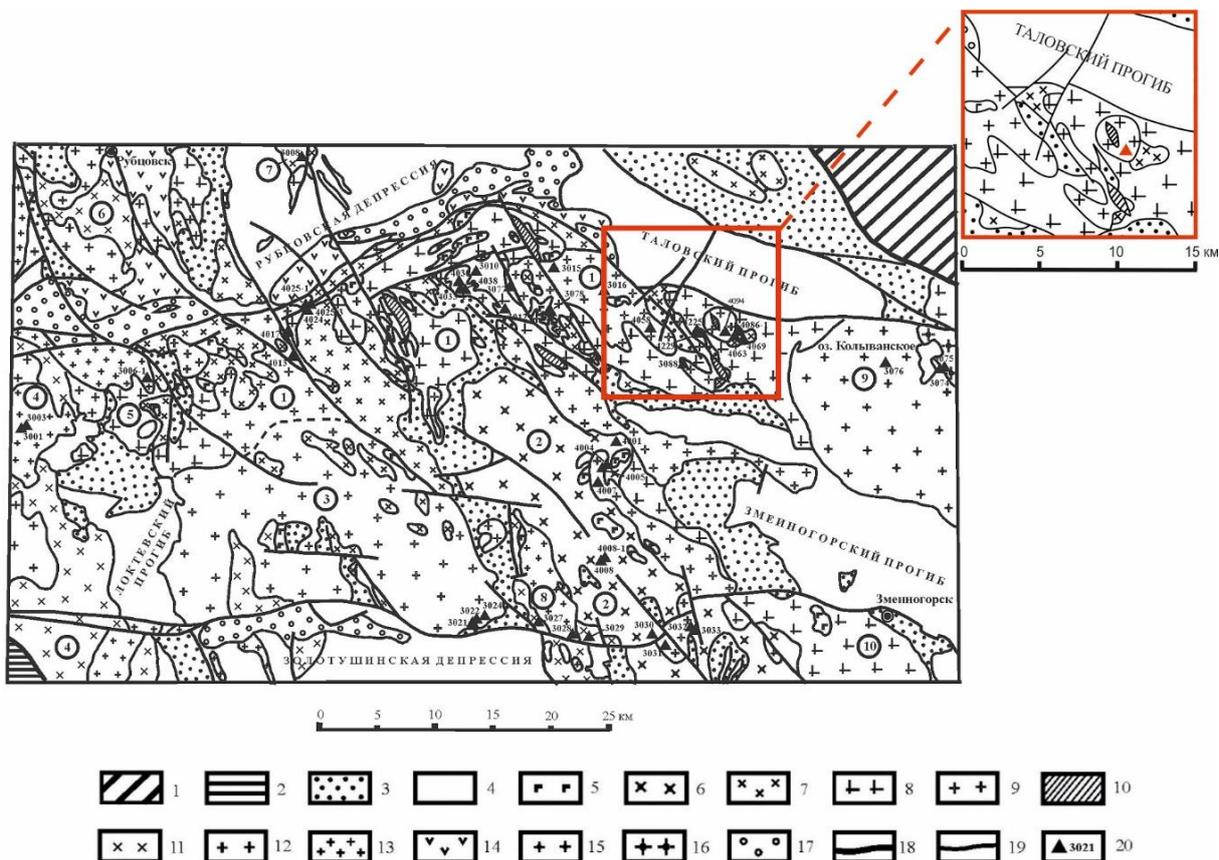


Рис. 1. Схема геологического строения северной части Алейского поднятия Рудного Алтая [1]: 1) каледонские структуры Горного Алтая; 2) герцинские структуры Иртышской зоны смятия; 3, 4) структурно-вещественные комплексы Рудно-Алтайской зоны (3 – терригенный комплекс основания, 4 – девонский осадочно-вулканогенный комплекс); 5–10) девонский интрузивный комплекс Рудного Алтая (5 – габброиды и диоритоиды ранней фазы, 6 – тоналиты и плагиограниты Алейского массива, 7 – породы второй фазы змеиногорского комплекса, 8 – лейкоплагиограниты третьей фазы змеиногорского комплекса, 9 – лейкограниты четвертой фазы змеиногорского комплекса, в том числе Устьянского массива, 10 – калиевые лейкограниты пятой фазы змеиногорского комплекса); 11–13) интрузивные образования средне-позднекаменноугольного волчихинского (позднезмеиногорского) комплекса (11 – породы ранних фаз, 12 – граниты третьей фазы, 13 – лейкограниты четвертой фазы); 14) вулканогенные образования средне-позднекаменноугольного панфиловского комплекса; 15, 16) интрузивные образования пермо-триасового синюшинского комплекса (15 – гранитоиды главной фазы, 16 – лейкограниты третьей фазы); 17) приразломные прогибы аккреционно-коллизивной и позднеколлизивной стадий; 18) границы структурно-формационных зон; 19) прочие разломы; 20) точки отбора и номера проб. Интрузивные массивы (цифры в кружках): 1) Новониколаевский; 2) Алейский; 3) Устьянский; 4) Локтевский; 5) Новоматвеевский; 6) Рубцовский; 7) Новоскляухинский; 8) Павловский; 9) Саввушкинский; 10) Мохнатые Сопки

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the northern part of the Aleisk uplift of the Rudny Altai [1]: 1) Caledonian structures of Gorny Altai; 2) Hercynian structures of the Irtysh crumple zone; 3, 4) structural-material complexes of the Rudny Altai zone (3 – terrigenous complex of the base, 4 – Devonian sedimentary-volcanic complex); 5–10) Devonian intrusive complex of the Ore Altai (5 – gabbroids and dioritoids of the early phase, 6 – tonalites and plagiogranites of the Aleisk massif, 7 – rocks of the second phase of the Zmeinogorsk complex, 8 – leukoplagiogranites of the third phase of the Zmeinogorsk complex, 9 – leucogranites of the fourth phase of the Zmeinogorsk complex, including the Ustyansky massif, 10 – potassium leucogranites of the fifth phase of the Zmeinogorsk complex); 11–13) intrusive formations of the Middle-Late Carboniferous Volchikha (Late Zmeinogorsk) complex (11 – rocks of the early phases, 12 – granites of the third phase, 13 – leucogranites of the fourth phase); 14) volcanogenic formations of the Middle-Late Carboniferous Panfilov complex; 15, 16) intrusive formations of the Permian-Triassic Sinyushinsky complex (15 – granitoids of the main phase, 16 – leucogranites of the third phase); 17) near-fault troughs of the accretion-collisional and late collisional stages; 18) boundaries of structural and formation zones; 19) other faults; 20) sampling points and sample numbers. Intrusive massifs (numbers in circles): 1) Novonikolaevsky; 2) Aleisky; 3) Ustyansky; 4) Loktevsky; 5) Novomatveevsky; 6) Rubtsovsky; 7) Novosklyukhinsky; 8) Pavlovsky; 9) Savvushkinsky; 10) Mokhnatye Sopki

Результаты исследования

В составе акцессорных минералов лейкогранитов четвёртой интрузивной фазы, наряду с типичными для гранитоидов магнетитом, гематитом, сфеном, цирконом, апатитом и др., установлены в единственном штоке (выноска на рис. 1, точка отбора показана красным цветом) колумбит, ксенотим, торит, монацит и впервые для данного комплекса такие редкие минералы, как фергюсонит, приорит, торианит, ураноторианит. В целом такая минерализация встречается в гранитоидных комплексах различных регионов [2, 3], но в алейско-змеиногорских породах Y-Nb, Y-Ti акцессории, как выше отмечено, присутствуют в единственном теле четвёртой фазы внедрения. Количество их не превышает единичных зёрен.

Фергюсонит Y(Nb,Ta)O₄ встречен в сростании с колумбитом. Зерно размером около 90×140 μm, большая часть сложена фергюсонитом, границы с окружающим колумбитом «заливистые», неправильной формы (рис. 2). Центральная часть зерна разбита продольной трещиной, в которой также развит колумбит. Кроме того, к трещине приурочен хлорит и небольшое зерно ураноторианита. Строение фергюсонита однородное, трещиноватости, за исключением краевых частей, не наблюдается. Стоит отметить, что ассоциация фергюсонита с колумбитом весьма распространена в гранитоидах [4].

Химический состав (табл. 1) соответствует основным характеристикам фергюсонита [5–8]. Так, соотношение Y к общей сумме Y+TR в среднем составляет 65,6 % при нормальных значениях от 63 до 75 %. Содержание CaO не превышает 1...3 %. UO₂ и ThO₂,

замещающие Y, не превышают количества 7,55 и 5,91 % соответственно.

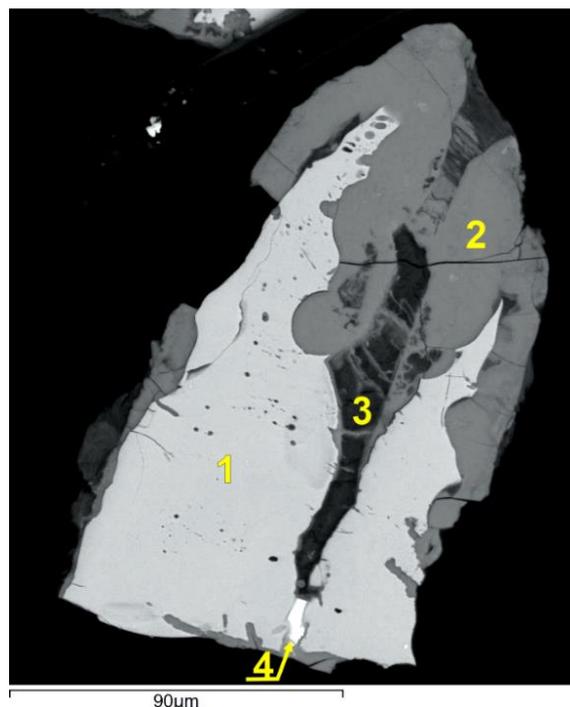


Рис. 2. 1 – фергюсонит в сростании с колумбитом – 2, 3 – хлорит, 4 – ураноторианит. Здесь и на последующих рисунках изображение в обратно рассеянных электронах

Fig. 2. 1 – fergusonite in intergrowth with columbite – 2, 3 – chlorite, 4 – uranotorianite. Here and in the following figures, the image in backscattered electrons

Таблица 1. Химический состав фергюсонита (мас. %)

Table 1. Fergusonite chemical composition, wt. %

№ п.п Ordinal number	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	–	1,35	–	–	2,09	–
CaO	0,87	0,73	0,84	0,62	0,39	0,66
TiO ₂	1,7	2,17	1,51	1,55	2,59	1,07
Y ₂ O ₃	24,84	24,31	27,3	28,64	26,98	28,66
Nb ₂ O ₅	44,18	43,76	45,6	46,57	39,48	48,61
Ta ₂ O ₅	–	–	2,06	–	3,75	1,27
Se ₂ O ₃	0,68	–	–	–	–	–
Nd ₂ O ₃	1,43	1,36	1,19	0,88	1,11	–
Sm ₂ O ₃	1,04	0,89	1,03	–	–	–
Gd ₂ O ₃	1,84	2,44	1,62	1,7	1,72	–
Dy ₂ O ₃	3,42	2,94	3,49	4,15	2,79	2,9
Er ₂ O ₃	2,79	2,38	2,8	3,09	3,08	3,87
Yb ₂ O ₃	5,47	4,36	4,56	4,55	4,91	6,04
ThO ₂	5,91	4,85	3,56	2,1	2,39	1,5
UO ₂	4,87	5,43	5,36	5,33	7,55	4,73
Сумма/Total	99,03	96,97	100,92	99,17	98,81	99,3
Y/(Y+TR), %	59,84	62,85	68,0	66,59	66,25	69,11

Кристаллохимические формулы фергюсонита (номера формул соответствуют порядковым номерам анализов в табл. 1)

- $(Y_{0,614}Ca_{0,043}Ce_{0,012}Nd_{0,024}Sm_{0,017}Gd_{0,028}Dy_{0,051}Er_{0,041}Yb_{0,077})_{0,907}(Nb_{0,927}Ti_{0,059}Th_{0,062}U_{0,05})_{1,098}O_4$
- $(Y_{0,613}Ca_{0,037}Nd_{0,023}Sm_{0,015}Gd_{0,038}Dy_{0,045}Er_{0,035}Yb_{0,063})_{0,869}(Nb_{0,937}Ti_{0,077}Th_{0,052}U_{0,057})_{1,123}O_4$
- $(Y_{0,653}Ca_{0,04}Nd_{0,019}Sm_{0,016}Gd_{0,024}Dy_{0,051}Er_{0,04}Yb_{0,063})_{0,906}(Nb_{0,927}Ti_{0,051}U_{0,054}Th_{0,036}Ta_{0,025})_{1,093}O_4$
- $(Y_{0,687}Ca_{0,03}Nd_{0,014}Gd_{0,025}Dy_{0,06}Er_{0,044}Yb_{0,063})_{0,923}(Nb_{0,95}Ti_{0,053}U_{0,053}Th_{0,022})_{1,079}O_4$
- $(Y_{0,651}Ca_{0,019}Nd_{0,018}Gd_{0,026}Dy_{0,041}Er_{0,044}Yb_{0,068})_{0,867}(Nb_{0,81}Ti_{0,089}Si_{0,095}Ta_{0,046}U_{0,076}Th_{0,025})_{1,141}O_4$
- $(Y_{0,68}Ca_{0,032}Dy_{0,042}Er_{0,054}Yb_{0,082})_{0,89}(Nb_{0,979}Ta_{0,015}Ti_{0,036}Th_{0,015}U_{0,047})_{1,092}O_4$

Ещё одно зерно фергусонита, размером 0,2×0,2 мм, также представляет взаимопрорастания с колумбитом (рис. 3), приуроченным к краевой части зерна и к трещинам, пустотам в фергусоните. Фергусонит содержит тонкие вкрапленники (размером в первые микроны) ураноторианита.

Колумбит, образующий сростания с фергусонитом, характеризуется повышенными содержаниями примесей тория, церия, титана, кальция, фосфора, кремния, алюминия (табл. 2; анализы 1 и 2 отвечают колумбиту на рис. 2, анализы 3–5 – колумбит на рис. 3).

Приорит $Y(Nb,Ti)_2O_6$ образует слегка удлиненные зерна размером 100×150 мкм красновато-бурого цвета, со стекляннм блеском. Внутреннее строение зерна однородное, слегка трещиноватое (рис. 4). На границах зерна наблюдаются сростания с кварцем, титанитом, биотитом, апатитом. Химический состав приорита приведен в табл. 3. Обращает внимание отсутствие ниобия, изоморфного с титаном. Пониженные содержания Nb отмечаются в такой разновидности приорита, как блонстрандин, но полное отсутствие Nb позволяет предполагать, что описываемый минерал соответствует крайне редким иттрокразиту $(Y,Th)Ti_2(O,OH)_6$ или тайиту $NYTi_2O_6$ [9]. Кроме того, вероятно присутствие самостоятельного минерально-

го вида подобно Y-ивашироиту $YTaO_4$, не изоструктурному с фергусонитом [10].

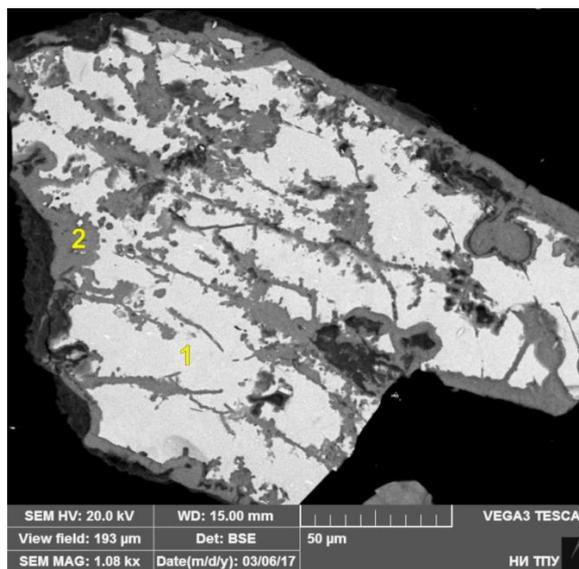


Рис. 3. Фергусонит (1), колумбит (2), вкрапленники белого цвета – ураноторианит

Fig. 3. Fergusonite (1), columbite (2), inclusions of white color – uranotorianite

Таблица 2. Химический состав колумбита (мас. %)

Table 2. Columbite chemical composition, wt. %

№ п.п Ordinal number	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	FeO	Y ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	Ce ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅	ThO ₂	Сумма Total
1	1,32	6,35	3,12	2,17	2,67	13,25	–	39,53	–	–	8,58	76,99
2	1,57	6,23	3,44	2,36	2,65	11,36	–	42,8	1,62	2,26	9,31	83,59
3	1,15	13,62	1,22	2,35	2,17	30,78	–	28,62	0,63	3,7	4,94	89,18
4	1,64	13,56	1,16	2,81	2,51	24,88	–	30,11	–	2,17	5,28	84,13
5	1,05	12,32	1,14	2,1	1,79	30,73	0,92	24,86	0,52	2,44	5,25	83,13

Кристаллохимические формулы колумбита (номера формул соответствуют порядковым номерам анализов в табл. 2)

- $(Fe_{0,759}Ca_{0,159}Al_{0,106})_{1,024}(Nb_{1,223}Si_{0,435}P_{0,181}Ti_{0,137}Th_{0,134})_{2,11}O_6$
- $(Fe_{0,609}Ca_{0,162}Al_{0,119})_{0,89}(Nb_{1,241}Si_{0,399}P_{0,186}Th_{0,136}Ti_{0,128}Ta_{0,039}Ce_{0,038})_{2,167}O_6$
- $(Fe_{1,532}Ca_{0,15}Al_{0,081})_{1,763}(Nb_{0,77}Si_{0,81}Ti_{0,097}Th_{0,067}P_{0,061}Ce_{0,014}Ta_{0,06})_{1,879}O_6$
- $(Fe_{1,274}Ca_{0,184}Al_{0,118})_{1,576}(Nb_{0,834}Si_{0,83}Ti_{0,116}Th_{0,074}P_{0,06}Ta_{0,036})_{2,05}O_6$
- $(Fe_{1,663}Ca_{0,146}Al_{0,08}Y_{0,032})_{1,921}(Nb_{0,727}Si_{0,797}P_{0,062}Ti_{0,087}Ce_{0,012}Ta_{0,043}Th_{0,077})_{1,808}O_6$

Таблица 3. Химический состав приорита (мас. %)

Table 3. Priorite chemical composition, wt. %

№ п.п Ordinal number	TiO ₂	Y ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Сумма Total
1	53,84	30,91	–	1,69	3,74	2,7	2,9	95,79
2	53,33	29,86	0,51	2,51	3,79	2,92	3,36	96,27

Кристаллохимические формулы приорита (номера формул соответствуют порядковым номерам анализов в табл. 3)

- $(Y_{0,89}Dy_{0,065}Yb_{0,048}Er_{0,046}Gd_{0,03})_{1,079}Ti_{2,19}O_6$
- $(Y_{0,864}Dy_{0,066}Yb_{0,056}Er_{0,05}Gd_{0,045}Sm_{0,01})_{1,091}Ti_{2,182}O_6$

Ксенотим YPO_4 встречается только в виде включений в цирконе, торите. Заслуживает внимания кристалл циркона размером около 0,3 мм с ровными гранными очертаниями и зональным строением (рис. 5). Внешняя зона лишена включений, центральная насыщена многочисленными микровключениями торита, уранинита, присутствие которых обусловлено распадом твёрдого раствора цирконий-торий-

уранового состава [11]. Дальнейший рост кристалла в сменившейся физико-химической обстановке привёл к формированию внешней каймы, лишённой включений и примесных элементов. Подобные кристаллы циркона с зональным строением и включениями торита в центральной части описаны в плиоценовых гранитах Карпат [11], в пегматитах Урала [12].

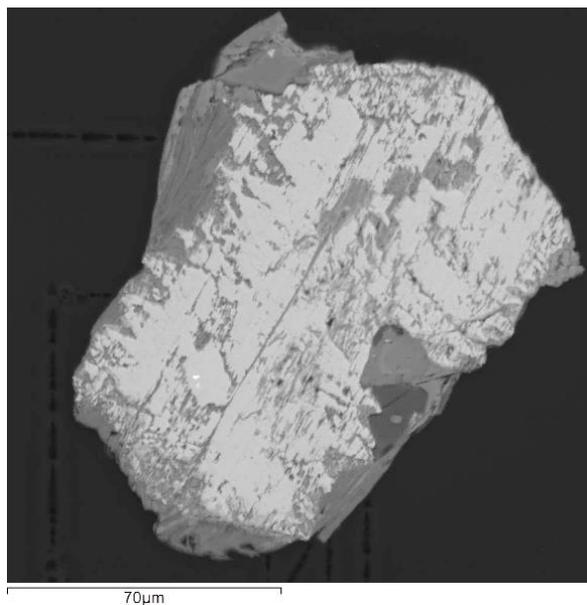


Рис. 4. Зерно приорита
 Fig. 4. Priorite grain

Выделения ксенотима, размером 10...15 μm , имеют изометричную, кристаллогранную или неправильную форму, приурочены они к кварцевым вроскам в кристалле циркона (рис. 5). Химический состав представлен в табл. 4 (номера анализов 1–3).

Таблица 4. Химический состав ксенотима (мас. %)

Table 4. Xenotim chemical composition, wt. %

№ п.п Ordinal number	SiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	Y ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅	ThO ₂	UO ₂	Сумма Total
1	2,67	32,4	1,42	38,21	2,46	4,65	–	3,48	–	1,91	1,6	88,81
2	3,64	31,25	1,46	36,45	2,26	3,84	–	3,59	–	2,92	1,82	87,23
3	2,42	31,64	–	35,39	3,43	5,89	4,04	5,01	–	2,01	1,58	91,42
4	–	31,9	0,96	36,55	3,02	6,06	3,37	5,27	4,18	6,61	–	97,92

Кристаллохимические формулы ксенотима (номера формул соответствуют порядковым номерам анализов в табл. 4)

1. $(Y_{0,725}Fe_{0,042}Gd_{0,029}Dy_{0,053}Yb_{0,038}Th_{0,015}U_{0,013})_{0,915}(P_{0,978}Si_{0,095})_{1,073}O_4$
2. $(Y_{0,725}Fe_{0,042}Gd_{0,029}Dy_{0,053}Yb_{0,038}Th_{0,015}U_{0,013})_{0,915}(P_{0,978}Si_{0,095})_{1,073}O_4$
3. $(Y_{0,682}Gd_{0,041}Dy_{0,069}Er_{0,046}Yb_{0,055}Th_{0,017}U_{0,013})_{0,923}(P_{0,97}Si_{0,088})_{1,058}O_4$
4. $(Y_{0,696}Fe_{0,029}Gd_{0,036}Dy_{0,07}Er_{0,038}Yb_{0,058}Ta_{0,041}Th_{0,054})_{1,022}P_{0,966}O_4$

Таблица 5. Химический состав торита (мас. %)

Table 5. Thorit chemical composition, wt. %

№ п.п Ordinal number	F	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	FeO	Y ₂ O ₃	PbO	ThO ₂	UO ₂	Сумма Total
1	0,79	0,38	15,32	0,71	–	–	2,83	–	62,02	6,58	88,62
2	1,63	0,47	16,84	–	1,08	1,52	–	–	63,31	7,49	92,34
3	1,15	0,72	18,06	–	0,71	1,63	–	–	66,59	3,53	92,39
4	–	–	18,31	–	–	–	–	1,22	71,55	6,61	97,7
5	–	–	18,87	–	–	–	–	1,41	72,06	5,55	97,89

Кристаллохимические формулы торита (номера формул соответствуют порядковым номерам анализов в табл. 5)

1. $(Th_{0,852}U_{0,088}Y_{0,091})_{1,031}[(Si_{0,925}Al_{0,027}P_{0,001})_{0,953}O_4]$
2. $(Th_{0,804}Ca_{0,06}Fe_{0,065}U_{0,093})_{1,022}[(Si_{0,94}Al_{0,031})_{0,971}O_4]$
3. $(Th_{0,828}Ca_{0,042}Fe_{0,074}U_{0,043})_{0,987}[(Si_{0,987}Al_{0,046})_{1,033}O_4]$
4. $(Th_{0,899}Pb_{0,018}U_{0,081})_{0,998}[Si_{1,011}O_4]$
5. $(Th_{0,894}Pb_{0,021}U_{0,067})_{0,982}[Si_{1,029}O_4]$

Torium Th[SiO₄] встречается в виде отмеченных выше микронных вкрапленников в цирконе, в монаците, а также образует отдельные зерна. Зерно торита

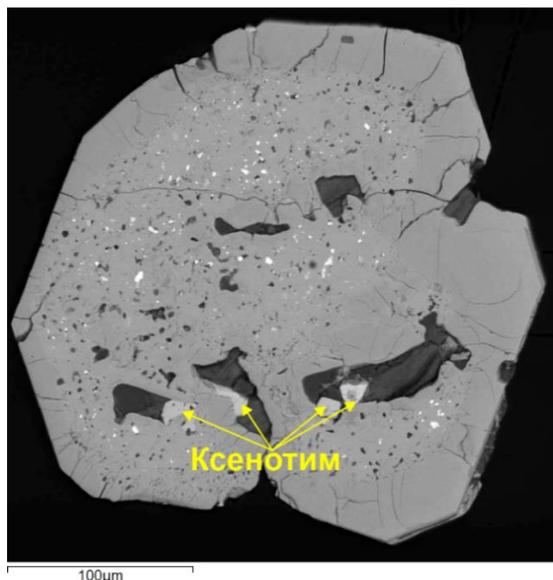


Рис. 5. Кристалл циркона. Центральная часть содержит тонкую вкрапленность уранинита (белое), торита (светло-серое)

Fig. 5. Zircon crystal. The central part contains thin inclusions of uraninite (white), thorite (light gray)

Кроме того, ксенотим образует включение в центре зерна торита, размером около 10 μm с гранными очертаниями (рис. 6, табл. 4, анализ № 4).

размером ~100×150 μm имеет неоднородное строение (рис. 6), центральная часть представлена собственно торитом (табл. 5, анализ № 1) и содержит отмеченное

ранее включение ксенотима. Периферия зерна сложена торитом (на снимке в обратном рассеянных электронах – серого цвета, темнее центральной части зерна), границы зон торита и торинита неровные, размытые, часто напоминают графические прорастания. Такое же взаимоотношение торита и торинита встречено в другом зерне, имеющем близкие кристаллогранной очертания (размером ~0,2 мм) (рис. 7). Торит, слагающий большую центральную часть зерна, состоит из двух зон, внутренняя (округлой формы, на снимке выглядит темнее) обогащена примесями железа, кальция, алюминия, фтора (табл. 5, анализы № 2, 3). Окружающая эту зону, преобладающая по размеру область сложена торитом, практически не имеющим примесей (присутствуют лишь свинец и уран (табл. 5, анализы № 4, 5)). Торит окружён достаточно ровной, выдержанного размера каймой торинита.

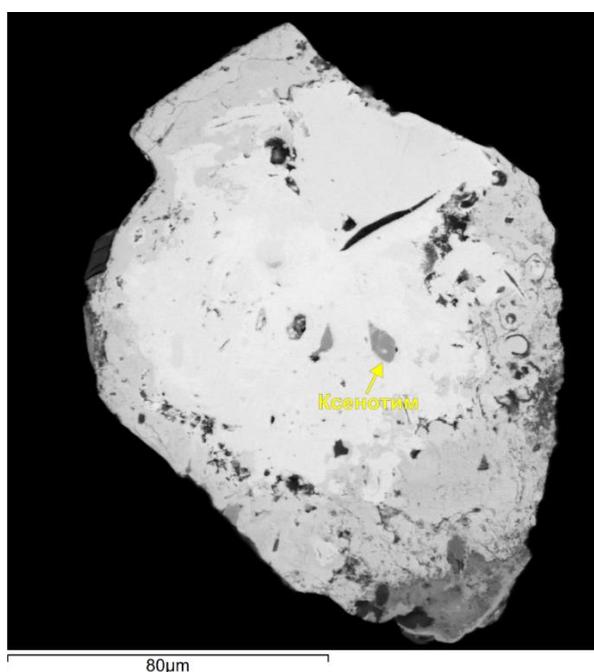


Рис. 6. Зерно торита, периферическая зона сложена торинитом

Fig. 6. Thorite grain, the peripheral zone is composed of thorianite

Существенно отличается по внутреннему строению зерно торита с ярко выраженной зональностью (рис. 8). Границы зон неровные, волнистые, напоминают колломорфные выделения, имеют дендритовидные очертания. Местами разрывы между зонами заполнены хлоритом (на рис. 8 имеют чёрную окраску). Различия между зонами выражаются в составе и количестве примесных элементов. Центральная часть (I на рис. 8) характеризуется только примесями UO_2 до 8...9 мас. % и PbO (1,4...1,6 мас. %). В следующей зоне (II) торит содержит существенно меньше UO_2 (3,3...4,5 мас. %), появляются примеси Al_2O_3 (0,5 мас. %) и F (3,5 %). Третья зона (III) характеризуется отсутствием UO_2 , таким же содержанием Al_2O_3 , несколько пониженным F (1,88...2,33 %), но появляются примеси CaO , TiO_2 , FeO , ZrO_2 , Nb_2O_5 . Внешняя зо-

на (IV) содержит ещё меньше F, а количество CaO , TiO_2 , FeO , ZrO_2 , Nb_2O_5 возрастает.

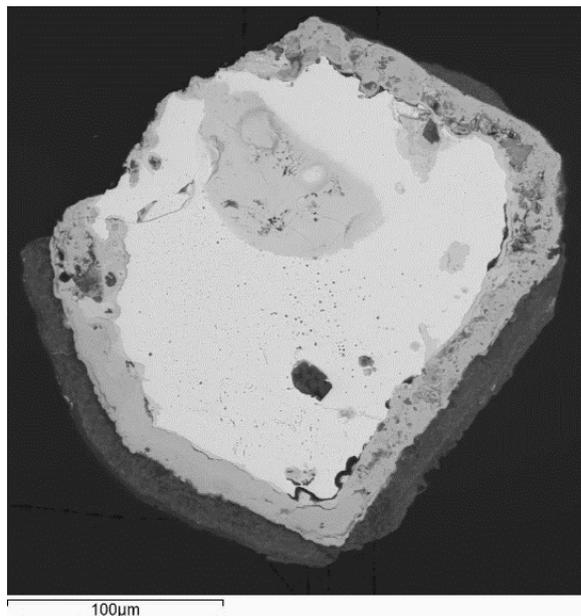


Рис. 7. Зерно торита с частично кристаллогранной формой, периферическая зона (тёмно-серая) сложена торинитом

Fig. 7. Thorite grain with a partially crystal-faceted shape, the peripheral zone (dark gray) is composed of thorianite



Рис. 8. Зерно торита

Fig. 8. Thorit grain

Торинит ThO_2 , образующий внешние зоны вокруг зёрен торита (рис. 6, 7), характеризуется примесями РЗЭ, фтора, фосфора, алюминия, кальция, железа, стронция, то есть главным образом теми же, что торит центральной части зёрен, кроме фосфора, редких земель и стронция (табл. 6).

Таблица 6. Химический состав ториянита (мас. %)

Table 6. Thorianit chemical composition, wt. %

№ п.п Ordinal number	F	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	FeO	SrO	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	ThO ₂	Сумма Total
1	4,37	–	0,83	6	6	1,18	0,75	3,54	–	–	3,34	51,14	77,15
2	3,88	0,57	1,48	7,17	6,23	2,03	0,59	4,46	3,55	–	3,03	46,49	79,48
3	6,41	–	1,39	1,08	8,75	0,87	–	–	–	–	–	59,08	77,58
4	5,73	–	1,39	0,87	8,72	0,86	0,48	1,4	1,63	0,59	–	57,83	79,49
5	6,56	–	1,8	1,15	8,59	2,21	–	3,79	4,47	–	–	49,83	78,4

Кристаллохимические формулы ториянита (номера формул соответствуют порядковым номерам анализов в табл. 6)

1. $(Th_{0,563}Ca_{0,311}Fe_{0,048}La_{0,063}Nd_{0,058})_{1,043}O_2$
2. $(Th_{0,507}Ca_{0,32}Fe_{0,081}La_{0,079}Ce_{0,062}Nd_{0,052})_{1,101}O_2$
3. $(Th_{0,571}Ca_{0,398}Fe_{0,031})_1O_2$
4. $(Th_{0,555}Ca_{0,394}Fe_{0,03}La_{0,022}Ce_{0,025}Pr_{0,009})_{1,035}O_2$
5. $(Th_{0,466}Ca_{0,378}Fe_{0,076}La_{0,057}Ce_{0,067})_{1,044}O_2$

Таблица 7. Химический состав монацита (мас. %)

Table 7. Monazit chemical composition, wt. %

№ п.п Ordinal number	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	ThO ₂	Сумма Total
1	3,44	24,43	0,46	14,27	27,71	3,03	8,62	1,3	0,92	14,5	98,69
2	0,98	28,18	0,46	16,92	31,74	3,24	9,46	1,22	0,97	5,29	98,47
3	2,44	26,12	0,49	14,65	28,86	2,61	9,66	–	–	11,93	96,75

Кристаллохимические формулы монацита (номера формул соответствуют порядковым номерам анализов в табл. 7)

1. $(Ce_{0,422}La_{0,219}Th_{0,137}Pr_{0,046}Nd_{0,128}Sm_{0,019}Gd_{0,013}Ca_{0,02})_{1,004}[(P_{0,86}Si_{0,143})_{1,003}O_4]$
2. $(Ce_{0,465}La_{0,251}Th_{0,049}Pr_{0,048}Nd_{0,136}Sm_{0,017}Gd_{0,013}Ca_{0,02})_{0,999}[(P_{0,962}Si_{0,039})_{1,001}O_4]$
3. $(Ce_{0,437}La_{0,224}Pr_{0,039}Nd_{0,142}Th_{0,112}Ca_{0,022})_{0,976}[(P_{0,915}Si_{0,1})_{1,015}O_4]$

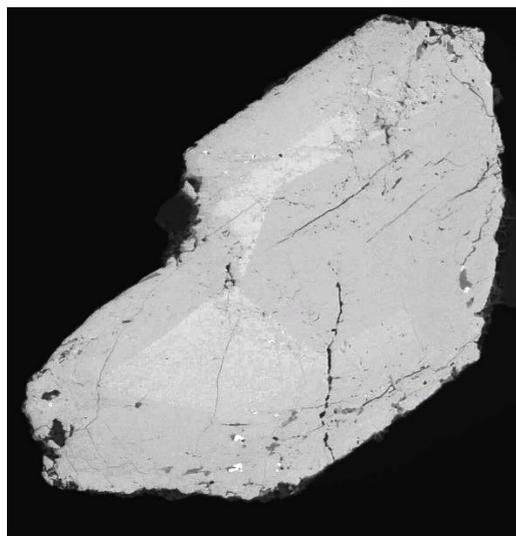


Рис. 9. Фрагмент кристалла монацита с блоково-зональным внутренним строением

Fig. 9. Fragment of a monazite crystal with a block-zonal internal structure

Кристалл монацита $(Ce,La)[PO_4]$, размером $0,2 \times 0,3$ мм, с не полностью сохранившимися гранями, обладает блоково-зональным строением (рис. 9). В сечении наблюдается три зоны, центральная имеет прямолинейные очертания, повторяющие облик кристалла, сменяется чуть более светлой зоной, также с прямолинейными границами, и внешняя зона несколько темнее предыдущей. Наблюдаемые зоны отличаются по количеству примесных элементов, наиболее изменчивы содержания ThO_2 и SiO_2 (табл. 7).

Обсуждение результатов исследования и выводы

Гранитоиды алейско-змеиногорского комплекса (D_{2-3}) несут разнообразную акцессорную минерализацию, наиболее обогащены редкими, редкоземельными, радиоактивными акцессориями лейкограниты четвертой интрузивной фазы [1, 13], что вполне естественно, поскольку редкоземельно-иттриевую минерализацию нередко генетически связывают с гранит-лейкогранитовыми комплексами [14].

Генезис фергюсонита, приорита, ториянита, ксенотима, монацита рассматривается [5, 7, 15–17] главным образом как пегматитовый, торит – магмогенный акцессорный минерал гранитоидов. Фергюсонит нередко встречается в составе пегматитов западной части Алтае-Саянской складчатой области [18, 19]. В отдельных случаях формирование иттриевых и редкоземельных минералов на постмагматической стадии кристаллизации связывается с фракционированием из расплава лёгких лантаноидов и Y [20]. Особенность алейско-змеиногорских гранитоидов заключается в отсутствии их пегматитов, собственно пегматитовый этап, как следующий за магматическим, не получил здесь развития. Как уже отмечалось [13], акцессорные минералы, присущие гранитным пегматитам, встречаются в апикальных и краевых частях гранитоидных тел. Вероятно, связано это с тем, что на завершающей стадии формирования гранитных интрузивов накапливался остаточный раствор, обогащённый Nb, Ti, Y, TR и другими элементами, обуславливающими минерализацию последующих пегматитовых образований, но, не имея возможности реализоваться в пегматитовом процессе, такие растворы в апикальных и апикально-краевых частях интрузи-

вов обусловили интенсивный автотометасоматоз, в результате которого типичные пегматитовые минералы (ильменорутит, скандистый ферроколумбит [9], уранториевый редкоземельный ксенотим [13]) сформировались в гранитоидных телах. Появление в гранитах акцессорных фергусонита, приорита, торианита, ксенотима, монацита обусловлено такой же автотометасоматической переработкой апикальных и краевых частей интрузива растворами, насыщенными пегматофильными элементами.

Описываемые акцессории обнаружены только в одной пробе лейкогранитов Новониколаевского массива и именно на участке, где проявилось своеобразное взаимоотношение гранитоидных тел нескольких фаз внедрения (рис. 1). Основной объём пород здесь представлен лейкоплагиогранитами III интрузивной фазы, в их центральной части расположен округлый шток изучаемых лейкогранитов IV фазы, внутри которого находится линзовидное тело калиевых лейкогранитов завершающей фазы становления комплекса. Такое взаиморасположение указывает на существование здесь подводящего канала внедрения расплавов

нескольких последовательных фаз. Более того, данный канал продолжал действовать в средне-позднекаменноугольное время, когда здесь же внедрились небольшие тела ранних фаз волчихинского комплекса. Именно с приуроченностью к долгоживущему интрузивному каналу связано появление только в этих лейкогранитовых телах редких акцессорных минералов, обогащённых редкоземельными, радиоактивными элементами. Распределение редких элементов в породах IV фазы алейско-змеиногорского комплекса показывает в изучаемых лейкогранитах, приуроченных к данному подводящему каналу, превышение содержания большинства элементов-примесей (кроме V, Sr, Cs, Ba и лёгких лантаноидов) над средними значениями во всех лейкогранитах данной фазы. Канал поступления гранитоидных расплавов из первичного очага был максимально благоприятен для поступления ниобия, титана, редкоземельных, радиоактивных элементов, которые в дальнейшем сформировали уникальную ассоциацию акцессорных минералов в данном теле новониколаевских лейкогранитов четвертой фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туркин Ю.А., Новоселов К.Л. Петролого-геохимические особенности девонских гранитоидов северо-западной части Рудного Алтая // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 5–15.
2. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet / Wang RuCheng, Wu FuYuan, Xie Lei, Liu XiaoChi, Wang JiaMin, Yang Lei, Lai Wen, Liu Chen // Science China. Earth Sciences. – 2017. – V. 60. – № 9. – P. 1655–1663.
3. Petrological and geochemical characteristics of REE mineralization in the A-type French Creek Granite, New Zealand / R. Morgenstern, R.E. Turnbull, P.A. Ashwell, T.W. Horton, Ch. Oze // Mineralium Deposita. – 2019. – V. 54. – P. 935–958.
4. Фергусонит-(Y) и продукты его изменения в гранитном пегматите жилы Береговой Зенковского массива на Урале / В.И. Попова, Е.И. Чуринов, И.А. Блинов, В.А. Губин // Новые данные о минералах. – 2012. – № 47. – С. 47–55.
5. Минералы (справочник). Т. II. Вып. 3. Сложные окислы, титанаты, ниобаты, танталаты, антимонаты, гидроокислы / под ред. Ф.В. Чухрова, Э.М. Бонштетт-Куплетской. – М.: Наука, 1967. – С. 251–260.
6. Hydrothermal genesis of Nb mineralization in the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit (China): Implicated by petrography and geochemistry of Nb-bearing minerals / Shang Liua, Lin Dinga, Hong-Rui Fanc, Kui-Feng Yangc, Yan-Wen Tangf, Hai-Dong Shec, Meizhen Hao // Precambrian Research. – 2020. – V. 348. – P. 1–24.
7. Enrichment of REE and HFSE during the magmatic-hydrothermal evolution of the Baerzhe alkaline granite, NE China: Implications for rare metal mineralization / Wu-Bin Yang, He-Cai Niua, Ning-Bo Li, Pete Hollings, Shannon Zurevinski, Chang-Ming Xinga // Lithos. – 2020. – V. 358–359. – P. 1–20.
8. Макагонов Е.П., Муфтахов В.А. Редкоземельно-редкометалльная минерализация в поздних гранитах сыростанского массива (Южный Урал) // Литосфера. – 2015. – № 2. – С. 121–132.
9. Солодов Н.А., Семенов Е.И., Бурков В.В. Геологический справочник по тяжелым литофильным редким металлам / под ред. Н.П. Лаврова. – М.: Недра, 1987. – 438 с.
10. Iwashiroite-(Y), YTaO₄, a new mineral from Suishoyama, Kawamata Town, Fukushima Prefecture, Japan / H. Hori, T. Kobayashi, R. Miyawaki, S. Matsubara, K. Yokoyama, M. Shimizu // Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. – 2006. – V. 101. – P. 170–177.
11. Huraiová M., Konečný P., Hurai V. Niobium mineralogy of Pliocene A1-type granite of the Carpathian Back-Arc Basin, Central Europe // Minerals. – 2019. – V. 9. – № 488. – P. 1–16.
12. Новые находки редких минералов в пегматитах Вишнёвых гор на Южном Урале / В.И. Попова, В.А. Попов, И.А. Блинов, В.А. Котляров, А.В. Касаткин, Р. Шкода, С.М. Лебедева // Минералогия. – 2019. – Т. 5. – № 1. – С. 3–14.
13. Новоселов К.Л. Акцессорные ниобий-танталовые минералы Алейского гранитного массива (СЗ Рудного Алтая) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 38–44.
14. Рафиков Я.М., Юсупов Р.Г. Продуктивность и рудоносность пород гранит-лейкогранитового комплекса на редкие земли, иттрий (чаткало-кураминская континентальная окраина) // Отечественная геология. – 2013. – № 1. – С. 59–69.
15. Бетехтин А.Г. Минералогия. — М.: Госгеолгиздат, 1950. – 956 с.
16. Highly fractionated Himalayan leucogranites and associated rare-metal mineralization / Fu-Yuan Wu, Xiao-Chi Liu, Zhi-Chao Liu, Ru-Cheng Wang, Lei Xie, Jia-Min Wang, Wei-Qiang Ji, Lei Yang, Chen Liuc, Gautam Prashad Khanal, Shao-Xiong He // Lithos. – 2020. – V. 352–353. – P. 1–24.
17. Magmatic evolution and W-Sn-U-Nb-Ta mineralization of the Mesozoic Jiulongnao granitic complex, Nanling Range, South China / Na-Xin Guoa, Zheng Zhaoa, Jian-Feng Gaob, Wei Chenc, Deng-Hong Wangd, Yu-Chuan Chena // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 94. – P. 414–434.
18. Гусев А.И. Типизация пегматитовой минерализации Алтая // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 3. – С. 93–97.
19. Гусев А.И. Редкометалльные пегматиты западной части Алтае-Саянской складчатой области // Известия АО РГО. – 2015. – № 3 (38). – С. 16–24.
20. Редкоземельные минералы в породах Катугинского редкометалльного месторождения (восточное Забайкалье): поведение лантаноидов и Y при кристаллизации насыщенного фтором агпаитового расплава / В.Б. Савельева, Е.П. Базарова, Е.А. Хромова, С.В. Канакин // Записки Российского минералогического общества. – 2017. – Т. 146. – № 4. – С. 1–21.

Поступила 09.06.2021 г.

Информация об авторах

Новоселов К.Л., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 549:553.493.66(571.151)

YTTRIUM RARE-EARTH AND RARE-METAL ACCESSORY MINERALS OF LEUCOGRANITES IN THE ALEYSK ZMEINOGORSK COMPLEX (RUDNY ALTAY)

Konstantin L. Novoselov,
novoselov@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, Russia, 634050.

The relevance and aim. The study of granitoids confined to the Aleysk Zmeinogorsk complex for the first time revealed the presence of rare accessory minerals of yttrium (priorite, fergusonite) in a sample spot of leucogranites of phase IV. According to the available data, these minerals are of pegmatitic, pneumatolith-hydrothermal and metasomatic origin, however their development at the magmatic stage is considered less common. The aim of the study is to reveal the origin of priorite and fergusonite in the Aleysk Zmeinogorsk leucogranites, as well as to explain the presence of yttrium and accessory rare-earth elements within the only intrusive zone.

Research methods involve conventional mineralogical and petrographical methods, identification of accessory minerals and analysis of their composition using crushed samples; analytical studies were performed on an electronic scanning microscope JSM–6510LV (Jeol Ltd) fitted with an energy dispersive spectrometer INCA Energy 350+ in a laboratory of the Geology and Mineralogy Institute of the Siberian branch of the Russian Academy of Science (Novosibirsk) and X-ray fluorescence microscope (the Division for Geology, School of Earth Science and Engineering, TPU).

Results. In line with earlier discovered yttrium (xenotime), rare-earth monazite, niobates (columbite, ilmenorutile), rare accessory minerals of yttrium-niobium and yttrium-titanium composition were identified in granitoids of the Aleysk Zmeinogorsk complex.

Conclusions. The presence of priorite and fergusonite in a stock of leucogranites of IV intrusive phase allows the assumption that it was formed due to continuous inflow of melting rocks during successive intrusive phases. The inflow of intrusive material from the initial magma chamber served as a favorable condition for the rocks to be saturated with yttrium, rare-earth elements, and rare metals. The accessory minerals of corresponding composition occurred at the final stage of intrusion formation as a result of autometasomatism of its apical parts and selvages.

Key words:

Rudny Altay, granitoids, accessory minerals, priorite, fergusonite, xenotime, thorite, thorianite, monazite.

REFERENCES

1. Turkin Yu.A., Novoselov K.L. Petrological and geochemical features of Devonian granitoids in north-west part of Rudny Altai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 5–15. In Rus.
2. Wang RuCheng, Wu FuYuan, Xie Lei, Liu XiaoChi, Wang JiaMin, Yang Lei, Lai Wen & Liu Chen. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet. *Science China. Earth Sciences*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 1655–1663.
3. Morgenstern R., Turnbull R.E., Ashwell P.A., Horton T.W., Oze Ch. Petrological and geochemical characteristics of REE mineralization in the A-type French Creek Granite, New Zealand. *Mineralium Deposita*, 2019, vol. 54, pp. 935–958.
4. Popova V.I., Churin E.I., Blinov I.A., Gubin V.A. Fergusonite-(Y) and its alteration products in granitic pegmatite of Beregovaya vein from Zenkovsky massive in the Urals. *New mineral data*, 2012, no. 47, pp. 47–55. In Rus.
5. *Mineraly. Spravochnik* [Minerals. Reference book]. Slozhnye oksidy, titanaty, niobaty, tantalaty, antimonaty, gidrooksidy [Complex oxides, titanates, niobates, tantalates, antimonates, hydrous oxides]. Eds. F.V. Chukhrov, E.M. Bonshtedt-Kupletskaya. Moscow, Nauka Publ., 1967. Vol. II, Iss. 3, pp. 251–260.
6. Shang Liua, Lin Dinga, Hong-Rui Fanc, Kui-Feng Yangc, Yan-Wen Tangf, Hai-Dong Shec, Mei-zhen Hao. Hydrothermal genesis of Nb mineralization in the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit (China): Implicated by petrography and geochemistry of Nb-bearing minerals. *Precambrian Research*, 2020, vol. 348, pp. 1–24.
7. Wu-Bin Yang, He-Cai Niua, Ning-Bo Li, Pete Hollings, Shannon Zurevinski, Chang-Ming Xinga. Enrichment of REE and HFSE during the magmatic-hydrothermal evolution of the Baerzhe alkaline granite, NE China: Implications for rare metal mineralization. *Lithos*, 2020, vol. 358–359, pp. 1–20.
8. Makagonov E.P., Muftakhov V.A. Rare-earth and rare-metal mineralization in late granite of syrostan massif (Southern Urals). *Lithosphere*, 2015, no. 2, pp. 121–132. In Rus.
9. Solodov N.A., Semenov E.I., Burkov V.V. *Geologicheskii spravochnik po tyazhelym litofilnym redkim metallam* [Geological reference book on heavy lithophile rare metals]. Ed. by N.P. Lavrov. Moscow, Nedra Publ., 1987. 438 p.
10. Hori H., Kobayashi T., Miyawaki R., Matsubara S., Yokoyama K., Shimizu M. Iwashiroite-(Y), YTaO₄, a new mineral from Suishoyama, Kawamata Town, Fukushima Prefecture, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2006, vol. 101, pp. 170–177.
11. Huraiová M., Konečný P., Hurai V. Niobium mineralogy of Pliocene A₁-type granite of the Carpathian Back-Arc Basin, Central Europe. *Minerals*, 2019, vol. 9, no. 488, pp. 1–16.
12. Popova V.I., Popov V.A., Blinov I.A., Kotlyarov V.A., Kasatkin A.V., Shkoda R., Lebedeva S.M. New findings of rare minerals in pegmatites of Vishnevye Mountains in the Southern Urals. *Mineralogy*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 3–14. In Rus.
13. Novoselov K.L. Accessory niobium-tantalum minerals of the Aleysk granite massif (N-W Rudny Altay area). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 38–44. In Rus.
14. Rafikov Ya.M., Yusupov R.G. Productivity and ore-bearing of granite-leucogranite complex in the rare earths, yttrium (chatkalkuramin continental boardland). *National Geology*, 2013, no. 1, pp. 59–69. In Rus.
15. Betekhtin A.G. *Mineralogiya* [Mineralogy]. Moscow, Gosgeolizdat Publ., 1950. 956 p.
16. Fu-Yuan Wu, Xiao-Chi Liu, Zhi-Chao Liu, Ru-Cheng Wang, Lei Xie, Jia-Min Wang, Wei-Qiang Ji, Lei Yang, Chen Liuc, Gautam Prashad Khanal, Shao-Xiong He. Highly fractionated Himalayan leucogranites and associated rare-metal mineralization. *Lithos*, 2020, vol. 352–353, pp. 1–24.
17. Na-Xin Guoa, Zheng Zhaoa, Jian-Feng Gaob, Wei Chenc, Deng-Hong Wanga, Yu-Chuan Chena. Magmatic evolution and W-Sn-U-Nb-Ta mineralization of the Mesozoic Jiulongnao granitic complex, Nanling Range, South China. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 94, pp. 414–434.
18. Gusev A.I. Typezation of pegmatite mineralization of Altai. *Modern high technologies*, 2014, no. 3, pp. 93–97. In Rus.

19. Gusev A.I. Rare earth elements pegmatites of west part Altai-Sajan folded area. *Izvestiya AO RGO*, 2015, no. 3(38), pp. 16–24. In Rus.
20. Savelyeva V.B., Bazarova E.P., Khromova E.A., Kanakin S.V. Redkometalnye mineraly v porodakh Kagutinskogo redkometal'nogo mestorozhdeniya [Rare minerals in the rocks of the

Katugin rare metal deposit, east Transbaikalia: Behavior of lanthanides and Y during crystallization of an F-saturated apatitic melt]. *Geology of Ore Deposits*, 2017, vol. 146, no. 4, pp. 1–21. In Rus.

Received: 9 June 2021.

Information about the authors

Konstantin L. Novoselov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 624.131

ОЦЕНКА СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ПОС. САБЕТТА (ПОЛУОСТРОВ ЯМАЛ)

Строкова Людмила Александровна¹,
sla@tpu.ru

Епифанова Екатерина Александровна¹,
epifanovaeva@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Активное освоение полуострова Ямал приводит к трансформации геологической среды, часто сопровождающейся активизацией природных и техноприродных процессов. Многочисленные исследования посвящены описанию геокриологических процессов этого региона. В данной работе внимание уделяется особому слабоизученному процессу – суффозии, на основе изучения гранулометрического состава песков, широко распространенных на территории Ямала.

Целью работы является оценка суффозионной устойчивости грунтов и определение пространственных закономерностей распространения суффозионно-опасных грунтов в районе населенного пункта Сабетта.

Методы. На первом этапе в ArcGIS составлены тематические карты факторов, обуславливающих развитие суффозии. Было выбрано четыре фактора: уклон, кривизна поверхности, экспозиция склонов, геологическое строение территории. На втором этапе проведена обработка данных по гранулометрическому составу грунтов. Были определены: степень неоднородности гранулометрического состава, максимальный размер суффозионных частиц, степень суффозионности грунтов основных стратиграфо-генетических комплексов, распространенных в районе. Оценка суффозионности песчаных грунтов выполнена по двум методикам. Составлена инвентаризационная карта проявлений суффозионно-опасных песков. Заключительным этапом стало составление прогнозной карты восприимчивости территории к суффозии на основе изучения пространственных закономерностей распределения проявлений с учетом веса обуславливающих ее факторов.

Результаты работы и область их применения. Наиболее предрасположены к суффозии зоны развития современных аллювиальных отложений, средней восприимчивостью характеризуется территория второй надпойменной террасы и с уклонами поверхности более 12 градусов, наименее предрасположена к суффозии территория развития современных аллювиально-морских отложений. Полученные данные по степени суффозионности песчаных грунтов рекомендуется использовать при проектировании инженерных сооружений. Используемую в работе технологию построения карт восприимчивости к суффозии рекомендуется опробовать при изучении геокриологических процессов, в первую очередь, бугров пучения.

Ключевые слова:

Суффозия, опасность, гранулометрический состав, пески, степень неоднородности, восприимчивость, картографирование, метод соотношения частотностей.

Введение

Исследуемая площадка находится за полярным кругом и связана с освоением Южно-Тамбейского месторождения, производством сжиженного природного газа и его транспортировкой морским путем [1–3]. На территории широко развиты песчаные грунты, поэтому встал вопрос о наличии здесь такого процесса, как суффозия. В своей монографии В.П. Хоменко [4] приводит всеобъемлющую характеристику процесса суффозии как одного из наименее изученных опасных экзогенных геологических процессов. Автором под процессом суффозии понимает «разрушение и вынос потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс дисперсных и цементированных обломочных горных пород, в том числе слагающих структурные элементы скальных массивов» [4. С. 9]. Первое определение термина «суффозия», под которым понималось «механическое разрушение и растворение водопроницаемых пород подземными водами, сопровождающиеся выносом минерального вещества из этих пород», приводит А.П. Павлов [5]. В настоящее время существует более 15 разных определений суффозии [6–17], которые можно разделить на две группы: включающие или исключаящие процесс растворения твердых компонентов горных пород.

Эту двусмысленность можно объяснить как сложностью самого процесса суффозии, так и недостаточностью всеобъемлющих исследований. Часто исследования сосредоточены лишь на одной стороне явления суффозии: либо химической, либо механической.

Суффозия приводит к появлению поверхностных и подземных эрозионных форм – проседанию вышележащей толщи и образованию западин – суффозионных воронок, блюдц, впадин, полостей, а также аккумулятивных форм – конусов выноса. Другим следствием суффозии может быть изменение гранулометрического состава пород как подверженных суффозии, так и являющихся фильтром для вынесенного материала, ухудшение прочностных и деформационных свойств [18–30].

Наиболее часто суффозия наблюдается на территориях распространения лёссов и лёссовидных суглинков, в нижних частях склонов речных долин, часто по ходам роющих животных. Одним из необходимых условий суффозии является наличие в породе как крупных частиц, образующих неподвижный каркас, так и вымываемых мелких. Вынос начинается лишь с определенных значений напора воды, ниже которых происходит только фильтрация [31–45].

Суффозионные провалы имеют как природное, так и техногенное происхождение. Большое значение имеет антропогенное воздействие, а именно сброс сточных вод, что усиливает развитие данного процесса. Техногенная суффозия встречается в местах утечек из водопроводных и канализационных сетей, барражного эффекта [45–55].

В соответствии с требованиями Стандарта комплексного развития территорий, отраслевых нормативных документов по инженерно-геологическим изысканиям для строительства [56–58] необходимо изучение опасных геологических и техноприродных процессов, к которым относится и суффозия, составление прогноза их развития и активизации, разработка рекомендаций для принятия решений по инженерной защите территории от опасных процессов.

Целью данной работы является определение пространственных закономерностей распространения суффозионно-опасных грунтов и построение прогнозной карты восприимчивости территории к проявлению суффозии.

Характеристика инженерно-геологических условий территории

Участок расположен за полярным кругом в границах полуострова Ямал и северной части Обской губы в зоне сплошной многолетней мерзлоты. Среднегодовая температура воздуха в районе минус 10,6 °С. Мощность мерзлой толщи 50...360 м. Глубина оттаивания почвы варьирует от 0,4 м для болот до 1,5 м на песчаных косах. Сильные ветры (более 15 м/с) регистрируются на протяжении всего года, чаще в зимний период. Количество осадков 314 мм/год, причём 40...46 % выпадает в виде снега или града. Часто бывают метели (в среднем более 100 дней в году).

В *тектоническом* отношении в основании Ямала залегает плита эпипалеозойской платформы с мезокайнозойским осадочным чехлом. Выступов кристаллического фундамента не наблюдается [59, 60].

В *геологическом* строении территории принимают участие палеозойские и мезозойско-кайнозойские осадочные породы, перекрытые четвертичными дисперсными грунтами мощностью 250...300 м. Голоценовые отложения представлены эоловыми, озерными, биогенными, аллювиальными и морскими разностями, плейстоценовые – морскими, лагунными, аллювиальными и ледниковыми.

В *геоморфологическом* отношении территория представляет плоскую низинную равнину с высотными отметками от 0 до 25 м с выделением второй террасы (14...20 м); первой озерно-аллювиальной террасой (1...7 м); современной лагунно-морской лайды (0...5 м), в пределах которой различают: самую низкую часть – заболоченную впадину между первой террасой и литоральной полосой шириной 1...2 км, песчаную литоральную полосу в виде гребня шириной 200–800 м и намывные косы и пляжи, современные аллювиальные отложения рек (рис. 1).

Среди экзогенных процессов преобладают криогенные процессы (солифлюкция, пучение, морозобойное растрескивание, нивация, термоэрозия, тер-

мокарст), подчиненное значение имеют литоральные, русловые и эоловые процессы.

Мерзлотные условия. Территория входит в Восточно-Ямальскую геокриологическую область, расположенную в северной части Западно-Сибирской плиты. Общие геокриологические условия характеризуются распространением ММП сливающегося типа. Мощность мерзлой толщи, определяемая по наличию текстуробразующего льда, составляет около 360 м. В пределах мелководья вдоль берега Обской губы существуют мягкие геокриологические условия, обусловленные тепляющим влиянием р. Оби. Установлено, что до глубины 50 м под Обской губой существует талик с почти вертикальной боковой границей.

Среднегодовые температуры пород на глубине нулевых годовых колебаний 8...15 м из-за неравномерного накопления снега, влияния поверхностных вод на различные элементы рельефа, а также результатов хозяйственной деятельности достигают значений минус 3...7 °С. Наиболее высокие температуры – минус 3...4 °С – отмечаются на пляже, косах и в прибрежной полосе отливов-приливов Обской губы. На прирусловом валу температуры грунтов имеют значения минус 4...6 °С. Самые низкие значения температур отмечаются на неравномерно дренированных пойменных участках и составляют минус 5...7 °С.

Значительная засоленность отложений морского генезиса способствует формированию в толще многолетнемерзлых грунтов талых прослоев (слоистой мерзлоты). Наиболее ярко криогенная слоистость выражена в зоне распространения криопеггов, где включающие криопеги грунты при естественной температуре минус 4... 7 °С находятся в талом состоянии. Расчетная температура начала замерзания этих грунтов, характеризующихся высокой засоленностью, варьирует от минус 6 до минус 10 °С, что существенно ниже их естественной температуры.

На территории практически повсеместно развит сезонно-талый слой (СТС). Мощность СТС изменяется от 0,5 до 2 м. Наименьшая мощность характерна для торфяников плоских заболоченных поверхностей междуречий. Для супесчано-суглинистых грунтов зоны сезонного оттаивания характерна высокая тиксотропность, а при промерзании – неравномерное площадное пучение. Наибольшими мощностями СТС характеризуются дренированные поверхности, где грунты СТС представлены песками и супесями, реже – суглинками с пониженной влажностью, а также косы и прирусловые валы.

В *гидрогеологическом* отношении район расположен в пределах Западносибирского артезианского бассейна, состоящего из верхней и нижней гидрогеологических зон, разделенных мощным туронско-эоценовым водоупором.

В структурно-гидрогеологическом плане исследуемая территория относится к Прикарскому бассейну стока подземных вод. По соотношению с многолетнемерзлыми породами (ММП) и положению в изучаемом разрезе до глубины 25 м выделяются надмерзлотные и внутримерзлотные воды.

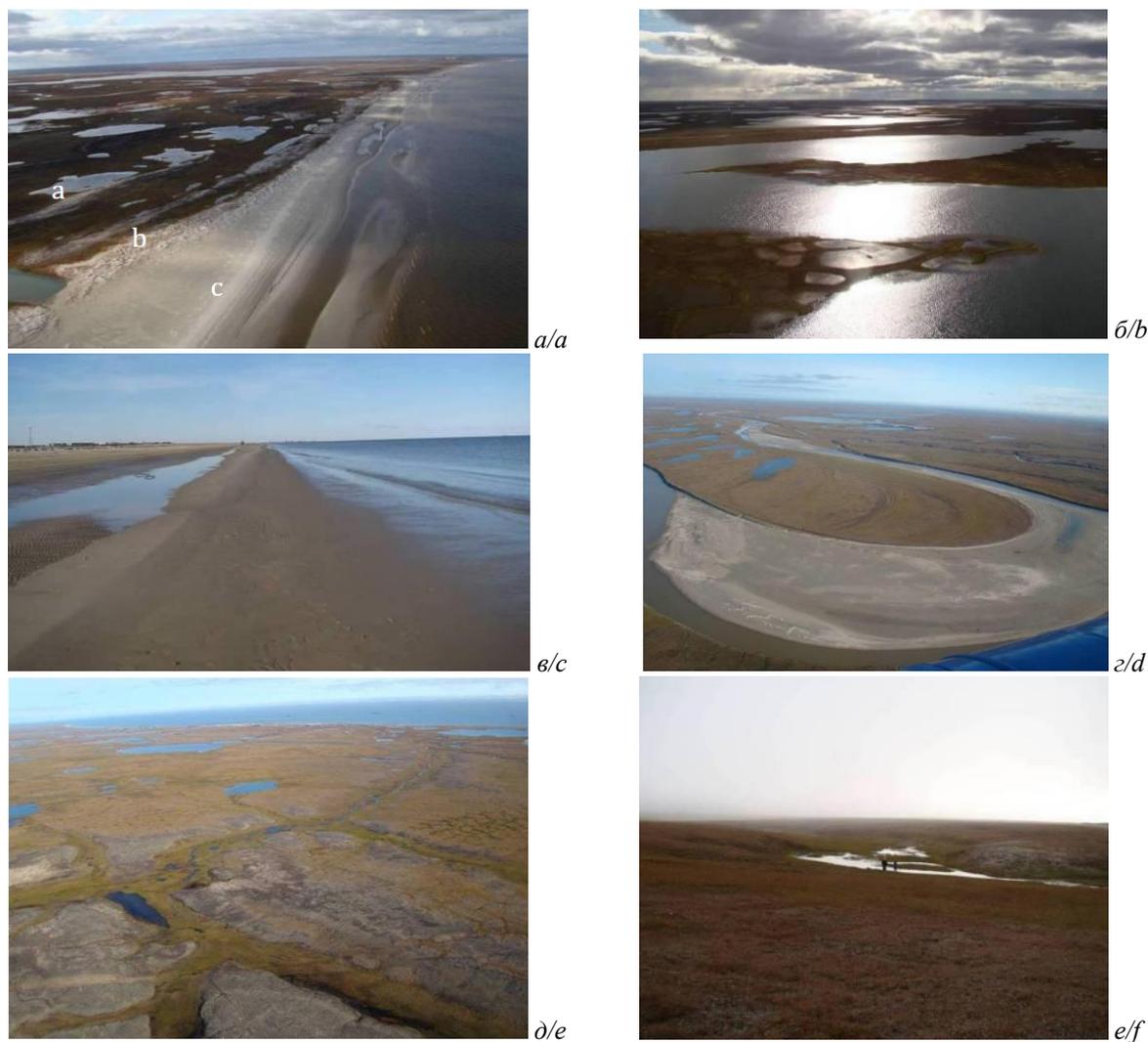


Рис. 1. Формы рельефа: а) лагуно-морская лайда (а – обводненная поверхность; б – литоральная полоса; с – косы и пляжи); б) обводненная поверхность лайды (зона, подверженная действию приливов); в) пляжи Обской губы вблизи п. Сабетта; г) пойма; д) современная аллювиально-морская терраса; е) вторая аллювиальная терраса и долина малой реки [3]

Fig. 1. Landforms: a) lagoon-sea laida (a – watered surface; b – littoral strip; c – spit and beaches); б) watered surface of laida (zone exposed to tides); c) beaches of the Ob Bay near the settlement of Sabetta; d) floodplain; e) Holocene alluvial-sea terrace; f) second alluvial terrace and the valley of the small river [3]

Надмерзлотные воды сезонноталого слоя залегают на глубине 0,2...1,5 м от дневной поверхности, непосредственно над кровлей мерзлой толщи. Мощность водонасыщенного слоя не превышает 0,1...0,4 м. Основной источник питания надмерзлотных вод – летние атмосферные осадки и влага за счет таяния подземных льдов. Они находятся в безнапорном, часто застойном состоянии. Разгрузка надмерзлотных вод происходит во всех понижениях рельефа и приводит к значительному обводнению и заболачиванию депрессий рельефа. При зимнем промерзании эти воды приобретают напор, происходит криогенное пучение грунтов, и формируются бугры пучения. Воды этого слоя нейтральные, слабосоленоватые, очень жесткие, по составу сульфатно-хлоридные магниевые.

Засоленные отложения часто содержат линзы незамерзших отрицательно-температурных рассолов – криопегов. Высокоминерализованные воды криопе-

гов очень агрессивны по отношению к металлическим, бетонным и железобетонным конструкциям. Криопеги препятствуют смерзанию свай с грунтом и существенно снижают их несущую способность. Присутствие линз незамерзшей воды в толще ММП оказывает влияние на динамику температурного режима грунтов и их физико-механические свойства. Криопеги в толще засоленных ММП Ямала расположены на различной глубине, в виде линз различной мощности. В разрезе могут быть встречены несколько линз, различающиеся напорами и минерализацией воды, что свидетельствует об отсутствии гидравлической связи между ними.

В приурезовой зоне, на осушке, встречены межмерзлотные воды, залегающие на глубине 4,0–6,8 м. Это внутримерзлотные линзы и слои минерализованных подземных вод (криопегов).

Методика выполнения работ

Определение пространственных закономерностей распространения геологических опасностей выполнено по технологии построения карт восприимчивости (предрасположенности) территории к развитию экзогенных геологических процессов (ЭГП), описанной в работах [25–37]. Построение карт восприимчивости осуществляется в следующей последовательности. Вначале выполняется подготовка тематических слоев, таких как: карта проявления ЭГП (инвентаризационная карта); количества выпадающих осадков; литологии; геоморфологии; гидрогеологии; цифровой модели рельефа, с которой можно установить абсолютные отметки рельефа, угол склона, экспозиции и других факторов, обуславливающих возникновение ЭГП и интенсивности их развития. Поскольку значимость каждого фактора в зависимости от региональных геологических, морфометрических, климатических, техногенных условий в общей оценке разная, необходимо выполнять оценку веса каждого фактора. Такая оценка выполняется с помощью различных статистических и детерминированных подходов. В данной работе для определения веса каждого фактора использовался метод соотношения частотностей (frequency ratio, FR). Далее тематические карты умножаются на соответствующие веса каждого фактора и объединяются в одну средствами наложения, затем карта дифференцируется на категории с разной степенью восприимчивости в световой раскраске.

Результаты

Подготовка тематических карт

Для оценки суффозии была подготовлена серия тематических карт факторов их обуславливающих. Исходными данными для картографических построений послужили: цифровая модель рельефа (ЦМР) – снимок Landsat 8 (LC08_L1TP_164010_20190731_20200827_02_T1_refl.tif, рис. 2, а), загруженный с сайта USGS Earthexplorer, и производные из нее карты: уклонов, кривизны поверхности и экспозиции склонов, построенные С ПОМОЩЬЮ «ArcGIS Desktop»; карты четвертичных образований листов R-42 и R-43, из фондов Всероссийского научно-исследовательского геологического института имени А. П. Карпинского [59, 60], карта распространения суффозионных песков, построенная авторами.

Стратиграфо-генетические комплексы пород – один из наиболее важных параметров при изучении опасных геологических процессов, поскольку различные грунты имеют разную степень устойчивости к их развитию. Слой оцифрован по карте четвертичных образований листов R-42 и R43 масштаба 1:1000000 (рис. 2, б).

Кривизна склона (рис. 2, в). Значения кривизны характеризуют морфологию откосов. Кривизна влияет на гидрологическое состояние почвенного покрова. Потенциально после выпадения осадков почвенный покров на вогнутом склоне может содержать больше воды и удерживать ее дольше, чем на выпуклом склоне.

Уклон склона (рис. 2, г) является основным параметром при оценке территории. Градиент уклона контролирует скорость подземного стока после выпадения атмосферных осадков, скорость поверхностного стока и содержание влаги в грунтах. По мере увеличения уклона напряжение сдвига в рыхлом почвенном покрове обычно также увеличивается.

Экспозиция склона (рис. 2, д) определяет такие параметры, как воздействие солнечного света, осушающие ветры, осадки (степень насыщения) и неоднородности растительного покрова, которые могут влиять на активизацию ЭГП [25–27].

Карта проявлений суффозии (рис. 2, е). В основе этого слоя использовались данные расчетов по суффозионной опасности песков.

Оценка суффозионной опасности песков

Для оценки суффозионной устойчивости дисперсных несвязных грунтов были собраны данные по гранулометрическому анализу песков из 70 скважин, пробуренных под строительство различных сооружений. Местоположение скважин показано на рис. 2, е. В разрезах встречено 95 слоев дисперсных несвязных грунтов, принадлежащих к четырем стратиграфо-генетическим комплексам (СГК): современным аллювиальным отложениям пойменных террас и русла aIV, современным аллювиально-морским (дельтовым, пляжево-эстуарным) отложениям amH, верхнечетвертичным отложениям первой a¹III и второй a²III надпойменных террас.

Многие исследователи (А.М. Дранников, В.С. Истомина, В.В. Пендин, С.В. Смолич и др.) считают, что суффозия развивается в породах, у которых степень неоднородности (Cu) гранулометрического состава больше 20, а гидравлический градиент больше 1. Проверка этого условия по выбранным площадкам показала, что среди 95 разновидностей песчаных грунтов не встречено слоев, в которых Cu>20. Для большей объективности было решено использовать и другие методы оценки суффозионности.

Вопросу оценки суффозионной устойчивости дисперсных несвязных грунтов много внимания уделялось во ВНИИГ имени В.Е. Веденеева [61–63]. В институте получены существенные практические рекомендации в области строительства гидротехнических сооружений, два из которых мы использовали при оценке суффозионной устойчивости несвязных грунтов.

Первый способ. Согласно руководству [61], без ухудшения прочности грунта могут быть вынесены самые мелкие частицы, количество которых не превышает 3–5 % по массе, т. е. проверка суффозионной устойчивости песков осуществляется по условию:

$$d_{\max}^{ci} \leq d_3 \dots d_5, \\ d_{\max}^{ci} = 0,77d_{\max}^0,$$

где d_{\max}^{ci} – максимальный размер частиц, которые могут быть вынесены фильтрационным потоком в результате суффозии; d_{\max}^0 – диаметр максимальных фильтрационных пор в грунте, определенный по формуле М.П. Павлича [14]:

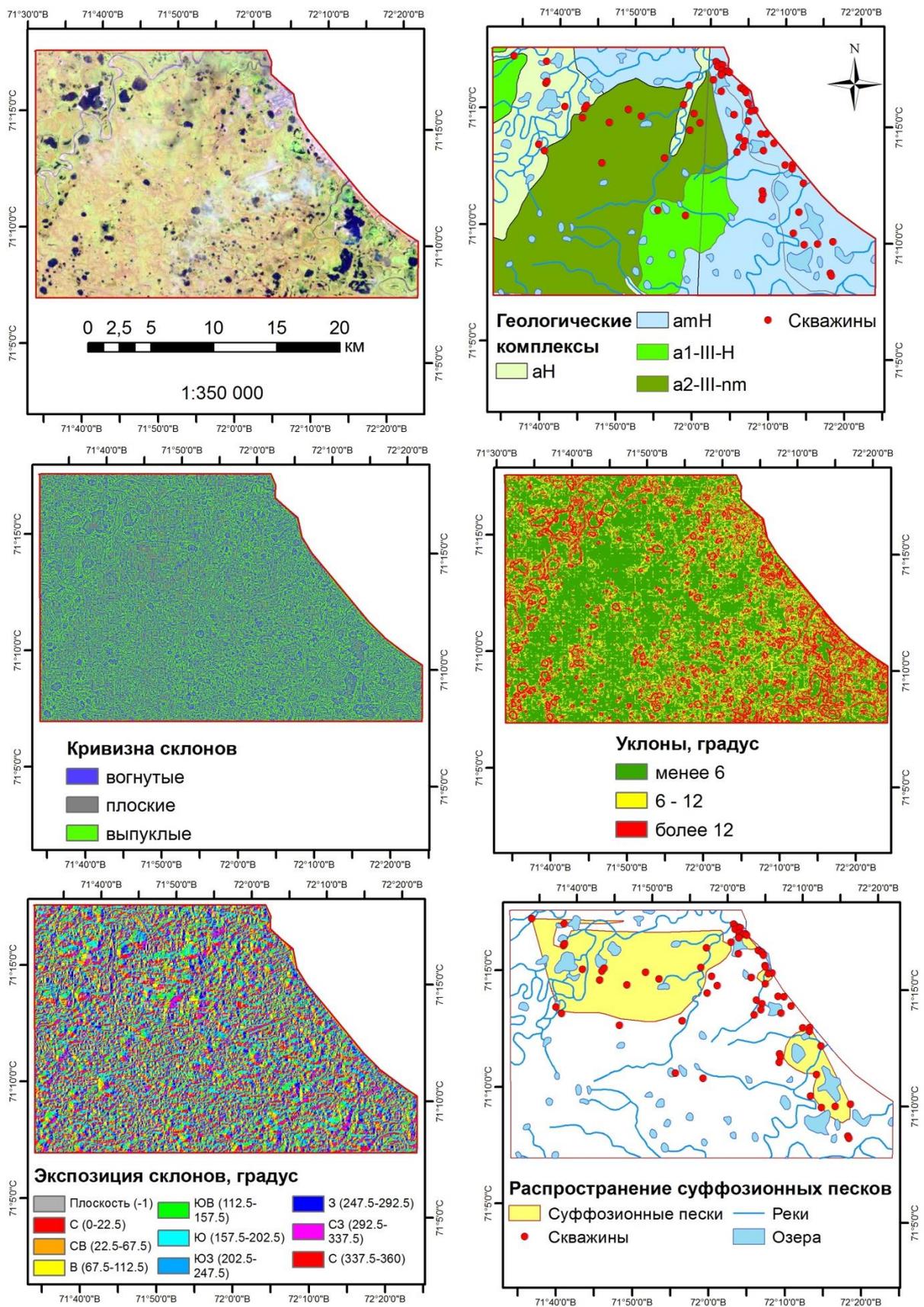


Рис. 2. Исходные слои для оценки суффозии
 Fig. 2. Data layers for suffusion assessment

$$d_{\max}^0 = 0,455k\sqrt{C_u}ed_{17},$$

где k – коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте или коэффициент локальности суффозии:

$$k = 1 + 0,05 C_u,$$

$$C_u = d_{60}/d_{10},$$

где C_u – степень неоднородности грунта; $d_3, d_5, d_{10}, d_{17}, d_{60}$ – диаметр частиц соответственно 3, 5, 10, 17, 60 процентной обеспеченности (диаметры частиц, меньше которых в данном грунте содержится (по массе) соответственно 3, 5, 10, 17, 60 % частиц); e – коэффициент пористости.

Если условие не выполняется, то грунт считается суффозионным, из такого грунта могут выноситься все частицы с размером меньше или равным d_{\max}^{ci} . Максимально возможный процент выноса суффозионных частиц можно определить по значению d_{\max}^{ci} на интегральной кривой гранулометрического состава. С.В. Щербаковым [64] предложен еще один параметр – степень суффозионности λ_1 , который позволяет количественно оценивать интенсивность суффозионной опасности:

$$\lambda_1 = d_3 \dots d_5 - d_{\max}^{ci}.$$

Им предложено по значению λ_1 различать грунты: несуффозионные (<0), слабосуффозионные ($0 \dots 0,1$), среднесуффозионные ($0,1 \dots 0,2$), сильносуффозионные ($>0,2$). Проверка этого условия по выбранным площадкам показала, что среди 95 разновидностей песчаных грунтов встречен 91 слой, в котором $\lambda_1 > 0$, в т. ч. 80 – слабосуффозионных, 8 – среднесуффозионных и 3 – сильносуффозионных песков.

Таблица 1. Оценка суффозионной устойчивости песчаных грунтов

Table 1. Assessment of the suffosion stability of sandy soils

ГТК (количество определений) Genetic types and age (number)	Параметры Characteristics	d_3	d_5	d_{10}	d_{17}	d_{60}	e	C_u	d_{\max}^{ci}	λ_1	λ_2
amH (73)	Среднее/Mean	0,057	0,072	0,078	0,088	0,113	0,83	1,6	0,03	0,04	-2,23
	Стандартное отклонение Standard deviation	0,049	0,089	0,099	0,116	0,122	0,15	0,2	0,04	0,06	17,56
	Минимум/Minimum	0,008	0,008	0,009	0,010	0,024	0,60	1,1	0,00	-0,02	-82,14
	Максимум/Maximum	0,299	0,454	0,486	0,511	0,548	1,39	2,7	0,24	0,32	57,45
aH (10)	Среднее/Mean	0,083	0,149	0,171	0,227	0,276	0,98	1,6	0,10	0,05	2,29
	Стандартное отклонение Standard deviation	0,035	0,091	0,109	0,159	0,181	0,27	0,1	0,08	0,04	4,07
	Минимум/Minimum	0,039	0,039	0,041	0,044	0,068	0,69	1,5	0,01	0,02	-1,44
	Максимум/Maximum	0,120	0,237	0,310	0,417	0,478	1,40	1,9	0,20	0,12	10,46
a ² III _{nm} (10)	Среднее/Mean	0,050	0,061	0,066	0,078	0,104	0,90	1,6	0,03	0,03	0,18
	Стандартное отклонение Standard deviation	0,025	0,058	0,065	0,096	0,106	0,22	0,1	0,03	0,03	4,14
	Минимум/Minimum	0,035	0,036	0,038	0,042	0,065	0,63	1,5	0,01	0,01	-5,51
	Максимум/Maximum	0,121	0,225	0,249	0,350	0,405	1,31	1,8	0,11	0,12	7,27
a ¹ III (2)	Среднее/Mean	0,092	0,136	0,147	0,189	0,231	0,73	1,5	0,05	0,09	-1,34
	Стандартное отклонение Standard Deviation	0,064	0,126	0,138	0,194	0,223	0,16	0,1	0,05	0,08	1,47
	Минимум/Minimum	0,046	0,047	0,049	0,051	0,073	0,61	1,5	0,02	0,03	-2,38
	Максимум/Maximum	0,137	0,225	0,244	0,326	0,389	0,85	1,6	0,08	0,14	-0,30

Определение веса факторов

Для определения веса каждого фактора методом соотношения частотностей (frequency ratio, FR) вначале были посчитаны площади классов каждого фактора и их доли (%) от площади изучаемого участка.

Второй способ. Критерий суффозионности записывается условием [62]

$$\frac{d_5}{d_{17}} \geq K_2,$$

где

$$K_2 = (0,32 + 0,16 \cdot C_u) \cdot \sqrt[6]{C_u} \cdot \frac{e}{1-e}.$$

Грунт считается несуффозионным, если условие выполняется. А.В. Шилова [65] вводит дополнительный параметр интенсивности суффозионной опасности – степень суффозионности λ_2 :

$$\lambda_2 = \frac{d_5}{d_{17}} - K_2.$$

По значению λ_2 предложено различать грунты: несуффозионные (<0), слабосуффозионные ($0 \dots 100$), среднесуффозионные ($100 \dots 200$), сильносуффозионные (>200). Проверка этого условия по выбранным площадкам показала, что среди 95 разновидностей песчаных грунтов встречено 17 слабосуффозионных слоев, в которых $\lambda_2 > 0$. Расчет суффозионной устойчивости проводился по усредненным данным в пределах инженерно-геологических элементов, выделенных на площадках. Обобщенные значения результатов расчета суффозионной устойчивости представлены в табл. 1.

Из результатов, приведенных в табл. 1, следует, что встреченные в разрезах разности песчаных грунтов являются в основном слабосуффозионными. Карта распространения суффозионных песков построена по значению λ_2 с помощью инструмента интерполяции Spatial Analyst (ArcGIS), методом естественной окрестности (рис. 2, e).

Далее в пределах каждого класса определены площадь проявления ЭГП (в км² и %), а также отношение % площади проявления ЭГП к % площади самого класса (вес FR). Вес каждого фактора и их классов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты определения веса факторов развития суффозионной опасности грунтов

Table 2. Results of determining the weight of the suffosion-conditioning factors of soils

Слои данных Data layers	Классы Classes	% класса % of total area (a)	% суффозионных участков % of suffosion area (b)	Вес по FR (b/a) FR-weights
Кривизна склонов Curvature	вогнутые/concave	44,1	44,6	1,01
	плоские/flat	8,1	8,0	0,99
	выпуклые/convex	47,8	47,4	0,99
Экспозиция склонов, градус Slope aspect (degree)	плоские/flat	1,6	1,8	1,10
	С (0–22,5)	5,7	5,5	0,96
	СВ (22,5–67,5)	12,6	12,4	0,98
	В (67,5–112,5)	13,9	14,0	1,00
	ЮВ (112,5–157,5)	12,0	12,4	1,03
	Ю (157,5–202,2)	11,0	13,8	1,25
	ЮЗ (202,5–247,5)	11,9	11,7	0,98
	З (247,5–292,5)	14,0	12,4	0,89
	СЗ (292,5–337,5)	11,8	11,0	0,93
Уклон, градус Slope angle (degree)	С (337,5–360)	5,4	5,1	0,95
	< 6	59,2	56,5	0,95
	6–12	23,1	24,4	1,06
	>12	17,7	19,1	1,08
Стратиграфо-генетические комплексы (СГК) Genetic types and age	aН	15,1	28,1	1,86
	amН	35,1	29,2	0,83
	a ¹ III	11,3	0,72	0,06
	a ² III _{nm}	38,5	41,9	1,09

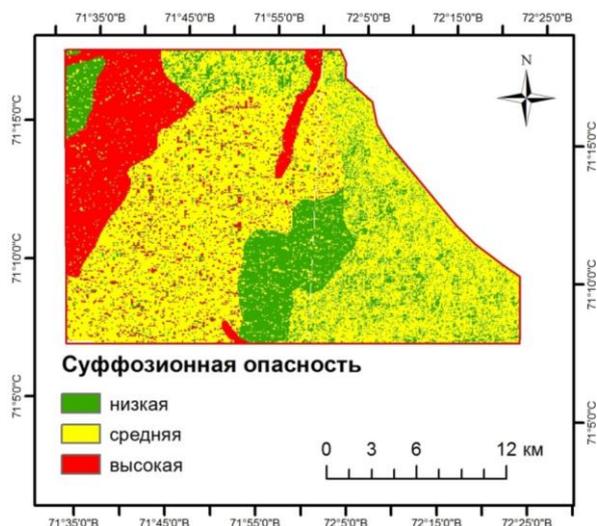


Рис. 3. Карта восприимчивости территории к суффозии с использованием FR метода

Fig. 3. Suffosion susceptibility map of the study area using the FR model

Как видно из табл. 2, самый высокий вес пораженности территории ЭГП (FR=1,86) имеет класс aН – площади развития современных аллювиальных отложений, на втором месте – склоны южной экспозиции (FR=1,25). Основная часть весов близка к единице, за исключением класса a¹III – первой надпойменной террасы (FR=0,06), вероятно, это обстоятельство можно объяснить малым количеством скважин на этой поверхности. Гранулометрический состав отложений первой террасы требует дальнейших исследований.

Построение карты восприимчивости

Тематические карты сложены с соответствующим весом каждого класса вышеперечисленных факторов в единую карту восприимчивости, которая расклас-

сифицирована на три категории (низкой, средней, высокой степени) восприимчивости к суффозионной опасности в светофорной раскраске (рис. 3).

Зоны развития современных аллювиальных отложений характеризуются высокой степенью суффозионной опасности, средняя степень типична для территорий второй надпойменной террасы и с уклонами поверхности более 12 градусов, низкая степень восприимчивости к суффозии свойственна для территории развития современных аллювиально-морских отложений.

Выводы

1. На исследуемой территории получили развитие различные опасные геологические и геокриологические процессы, затрудняющие освоение территории.
2. Особое значение для данного района имеет наличие в разрезе дисперсных несвязных грунтов, склонных к развеванию, суффозии. Проведенная обработка данных по гранулометрическому составу песков позволила определить вероятные диаметры выносимых частиц, параметры интенсивности суффозионной опасности основных стратиграфо-генетических комплексов, распространенных в районе п. Сабетта. Выполнен анализ пространственных закономерностей распространения суффозионно-опасных песков района.
3. Используемую в работе технологию построения карт восприимчивости к суффозии рекомендуется опробовать при изучении геокриологических процессов района, в первую очередь, бугров пучения.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Grosse G., Jones B. M. Spatial distribution of pingos in northern Asia // *The Cryosphere*. – 2011. – V. 5. – P. 13–33. URL: <https://doi.org/10.5194/tc-5-13-2011> (дата обращения 05.03.2021).
- Дегазация земли в арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал / В.И. Богоявленский, О.С. Сизов, И.В. Богоявленский, Р.А. Никонов, Т.Н. Каргина // *Арктика: экология и экономика*. – 2019. – № 4 (36). – С. 57–68. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68
- Сеняня И., Хэнкок Д. Оценка воздействия на окружающую среду и социальную сферу проекта «Ямал СПГ». Заключительный отчет. Версия 5. – М.: ЭНВАЙРОН, 2014. – 953 с.
- Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. – М.: ГЕОС, 2003. – 216 с.
- Павлов А.П. О рельефе равнин и его изменениях под влиянием работы подземных и поверхностных вод // *Землеведение*. – 1898. – Т. 5. – № 3–4. – С. 91–147.
- Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. – М.: РУДН, 2017. – 328 с.
- Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярл Л.А. Инженерная геодинамика. – М.: КДУ, 2007. – 327 с.
- Буренкова В.В., Буренков П.М. Отечественный опыт оценки фильтрационной прочности несвязных грунтов тела плотины и основания // *Природобустройство*. – 2020. – № 4. – С. 84–91.
- Дранников А.М. Инженерная геология. – Киев: Госстройиздат, 1964. – 256 с.
- Дробинина Е.В., Катаев В.Н. Физические свойства песчаных и супесчаных грунтов покровной толщи в интегральной оценке суффозионной опасности территории в районах развития карбонатного карста // *Геоинформатика*. – 2017. – № 1. – С. 21–31.
- Истомина В.С. Фильтрационная устойчивость грунтов. – М.: Госстройиздат, 1957. – 295 с.
- Лаврусевич А.А., Хоменко В.П. Инженерная защита территорий, пораженных лесовым псевдокарстом // *Вестник МГСУ*. – 2012. – № 10. – С. 191–199.
- Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. – Л.: Недра, 1977. – 479 с.
- Павлич М.П. Способ определения несущей способности гранулометрических составов грунта // *Известия ВНИИГ*. – 1961. – Т. 68. – С. 197–202.
- Оценка суффозионной опасности площадки АЭС и ее окрестностей. Опасные для строительства геологические процессы / В.П. Пендин, А.С. Гусельцев, И.К. Фоменко, О.В. Зеркаль, О.Н. Сироткина // *Сб. матер. Междунар. сем., посвящ. 70-летию д.г.-м.н. В.П. Хоменко*. – М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2019. – С. 22–29.
- Смолич С.В., Смолич К.С. Количественная оценка суффозионной опасности песчаных грунтов // *Сергеевские чтения. Научное обоснование актуализации нормативных документов инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий*. – М.: Российский университет дружбы народов (РУДН), 2010. – С. 176–181.
- Хоменко В.П. Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. – М.: Наука, 1986. – 98 с.
- Engemoen W.O., Redlinger C.G. Internal erosion incidents at Bureau of Reclamation dams // *Managing our Water Retention Systems: Proc. of 29th USSD Annual Meeting and Conference*. – Nashville, TN, April 20–24, 2009. – Denver, CO: U.S. Society on Dams. 2009. – P. 731–745.
- Erosion in geomorphology applied to dams and levees / Ed. by S. Bonelli. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 388 p.
- Fannin R.J., Slangen P. On the distinct phenomena of suffusion and suffosion // *Géotechnique Letters*. – 2014. – V. 4. – Iss. 4. – P. 289–294.
- Glossary of geology / Eds. M. Gary, R. McAfee Jr, C.L. Wolf; with a foreword by I. Campbell. – Washington, D.C.: American Geological Institute, 1972. – 52 p.
- Hutchinson J.N. Damage to slopes produced by seepage erosion in sands // *Landslides and mudflows: reports of Alma Ata International Seminar*. – Alma Ata, October 1981. – Moscow: Centre of International Projects, GKNT, 1982. – P. 250–265.
- Kälin M. Hydraulic piping – theoretical and experimental findings // *Canadian geotechnical journal*. – 1977. – V. 14. – № 1. – P. 107–124.
- Skempton A.W. Landmarks in early soil mechanics // *The measurement, selection, and use of design parameters in geotechnical engineering: Proc. of 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – Brighton, UK, September 1979. – London: British Geotechnical Society, 1979. – V. 5. – P. 1–26.
- Ghorbanzadeh O., Feizizadeh B., Blaschke T. An interval matrix method used to optimize the decision matrix in AHP technique for land subsidence susceptibility mapping. *Environmental Earth Sciences*. – 2018. – V. 77. – Article number 584.
- Landslide susceptibility mapping for Austria using Geons and optimization with the Dempster–Shafer theory / T. Gudiyangada Nachappa, S. Tavakkoli Piraililou, O. Ghorbanzadeh, H. Shahabi, T. Blaschke // *Applied Sciences*. – 2019. – V. 9 (24). – Article number 5393.
- Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping / T. Gudiyangada Nachappa, S. Kienberger, S.R. Meena, D. Hölbling, T. Blaschke // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. – 2020. – V. 11. – № 1. – P. 572–600.
- Estimating the quality of landslide susceptibility models / F. Guzzetti, P. Reichenbach, F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Galli // *Geomorphology*. – 2006. – V. 81. – P. 166–184.
- Ivanova E. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio and Analytic Hierarchy Process (AHP): comparative study of two areas in Bulgaria // *Proc. of the International Conference Analysis and Management of Changing Risk for Natural Hazards*. – Padua, Italy, 18–19 November, 2014. – P. AP23-1–AP23-9.
- Rasyid A.R., Bhandary N.P., Yatabe R. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia // *Geoenvironmental Disasters*. – 2016. – V. 3. – Article number 19.
- Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: a case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China / Y.X. Zhang, H.X. Lan, L.P. Li, Y.M. Wu, J.H. Chen, N.M. Tian // *Journal of Mountain Science*. – 2020. – V. 17. – Article number 2.
- Spatial distribution and susceptibility zoning of geohazards along the Silk Road, Xian-Lanzhou / J. Zhuang, J. Peng, X. Zhu, W. Li, P. Ma, T. Liu // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – V. 75. – Article number 711.
- Wang M., Qiao J., He S. GIS-based earthquake-triggered landslide hazard zoning using contributing weight model // *Journal of Mountain Science*. – 2010. – V. 7. – P. 339–352. DOI: 10.1007/s11629-010-2054-7
- Cheng J., Tao J.P. Fuzzy comprehensive evaluation of drought vulnerability based on the analytic hierarchy process – an empirical study from Xiaogan City in Hubei Province // *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. – 2010. – V. 1. – P. 126–135.
- Classification of the type of eco-geological environment of a coal mine district: a case study of an ecologically fragile region in Western China / Z. Yang, W. Li, Y. Pei, W. Qiao, Y. Wu // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 174. – P. 1513–1526.
- Liu S., Li W. Indicators sensitivity analysis for environmental engineering geological patterns caused by underground coal mining with integrating variable weight theory and improved matter-element extension model // *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. 686. – P. 606–618
- Liu S., Li W., Wang Q. Zoning method for environmental engineering geological patterns in underground coal mining areas // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 634. – P. 1064–1076.
- Строкова Л.А., Ежкова А.В., Леонова А.В. Применение линейного анализа для оценки карстоопасности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 117–126.
- Строкова Л.А. Районирование участков строительства прудов-отстойников Эльгинского каменноугольного месторождения в Якутии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 97–106.

40. Papin A.A., Sibin A.N. Simulation of the motion of a mixture of liquid and solid particles in porous media with regard to internal suffosion // *Fluid Dynamics*. – 2019. – V. 54 (4). – P. 520–534.
41. Wewer M., Aguilar-López J.P., Kok M., Bogaard T. A transient backward erosion piping model based on laminar flow transport equations // *Computers and Geotechnics*. – 2021. – V. 132. – № 103992.
42. A study of suffusion kinetics inspired from experimental data: comparison of three different approaches / A. Kodieh, R. Gelet, D. Marot, A.Z. Fino // *Acta Geotechnica*. – 2021. – V. 16 (2). – P. 347–365.
43. Kanitz M., Grabe J. The influence of the void fraction on the particle migration: a coupled computational fluid dynamics–discrete element method study about drag force correlations // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2021. – V. 45 (1). – P. 45–63.
44. Prasomsri J., Takahashi A. The role of fines on internal instability and its impact on undrained mechanical response of gap-graded soils // *Soils and Foundations*. – 2020. – V. 60 (6). – P. 1468–1488.
45. Строкова Л.А., Епифанова Е.А., Коржнева Т.Г. Численный анализ поведения основания опоры моста на старой железнодорожной линии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 125–139.
46. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Оценка деформаций исторического здания в Томске с помощью комплексного подхода, основанного на сочетании наземного лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 27–41.
47. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Анализ деформаций прожоторной мачты при помощи наземного лазерного сканирования и метода конечных элементов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 7–17.
48. Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского ГОК в Якутии / Л.А. Строкова, С.А. Дмитриева, Н.В. Осьмушкина, А.В. Осьмушкин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
49. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78 (8). – P. 5517–5530.
50. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности из-за извлечения подземных вод // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 6–17.
51. Строкова Л.А., Галеева Э.И., Леонова А.В. Районирование инженерно-геокриологических условий трассы трубопровода на Восточно-Мессояхском нефтегазоконденсатном месторождении // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 14–22.
52. Сахаровский А.В., Строкова Л.А. Определение устойчивости оползневого склона при проектировании моста через р. Пошнарку в Чувашии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 125–134.
53. Строкова Л.А., Надеждина Ю.Ю. Типизация инженерно-геологических условий территории трассы проектируемой железной дороги Элегест-Кызыл-Курагино // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 64–77.
54. Строкова Л.А., Ежкова А.В., Леонова А.В. Применение линейного анализа для оценки карстоопасности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 117–126.
55. Оценка инженерно-геокриологических условий Берегового нефтегазоконденсатного месторождения / Л.А. Строкова, Д.В. Пургина, Э.И. Галеева, А.Н. Курчатова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 6–19.
56. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. I. Общие правила производства работ. – М.: Госстрой России, 1997. – 47 с.
57. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. – М.: Минстрой России, 2016. – 49 с.
58. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. – М.: Минрегион России, 2012. – 65 с.
59. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист R-42 – п-ов Ямал. Объяснительная записка / М.А. Шишкин, Я.Э. Файбусович, С.И. Шкарубо, Д.В. Назаров. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 366 с.
60. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист R-43 – Обская губа. Объяснительная записка / Е.А. Лебедева, Я.Э. Файбусович, Д.В. Назаров, А.С. Воронин, Л.И. Рубин. – СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2017. – 209 с.
61. Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость суффозионную устойчивость: П 49-90. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1991. – 94 с.
62. Рекомендации по проектированию переходных зон каменно-земляных плотин: П35-87. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1989. – 65 с.
63. Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. П 56-90. СПб.: ВНИИГ, 1992. – 110 с.
64. Щербаков С.В. Прогнозирование устойчивости сооружений в зависимости от суффозионности грунтов // Трофимукские чтения-2013: матер. Всерос. молод. науч. конф. с участ. иностр. ученых. – Новосибирск, 8–14 сентября 2013. – С. 584–586.
65. Шилова А.В. Оценка суффозионной устойчивости и классифицирование грунтов на примере промплощадки // Сергеевские чтения. Юбилейная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Е.М. Сергеева. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – М.: Российский университет дружбы народов, 2014. – С. 214–218.

Поступила 17.03.2021 г.

Информация об авторах

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

Епифанова Е.А., кандидат геолого-минералогических наук инженер Научно-производственной лаборатории «Агробиофотоника» Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 624.131

ASSESSMENT OF SUFFUSION IN THE TERRITORY OF SETTLEMENT SABETTA, THE YAMAL PENINSULA

Lyudmila A. Strokova¹,
sla@tpu.ru

Ekaterina A. Epifanova¹,
epifanova@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. The active development of the Yamal Peninsula leads to the transformation of the geological environment, often accompanied by the activation of natural and technological processes. Numerous studies are devoted to the description of geocryological processes in this region. In this work, we paid attention to a special poorly studied process – suffusion, based on the study of the grain size distribution of sands that are widely distributed in the territory of Yamal.

The main aim of the research is to assess the suffusion stability of soils and determine the spatial patterns of the distribution of suffusion-hazardous soils in the area of the settlement Sabetta.

Methods. At the first stage, we compiled the thematic maps of the factors that determine the development of suffusion in ArcGIS. We chose four factors, namely: the slope, the curvature of the surface, the exposure of the slopes, and the geological structure of the territory. At the second stage, we processed the data on the grain size distribution of soils. The following factors were determined: uniformity coefficient, the maximum size of suffusion particles, and the degree of soil suffusion of the main stratigraphic-genetic complexes distributed in the area. The assessment of the suffusion of sandy soils was performed using two methods. An inventory map of the manifestations of suffusion-hazardous sands has been compiled. The final stage was the preparation of a forecast map of the territory's susceptibility to suffusion based on the study of spatial patterns of the distribution of its manifestations.

Results. The zones of development of modern alluvial deposits are the most prone to suffusion, the territory of the second above-floodplain terrace is characterized by an average susceptibility and surface slopes of more than 12 degrees, the territory of development of modern alluvial-marine deposits is the least susceptible to suffusion. We recommended using the obtained data on the degree of suffusion of sandy and coarse-grained soils in the design of engineering structures. We recommended using the technology of susceptibility mapping in the study of geocryological processes, first of all, heaving mounds.

Key word:

Suffusion, danger, particle size distribution, sandy soils, uniformity coefficient, susceptibility, mapping, frequency ratio method.

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

REFERENCES

- Grosse G., Jones B. M. Spatial distribution of pingos in northern Asia. *The Cryosphere*, 2011, vol. 5, pp.13–33. Available at: <https://doi.org/10.5194/tc-5-13-2011> (accessed 5 March 2021).
- Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A., Kargina T.N. Earth degassing in the Arctic: comprehensive studies of the distribution of frost mounds and thermokarst lakes with gas blowout craters on the Yamal Peninsula. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 4 (36), pp. 52–68. In Rus. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68.
- Senchyanya I., Khancoks J. *Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredyu i sotsialnyuyu sferu proekta «Jamal SPG»* [Environmental and social impact assessment of the Yamal LNG project]. Final Report. Version 5. Moscow, ENVIRON Publ., 2014. 953 p.
- Khomenko V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Regularities and forecasting of suffusion]. Moscow, GEOS Publ., 2003. 216 p.
- Pavlov A.P. O relefe ravnin i ego izmeneniyakh pod vliyaniem raboty podzemnykh i poverhnostnykh vod [On the relief of the plains and its changes under the influence of the work of underground and surface waters]. *Zemlevedenie*, 1898, vol. 5, no. 3–4, pp. 91–147.
- Anikeev A.V. *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh rayonakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Collapse sinks and subsidences in karst areas: mechanisms, prediction, and risk estimation]. Moscow, RUDN University Publ., 2017. 328 p.
- Bondarik G.K., Penden V.V., Yarg L.A. *Inzhenernaya geodinamika* [Engineering geodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2007. 327 p.
- Burenkova V.V., Burenkov P.M. Domestic experience of assessing the filtration strength of non-cohesive soils of dam body and base. *Environmental engineering*, 2020, vol. 4, pp. 84–91. In Rus.
- Drannikov A.M. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology]. Kiev, Gosstroyizdat Publ., 1964. 256 p.
- Drobinina E.V., Kataev V.N. Fizicheskie svoystva peschanykh i supeschanykh gruntov pokrovnoy tolshhi v integralnoy otsenke suffuzionnoy opasnosti territorii v rayonakh razvitiya karbonatnogo karst [Physical properties of sandy and sandy loam soils of the cover layer in the integral assessment of the suffusion hazard of the territory in the areas of development of carbonate karst]. *Geoinformatika*, 2017, no. 1, pp. 21–31.
- Istomina V.S. *Filtratsionnaya ustoychivost gruntov* [Filtration stability of soils]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1957. 219 p.
- Lavrusevich A.A., Khomenko V.P. Engineering protection of territories affected by loess pseudocast. *Bulletin of the MSU*, 2012, no. 10, pp. 191–199. In Rus.
- Lomtadze V.D. *Inzhenernaya geologiya. Inzhenernaya geodinamika* [Engineering geology. Engineering geodynamics]. Leningrad, Nedra Publ., 1977. 479 p.
- Pavchich M.P. Sposob opredeleniya nesuffuzionnykh granulometricheskikh sostavov grunta [Method for determining non-diffusion granulometric compositions of soil]. *Izvestia VNIIG*, 1961, vol. 68, pp. 197–202.
- Penden V.V., Guseltsev A.S., Fomenko I.K., Zerkal O.V., Sirotkina O.N. Otsenka suffuzionnoy opasnosti ploshchadki AES i ee okrestnostei. Opasnye dlya stroitelstva geologicheskie protsessy [Assessment of suffusion hazard at a NPP site and its vicinity].

- Geological processes hazardous to construction]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnogo seminara, posvyashchennogo 70-letiyu V.P. Khomenko* [Proc. Intern. Workshop dedicated to the 70th birthday of Dr. Sc. V.P. Khomenko]. Moscow, MISI-MGSU Publ., 2019. pp. 22–29.
16. Smolich S.V., Smolich K.S. Kolichestvennaya otsenka suffuzionnoy opasnosti peschanykh gruntov [Quantitative assessment of the suffusion hazard of sandy soils]. *Sergeevskie Chteniya. Nauchnoe obosnovanie aktualizatsii normativnykh dokumentov inzhenerno-geologicheskikh i inzhenerno-ekologicheskikh izyskaniy* [Sergeev Readings. Scientific substantiation of updating of normative documents of engineering-geological and engineering-ecological surveys]. Moscow, RUDN University Publ., 2010. pp. 176–181.
 17. Khomenko V.P. *Karstovo-suffuzionnye protsessy i ikh prognoz* [Karst-suffusion processes and their prognosis]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 98 p.
 18. Engemoen W.O., Redlinger C.G. Internal erosion incidents at Bureau of Reclamation dams. *Managing our Water Retention Systems: Proc. of 29th USSD Annual Meeting and Conference*. Nashville, TN, April 20–24, 2009. Denver, CO, U.S. Society on Dams, 2009. pp. 731–745.
 19. *Erosion in geomechanics applied to dams and levees*. Ed. by S. Bonelli. Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2013. 388 p.
 20. Fannin R.J., Slangen P. On the distinct phenomena of suffusion and suffusion. *Géotechnique Letters*, 2014, vol. 4, Iss. 4, pp. 289–294.
 21. *Glossary of geology*. Eds. M. Gary, R. McAfee Jr, C.L. Wolf; with a foreword by Ian Campbell. Washington, D.C., American Geological Institute, 1972. 52 p.
 22. Hutchinson J.N. Damage to slopes produced by seepage erosion in sands. *Landslides and mudflows: reports of Alma Ata International Seminar, October 1981*. Moscow, Centre of International Projects, GKNT, 1982. pp. 250–265.
 23. Kälin M. Hydraulic piping – theoretical and experimental findings. *Canadian geotechnical journal*, 1977, vol. 14, no. 1, pp. 107–124.
 24. Skempton A.W. Landmarks in early soil mechanics. *The measurement, selection, and use of design parameters in geotechnical engineering: Proc. of 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Brighton, UK, September 1979. London, British Geotechnical Society, 1979. Vol. 5, pp. 1–26.
 25. Ghorbanzadeh O., Feizizadeh B., Blaschke T. An interval matrix method used to optimize the decision matrix in AHP technique for land subsidence susceptibility mapping. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, Article number 584.
 26. Gudiyangada Nachappa T., Tavakkoli Pirailou S., Ghorbanzadeh O., Shahabi H., Blaschke T. Landslide susceptibility mapping for Austria using Geons and optimization with the Dempster-Shafer theory. *Applied Science*, 2019, vol. 9 (24), Article number 5393.
 27. Gudiyangada Nachappa T., Kienberger S., Meena S.R., Hölbling D., Blaschke T. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 572–600.
 28. Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 2006, vol. 81, pp. 166–184.
 29. Ivanova E. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio and Analytic Hierarchy Process (AHP): comparative study of two areas in Bulgaria. *Proc. of the International Conference Analysis and Management of Changing Risk for Natural Hazards*. Padua, Italy, 18–19 November, 2014. pp. AP23-1–AP23-9.
 30. Rasyid A.R., Bhandary N.P., Yatabe R. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 2016, vol. 3, Article number 19.
 31. Zhang Y.X., Lan H.X., Li L.P., Wu Y.M., Chen J.H., Tian N.M. Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: a case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China. *Journal of Mountain Science*, 2020, vol. 17, Article number 2.
 32. Zhuang J., Peng J., Zhu X., Li W., Ma P., Liu T. Spatial distribution and susceptibility zoning of geohazards along the Silk Road, Xian-Lanzhou. *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75, Article number 711.
 33. Wang M., Qiao J., He S. GIS-based earthquake-triggered landslide hazard zoning using contributing weight model. *Journal of Mountain Science*, 2010, vol. 7, pp. 339–352. DOI: 10.1007/s11629-010-2054-7.
 34. Cheng J., Tao J.P. Fuzzy comprehensive evaluation of drought vulnerability based on the analytic hierarchy process – an empirical study from Xiaogan City in Hubei Province. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2010, vol. 1, pp. 126–135.
 35. Yang Z., Li W., Pei Y., Qiao W., Wu Y. Classification of the type of eco-geological environment of a coalmine district: a case study of an ecologically fragile region in Western China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 174, pp. 1513–1526.
 36. Liu S., Li W. Indicators sensitivity analysis for environmental engineering geological patterns caused by underground coal mining with integrating variable weight theory and improved matter-element extension. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 686, pp. 606–618.
 37. Liu S., Li W., Wang Q. Zoning method for environmental engineering geological patterns in underground coal mining areas. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 634, pp. 1064–1076.
 38. Strokova L.A., Ezhkova A.V., Leonova A.V. The application of lineament analysis to assess the karst hazard in the design of the main gas pipeline in South Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 117–126. In Rus.
 39. Strokova L.A. Zoning of construction sites of the settling ponds of the Elginsky coal Deposit in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 97–106. In Rus.
 40. Papin A.A., Sibin A.N. Simulation of the motion of a mixture of liquid and solid particles in porous media with regard to internal suffusion. *Fluid Dynamics*, 2019, vol. 54, no. 4, pp. 520–534.
 41. Wewer M., Aguilar-López J.P., Kok M., Bogaard T. A transient backward erosion piping model based on laminar flow transport equations. *Computers and Geotechnics*, 2021, vol. 132, no. 103992.
 42. Kodieh A., Gelet, R., Marot D., Fino A.Z. A study of suffusion kinetics inspired from experimental data: comparison of three different approaches. *Acta Geotechnica*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 347–365.
 43. Kanitz M., Grabe J. The influence of the void fraction on the particle migration: a coupled computational fluid dynamics–discrete element method study about drag force correlations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2021, vol. 45, no. 1, pp. 45–63.
 44. Prasomsri J., Takahashi A. The role of fines on internal instability and its impact on undrained mechanical response of gap-graded soils. *Soils and Foundations*, 2020, vol. 60, no. 6, pp. 1468–1488.
 45. Strokova L.A., Epifanova E.A., Korzhneva T.G. Numerical analysis of bridge foundation behaviour on the old railway line. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 125–139. In Rus.
 46. Epifanova E.A., Strokova L.A. Evaluation of deformation of a historic building in Tomsk by an integrated approach based on terrestrial laser scanner and finite element modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 27–41. In Rus.
 47. Epifanova E.A., Strokova L.A. Numerical analysis of deformations of the lighting mast by ground laser scanning and finite elements method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 7–17. In Rus.
 48. Strokova L.A., Dmitrieva S.A., Osmushkina N.V., Osmushkin A.V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 175–185. In Rus.
 49. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 8, pp. 5517–5530.
 50. Phi H.T., Strokova L.A. Classification of soil types for Hanoi (Vietnam) when studying land subsidence at groundwater extraction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 6–17. In Rus.
 51. Strokova L.A., Galeeva E.I., Leonova A.V. Zoning of engineering-geocryological conditions of the pipelines on Vostochno-Messoyakhskiye field oil and gas condensate field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 14–22. In Rus.

52. Saharovskiy A.V., Strokova L.A. Determining landslide slope stability when designing a bridge over the river Poshnarka in the Chuvash Republic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 125–134. In Rus.
53. Strokova L.A., Nadezhkina Yu.Yu. Typification of engineering and geological conditions of the territory of the route of the projected railway Elegest-Kyzyl-Kuragino. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 64–77. In Rus.
54. Strokova L.A., Ezhkova A.V., Leonova A.V. The application of lineament analysis to assess the karst hazard in the design of the main gas pipeline in South Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 117–126. In Rus.
55. Strokova L.A., Purgina D.V., Galeeva E.I., Kurchatova A.N. Evaluation of engineering-geocryological conditions of the Beregovoye oil and gas condensate field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 6–19. In Rus.
56. SP 11-105-97. *Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva*. Ch. I. Obshchie pravila proizvodstva rabot [Engineering and geological surveys for construction. P. I. General rules for the production of works]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 1997. 47 p.
57. SP 115.13330.2011. *Geofizika opasnykh prirodnykh vozdeystviy* [Geophysics of dangerous natural impacts]. Moscow, Ministry of Russia Publ., 2016. 49 p.
58. SP 116.13330.2012. *Inzhenernaya zashchita territoriy, zdaniy i sooruzheniy ot opasnykh geologicheskikh protsessov* [Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes]. Moscow, N.M. Gersevanov Research Institute of Regional Development Publ., 2012. 65 p.
59. Shishkin M.A., Faybusovich Ya.E., Shkarubo S.I., Nazarov D.V. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (trete pokolenie). Seriya Zapadno-Sibirskaya. List R-42 Yamal* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). West Siberian series. R-42 – Yamal. Explanatory note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI Publ., 2015. 366 p.
60. Lebedeva A., Faibusovich Ya.E., Nazarov D.V., Voronin A.S., Rubin L.I. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (trete pokolenie). Seriya Zapadno-Sibirskaya. R-43-Obskaja guba* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). West Siberian series. Sheet R-43 – Ob bay. Explanatory note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI Publ., 2017. 209 p.
61. *Rekomendatsii po metodike laboratornykh ispytaniy gruntov na vodopronitsaemost sutfuzionnuyu ustoychivost* [Recommendations on the methodology of laboratory tests of soils for water permeability and suffusion resistance]. P. 49–90. Leningrad, VNIIG named after B.E. Vedenev Publ., 1991. 94 p.
62. *Rekomendatsii po proektirovaniyu perehodnykh zon kamennozemlyanykh plotin* [Recommendations for the design of transition zones of stone-earth dams]. P.35–87. Leningrad, VNIIG named after B.E. Vedenev Publ., 1989. 65 p.
63. *Rekomendatsii po proektirovaniyu obratnykh filtrov gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Recommendations for the design of reverse filters of hydraulic structures]. P. 56–90. St. Petersburg, VNIIG Publ., 1992. 110 p.
64. Shcherbakov S.V. Prognozirovaniye ustoychivosti sooruzheniy v zavisimosti ot sutfuzionnosti gruntov [Predicting the stability of structures depending on the soil suffusion]. *Trofimukovskie chteniya-2013: Materialy Vserossiyskoy mo;odexhnoy nauchnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh* [Trofimuk readings-2013: Proc. All-Russian youth scientific conference with participation of foreign scientists]. Novosibirsk, September 8–14, 2013. pp. 584–586.
65. Shilova A.V. Otsenka sutfuzionnoy ustoychivosti i klassifitsirovaniye gruntov na primere prompleshchadki [Evaluation of suffusion stability and classification of soils on the example of an industrial site]. *Sergeevskie chteniya. Yubileynaya konferentsiya, posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika E.M. Sergeeva. Materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii* [Sergeev Readings. Anniversary conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician E.M. Sergeev. Proc. of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Problems of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology. Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Problems of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology]. Moscow, RUDN University Publ., 2014. pp. 214–218.

Received: 17 March 2021.

Information about the authors

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

Ekaterina A. Epifanova, Cand. Sc., engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.832

ОСОБЕННОСТИ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ КАРБОНАТНЫХ ТОЛЩ ПО КОМПЛЕКСНЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Чучалина Кристина Юрьевна¹,
K.Yu.Chuchalina@gmail.com

Коровин Михаил Олегович¹,
koroavinmo@hw.tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования определена необходимостью прогнозирования латеральной изменчивости литологических типов пород, что оказывает влияние на разработку и экономическую оценку месторождения. Очень часто нефтяные компании имеют ограниченный набор геолого-геофизической информации, в связи с чем возникают трудности для прогнозирования перспективных областей, что способствует увеличению неопределенностей при изучении территории месторождения.

Цель: выделение и статистическое обоснование фациального строения по данным геолого-геофизической информации на примере одного из месторождений Томской области, приуроченного к палеозойскому фундаменту Западной Сибири.

Объектом исследования являются отложения палеозойского фундамента юго-восточной части Западно-Сибирской плиты – коллекторы сложнопостроенных карбонатных толщ, окно исследования, которое охватывает объем горной породы, равный 40 м, выбрано исходя из условий построения сейсмофациальной карты.

Методы исследования основаны на использовании комплексного анализа данных – статистическое сопоставление геофизических исследований и кернового материала. Такой анализ способствует уменьшению неопределенностей в процессе оценки и прогноза геологической среды. В работе отмечено, что использование широкого спектра информации влияет на оценку и прогноз распределения геологических тел в пространстве. Предложена методика сравнения акустических свойств, полученных из первоначального источника – сейсмические данные, с расчетными акустическими свойствами по керновым данным. Выявлены взаимосвязи между сейсмической, геофизической информацией и лабораторными исследованиями керна. Обоснование полученной сейсмофациальной карты на основе комплексирования данных позволяет эффективно прогнозировать геологическое распределение фаций в пространстве и времени, но также уменьшать неопределенности при построении геологической модели.

Ключевые слова:

Фация, лабораторные исследования керна, акустический импеданс, комплексирование, палеозойские отложения.

Введение

Нередко геолого-геофизические данные имеют низкую информативность, что является следствием возникновения неопределенностей для прогноза формы, размера, расположения геологического тела, а также для выявления зон нефтегазонакоплений. Данные трудности возникают, например, из-за сложного строения территории или из-за разрешающей способности методов исследования. Эти условия характерны для исследуемого месторождения, которое представляет палеозойский стратиграфический диапазон нефтегазоносности – от среднего до позднего девона. В течение среднего и верхнего девона территория подвергалась активной разломной тектонике, что является причиной для формирования органогенного биогерма. Стоит отметить, что с северо-востока данный биогерм был ограничен открытым глубоководным бассейном, а с юго-запада – изолированным мелководным морем [1, 2]. Принимая во внимание сложные геологические условия, необходимо комплексировать геолого-геофизическую информацию для повышения достоверности прогноза фациального строения изучаемой территории. Также стоит отметить, что совместное изучение и сопоставление геологической информации необходимо для рационального освоения месторождения.

Для анализа фациального строения изучаемого месторождения за основу была принята сейсмофациальная карта сложнопостроенных карбонатных толщ [3–5], которая была получена благодаря комплексу сейсмических атрибутов: мгновенная частота, мгновенная фаза, мгновенное качество, относительный акустический импеданс, первая производная, затухание [6–9].

О методике петрофизического анализа

Изучаемое нефтяное месторождение характеризуется невысоким процентом выноса керна, что вносит неопределенность при прогнозировании распределения фаций. Стоит отметить, что отбор керна был осуществлен только из двух эксплуатационных скважин № 1 и 2, где фонд скважин представлен четырьмя разведочными и девятью эксплуатационными скважинами. Согласно опубликованным данным [10], для нахождения корреляционной связи необходимо не менее 30 точек исследования, чтобы полученная зависимость являлась корректной. В данном случае количество образцов кернового материала в исследуемом интервале из двух скважин составляет 65 шт, данный факт является допустимым для дальнейших исследований.

Измерения упругих свойств на керне для сопоставления с сейсмической и геофизической информацией были проведены в скважинах № 1 и 2, наличие

кернового материала увеличивает достоверность комплексирования ГИС-керна. Для предсказания фациальной обстановки было рассчитано акустическое свойство – акустический импеданс, по формуле, представленной ниже [11]:

$$AI = V_p * \rho,$$

где AI – акустический импеданс м/с*г/см³; V_p – скорость продольной волны м/с; ρ – плотность горной породы г/см³.

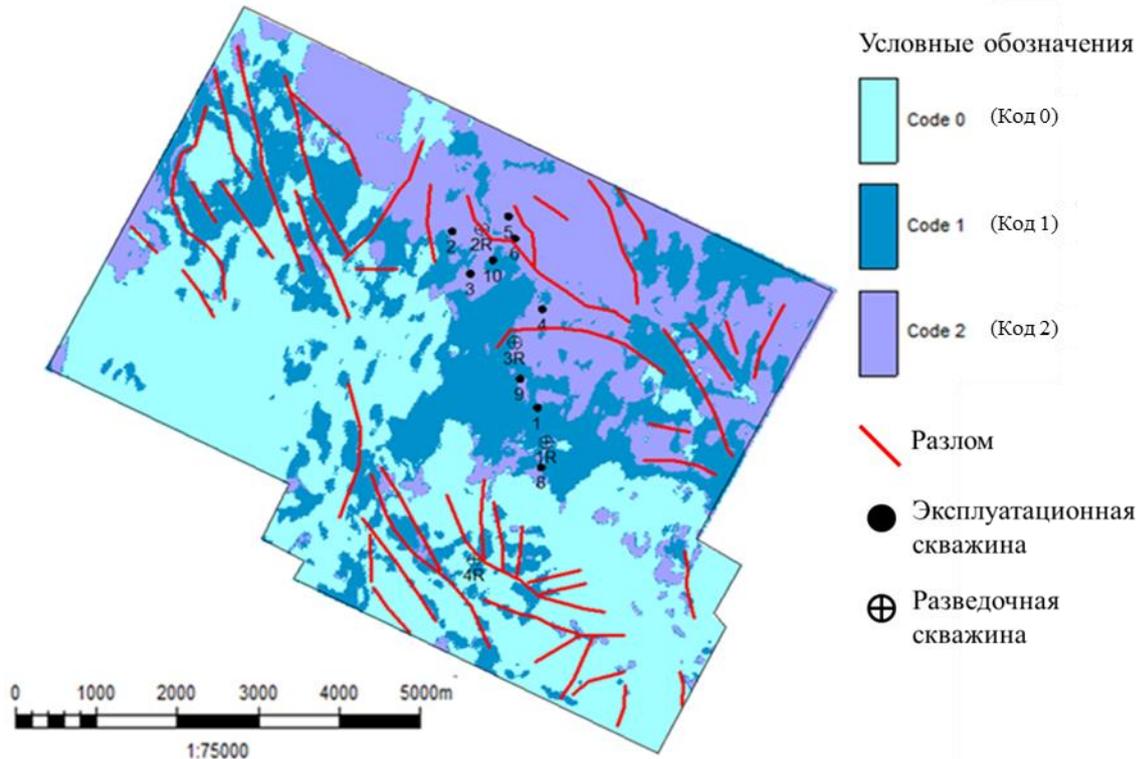


Рис. 1. Сейсмofациальная карта сложнопостроенных карбонатных толщ по кровле фундамента Ф2
 Fig. 1. Seismic facies map of complex carbonate reservoir by the top of the basement F2

Из-за отсутствия измерений скорости продольной волны в эксплуатационной скважине № 1 невозможно рассчитать сейсмический параметр, поэтому была получена зависимость на основе данных скважины № 2 для восстановления упругого свойства породы (рис. 2).

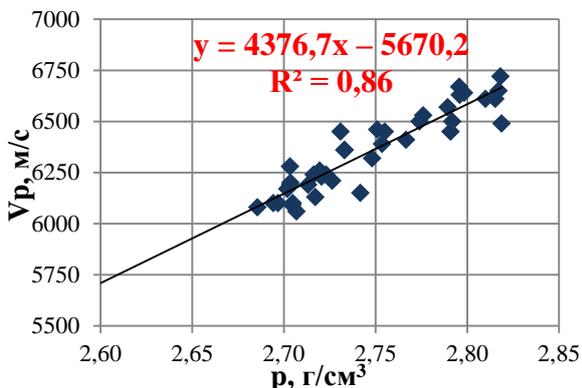


Рис. 2. Зависимость плотности горной породы и скорости продольной волны для скважины № 2
 Fig. 2. Dependence of rock density and the velocity of the longitudinal wave for well no. 2

Полученный расчётный акустический импеданс по керновым данным двух эксплуатационных скважин

был сопоставлен с частотой распределения акустического параметра по ГИС (геофизические исследования скважин) (рис. 3).

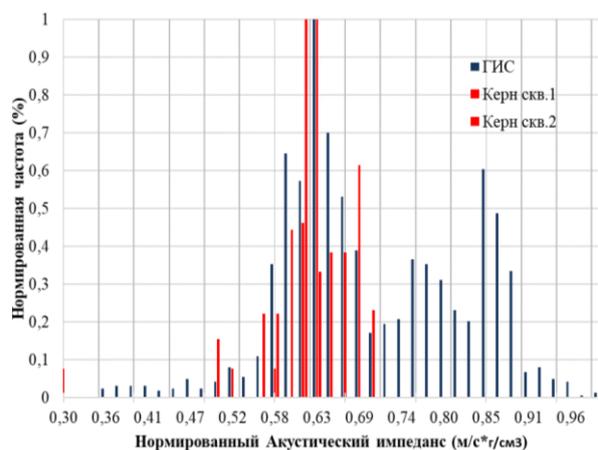


Рис. 3. Частота распределения акустического импеданса по данным лабораторных исследований керна и ГИС (геофизические исследования скважин) для скважин № 2, 2R, 10, 1, 1R и 3R
 Fig. 3. Frequency of distribution of acoustic impedance according to laboratory tests of core and well logs for wells no. 2, 2R, 10, 1, 1R and 3R

По оси X показаны нормированные значения акустического импеданса, а по оси Y отложена нормированная частота появления переменной (акустический импеданс по ГИС и керну), где вся площадь гистограммы принимается равной единице. Соответственно, самый высокий столбик на гистограмме характеризует интервал с наиболее вероятными результатами. Сопоставление скважинных данных позволяет выделить наиболее достоверные кластеры фаций, так как вероятность распределения в межскважинном пространстве определенного литотипа выше благодаря точечным исследованиям в скважине. Также необходимо отметить, что наличие связи в точке исследуемого интервала между образцом керна и геофизическими исследованиями скважин показывает досто-

верность данных не только на качественном, но и на количественном уровне.

Исходя из анализа геофизических данных и лабораторных исследований керна для фонда скважин – № 2, 2R, 10, 1, 1R и 3R, был сделан прогноз распределения фаций с более достоверной вероятностью в области расположения этих скважин. При помощи статистических данных было выявлено, что разведочные скважины № 2R и № 1R вскрывают в преобладающем объеме доломит, а три эксплуатационные скважины № 2, 10, 1 и одна разведочная скважина № 3R представлены известняком.

Согласно указанной кластеризации сейсмофациальной карты Цвет-Фация (рис. 1) была составлена сводная таблица для статистического обоснования (таблица) [12].

Таблица. Сводная таблица по данным сейсмической и геолого-геофизической информации

Table. Summary table according to seismic, geological and geophysical information

Тип исследования Research type	Керн Core	ГИС Well logs	Сейсмофациальная карта Seismic facies map	Вероятность, % Probability, %
Скважина № Well no.				
5	–	Известняк Limestone	Доломит Dolomite	50
6	–	Известняк Limestone	Доломит Dolomite	50
2	Известняк Limestone	Известняк Limestone	Доломит Dolomite	66,6
2R	–	Доломит Dolomite	Доломит Dolomite	100
10	–	Известняк Limestone	Известняк Limestone	100
1	Известняк Limestone	Известняк Limestone	Известняк Limestone	100
1R	–	Доломит Dolomite	Известняк Limestone	50
4	–	Известняк Limestone	Доломит Dolomite	50
4R	Глинисто-кремнистые Argillaceous-siliceous	–	Глинисто-кремнистые Argillaceous-siliceous	66,6
3	–	Известняк Limestone	Доломит Dolomite	50
3R	–	Доломит Dolomite	Известняк Limestone	50
9	–	Известняк Limestone	Известняк Limestone	100
8	–	Доломит Dolomite	Известняк Limestone	50

На основе проведенного комплексного анализа геолого-геофизических данных была установлена вероятность наличия определенной фации в области скважины, что приведено в таблице [13, 14]. Скважины, которые характеризуются вероятностью встречаемости определенной фации более 50 %, представляют наиболее достоверные области распространения данной фации. К такому фонду относятся скважины № 2, 2R, 10, 1, 1R и 3R. Необходимо отметить, что скважина 3R представляет вероятность 50 % распределения как доломита, так и известняка, но, исходя из данных ГИС и сейсмофациальной карты, было принято решение, что достоверность встречаемости фации доломит 100 %, так как на сейсмической карте данная скважина расположена на границе фаций доломит–известняк.

При использовании комплексной интерпретации геологических данных появляется возможность сни-

жения рисков и неопределенностей, связанных с решающей способностью, например, сопоставляя сейсмические данные со скважинной информацией, это позволяет увеличить область достоверности околоскважинного пространства [15]. На основе полученных результатов по статистическому анализу геолого-геофизической информации было построено распределение фаций по сейсмическому атрибуту – относительный акустический импеданс только для скважин с достоверной фактической информацией, где каждой скважине присвоена определенная фация [16]. По оси X отложена переменная относительного акустического импеданса, а по оси Y – количество наблюдений, попадающих в соответствующий диапазон на оси X. Исходя из частотного распределения параметра относительного акустического импеданса, представленного на рис. 4, где возникает неполное

разделение между двумя фациями – доломит и известняк, были проанализированы исследуемые области около скважин (рис. 1) [17–19]. Стоит отметить, что скважина 1R расположена на границе разделения доломит–известняк, поэтому данная скважина не учитывалась при построении распределения значений по сейсмическому атрибуту (рис. 5).

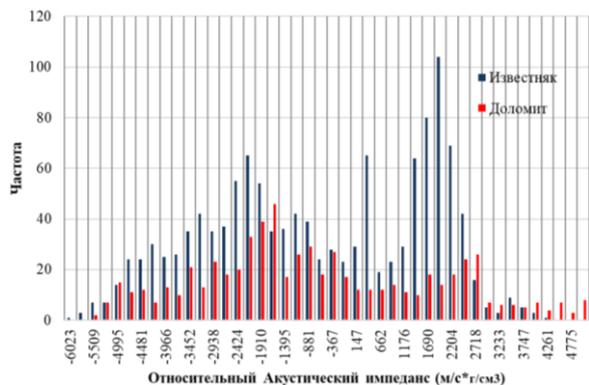


Рис. 4. Частота распределения переменной – относительный акустический импеданс

Fig. 4. Variable distribution frequency – relative acoustic impedance

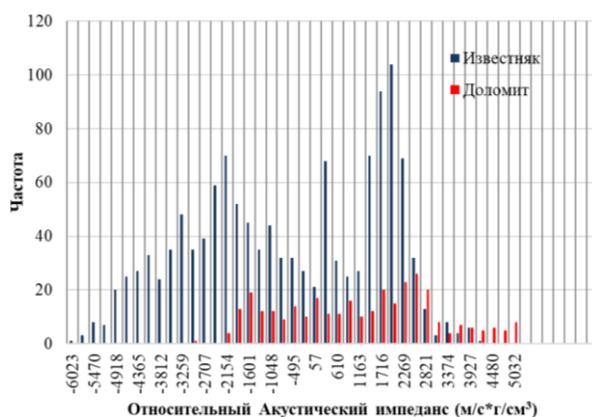


Рис. 5. Частота распределения переменной – относительный акустический импеданс без скважины 1R

Fig. 5. Variable distribution frequency – relative acoustic impedance without well 1R

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ежова А.В. Изучение палеозойских коллекторов Северо-Останинского нефтяного месторождения по керну и шламу. Кн. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 102 с.
2. Ежова А.В., Меркулов В.П., Чеканцев В.А. Геологическая модель строения палеозойского фундамента Северо-Останинского нефтяного месторождения (Томская область) // Горный журнал. – 2012. – Специальный выпуск. – С. 35–38.
3. Волкова А.А. Комплексный анализ сейсмических и скважинных данных при изучении трещиноватых коллекторов на примере месторождения в фундаменте Западной Сибири // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXI Международного научного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2017. – Т. I. – С. 356–358.
4. Волкова А.А. Выбор оптимальных параметров сейсмического фациального анализа при изучении палеозойских отложений

Таким образом, имея площадное распределение фаций изучаемого объекта, полученное в результате анализа формы сейсмического сигнала, можно провести районирование территории, но восстановление обстановок осадконакопления и прогноз фаций необходимо проводить совместно с интерпретацией ГИС и лабораторными исследованиями керна, что подтверждается данными таблицы [20–22].

Заключение

В результате проведенных комплексных исследований геологической среды были изучены карбонатные отложения с позиции фациального строения. Предложенная авторами методика ясно отражает последовательность интерпретации геологической информации – сейсмика, геофизика, лабораторные исследования керна. Данный подход включает кластеризацию полученных результатов на основе сейсмического параметра – акустический импеданс.

На основе детальных литолого-фациальных исследований по комплексу упругих свойств в керне скважин и геофизических данных было детально изучено шесть скважин – № 2, 2R, 10, 1, 1R и 3R, на основе которых было выделено распределение фаций. Закономерности распределения фаций по латерали были установлены с помощью совместной интерпретации сейсмических, геофизических данных и лабораторных исследований керна.

Резюмируя все вышесказанное, имея минимальный спектр данных, но с хорошим качеством, можно осуществить интерпретацию на более достоверном уровне, то есть определить связи между керовым материалом и геофизическими данными, что в дальнейшем позволяет спроецировать полученную связь на сейсмический куб. Необходимо отметить, что, используя комплексирование результатов исследования, появляется вероятность уменьшения неопределенностей геологической среды. Данный факт в дальнейшем благоприятно влияет на проектирование геологических объектов. По результатам исследования были выявлены области соответствия между сейсмическими данными и геолого-геофизической интерпретацией, уточнены распределения фаций в межскважинном пространстве и выявлены области для перспективного бурения новых скважин.

Западной Сибири // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXII Международного научного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2018. – Т. I. – С. 383–384.

5. Волкова А.А. Применение сейсмofациального анализа для уточнения схемы геологического строения на примере месторождения в фундаменте Западной Сибири // Современные проблемы седиментологии в нефтегазовом инжиниринге: Труды III Всероссийского научно-практического седиментологического совещания. – Томск, 2017. – С. 223–228.
6. Seismic facies analysis and structural interpretation of the Sandakan sub-basin / K. Futalan, A. Mitchell, K. Amos, G. Backe // AAPG international conference and exhibition. – Singapore, 2012. URL: www.searchanddiscovery.com/documents/2012/30254futalan/ndx_futalan.pdf (дата обращения 14.02.2021).
7. White R.E. Properties of instantaneous seismic attributes // The Leading Edge. – 1991. – V. 10. – № 7. – P. 26–32.

8. Interactive seismic facies classification using textural attributes and neural networks / B.P. West, S.R. May, J.E. Eastwood, C. Rossen // The Leading Edge. – 2002. – V. 21. – № 10. – P. 1042–1049.
9. Chopra S., Marfurt K. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization // Geophysical developments. – Tulsa: SEG, 2007. – 464 p.
10. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / под ред. В.И. Петерсильс, В.И. Порокуна, Г.Г. Яценко. – М.; Тверь: ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика», 2003. – 258 с.
11. Прогнозирование структуры и свойств природных резервуаров на основе комплексной интерпретации сейсмических и скважинных геолого-геофизических данных / А.П. Жуков, В.А. Жемчугова, К.А. Эпов, С.Л. Федотов // Технологии сейсморазведки. – 2006. – № 1. – С. 69–78.
12. Чучалина К.Ю. Статистическое обоснование сейсмофациального анализа сложнопостроенных карбонатных коллекторов Северо-Останинского нефтяного месторождения: магистерская диссертация. – Томск, 2019. – 84 с.
13. Чоловский И.П. Методы геолого-промышленного анализа при разработке крупных нефтяных месторождений. – М.: Недра, 1966. – 180 с.
14. Чернова О.С., Захарова А.А. К вопросу о классификации обстановок осадконакопления, фаций, генетических типов пород и осадочных текстур с позиций кластерного анализа // Геологическое строение и нефтегазоносность отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты (Томская область). – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного университета, 2006. – С. 175–178.
15. Amaefule J.O., Keelan D.K. Stochastic approach to computation of uncertainties in petrophysical properties // SCA conference. – Texas, 1989. – P. 1–28.
16. Дэвис Дж. Статистический анализ данных в геологии. – М.: Недра, 1990. – С. 424–427.
17. Кузнецов В.Г. Фации и фациальный анализ в нефтегазовой геологии. – М.: ИЦ РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. – 244 с.
18. Слосс Л.А., Крумбейн В.К., Дэллз Э.В. Комплексный фациальный анализ // Осадочные фации в геологической истории. Л.; М.: Недра, 1953. – 289 с.
19. Хэллем Э. Интерпретация фаций и стратиграфическая последовательность. – М.: Мир, 1983. – 328 с.
20. Olneva T., Ovechkina V., Zhukovskaya E. Object-oriented geoseismic analysis: ways and examples // XVII Serbian geological congress. Book of Abstracts. – Serbia, 2018. – P. 707–713.
21. Linari V. Seismic facies analysis based on 3D multiattribute volume classification, La Palma Field, Maracaibo, Venezuela / V. Linari, M. Santiago, C. Pastore, K. Azbel, M. Poupon // The Leading Edge. – 2003. – P. 32–36.
22. Davies D.K., Vessell R.K. Flow unit characterization of a shallow shelf carbonate reservoir: North Robinson Unit, West Texas // 10th Symposium on Improved Oil Recovery. – Tulsa, 1996. – P. 21–24.

Поступила 09.06.2021 г.

Информация об авторах

Чучалина К.Ю., магистрант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Коровин М.О., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.832

SPECIFIC FEATURES OF PETROPHYSICAL PROPERTIES OF COMPLEX CARBONATE RESERVOIR BY COMPLEX GEOPHYSICAL DATA

Kristina Yu. Chuchalina¹,
K.Yu.Chuchalina@gmail.com

Mikhail O. Korovin¹,
korovinmo@hw.tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is determined by the need to predict the lateral variability of lithological rock types, which affects the development and economic evaluation of the field. Very often, oil companies have a limited set of geological and geophysical information, in this relation the difficulties arise in predicting promising areas, which contributes to increase in uncertainties in the study of the field.

The main aim of the research is isolation and statistical justification of the facies structure according to the geological and geophysical information on the example of one of the deposits of the Tomsk region, confined to the Paleozoic basement of Western Siberia.

The object of the study is deposits of the Paleozoic basement of the southeastern part of the West Siberian Plate – complex carbonate reservoir, the study window that covers a rock volume of 40 m is selected based on the conditions for constructing a seismic facies map.

Methods of the research are based on the use of integrated data analysis – a statistical comparison of geophysical surveys and core material. This analysis helps to reduce uncertainties in the process of assessing and forecasting the geological environment. The paper notes that the use of a wide range of information affects the assessment and forecast of the distribution of geological bodies in space. A technique is proposed for comparing acoustic properties obtained from the original source – seismic data, with the calculated acoustic properties from core data. The authors have revealed the interconnections between seismic, geophysical information and core research. The justification of the obtained seismic facies map based on the data integration allows us to effectively predict the geological distribution of facies in space and time, but also to reduce uncertainties in the construction of the geological model.

Key words:

Facies, laboratory-based core analysis, acoustic impedance, fusion, paleozoic deposits.

REFERENCES

- Ezhova A.V. *Izucheniye paleozoiskikh kollektorov Severo-Ostaniinskogo neftyanogo mestorozhdeniya po kernu i shlamu* [Study of Paleozoic reservoirs of the North Ostaninskoe oil field by core and sludge]. B. 1. Tomsk, TPU Publ. house, 2011. 102 p.
- Ezhova A.V., Merkulov V.P., Chekantsev V.A. Geologicheskaya model stoeniya paleozoiskogo fundamenta Severo-Ostaniinskogo neftyanogo mestorozhdeniya (Tomskaya oblast) [Paleozoic basement geological structure model of Northern Ostaninskoe oil field (Tomsk region)]. *Mountain Journal*, 2012, Special issue, pp. 35–38.
- Volkova A.A. Vybory optimalnykh parametrov seismicheskogo fatsialnogo analiza pri izuchenii paleozoiskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri [Selection of optimal parameters of seismic facies analysis in the study of Paleozoic deposits in Western Siberia]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XXII Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchennykh* [Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXII International Scientific Symposium named after academician M.A. Usov for students and young scientists]. Tomsk, TPU Publ. house, 2018. Vol. I, pp. 383–384.
- Volkova A.A. Kompleksnyy analiz seismicheskikh i skvazhinnykh dannykh pri izuchenii treshchinovatykh kollektorov na primere mestorozhdeniya v fundamente Zapadnoy Sibiri [Comprehensive analysis of seismic and well data in the study of fractured reservoirs on the example of a field in the basement of Western Siberia]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XXII Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchennykh* [Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXI International Scientific Symposium named after academician M.A. Usov for students and young scientists]. Tomsk, TPU Publ. house, 2018. Vol. I, pp. 356–358.
- Volkova A.A. Primeneniye seismofatsialnogo analiza dlya utochneniya skhemy geologicheskogo stroeniya na primere mestorozhdeniya v fundamente Zapadnoy Sibiri [Use of seismic facies analysis to clarify the geological structure of the field as an example in the basement of Western Siberia]. *Sovremennyye problemy sedimentologii v neftegazovom inzhiniringe. Trudy III vserossiyskogo nauchno prakticheskogo sedimentologicheskogo soveshchaniya* [Modern problems of sedimentology in oil and gas engineering. Proc. of the III All-Russian Scientific and Practical Sedimentology Meeting]. Tomsk, 2017. pp. 223–228.
- Futalan K., Mitchell A., Amos K., Backe G. Seismic facies analysis and structural interpretation of the Sandakan sub-basin. *AAPG international conference and exhibition*. Singapore, 2012. Available at: www.searchanddiscovery.com/documents/2012/30254futalan/ndx_futalan.pdf (accessed 14 February 2021).
- White R.E. Properties of instantaneous seismic attributes. *The Leading Edge*, 1991, vol. 10, no 7, pp. 26–32.
- West B.P., May S.R., Eastwood J.E., Rossen C. Interactive seismic facies classification using textural attributes and neural networks. *The Leading Edge*, 2002, vol. 21, no. 10, pp. 1042–1049.
- Chopra S., Marfurt K. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. *Geophysical developments*. Tulsa, SEG, 2007. 464 p.
- Metodicheskie rekomendatsii po podschetu geologicheskikh zapasov nefti i gaza obemnym metodom* [Guidelines for calculating the geological reserves of oil and gas by the volumetric method]. Eds. V.I. Petersils, V.I. Poroskuna, G.G. Yatsenko. Moscow, Tver, VNIGNI, Scientific and Practical Center «Tvergeofizika», 2003. 258 p.
- Zhukov A.P., Zhemchugova V.A., Epov K.A., Fedotov S.L. Prognozirovaniye struktury i svoystv prirodnykh rezervuarov na osnove kompleksnoy interpretatsii seismicheskikh i skvazhinnykh geologo-geofizicheskikh dannykh [Prediction of the structure and properties of natural reservoirs based on a comprehensive interpretation of seismic and borehole geological and geophysical data]. *Seismic exploration technologies*, 2006, no 1, pp. 69–78.
- Chuchalina K.Yu. *Statisticheskoe obosnovaniye seismofatsialnogo analiza slozhnopolostroyennykh karbonatnykh kollektorov Severo-Ostaniinskogo neftyanogo mestorozhdeniya: magisterskaya dissertatsiya* [Statistical justification of seismic facies analysis of complex carbonate reservoirs of the North-Ostaninskoye oil field: master's thesis]. Tomsk, 2019. 84 p.
- Cholovsky I.P. *Metody geologo-promyslovogo analiza pri razrabotke krupnykh neftynykh mestorozhdeniy* [Methods of geologi-

- cal field analysis in the development of large oil fields]. Moscow, Nedra Publ., 1966. 180 p.
14. Chernova O.S., Zakharova A.A. K voprosy o klassifikatsii obstanovok osadkonakopleniy, fatsii, geneticheskikh tipov porod i osadochnykh tekstur s pozitsii klasternogo analiza [On the classification of sedimentation conditions, facies, genetic types of rocks and sedimentary textures from the perspective of cluster analysis]. *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost otlozheny yugovostoka Zapadno-Sibirskoy plity (Tomskaya oblast)* [Geological structure and oil and gas content of sediments in the southeast of the West Siberian Plate (Tomsk Region)]. Novosibirsk, NGU Publ. house, 2006. pp. 175–178.
 15. Amaefule J.O., Keelan D.K. Stochastic approach to computation of uncertainties in petrophysical properties. *SCA conference*. Texas, 1989. pp. 1–28.
 16. Davis J. *Statisticheskii analiz dannykh v geologii* [Statistical analysis of data in geology]. Moscow, Nedra Publ., 1990. pp. 424–427.
 17. Kuznetsov V.G. *Fatsii i fatsialny analiz v neftegazovoy geologii* [Facies and facies analysis in oil and gas geology]. Moscow, Publishing Center of the Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkin, 2012. 244 p.
 18. Sloss L.A., Crumbain V.K., Daples E.V. *Kompleksny fatsialny analiz* [Complex facies analysis]. Sedimentary facies in geological history. Moscow, Nedra Publ., 1953. 289 p.
 19. Hallem E. *Interpretatsiya fatsiy i stratigraficheskaya posledovatel'nost* [Interpretation of facies and stratigraphic sequence]. Moscow, Mir Publ., 1983. 328 p.
 20. Olneva T., Ovechkina V., Zhukovskaya E. Object-oriented geoseismic analysis: ways and examples. *XVII Serbian geological congress. Book of Abstracts*. Serbia, 2018. pp. 707–713.
 21. Linari V., Santiago M., Pastore C., Azbel K., Poupon M. Seismic facies analysis based on 3D multiattribute volume classification, La Palma Field, Maracaibo, Venezuela. *The Leading Edge*, 2003, pp. 32–36.
 22. Davies D.K., Vessell R.K. Flow unit characterization of a shallow shelf carbonate reservoir: North Robinson Unit, West Texas. *10th Symposium on Improved Oil Recovery*. Tulsa, 1996. pp. 21–24.

Received: 9 June 2021.

Information about the authors

Kristina Yu. Chuchalina, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mikhail O. Korovin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.98

ТЕПЛОВОЙ ПОТОК И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Лобова Галина Анатольевна¹,
lobovaga@tpu.ru

Меренкова Анна Сергеевна¹,
a.merenkova@yandex.ru

Исаев Валерий Иванович¹,
isaevvi@tpu.ru

Кузьменков Станислав Григорьевич²,
ksg.1948@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Югорский государственный университет,
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

Актуальность исследования северо-восточной части Томской области определяется необходимостью поисков новых источников пополнения ресурсной базы, определенных стратегией развития нефтяной отрасли Российской Федерации до 2035 г.

Целью данного исследования является определение плотности теплового потока и выполнение корреляции аномальных зон полученного параметра с установленной нефтегазоносностью, определение перспективности северо-восточных земель Томской области для нижнеюрских и доюрских отложений.

Объектом исследования являются северо-восточные земли Томской области, относящиеся к территории широкого распространения геттанг-нижнетогурских потенциальных нефтематеринских тогурских отложений и имеющие определенное сходство геологического строения с нефтепромысловыми районами. Для определения плотности теплового потока использованы температуры, измеренные в 38 поисково-разведочных и параметрических представительных скважинах.

Методы исследования включают сбор и анализ геолого-геофизических данных по глубоким скважинам, пробуренным на территории исследования, и палеотемпературное моделирование 1D, совмещенное с палеотектоническими реконструкциями с применением отечественного программного продукта.

Результаты. По расчетным значениям теплового потока в скважинах методом интерполяции построена карта с сечением изолиний 2,5 мВт/м². Анализ выполненных построений показывает, что тепловое поле на кровле фундамента в северо-восточной части Томской области неоднородно. Его значения изменяются от 33 до 69 мВт/м². Зона повышенных значений плотности теплового потока простирается с северо-запада на юго-восток, пересекая тектонические структуры. На северо-восточных и восточных участках наблюдается снижение напряженности геотермического поля. Повышенные значения теплового потока в основном коррелируют с установленной нефтегазоносностью на территории исследования. В пределах южной части Карамкинского мезопргиба предполагается высокая перспективность в нижнеюрском и доюрском комплексах. Высокие перспективы нефтегазоносности можно отметить в районе параметрической скважины Южно-Пыжинская 1 и земель, расположенных в Восточно-Пайдугинской мегавпадине, где увеличены мощности нижнеюрских отложений и величина теплового потока.

Выводы. Получены новые данные о плотности теплового потока на северо-востоке Томской области. Территория исследования перспективна для проведения дальнейших поисково-разведочных работ с целью открытия залежей в нижнеюрских и доюрских объектах.

Ключевые слова:

Нефтематеринские тогурские отложения, палеотемпературное моделирование, плотность теплового потока, нефтегазоносность, нижнеюрские и доюрские отложения, северо-восток Томской области.

Введение

Потребность в новых источниках пополнения ресурсной базы в Томской области является весьма назревшей задачей. По принятой стратегии развития Российской Федерации до 2035 г. задача нефтяной отрасли в Западной Сибири – прирастить запасы УВ за счет изучения и освоения малоизученных территорий [1]. Перспективы нефтегазоносности земель напрямую связаны с наличием как резервуаров, так и нефтематеринских отложений. В северо-восточной части Томской области интерес представляют нижнеюрский и доюрский нефтегазоносные комплексы,

для которых потенциально нефтематеринскими являются тогурские отложения, имеющие широкое распространение на этих землях.

В пределах Томской области ранее выполнены исследовательские работы в Нюрольской, Усть-Тымской мегавпадинах, Колтогорском мезопргибе, Бакчарской мезовпадине (рис. 1), включающие бассейновое моделирование и ранжирование территории по степени перспективности для проведения дальнейших поисковых работ на горизонты нижней юры и палеозоя. Наиболее крупный Верхнекетский геттанг-раннетогурский седиментационный бассейн, расположенный в восточной ча-

сти Томской области и имеющий сходное геологическое строение [2], также представляет определенный интерес

в нефтегазоносном отношении и является объектом исследования в данной работе.

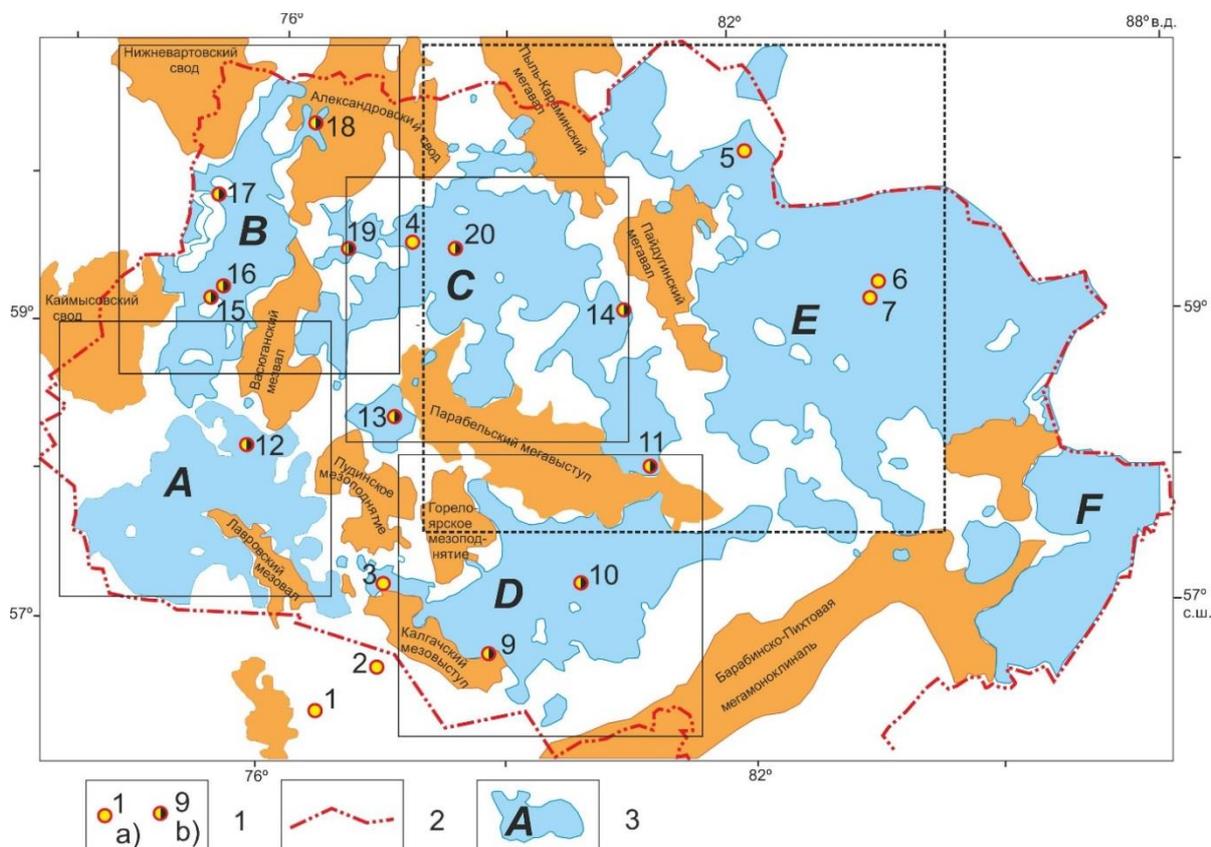


Рис. 1. Схема областей накопления нижнеюрских нефтематеринских отложений (по [2, 3] с доработкой). 1 – скважина, вскрывшая тогурскую свиту: получен приток (а); изучен керн (б); 2 – контур Томской области; 3 – геттанг-нижнетоярские седиментационные бассейны: А – Нюрольский, В – Колтогорский, С – Усть-Тымский, D – Бакчарский, E – Верхнекетский, F – Тегульдетский. Сплошной черной линией обозначены участки ранее выполненных исследований на основе палеотемпературного моделирования [3–5]. Положение территории исследования показано пунктирной линией

Fig. 1. Scheme of accumulation areas of Lower Jurassic oil source suites (according to [2, 3] with revision): 1 – the well penetrated the Togur suite: inflow (a) received; core studied (b); 2 – the Tomsk region outline; 3 – Hettangian-Lower Toarcian sedimentation basins: A – Nurovka; B – Koltogor; C – Ust-Tym; D – Bakchar; E – Verkhneketskiy; F – Teguldetskiy. The solid black line denotes areas of earlier studies based on paleotemperature modeling [3–5]. The location of the study area is shown with a dashed line

Известно, что геотемпература является важным прогностическим критерием [6–8], поэтому исследования направлены на определение величины теплового потока из кровли фундамента, построение карты и прослеживание связи между установленной нефтегазоносностью и аномальными зонами полученного параметра.

Краткая характеристика нефтегазоносности территории

Территория исследования охватывает центральную и западную части Верхнекетского, западную часть Усть-Тымского и северный участок Бакчарского геттанг-нижнетоярских седиментационных бассейнов. Исследуемый район частично перекрывает ранее изученные земли на стыках территорий.

В тектоническом отношении исследование проводится в Восточно-Пайдугинской, Усть-Тымской мегаплатинах, Бакчарской мезовпадине и структурах их обрамления.

На северо-западе территории исследования, где нефтематеринские волжские отложения (возрастной

аналог баженовской свиты) формируются в прибрежных фациальных условиях (переходная зона), содержание $C_{орг}$ достигает 7 %, мощность толщи 20 м, грация катагенеза M_1^1 , открыто 5 месторождений с залежами нефти в верхнеюрском и меловом комплексах (рис. 2). В пределах северного склона Парабельского мегавыступа открыты газоконденсатные верхнеюрские залежи на месторождениях Сильгинской группы. Далее на восток промышленная нефтегазоносность верхнеюрского и мелового НГК не установлена, вероятнее всего, это связано со снижением генерационного потенциала волжской нефтематеринской свиты.

Таким образом, основной интерес представляют нижнеюрский и доюрские комплексы, для которых потенциально нефтематеринскими являются тогурские породы, которые имеют широкое распространение на территории исследования и, по данным исследователей [2, 9], обладают достаточным нефтематеринским потенциалом.

Отмечается неоднородность РОВ в тогурских отложениях, здесь присутствуют как гумусовая, так и сапропелевая составляющие [10]. В приведенных результатах изучения с использованием современных методов аналитической органической геохимии нижнеюрских пород в скважинах, расположенных в восточной части территории исследования, показано, что значение $S_{орг}$ достигает в урманской свите (скв. Восток-3) до 2 %, а водородный индекс достигает 38 мг УВ/г $S_{орг}$, что указывает на принадлежность основной части РОВ к террагенному генезису [11]. Стадия катагенеза органического вещества достигает градации $МК_1 - МК_1^2$, что подтверждает катагенетическую зрелость битумоидов.

Нижнеюрские толщи в наиболее прогнутых участках характеризуются присутствием в разрезе урманской, тогурской и пешковской свит с пластами-коллекторами ($Ю_{17}$, $Ю_{16}$ и $Ю_{15}$), покрывками для которых служат глинистые толщи китербютского и лайдинского горизонтов [12]. Вскрытые пласты имеют прямые признаки нефтенасыщения (рис. 2). Из нижнеюрских толщ получены: приток воды с пленкой нефти из пласта $Ю_{14}$ пешковской свиты в скважине Южно-Пыжинская 1 и разгазированная нефть в интервалах залегания пластов $Ю_{16-17}$ урманской свиты в Толпаровской 1.

Таким образом, полученные результаты геолого-разведочных работ на территории исследования подтверждают ее перспективность и позволяют выполнить «нефтегеологическое моделирование» [13–15].

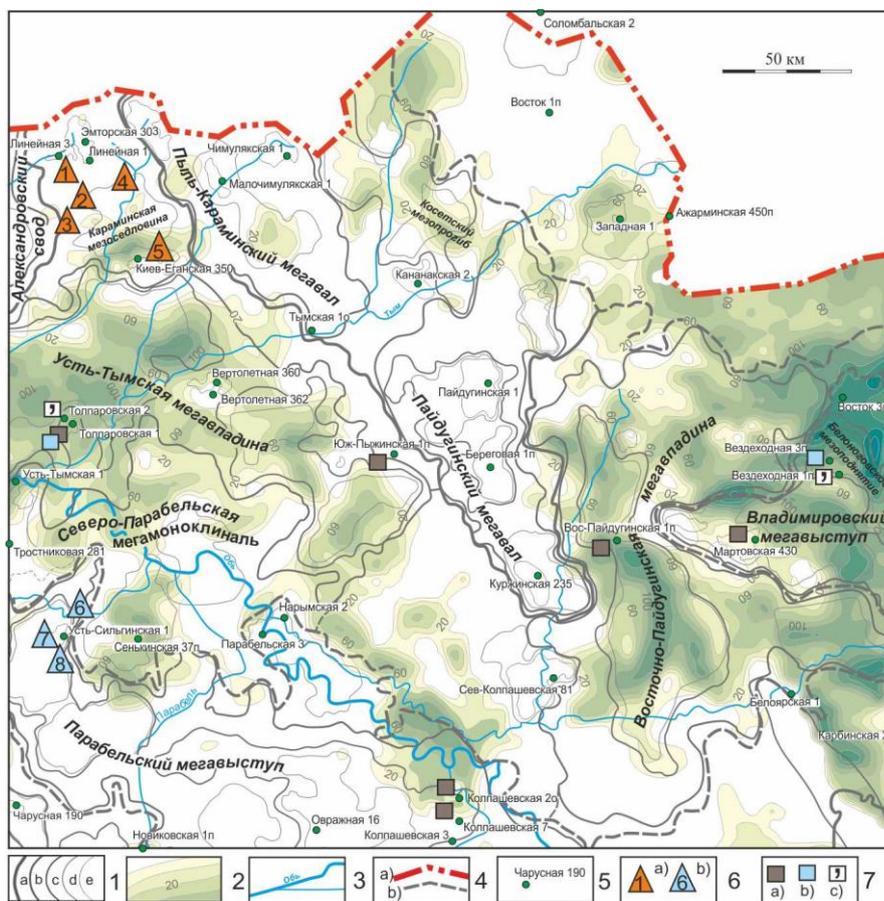


Рис. 2. Обзорная схема нефтегазоносности северо-восточной части Томской области на тектонической основе юрского структурного яруса с границей распространения тогурских нефтематеринских отложений (с использованием [2]): 1 – контур тектонической структур: надпорядковая (а), I–IV порядка (b–e); 2 – изопахиты тогурских отложений с сечением 20 м; 3 – речная сеть; 4 – граница: Томской области (а), условная для «переходной зоны» от Западно-Сибирской плиты к Енисейскому кряжу (b); 5 – моделируемая скважина; 6 – месторождения углеводородов: нефти (а): 1 – Линейное, 2 – Кондрашовское, 3 – Тунгольское, 4 – Киев-Еганское, 5 – Арбузовское; газоконденсатное (b): 6 – Северо-Сильгинское, 7 – Усть-Сильгинское, 8 – Среднесильгинское; 7 – прямые признаки нефтегазоносности в нижнеюрском и доюрском НГК: непромышленный приток нефти (а), газа (b); запах нефти в керне (с)

Fig. 2. Overview scheme of oil and gas presence of the Tomsk region north-eastern part on the Jurassic structural stage tectonic foundation with the boundary of Togur oil source deposits distribution (using [2]): 1 – boundaries of tectonic structures: supra-order (a), I–IV order (b–e); 2 – isopachous lines of the Togur deposits with a section of 20 m; 3 – river system; 4 – boundary of Tomsk region (a), conditional border of the «transition zone» from the West Siberian plate to the Yenisei ridge (b); 5 – the simulated well; 6 – hydrocarbon fields: of oil (a): 1 – Lineynoe, 2 – Kondrashovskoe, 3 – Tungolskoe, 4 – Kiev-drashovskoe, 5 – Arbuzovskoe, 4 – Kiev-Eganskoe, 3 – Tungsolskoe, 4 – Arbuzovskoe; of gas and condensate (c): 6 – Severo-Silginskoe, 7 – Ust-Silginskoe, 8 – Srednesilginskoe; 7 – direct signs of oil and gas presence obtained in the Lower Jurassic and pre-Jurassic oil and gas complexes: noncommercial flow of oil (a), gas (b); the smell of oil in the core (c)

На данном этапе исследований ставится задача определить и закартировать распределение теплового потока из кровли фундамента, и установить степень корреляции его значений с доказанной нефтегазоносностью.

Методика расчета теплового потока

Для выполнения исследований используется программное обеспечение «ТермоDialog» [16], позволяющее проводить нефтегеологическое моделирование 1D с учетом местного изменения поверхностной температуры в геологическом прошлом. Это программное обеспечение по своим результатам не уступает известным программам бассейнового моделирования, таким как BasinMod, Temis Flow, PetroMod, TECMOD2D [17–20]. Преимущество применяемой компьютерной технологии состоит в том, что определение теплового потока не требует сведений об условиях его внутреннего источника, подтверждение которых также нуждается в убедительных фактах о их существовании.

Методика расчета теплового потока из кровли фундамента заключается в решении обратной линейной задачи геотермии [21]. Для решения используется статистическая модель распределения коэффициента теплопроводности в каждой свите осадочного разреза с верхним граничным условием, соответствующим изменению климата в прошлые геологические эпохи на поверхности Земли в изучаемом районе [22]. При этом решение задачи является однозначным, так как принимается допущение квазипостоянства теплового потока, который по оценкам [23], начиная с юрского периода, изменялся в пределах 5 %.

При отсутствии на территории исследований экспериментальных определений теплопроводности свит осадочного чехла используются петрофизические зависимости теплопроводности осадков от их литологии и плотности [6]. Коэффициенты температуропроводности, плотности тепловыделения радиоактивных источников определяются литологией стратиграфических комплексов.

Необходимо отметить, что вклад радиоактивных источников тепла осадочного разреза может быть ощутимым, в зависимости от мощности осадочного чехла на конкретный момент геологического времени. Поэтому этот фактор алгоритмически учитывается решением прямых задач геотермии при расчете геотемператур осадочных комплексов.

Для палеотемпературного моделирования используются литолого-стратиграфические разбивки глубоких скважин, температуры, полученные как при испытании интервалов с существенными притоками флюида, так и определенные по геотермии в скважинах, выдержанных в состоянии покоя необходимое время после завершения работ (материалы представлены томским территориальным фондом геологической информации).

В качестве исходных используются также палеотемпературы, пересчитанные из отражательной способности витринита (материалы предоставлены Институтом нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН).

Для моделирования проанализированы 63 скважины, из них отобраны 38 наиболее представительных и соответствующих требованиям измерения исходных температур.

Достоверность результатов моделирования обеспечивается сходимостью расчетных и измеренных температур, равной среднеквадратичной погрешности измерений. В наших расчетах сходимость («невязка») составила порядка ± 2 °C (таблица), что соответствует погрешности определения измеренных температур [7].

В процессе выполнения расчетов для четырех скважин: Кананакская 2, Ажарминская 450, Восток 1 и Вездеходная 3, было установлено, что совместное применение в качестве наблюдаемых палеотемператур, определенных из ОСВ, и геотемператур, определенных в современном разрезе, приводит к расхождению наблюдаемых и расчетных температур выше допустимых значений. Расчеты выполнены в двух вариантах, в каждом из которых учитывался только один тип наблюдаемых температур. При построении карты использовалось среднее значение между двумя итерациями. Однако этот вопрос требует отдельной проработки, так как, вероятно, имеет место проявление процессов эрозии, что рекомендуется учитывать при построении модели [24–28].

По полученным значениям теплового потока в скважинах методом интерполяции построена карта с сечением изолиний $2,5 \text{ мВт/м}^2$ (рис. 3).

Анализ карты теплового потока

Анализ выполненных построений показывает, что тепловое поле на кровле фундамента в северо-восточной части Томской области неоднородно. Его значения изменяются от 33 до 69 мВт/м^2 (рис. 3).

Отмечается зона повышенных значений плотности теплового потока, простирающаяся с северо-запада на юго-восток и пересекающая при этом как положительные тектонические структуры, так и отрицательные. Высокие значения теплового потока отмечались ранее на Александровском вале, расположенном в северной части территории исследования. Такой же тепловой режим сохраняется и восточнее, в пределах Караминской мезоседловины, достигая максимума в скважине Куль-Еганская 350 (63 мВт/м^2). Юго-восточная аномалия закартирована на Колпашевской структуре, плотность теплового потока в 69 мВт/м^2 зафиксирована в скважине 2.

Можно усомниться в значении 60 мВт/м^2 в Белоярской скважине в связи с ее близостью к Карбинской 2, где получено значение в 42 мВт/м^2 . Скважины находятся в тектоническом плане в «переходной» зоне от Западно-Сибирской плиты к байкалидам Енисейского кряжа, для которых характерно понижение теплового потока.

В северо-восточном и восточном направлении наблюдается снижение напряженности геотермического поля. Локальная аномалия с понижением теплового потока до 33 мВт/м^2 отмечается в «переходной» зоне от Западно-Сибирской плиты к Енисейскому кряжу.

В восточном направлении идет постепенно снижение плотности теплового потока, что соответствует данным, полученным ранее [4, 6].

Таблица. Сопоставления измеренных и расчетных температур, рассчитанные значения плотности теплового потока в моделях скважин

Table. Comparison of the measured and calculated temperatures, calculated values of heat flux density in the study area

Скважина, ее условный индекс (рис. 3) Well, its conditional field index (Fig. 3)	Глубина измерения параметра, м Parameter measurement depth, m	Температура/Temperature, °C					Разница расчётной и измеренной Difference in calculated and measured	Расчётный тепловой поток, мВт/м ² /Глубина, м Calculated heat flux, mW/m ² /Depth, m
		*Пластовая Formation	**ОСВ (R_{vit}^o) Reflectivity of vitrinite	*ОГГ General geothermal gradient	Модельная (расчётная) Model (calculated)			
Береговая параметрическая 1, Б1п Beregovaya parametric 1	2415	83	–	–	80	–3	49/2576	
	2330	78	–	–	77	–1		
	2500	–	–	81	82	1		
	2390	–	99(0,64)	–	96	–3		
	2405	–	99(0,64)	–	96	–3		
	2410	–	99(0,64)	–	97	–2		
	2449	–	99(0,64)	–	98	–1		
	2560	–	103(0,68)	–	101	2		
	2573	–	100(0,65)	–	102	2		
Среднеквадратическое отклонение, °C Mean squared error («true error»), °C						±2		
Вертолетная 360, В360 Vertoletnaya 360	2605	85	–	–	86	1	48/3121	
	2580	84	–	–	85	1		
	2680	90	–	–	88	–2		
	2535	82	–	–	84	2		
	2465	80	–	–	82	2		
	2622	–	105(0,69)	–	102	–3		
	2656	–	105(0,69)	–	103	–2		
Среднеквадратическое отклонение, °C Mean squared error («true error»), °C						±2		
Усть-Сильгинская (УС1) Ust-Silginskaya 1	2040	–	–	58	59	1	42/2531	
	2270	–	–	64	65	1		
	2440	–	–	70	69	–1		
	2500	–	–	72	71	–1		
Среднеквадратическое отклонение, °C Mean squared error («true error»), °C						±1		
Южно-Пыжинская 1 параметрическая (ЮПы1п) Yuzhno-Pyzhinskaya parametric 1	2598	–	116(0,76)	–	114	–2	56/3127	
	2618	–	117(0,77)	–	115	–2		
	2643	–	116(0,76)	–	116	0		
	2705	–	119(0,79)	–	122	3		
	2770	–	119(0,79)	–	118	–1		
	2802	–	119(0,79)	–	120	1		
Среднеквадратическое отклонение, °C Mean squared error («true error»), °C						±2		
Нарымская 2, (Нар2) Narymskaya 2	2370	–	–	75	76	1	47/2717	
	2520	–	–	82	83	1		
	2800	–	–	89	88	–1		
	2850	–	–	91	90	–1		
Среднеквадратическое отклонение, °C Mean squared error («true error»), °C						±1		
Тымская 1 опорная (Т1о) Tymskaya key 1	2290	–	–	67	68	1	43/2921	
	2480	–	–	75	74	–1		
Среднеквадратическое отклонение, °C Mean squared error («true error»), °C						±1		

* – Пластовые температуры и температуры метода ОГГ изучены и сведены из первичных «дел скважин (материалы Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по СФО»);

** – ОСВ (R_{vit}^o) определен в Лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск).

* – Formation temperature and general geothermal gradient are studied and linked from the «well file» (materials of Tomsk branch of «Territorial fund of geological information in SFD»);

** – OCB (R_{vit}^o) – VR is determined in the Laboratory of oil and gas geochemistry at the Institute of oil-and-gas geology and geophysics SB RAS (Novosibirsk).

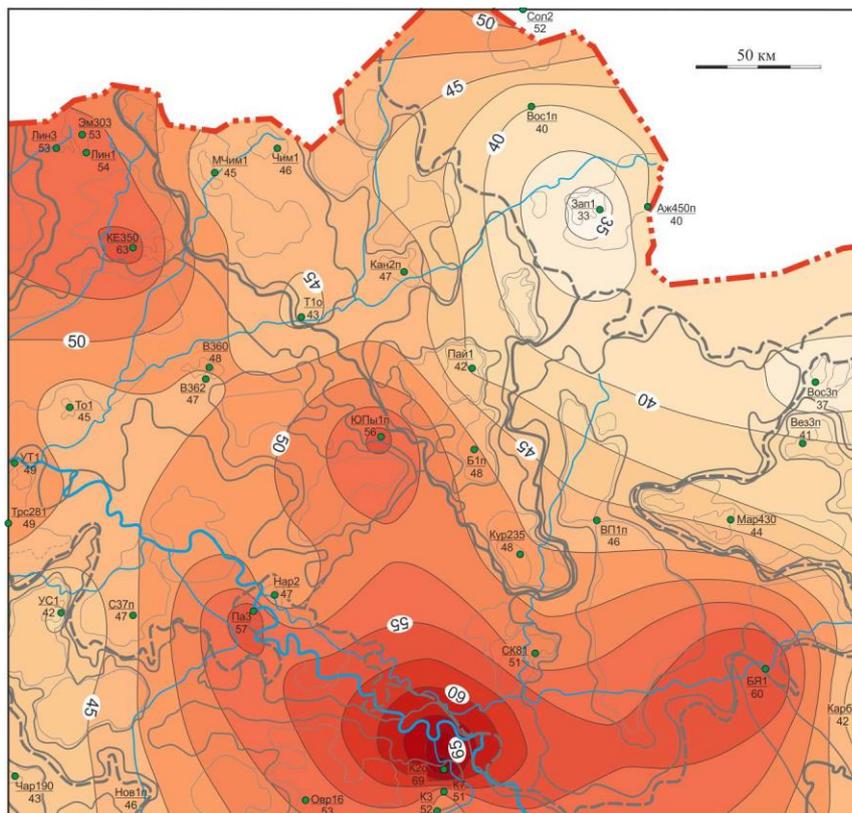


Рис. 3. Схематическая карта расчетного теплового потока северо-восточной части Томской области. Для каждой скважины указаны ее условный индекс и значение плотности теплового потока, mW/m^2

Fig. 3. Map of the calculated heat flow in the north-eastern part of the Tomsk region. Conventional index and heat flow density value are given for each well, mW/m^2

Распределение плотности теплового потока и нефтегазоносность территории

Повышенные значения теплового потока в основном коррелируют с установленной нефтегазоносностью на территории исследования.

Катагенетическая зрелость баженовских отложений, обеспеченная повышенным тепловым потоком, привела к образованию в пределах Караминского мезопрогиба нескольких месторождений с залежами в верхнеюрском и меловом НГК (рис. 2). Поскольку тургорские отложения закартированы лишь в южной части структуры, то в контуре распространения тогура можно предположить высокую перспективность в нижнеюрском и доюрском комплексах на Киев-Еганской структуре. Палеозойская толща представлена здесь глинисто-карбонатными породами инской серии (D_3-C_1), способными к образованию зон коллекторов [29].

Высокие перспективы нефтегазоносности можно отметить в районе скважины Южно-Пыжинская 1, где получены прямые признаки нефтегазоносности и в нижнеюрском, и в доюрском НГК. Интерес представляют земли, расположенные южнее этой скважины, где увеличены мощности нижнеюрских отложений и величина теплового потока.

Повышенный тепловой поток и наличие тогура на Колпашевской структуре обусловили генерацию нефти, что доказывается притоками воды с пленкой

нефти из отложений коры выветривания. Г.Д. Исеевым в 2010 г. здесь установлены зоны с высокими коллекторскими свойствами в коре выветривания. Однако, несмотря на то, что первая палеозойская нефть была получена именно здесь еще в 40-е гг. прошлого столетия, промышленных залежей до настоящего времени здесь так и не открыто. Вероятно, это обусловлено сильной преобразованностью пород палеозоя в зоне Томь-Кольванской складчатой области субмеридионального простирания.

К некоторому диссонансу можно отнести полученные прямые признаки нефтегазонасыщения пород фундамента на Вездеходной 3 и низкое значение теплового потока. Скважина Вездеходная 1 вскрыла венд-кембрийскую вездеходную толщу, представленную известняками с прослоями доломитов, где были отмечены капельки и плёночки бурого битума. Скважина Мартовская 430 также находится в пределах распространения вездеходной толщи, где вскрыт известняк с большим содержанием органики (битум?) и при испытании совместно нижнеюрских и палеозойских пород получена вода с пленкой нефти. Тепловой поток здесь также не высок (рис. 3).

Выводы

В результате выполненных исследований получены 38 новых значений плотности теплового потока – фундаментального геодинамического параметра для северо-восточной части Томской области.

Установлена в основном положительная корреляция нефтегазоносности, включая нижнеюрский и доюрский комплексы, и напряженности значений теплового поля. Полученные результаты говорят об обоснованности и необходимости второго этапа исследований – расчета генерационного потенциала тогурской свиты, учета вещественного состава нижнеюр-

ских и доюрских комплексов и последующего проведения районирования и ранжирования этой территории по перспективности.

Авторы благодарят рецензентов за внимательную проработку статьи и замечания, способствующие улучшению аргументации выводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз научно-технологического развития отраслей ТЭК России на период до 2035 года // Минэнерго. 2016. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 17.05.2021).
2. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
3. Нефтегазоносность коллекторов коры выветривания и палеозоя юго-востока Западной Сибири (прогнозирование трудноизвлекаемых запасов) / Г.А. Лобова, В.И. Исаев, С.Г. Кузьменков, Т.Е. Лунёва, Е.Н. Осипова // Геофизический журнал. – 2018. – Т. 40. – № 4. – С. 73–106.
4. Тепловой поток и термическая история материнской нижнеюрской тогурской свиты и нефтегазоносность палеозоя Колтогорского мезопрогиба (южный сегмент Колтогорско-Уренгойского палеорифта) / Г.А. Лобова, Т.Е. Лунёва, В.И. Исаев, Ю.В. Коржов, М.Ф. Галиева, Д.С. Крутенко // Геофизический журнал. – 2019. – Т. 41. – № 5. – С. 128–155.
5. Лобова Г.А., Меренкова А.С., Кузьменков С.Г. Тепловой поток, термическая история материнской нижнеюрской тогурской свиты и нефтегазоносность Бакчарской мезовпадины (юго-восток Западной Сибири) // Геофизический журнал. – 2020. – Т. 42. – № 2. – С. 14–28.
6. Стратегия и основы технологии поисков углеводородов в доюрском основании Западной Сибири / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, Ю.В. Коржов, М.Я. Кузина, Л.К. Кудряшова, О.Г. Сунгурова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 112 с.
7. Tissot B.P. Preliminary data on the mechanisms and kinetics of the formation of petroleum in sediments. Computer simulation of a reaction flowsheet // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2003. – V. 58. – № 2. – P. 183–202. DOI: <https://doi.org/10.2516/ogst:2003013>
8. Handhal A.M., Al-Shahwan M.F., Chafeet H.A. Interpretation of hydrocarbon generation, migration and thermal history of Mesopotamian basin Southern Iraq based 1D Petromod software // Iraqi Geological Journal. – 2020. – V. 53. – № 1B. – P. 29–56.
9. Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. Геохимия органического вещества и нефтегенерационный потенциал нижнеюрской тогурской свиты (юго-восток Западной Сибири) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2014. – Т. 9. – № 1. URL: http://www.ngpt.ru/rub/1/13_2014.pdf (дата обращения 19.05.2021).
10. Катагенез органического вещества в кровле и подошве юрского комплекса Западно-Сибирского мегабассейна / А.Э. Конторович, А.Н. Фомин, В.О. Красавчиков, А.В. Истомин // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50 – № 11. – С. 1875 – 1887.
11. Геохимические критерии нефтегазоносности мезозойских отложений юго-востока Западной Сибири (по результатам бурения скважин Восток-1, 3, 4) / А.Э. Конторович, Е.А. Костырева, В.Н. Меленевский, В.И. Москвин, А.Н. Фомин // Геология нефти и газа. – 2009. – № 1. – С. 4–12.
12. Геологическое строение и сейсмогеологические критерии картирования нефтегазоперспективных объектов нижнеюрских отложений Усть-Тымской мегавпадины / В.А. Конторович, Л.М. Калинина, А.Ю. Калинин, М.В. Соловьев, О.А. Локтионова // Геология нефти и газа. – 2018. – № 6. – С. 81–96.
13. Loktionova O. Geological model and oil-gas-potential of the lower and Middle Jurassic of the Ust-Tym megadepression // Information technologies in solving modern problems of geology and geophysics: VII International Scientific Conference of young scientists and students. Book of Abstracts. – Baku, Azerbaijan, October 15–18, 2018. – P. 40–142.
14. Hantschel T., Kauerauf A.I. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling. – Heidelberg, Springer, 2009. – 476 p.
15. Optical thermal maturity parameters and organic geochemical alteration at low grade diagenesis to anchimetamorphism: a review / C. Hartkopf-Fröder, P. Königshof, R. Littke, J. Schwarzbauer // International Journal of Coal Geology. – 2015. – V. 150. – P. 74–119. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2015.06.005> (дата обращения 19.05.2021).
16. Тепловой поток и нефтегазоносность (полуостров Ямал, Томская область) / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, А.Н. Фомин, В.И. Булатов, С.Г. Кузьменков, М.Ф. Галиева, Д.С. Крутенко // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 3. – С. 125–135. URL: <https://geors.ru/archive/journal/74/> (дата обращения 19.05.2021).
17. Petroleum system evolution in the inverted Lower Saxony Basin, northwest Germany: a 3D basin modeling study / B. Bruns, R. di Primio, U. Berner, R. Littke // Geofluids. – 2012. – V. 13. – № 2. – 26 p. DOI: <http://doi.org/10.1111/gfl.12016>
18. Reconstruction of the Cenozoic history of hydrocarbon fluids from rifting stage to passive continental margin stage in the Huizhou Sag, the Pearl River Mouth Basin / Ya. Li, Sh. Jiang, Zh. Jiang, H. Liu, B. Li // Geofluids. – 2017. – V. 2017. – 32 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/4358985>
19. Reconstruction of burial history, temperature, source rock maturity and hydrocarbon generation in the northwestern Dutch offshore / R.A. Fattah, J.M. Verweij, N. Witmans, J.H. ten Veen // Netherlands Journal of Geosciences. – 2012. – V. 91. – № 4. – P. 535–554. URL: <https://doi.org/10.1017/S001677460000378> (дата обращения 19.05.2021).
20. Heat flow evolution, subsidence and erosion in Upper Silesian Coal Basin, Czech Republic / E. Geršlová, M. Goldbach, M. Geršl, P. Skupien // International Journal of Coal Geology. – 15 January 2016. – V. 154–155. – P. 30–42. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.12.007> (дата обращения 19.05.2021).
21. Обобщение стационарной задачи геотермии Рэлея–Тихонова для горизонтального слоя / В.И. Старостенко, Р.И. Кутас, В.Н. Шуман, О.В. Легостаева // Физика Земли. – 2006. – № 12. – С. 84–91.
22. Палеоклиматические факторы реконструкции термической истории баженовской и тогурской свит юго-востока Западной Сибири / В.И. Исаев, А.А. Искоркина, Г.А. Лобова, А.Н. Фомин // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. – № 4. – С. 3–25.
23. Ермаков В.И., Скоробогатов В.А. Тепловое поле и нефтегазоносность молодых плит СССР. – М.: Недра, 1986. – 222 с.
24. Kutas R.I., Kobolev V.P. The thermal regime of the southern margin East-European craton. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 249. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012034> (дата обращения 19.05.2021)
25. Xiang C., Pang X., Danisik M. Post-Triassic thermal history of the Tazhong Uplift Zone in the Tarim Basin, Northwest China: Evidence from apatite fission-track thermochronology // Geoscience Frontiers. – 2013. – № 4. – P. 743–754. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.11.010> (дата обращения 19.05.2021).
26. Kim C.-S. Automated reconstruction of a basin thermal history with integrated paleothermometry and genetic algorithm. Soft computing for reservoir characterization and modeling. – 2002. – V. 80. – P. 313–329. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1807-9_13 (дата обращения 19.05.2021).
27. Towards stratigraphic-thermo-mechanical numerical modelling: integrated analysis of asymmetric extensional basins / A. Balázs, L. Matenco, D. Granjeon, K. Alms, T. François, O. Sztanó // Global and Planetary Change. – 2021. – V. 196. – P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103386> (дата обращения 19.05.2021).

28. Theissen S., Rüpke L.H. Feedbacks of sedimentation on crustal heat flow: new insights from the Voring Basin, Norwegian Sea // Basin Research. – 2010. – V. 22. – P. 976–990. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00437> (дата обращения 19.05.2021).
29. Исаев Г.Д. Геология и тектоника палеозоя Западной Сибири // Литосфера. – 2010. – № 4. – С. 52–68.

Поступила 09.06.2021 г.

Информация об авторах

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

Меренкова А.С., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Исаев В.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кузьменков С.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

UDC 553/98

HEAT FLOW AND OIL AND GAS PRESENCE OF THE TOMSK REGION NORTH-EASTERN PART**Galina A. Lobova**¹,
lobovaga@tpu.ru**Anna S. Merenkova**¹,
a.merenkova@yandex.ru**Valery I. Isaev**¹,
isaevvi@tpu.ru**Stanislav G. Kuzmenkov**²,
ksg.1948@yandex.ru¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.² Yugra State University,
16, Chehov avenue, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

The relevance of the study of the north-eastern part of the Tomsk region is determined by the need to search for new sources of replenishment of the resource base, defined by the strategy for oil industry development in the Russian Federation until 2035.

The main aim of the research is to determine the heat flow density from the bottom of the sedimentary section by solving the inverse problem of geothermics. It includes the anomalous zones correlation of the obtained parameter with the established oil and gas content and the prospects determination of the north-eastern lands of the Tomsk region for the Lower Jurassic and pre-Jurassic deposits.

The objects of the research are the north-eastern lands of the Tomsk region belonging to the territory of widespread Hettangian-Lower Toarcian. There are potential oil-source Togur deposits having certain similarity in geological structure with oil-producing regions. The temperatures measured in 38 exploration and parametric representative wells were used to determine the heat flow density.

Research methods include the collection and analysis of geological and geophysical data on deep wells drilled in the research area, 1D paleotemperature modeling combined with paleotectonic reconstructions using a domestic software product.

The result. The authors have built a map with a cross-section of isolines of 2,5 mW/m² based on the calculated values of the heat flow in the wells by the interpolation method. The analysis of the performed constructions shows that the thermal field on the top of the basement in the north-eastern part of the Tomsk region is heterogeneous. Its values vary from 33 to 69 mW/m². The zone of increased values of the heat flow density extends from north-west to south-east, crossing tectonic structures. A decrease in the intensity of the geothermal field is observed in the north-eastern and eastern sections. The increased values of the heat flow, in general, correlate with the established oil and gas content in the study area. Within the southern part of the Karamka Mesotrough, high prospects are expected in the Lower Jurassic and Pre-Jurassic complexes. High prospects for oil and gas content can be noted in the area of the Yuzhno-Pyzhinskaya 1 parametric well and lands located in the East Paiduga Megadepression, where the thickness of the Lower Jurassic deposits and the magnitude of the heat flow are increased.

Conclusions. The authors obtained new data on the heat flow density in the Tomsk region north-eastern part. The study area is promising for further prospecting and exploration work with the aim of discovering deposits in the Lower Jurassic and pre-Jurassic objects.

Key words:

Oil source Togur deposits, paleotemperature and paleotectonic modeling, heat flow density, oil and gas content, Lower Jurassic and pre-Jurassic deposits, northeast of the Tomsk region.

The authors are thankful to the reviewers for thoughtful work with the paper and comments, contributing to improvement of reasoning conclusions.

REFERENCES

1. *Prognoz nauchno-tehnologicheskogo razvitiya otrasley TEK Ros-sii na period do 2035 goda* [Forecast of scientific and technological development of the sectors of the Fuel and Energy Complex of Russia for the period up to 2035]. 2016. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/8914> (accessed 17 May 2021).
2. Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegazonosnost mezozoysko-kaynozoykskih otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and oil and gas potential of the Mesozoic-Cenozoic sediments of the Western Siberia southeastern regions]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2002. 253 p.
3. Lobova G.A., Isaev V.I., Kuzmenkov S.G., Luneva T.E., Osipova E.N. Oil and gas reservoirs of weathering crusts and Paleozoic basement in the southeast of Western Siberia (forecasting of hard-to-recover reserves). *Geofizicheskii zhurnal*, 2018, vol. 40, no. 4, pp. 73–106. In Rus.
4. Lobova G.A., Luneva T.E., Isaev V.I., Korzhov Yu.V., Galieva M.F., Krutenko D.S. The heat flow, thermal history of the source Lower Jurassic Togurskaya suite and oil-and-gas potential of the Paleozoic of the Koltogor mezodepression (southern segment of the Koltogor-Urengoy paleorift). *Geofizicheskii zhurnal*, 2019, vol. 41, no. 5, pp. 128–155. In Rus.
5. Lobova G.A., Merenkova A.S., Kuzmenkov S.G. Heat flow, thermal history of the source Lower Jurassic Togur suite and hydrocarbon presence in the Bakchar mezodepression (South-East of West Siberia). *Geofizicheskii zhurnal*, 2020, vol. 42, no. 2, pp. 128–155. In Rus.
6. Isaev V.I., Lobova G.A., Korzhov Yu.V., Kuzina M.Ya., Kudryashova L.K., Sungurova O.G. *Strategiya i osnovy tekhnologii poiskov uglevodorodov v doyrskom osnovanii Zapadnoy Sibiri* [Strategy and basis of technologies for hydrocarbon exploration in the pre-Jurassic basement of Western Siberia]. Tomsk, TPU Publ. house, 2014. 112 p.

7. Tissot B.P. Preliminary data on the mechanisms and kinetics of the formation of petroleum in sediments. Computer simulation of a reaction flowsheet. *Oil & Gas Science and Technology. Rev. IFP*, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 183–202. DOI: <https://doi.org/10.2516/ogst:2003013>
8. Handhal A.M., Al-Shahwan M.F., Chafeet H.A. Interpretation of hydrocarbon generation, migration and thermal history of Mesopotamian basin Southern Iraq based 1D Petromod software. *Iraqi Geological Journal*, 2020, vol. 53, no. 1B, pp. 29–56.
9. Kostyreva E.A., Moskvina B.I., Yan P.A. Geochemistry of organic matter and oil generation potential of the Lower Jurassic Togur formation (south-east of Western Siberia). *Neftegazovaya geologia. Teoria i praktika*, 2014, vol. 9, no. 1. In Rus. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/1/13_2014.pdf (accessed 19 May 2021).
10. Kontorovich A.E., Fomin A.N., Krasavchikov V.O., Istomin A.V. Katagenez organicheskogo veshchestva v krovle i podoshve yurskogo kompleksa Zapadno-Sibirskogo megabasseyina [Catagenesis of organic matter in the top and bottom of the West Siberian megabasin Jurassic complex]. *Geologiya i geofizika*, 2009, vol. 50, no. 11, pp. 1875–1887.
11. Kontorovich A.E., Kostyreva E.A., Moskvina V.I., Fomin A.N. Geokhimicheskie kriterii neftegazonosnosti mezozoyskikh otlozheniy yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri (po rezultatam bureniya skvazhin Vostok-1, 3, 4) [Geochemical criteria for the oil and gas content of Mesozoic sediments in the Western Siberia southeast (based on the results of drilling Vostok-1, 3, 4 wells)]. *Geologiya negti i gaza*, 2009, no. 1, pp. 4–12.
12. Kontorovich V.A., Kalinina L.M., Kalinin A.Yu., Solovov M.V., Loktionova O.A. Geologicheskoe stroenie i seismogeologicheskie kriterii kartirovaniya neftegazoperspektivnykh obektov nizhneyurskikh otlozheniy Ust-Tymsoy megavpadiny [Geological structure and seismogeological criteria for oil and gas promising objects mapping in the Lower Jurassic deposits of the Ust-Tym megadepression]. *Geologiya nefii i gaza*, 2018, no. 6, pp. 81–96.
13. Loktionova O. Geological model and oil-gas-potential of the lower and Middle Jurassic of the Ust-Tym megadepression. *Information technologies in solving modern problems of geology and geophysics: VII International Scientific Conference of young scientists and students*. Book of Abstracts. Baku, Azerbaijan, October 15–18, 2018. pp. 40–142.
14. Hantschel T., Kauerauf A.I. *Fundamentals of basin and petroleum systems modeling*. Heidelberg, Springer, 2009. 476 p.
15. Hartkopf-Fröder C., Königshof P., Littke R., Schwarzbauer J. Optical thermal maturity parameters and organic geochemical alteration at low grade diagenesis to anchimetamorphism: a review. *International Journal of Coal Geology*, 2015, vol. 150, pp. 74–119. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2015.06.005> (accessed 19 May 2021).
16. Isaev V.I., Lobova G.A., Fomin A.N., Bulatov V.I., Kuzmenkov S.G., Galieva M.F., Krutenko D.S. Heat flow and oil and gas potential (the Yamal peninsula, Tomsk Region). *Georesources*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 125–135. In Rus.
17. Bruns B., di Primio R., Berner U., Littke R. Petroleum system evolution in the inverted Lower Saxony Basin, northwest Germany: a 3D basin modeling study. *Geofluids*, 2012, vol. 13, no. 2, 26 p. DOI: <http://doi.org/10.1111/gfl.12016>
18. Li Ya., Jiang Sh., Jiang Zh., Liu H., Li B. Reconstruction of the Cenozoic history of hydrocarbon fluids from rifting stage to passive continental margin stage in the Huizhou Sag, the Pearl River Mouth Basin. *Geofluids*, 2017, vol. 2017, 32 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/4358985>
19. Fattah R.A., Verweij J.M., Witmans N., ten Veen J.H. Reconstruction of burial history, temperature, source rock maturity and hydrocarbon generation in the northwestern Dutch offshore. *Netherlands Journal of Geosciences*, 2012, vol. 91, no. 4, pp. 535–554. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0016774600000378>
20. Geršlová E., Goldbach M., Geršl M., Skupien P. Heat flow evolution, subsidence and erosion in Upper Silesian Coal Basin, Czech Republic. *International Journal of Coal Geology*, 2016, vol. 154–155, pp. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.12.007>
21. Starostenko V.I., Shuman V.N., Legostaeva O.V. Obobshchenie stacionarnoy zadachi geotermii Releya–Tikhonova dlya gorizontalnogo sloya [Generalization of the stationary Rayleigh–Tikhonov geothermal problem for a horizontal layer]. *Fizika Zemli*, 2006, no. 12, pp. 84–91.
22. Isaev V.I., Iskorkina A.A., Lobova G.A., Fomin A.N. Paleoclimatic factors of reconstruction of thermal history of parent petroleum bazhenov and togur suites of southeast of West Siberia. *Geofizicheskii zhurnal*, 2016, vol. 38, no. 4, pp. 3–25. In Rus.
23. Ermakov V.I., Skorobogatov V.A. *Teplovoe pole i neftegazonosnost molodykh plit SSSR* [Thermal field and oil and gas content of young plates of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 222 p.
24. Kutas R.I., Kobleev V.P. The thermal regime of the southern margin East-European craton. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 249. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012034> (accessed 19 May 2021)
25. Xiang C., Pang X., Danisik M. Post-Triassic thermal history of the Tazhong Uplift Zone in the Tarim Basin, Northwest China: evidence from apatite fission-track thermochronology. *Geoscience Frontiers*, 2013, no. 4, pp. 743–754. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.11.010>
26. Kim C.-S. Automated reconstruction of a basin thermal history with integrated paleothermometry and genetic algorithm. *Soft computing for reservoir characterization and modeling*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002, vol. 80, pp. 313–329. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1807-9_13
27. Balázs A., Maţenco L., Granjeon D., Alms K., François T., Sztanó O. Towards stratigraphic-thermo-mechanical numerical modelling: Integrated analysis of asymmetric extensional basins. *Global and Planetary Change*, 2021, vol. 196, pp. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103386>
28. Theissen S., Rüpke L.H. Feedbacks of sedimentation on crustal heat flow: new insights from the Voring Basin, Norwegian Sea. *Basin Research*, 2010, vol. 22, pp. 976–990. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00437>
29. Isaev G.D. Geologiya i tektonika paleozoya Zapadnoy Sibiri [Geology and tectonics of the Western-Siberian plate Paleozoic basement]. *Litosfera*, 2010, no. 4, pp. 52–68.

Received: 9 June 2021.

Information about the authors

Galina A. Lobova, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anna S. Merenkova, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valery I. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Stanislav G. Kuzmenkov, Dr. Sc., professor, Yugra State University.

УДК 551.341

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ МИГРАЦИИ ИОНОВ РАСТВОРЕННОЙ СОЛИ NaCl ПРИ ВЕРТИКАЛЬНО НАПРАВЛЕННОМ ЗАМЕРЗАНИИ ГРУНТА

Григорьев Борис Владимирович,
b.v.grigorev@utmn.ru

Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

Актуальность исследования продиктована нарастанием темпов деградации криолитозоны одновременно с интенсивным промышленным освоением территории вечной мерзлоты, сопровождающимся нарушением естественных природных процессов и разрушением хрупкой экосистемы Арктических и приарктических территорий. Одним из последствий хозяйственной деятельности человека является засоление грунта. Продолжительный процесс миграции растворенных солей в толщу ведет к формированию ряда объектов криолитозоны, среди которых большой интерес представляют криопэги – линзы переохлажденного порового раствора в окружении мерзлого флюидоупора.

Цель: изучение процесса криогенного концентрирования соли в водонасыщенной песчанистой супеси.

Метод. Эксперимент состоит из повторяющихся циклов вертикально направленного частичного замораживания–оттаивания засоленного влажного грунта в замкнутом объеме – вертикальном теплоизолированном цилиндре, теплоперенос в котором осуществлялся через торцевые стороны. Продвижение фронта заморозания регулировалось программным алгоритмом управления мощностью холодильника с одной стороны и нагревателя с другой до замораживания грунта на определенную глубину, за которой следовало оттаивание.

Результаты. В эксперименте воспроизводилась ситуация, характерная для осенне-весеннего периода: ежедневный процесс промерзания и оттаивания влажного грунта, загрязненного легкорастворимыми солями. В результате проведены четыре серии экспериментов с разным количеством повторяющихся циклов движения фронта заморозания и фронта оттаивания в грунте, насыщенном концентрированным раствором соли NaCl, по направлению сверху вниз на расстояние 70–80 % от высоты цилиндра. При этом нижняя область всегда поддерживалась в талом виде. Описаны наблюдаемые явления, и приведено вероятное объяснение процессам, сопровождающим заморозание и оттаивание грунта, таким как неодинаковое по вертикальному сечению снижение температуры начала заморозания, формирование теплового барьера в направлении движения фронта заморозания в низкотемпературной области, перераспределение ионов соли по вертикальному разрезу, зависимость градиента концентрации от числа циклов заморозания–оттаивания, отклонение значения температуры таяния по сравнению с температурой начала заморозания. Получены численные значения перераспределения влажности и концентрации раствора в грунте после каждой серии экспериментов.

Ключевые слова:

Криопэги, фронт промерзания, концентрирование солей, фазовый переход, температура начала заморозания.

Введение

В настоящее время наблюдается новый виток интереса к Арктике и криолитозоне в целом, продиктованный как богатой сырьевой базой, представленной в области многолетней мерзлоты и шельфа, так и геополитическими мотивами стран Арктического региона [1].

Одной из ключевых задач освоения и эффективно-го использования сухопутной территории, занятой многолетней мерзлотой, является строительство зданий и сооружений по технологиям, обеспечивающим их длительную безаварийную функциональность и исключение экологического вреда окружающей территории. При любых вариантах использования мерзлоты выдвигается требование сохранности грунта в мерзлом состоянии по причине того, что несущая способность грунта лавинообразно падает при фазовом превращении льда, выполняющего роль цемента, который скрепляет между собой минеральные и органические частицы [2, 3]. Суммарная льдистость мерзлого грунта за счет льда-цемента и ледяных включений может достигать 90 % и более [1, 4]. Технология замещения переувлажненных мерзлых грунтов песчаным грунтом решает проблему стабилизации оснований лишь частично, временно локализуя участок,

но приводит к нарушению естественного режима надмерзлотного и межмерзлотного стока, вызывая деградацию мерзлоты по периметру.

Высокие темпы освоения территорий многолетней мерзлоты выявляют две взаимосвязанные проблемы: малый срок безаварийной эксплуатации зданий и сооружений в результате деформации грунтов оснований и тепловое и минеральное засорение поверхностного слоя, сопровождаемое проведением недопустимых для многолетнемерзлых грунтов земляных работ на этапе строительства. Это приводит к растеплению, переувлажнению и в конечном счете деформациям поверхности [5].

Криопэги – изолированные напорные высокоминерализованные линзы подземных вод, широко представленные на арктическом побережье, под руслами рек и озерами, а также на территории жилой застройки. Последние сформировались относительно недавно вследствие деятельности человека: загрязнение поверхности бытовыми стоками, нарушение водообмена с общим растеплением грунта привело к концентрированию солей в поверхностном слое грунта и последующему криогенному концентрированию солей на глубине 1–4 м с образованием линз криопэгов. Подобные образования несут значительный вред для зданий и со-

оружений, вызывая коррозию опор металлических и бетонных оснований, деформацию поверхности, и снижают несущую способность грунта [6–9].

Главная особенность криопэггов в том, что они существуют при отрицательной температуре, притом обычная температура их существования в пределах $0...-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, хотя встречаются криопэгги при температуре $-2...-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от концентрации растворов [10, 11].

Размеры и минерализация криопэгга не постоянны и изменяются в течение года. В марте – начале июня наблюдается максимальная концентрация, максимальный напор и минимальные размеры из-за промерзания грунтового массива [12]. Минимум концентрации солей приходится на август–октябрь. Такие сезонные колебания влияют на уровень земной поверхности грунта, нагруженного внешним давлением, вызывая серьезные повреждения многоэтажных конструкций [13].

Обзор экспериментальных работ по теме исследования процессов концентрирования солей в условиях вертикально направленного замерзания–оттаивания грунта показал неоднозначный характер миграции ионов солей. Так, в публикации А.М. Тимофеева [14] при промораживании сверху вниз засоленного образца песка максимальная концентрация порового раствора установилась в нижней части ячейки, в то время как для глинистого грунта наибольшее значение концентрации было в верхней части образца. В то же время многие полевые исследования авторов Н.В. Ивановой, А.Ф. Паренкиной, А.Ф. Сухоруковой [15–18] и других показывают, что в результате замерзания порового раствора происходит как отжатие солей от фронта промерзания в нижележащие слои с увеличением минерализации поровых растворов последних, так и выпадение солей в осадок либо захватывание наступающим льдом. То есть имеет место криогенный метаморфизм [17].

При изучении в лабораторных условиях процессов миграции влаги и криогенного метаморфизма в мерзлых и замерзающих грунтах необходимо воссоздавать натурные термодинамические условия: температуру, давление, направление фронта замерзания и оттаивания [19, 20]. В предлагаемой к рассмотрению установке была воспроизведена частная ситуация, когда выделенный ограниченный объем грунта подвергается многократному замерзанию, направленному сверху вниз с последующим оттаиванием при засолении одним типом соли.

Экспериментальная установка

Для выполнения исследований по изучению миграции ионов солей в поровой воде при движении фронта промерзания была разработана оригинальная установка (рис. 1), позволяющая задавать и регулировать движение фронта промерзания во влажном грунте. Установка включает в себя измерительную ячейку с грунтом (рис. 1), холодильную камеру, двухканальный источник питания, систему поддержания нулевого спаи термопар и аналого-цифровой преобразователь ZETLAB.

В основе установки измерительная ячейка с грунтом, которая представляет собой двукратно теплоизо-

лированный цилиндр из поливинилхлорида диаметром 50 мм, высотой 220 мм и толщиной стенки 3 мм с охранной медной пластиной между слоями изоляции. С торцов цилиндра размещены алюминиевые диски, непосредственно контактирующие с грунтом. К дискам приклеены элементы Пельтье, регулируя напряжение на которых можно задавать направление теплового потока и положение фронта замерзания в определенный момент времени. Боковые стороны дисков соприкасаются с охранной пластиной. Таким образом, с наружной стороны цилиндра выстраивается температурный градиент подобный тому, что есть в грунте. Для температурной стабилизации элементов Пельтье к их наружной стороне приклеены радиаторы с принудительным обдувом. За контроль температуры грунта отвечают семь термопар, подключенных к аналого-цифровому преобразователю. Измерительные спаи термопар вводятся в грунт с боковой стороны цилиндра на расстоянии 15 мм от верхней и нижней сторон и по 30 мм между собой. Холодные спаи термопар помещаются в сосуд Дьюара, заполненный водоледянной смесью. В собранном виде описанная конструкция помещается в короб, расположенный в криокамере. Криокамера настраивается на температуру, среднюю между температурами, задаваемыми элементами Пельтье. Программируемый источник питания выдает напряжение, изменяющееся по ступенчатому закону. При этом изменение напряжения на каждом шаге минимально и нивелируется толщиной дисков таким образом, что температура грунта изменяется плавно. Элементы Пельтье имеют размеры $40\times 40\text{ мм}$, максимальное напряжение 12 В, максимальный ток 3 А.

Природный грунт предварительно промывается дистиллированной водой для удаления разнообразных солей, растворенных в поровой воде или выпавших в осадок на минеральных частицах. Полученный грунт просеивается и тщательно перемешивается. Готовится раствор NaCl концентрацией 50 г/л. Далее в закрытый с одной стороны цилиндр малыми порциями засыпается сухой грунт и приливается раствор до полного заполнения цилиндра. Вся операция выполняется на вибростоле для плотного и равномерного укладывания частиц. Ячейка в собранном виде устанавливается в открытый с одной стороны короб в криокамере (рис. 1).

Постановка задачи повторяет замерзание грунта в природных условиях: отрицательная температура на верхнем торце плавно изменяется от $0,5\text{ до }-7,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время с нижнего торца поддерживается температура $-1,5...-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответствующая талому состоянию для данной концентрации раствора. Увеличивая напряжение на верхнем Пельтье по ступенчатому закону: от $V_{\min}=0,6\text{ В}$ до $V_{\max}=4,5\text{ В}$, с шагом 1800 сек и количеством шагов 28 и уменьшая напряжение на нижнем Пельтье по аналогичному закону с параметрами от $V_{\max}=0,46\text{ В}$ до $V_{\min}=0,22\text{ В}$ с тем же шагом и количеством шагов, задается перемещение фронта замерзания сверху вниз. При такой постановке эксперимента не достигается полного замораживания грунта – нижняя область толщиной 15–25 мм всегда сохраняется в талом состоянии.

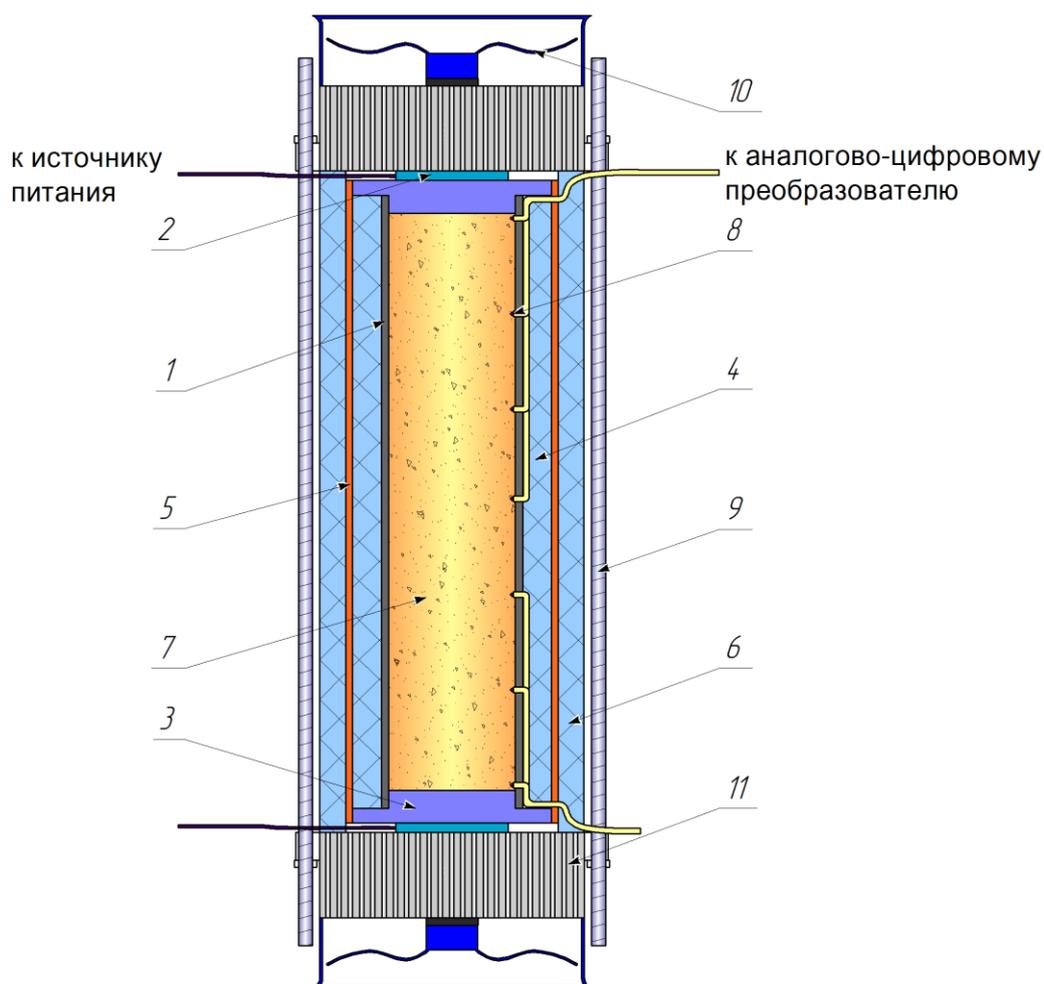


Рис. 1. Конструкция измерительной ячейки: 1 – цилиндр для грунта; 2 – элементы Пельтье; 3 – алюминиевые диски; 4, 6 – теплоизоляция; 5 – медный кожух; 7 – грунт; 8 – термодпары T-типа (медь-константан); 9 – шпильки; 10 – вентиляторы; 11 – радиаторы

Fig. 1. Measuring cell: 1 – ground cylinder; 2 – Peltier elements; 3 – aluminum disk; 4, 6 – thermal isolation; 5 – copper casing; 7 – ground; 8 – copper/constantan thermocouple; 9 – stud-bolt; 10 – fans; 11 – radiators

После этапа замораживания меняется полярность проводов питания верхнего элемента Пельтье. Выставляется напряжение 0,8 В на верхнем и 0,15 В на нижнем. Тем самым обеспечивается оттаивание грунта, повторяющее природный процесс нагрева грунта от солнечного излучения или воздуха. При полном оттаивании грунта полярность верхнего элемента Пельтье снова меняется, и этап замораживания повторяется. Полный цикл заморозание–оттаивание составляет обычно 25 часов, из них 14 часов длится замораживание и 9 часов оттаивание. Описанный цикл повторяется от 7 до 14 раз. После конечного оттаивания грунт размораживается, извлекается из ячейки и разделяется по горизонтали на 4 части.

Результаты

Предварительно был определен гранулометрический состав исследуемого грунта, позволяющий задать его классификацию (по ГОСТ 25100-2011) и установить соотношение глинистых и песчаных частиц (табл. 1). При промывании природного грунта от солей и примесей было обнаружено высокое содержание коллоидных частиц – в течение 24 часов не происходило полного осаждения частиц, особенно в придонном слое наблюдалась устойчивая взвесь, поэтому оставшаяся жидкость выпаривалась при 70 °С.

По результатам таблицы, в соответствии с ГОСТ 25100-2011, исследуемый грунт – это супесь песчаная с долей глинистых частиц.

Таблица 1. Гранулометрический состав

Table 1. Grade analysis

Размер ячейки, мм Mesh width, mm	≥0,63	0,63–0,43	0,43–0,25	0,25–0,20	0,20–0,14	0,14–0,05	>0,05
Масса грунта, гр Soil mass, g	0,330	2,032	6,558	29,370	49,562	7,303	4,845

Было проведено пять экспериментов с одним и тем же типом грунта – супесью, насыщаемой раствором NaCl концентрацией 50 г/л. Эксперименты повторялись в схожих условиях замораживания–оттаивания. Ожидалось увидеть градиент концентрации соли в поровом флюиде на основе анализа водной вытяжки из четырех частей грунта. При этом возрастание концентрации могло возникнуть как в верхней части цилиндра, так и нижней по причинам, указанным выше. В ходе выполнения эксперимента оставалась неопре-

деленность в моменте извлечения образцов: если за время оттаивания, предшествующего извлечению грунта, компенсируется дисбаланс влажности по цилиндру, то и ожидаемый градиент концентрации соли вслед за этим скомпенсируется. Из этого следует необходимость извлекать грунт после этапа замораживания (точка *B*, рис. 2), но это технически сложно и требует другой конструкции ячейки. Поэтому был использован вариант поэтапного размораживания сверху с извлечением оттаявшей части.

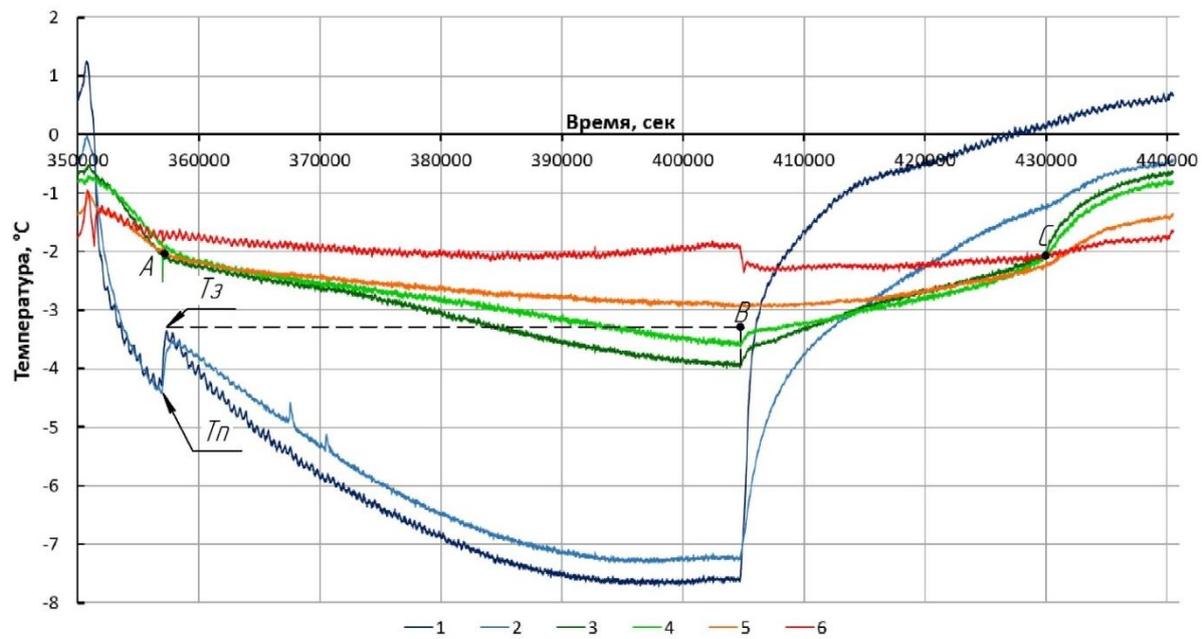


Рис. 2. График одного цикла замораживания–оттаивания. Нумерация датчиков направлена сверху вниз (датчик температуры между 2 и 3 вышел из строя во время эксперимента)

Fig. 2. Schedule of one freezing–thawing cycle. Sensor numbering is from top to bottom (temperature sensor between 2 and 3 failed during the experiment)

Для двух верхних датчиков температуры – 1 и 2 – виден четко выраженный фазовый переход при переохлаждении до $T_n = -4,4$ °C (рис. 2), после которого интенсивность замораживания грунта снижается за счет постепенного высвобождения теплоты фазового перехода при кристаллизации воды, пополняющейся, вероятно, в результате процесса обессаливания концентрированного порового раствора в результате отжатия части ионов или выпадения их в осадок. Нижний датчик – 6 показывает, что окружающий грунт поддерживается при температуре значительно выше температуры фазового перехода, а значит находится в талом состоянии на протяжении всего времени замораживания.

Температура начала замораживания (T_z) колеблется от цикла к циклу от $-3,2$ до $-3,6$ °C. Если принять температуру замораживания в качестве характеристики, устанавливающей фазовое состояние грунта в данный момент, то, анализируя рис. 2, можно определить, что фронт замораживания продвинулся до точки *B*, то есть примерно на расстояние 145 мм при T_z , равной $-3,4$ °C. Однако данное условие может распространяться только на идеальную ситуацию: грунт равномерен по дисперсности и пористости во всех точках,

влажность равномерна по объему пор, флюид – дистиллированная вода, выделение и движение растворимых солей отсутствует. В лабораторном эксперименте эти условия выполняются лишь частично, поэтому о фазовом состоянии воды в точке *B* можно говорить лишь с определенной долей вероятности. Косвенно на фазовое состояние грунта в области датчиков – 3 и 4 в точке *B* указывает перегиб этих графиков в точке *C* при температуре -2 °C в процессе оттаивания: так как режим оттаивания постоянен (по подводу тепла), нет предпосылок изменения тренда линий в точке *C*, намеченного на отрезке 405000–430000 с, поэтому в данном случае речь может идти об окончании таяния грунта в области этих датчиков. Отсюда следует, что грунт находился в мерзлом или частично мерзлом состоянии в области датчика – 4 и даже (хотя по перегибу это меньше заметно) в области датчика – 5, минимальная наблюдаемая температура которого в конце замораживания была $-2,95$ °C. Это доказывает неоднозначность предположения о возможности оценки фазового состояния грунта в произвольной точке по температуре начала замораживания, определенной в другой точке. Вероятной причиной смещения температуры начала замораживания является после-

довательное обессоливание порового раствора при приближении фронта замерзания за счет отжатия или выпадения в осадок ионов [6]. Отжатие предполагается вниз, в талую область, хотя вероятен и обратный процесс – подток влаги к центрам кристаллизации вверх [7], далее кристаллизация молекул воды и захватывание льдом фрагментов раствора с очень высокой концентрацией.

При направленном оттаивании грунта сверху, в верхней части цилиндра возникает избыточное давление высоко минерализованной жидкости, которая оказывает корродирующее воздействие на поверхность диска. Визуально такое наблюдалось после разбора ячейки: на поверхности алюминия возникли множественные белые пятна с кристаллами соли по середине. На нижнем диске такого эффекта не наблюдалось, что косвенно указывает на рост концентрации соли в верхней части ячейки.

Отдельного упоминания заслуживает промежуток на графике вблизи точки фазового перехода 1 и 2 датчиков – точка А. Он интересен тем, что для кривых 3, 4 и 5 в этот момент возник перегиб (по отношению к оси времени) от 50° до 10°, соответственно до и после момента фазового перехода. С одной стороны, его нельзя объяснить кристаллизацией воды возле 3, 4 и 5 датчиков, так как, во-первых, при температуре –2 °С раствор с такой концентрацией не кристаллизуется, о чем свидетельствуют данные 1 и 2 датчиков с этого же графика; во-вторых, отсутствуют скачки температуры, подобные тем, что наблюдаются для 1 и 2 кривых, нет выхода на «полку» или иных признаков изменения фазового состояния. В связи с этим можно полагать о формировании теплового барьера в верхней части цилиндра за счет медленно кристаллизующейся поровой воды. Именно «медленно», в ограниченном объеме грунта в течение длительного времени за счет подтока воды снизу к центрам кристаллизации, отделения от раствора пресной воды, превращающейся в лед, окружения и сжатия льдом сфер оставшегося концентрированного раствора с постепенной кристаллизацией молекул воды до критической концентрации раствора при данной температуре. Все это формирует на длительное время тепловой барьер, препятствующий охлаждению нижележащей части грунта и продвижению фронта замерзания.

Отсюда следует, что фазовый переход с переохлаждением грунта является негативным проявлением в ходе эксперимента, так как начавшаяся кристаллизация охватывает слой грунта толщиной 30–40 мм. В следствие этого от жидкости, заключенной в этом объеме, продолжительно выделяется теплота фазового перехода, компенсируя тем самым теплоотвод сверху. Поэтому на отдельных интервалах времени практически отсутствует корреляция между алгоритмом увеличения напряжения на верхнем элементе Пельтье и продвижением фронта замерзания, то есть нет линейного снижения температуры. А это идет вразрез с постановкой эксперимента и влияет на получаемые результаты. Правильнее в место контакта верхнего диска с грунтом вводить затравку из кристаллов льда при достижении грунтом температуры,

близкой к температуре начала замерзания. Этим формируется тонкий слой замерзшей воды, который будет продвигаться пропорционально снижению температуры.

После завершения циклов и извлечения грунта проводится замер массы каждого из четырех образцов, образцы высушиваются до постоянной массы, и рассчитывается влажность (табл. 2).

Таблица 2. Влажность образцов четырех экспериментов

Table 2. Moisture of samples in four experiments

№ образца Sample no.	Глубина, мм Depth, mm	Количество циклов/Number of cycles			
		7	10	12	14
		Влажность грунта, % Soil moisture, %			
1	5...54	23,5	22,2	19,7	16,3
2	59...107	23,5	23,4	23,4	20,7
3	112...161	23,1	23,6	24,5	20,6
4	166...215	22,8	22,7	24,4	21,2

Примечание: Нумерация идет от «холодного» к «горячему» элементам сверху вниз.

Note: Numbering goes from «cold» to «hot» elements from top to bottom.

Характерно, что при меньшем числе циклов максимальная влажность наблюдается в верхней части грунта при разнице в 3 %, но при увеличении количества циклов градиент влажности возрастает до 23 %, при этом максимум уже наблюдается у основания грунтового массива. То есть с увеличением числа циклов замораживания–оттаивания происходит инверсия градиента влажности.

Далее, согласно ГОСТ 26423-85 «Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки», готовится водная вытяжка из образцов. Для этого к образцу сухого грунта приливается дистиллированная вода, по массе одиннадцатикратно превышающая массу раствора до высушивания. Тем самым исходная концентрация ионов уменьшается в 11 раз. Полученная взвесь отстаивается и последовательно фильтруется через фильтры «белая лента» и «синяя лента» до получения прозрачной жидкости. Полученный объем не превышает 250 мл – минимально достаточный для химического анализа по определению катионов Na⁺ и анионов Cl⁻.

Итоговые результаты по минерализации поровой воды представлены в табл. 3.

Таблица 3. Минерализация поровой воды образцов четырех экспериментов

Table 3. Mineralization of pore water of samples in four experiments

№ пробы и глубина отбора (мм) Sample no. and sampling depth (mm)	Количество циклов Number of cycles			
	7	10	12	14
	Суммарная минерализация, г/л Total mineralization, g/l			
1, 5–54	50,1	53,8	51,6	60,6
2, 59–107	56,4	45,7	42,1	39,1
3, 112–161	53,9	45,7	39,5	43,5
4, 166–215	52,8	49,4	39,5	41,9

Из табл. 2 видно, что циклический процесс вертикального перемещения фронта замерзания грунта способствует перераспределению ионов солей в порах грунта. Наибольшая концентрация солей возникает в низкотемпературной области, вблизи «холодного» элемента Пельтье, от которого происходит движение фронта замерзания. При этом заметно, что рост концентрации пропорционален количеству циклов движения фронта замерзания: при 7 циклах различия между максимальными и минимальными значениями составляют 11 %, при 10 циклах – 15 %, при 12 циклах – 23 % и при 14 циклах – 35 %.

Выводы

В ходе проведенной серии экспериментов с ограниченным объемом влажного грунта, насыщенного хлоридно-натриевым раствором, установлено, что после многократного направленного движения фронта промерзания максимальная концентрация солей в исследованной песчанистой супеси устанавливается в верхнем интервале пробоотбора, то есть со стороны «холодного» элемента Пельтье. Такая зависимость выражается более отчетливо при увеличении количе-

ства циклов, когда увеличивается разность между максимальным и минимальным значениями. Вероятно, это можно объяснить типом грунта: исследуемый грунт из-за высокого содержания глинистых и коллоидных частиц имеет высокую величину удельной активной поверхности, благодаря этому, а также высокой концентрации соли такой грунт содержит большое количество незамерзшей воды. В результате этого имеет место массоперенос концентрированного раствора к центрам кристаллизации за счет осмотических сил. В подтверждение чего установлена явная зависимость между величиной концентрации солей и числом циклов замерзания.

При обобщении достаточного количества экспериментальных данных результаты исследований могут внести вклад в понимание природы массопереноса в засоленных влажных грунтах и помогут прогнозировать процессы формирования областей повышенной концентрации солей в промерзающем или мерзлом грунте.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ СП-3897.2018.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Williams P.J., Smith M.W. The frozen earth. Fundamentals of geocryology. – Cambridge: Cambridge University Press, 1991. – 328 p.
2. Jame Y.W. Temperature effects on phase composition of a partially frozen soil. – Saskatoon, Canada: University of Saskatchewan, 1972. – 18 p.
3. Newman G.P., Wilson G.W. Heat and mass transfer in unsaturated soils during freezing // Canadian Geotechnical Journal. – 1997. – № 34. – P. 63–70.
4. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства многолетне-мерзлых грунтов Центральной Якутии. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 62 с.
5. Anderson D.M., Hoekstra P. Migration of interlamellar water during freezing and thawing of Wyoming bentonite // Soil Science Society of America Proceedings. – 1965. – V. 29. – P. 498–504.
6. Данзанова М.В., Павлова Н.А. Экспериментальные исследования фильтрационных свойств грунтов, вмещающих надмерзлотные криопэги, на территории Якутска // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2016. – № 6. – С. 567–576.
7. Павлова Н.А., Данзанова М.В. Межгодовая изменчивость химического состава техногенных криопэгов на территории города Якутска // Криосфера Земли. – 2018. – Т. 22. – № 6. – С. 26–34.
8. Farouki O.T. Thermal properties of soils. – Hanover: CRREL, 1981. – 137 p.
9. Иванова Н.В., Ривкин Ф.М., Власова Ю.В. Строение и закономерности формирования криогенной толщи на побережье Печорского моря // Криосфера Земли. – 2008. – Т. 12. – № 2. – С. 19–24.
10. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. – 189 с.
11. Шиманов А.А., Комаров И.А., Киреева Т.А. Особенности изменения химического состава криопэгов полуострова Ямал в процессе криогенного концентрирования // Вестник Московского университета. – 2019. – № 6. – С. 73–80.
12. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал / под ред. Васильчук Ю.К., Крылова Г.В., Подборного Е.Е. – СПб: Изд-во «Недра», 2006. – 423 с.
13. Торговкин Н.В., Макаров В.Н. Агрессивность сезонноталых и мерзлых грунтов Якутска // Наука и образование. – 2014. – № 1 (73). – С. 85–89.
14. Тимофеев А.М., Кравцова О.Н., Протодьяконова Н.А. Экспериментальное исследование перераспределения соли при промерзании засоленных грунтов и водных растворов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 07 (61). – Ч. 3. – С. 88–90.
15. Thermal regime of permafrost at Varandey Settlement along the Barents Sea / T.M.H. Le, I. Depina, E. Guegan, A. Sinityn // Engineering Geology. – 2018. – V. 246. – P. 69–81.
16. Паренкина О.Л. Условия формирования и распространения криопэгов на территории Бованенковского НГКМ // Геология, география и глобальная энергия. – 2010. – № 3 (38). – С. 93–94.
17. Сухорукова А.Ф. Состояние изученности криопэгов в арктической зоне Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 172–176.
18. Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. – 1999. – Т. 3. – № 2. – С. 40–65.
19. Lange G.R., McKim H.L. Saturation, phase composition, and freezing-point depression in a rigid soil model // Permafrost: Proceedings of an International conference. – Washington, D.C.: National academy of sciences, 1966. – P. 187–192.
20. Williams P.J. Suction and Its effects in unfrozen water of frozen soils // Proceedings of an International Conference. – Washington: National Academy of Sciences, 1966. – P. 225–229.

Поступила 16.06.2021 г.

Информация об авторах

Григорьев Б.В., кандидат технических наук, заведующий кафедрой прикладной и технической физики Тюменского государственного университета.

UDC 551.341

EXPERIMENTAL STUDY OF MIGRATION OF IONS OF DISSOLVED SALT NaCl DURING VERTICAL FREEZING OF THE GROUND

Boris V. Grigoriev,
b.v.grigorev@utmn.ru

Tyumen State University,
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

The work is devoted to the laboratory investigation of the causes of cryopeg formation – objects of cryolitosones of natural or man-made character, which are lenses of supercooled pore solution in the environment of frozen fluid stop. In particular, processes promoting cryogenic concentration of salts, as well as peculiarities of laboratory experiment are considered. The paper describes the experimental installation and procedure of experiment on controlling freezing–thawing of soil in closed volume – vertical heat-insulated cylinder, in which heat transfer was carried out through end sides according to preset algorithm. The experiment repeated the situation typical for the autumn–spring period: the daily freezing and thawing of wet soil contaminated with easily soluble salts. Four series of experiments were carried out with different number of repeated cycles of freezing front and thawing front motion in soil saturated with concentrated salt solution NaCl directed from top to bottom at a distance of 70–80 % from cylinder height. At the same time, the lower area was always supported in the thawed form. The paper considers the phenomena and introduces the probable explanation for processes accompanying soil freezing and thawing, such as decrease of freezing start temperature in vertical section, formation of thermal barrier in direction of freezing front movement in low-temperature area, redistribution of salt ions along vertical section, dependence of concentration gradient on number of freezing–thawing cycles, deviation of melting temperature value in comparison with freezing start temperature. Numerical values of moisture redistribution and solution concentration in soil after each series of experiments were obtained. Methods of modernization of experimental installation and carrying out the experiment are proposed.

Key words:

Cryopegs, freezing front, salt concentrating, phase transition, freezing beginning temperature.

The work was supported by the Russian Federation President Grant SP-3897.2018.1.

REFERENCES

- Williams P.J., Smith M.W. *The frozen earth. Fundamentals of geocryology*. Cambridge, Cambridge University Press, 1991. 328 p.
- Jame Y.W. *Temperature effects on phase composition of a partially frozen soil*. Saskatoon, University of Saskatchewan, 1972. 18 p.
- Newman G.P., Wilson G.W. Heat and mass transfer in unsaturated soils during freezing. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, no. 34, pp. 63–70.
- Votyakov I.N. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva mnogoletemerzlykh gruntov Tsentralnoy Yakutii* [Physical and mechanical properties of permafrost soils in Central Yakutia]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ. house, 1961. 62 p.
- Anderson D.M., Hoekstra P. Migration of interlamellar water during freezing and thawing of Wyoming bentonite. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1965, vol. 29, pp. 498–504.
- Danzanova M.V., Pavlova N.A. Experimental studies of filtration properties of soils containing suprapermafrost cryopegs on the territory of Yakutsk. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2016, no. 6, pp. 567–576. In Rus.
- Pavlova N.A., Danzanova M.V. Interannual variability of the chemical composition of technogenic cryopegs on the territory of the city of Yakutsk. *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. 22, no. 6, pp. 26–34. In Rus.
- Farouki O.T. *Thermal Properties of Soils*. Hanover, CRREL, 1981. 137 p.
- Ivanova N.V., Rivkin F.M., Vlasova Yu.V. The structure and patterns of formation of cryogenic strata on the coast of the Pechora Sea. *Cryosphere of the Earth*, 2008, vol. 12, no. 2, pp. 19–24. In Rus.
- Anisimova N.P., Pavlova N.A. *Gidrogeokhimicheskie issledovaniya kriolitozony Tsentralnoy Yakutii* [Hydrogeochemical studies of the permafrost zone of Central Yakutia]. Novosibirsk, Geo Academic Publ. house, 2014. 189 p.
- Shimanov A.A., Komarov I.A., Kireeva T.A. Features of changes in the chemical composition of cryopegs of the Yamal Peninsula in the process of cryogenic concentration. *Moscow University Bulletin*, 2019, no. 6, pp. 73–80. In Rus.
- Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy poluostrova Yamal* [Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula]. Eds. Yu.K. Vasilchuk, G.V. Krylov, E.E. Podborny. St. Petersburg, Nedra Publ. house, 2006. 423 p.
- Torgovkin N.V., Makarov V.N. Aggressiveness of seasonally thawed and frozen soils of Yakutsk. *Science and Education*, 2014, no. 1 (73), pp. 85–89. In Rus.
- Timofeev A.M., Kravtsova O.N., Protodyakonova N.A. Experimental study of salt redistribution during freezing of saline soils and aqueous solutions. *International scientific research journal*, 2017, no. 07 (61), P. 3, pp. 88–90. In Rus.
- Le T.M.H., Depina I., Gueganc E., Sinityn A. Thermal regime of permafrost at Varandey Settlement along the Barents Sea. *Engineering Geology*, 2018, vol. 246, pp. 69–81.
- Parentina O.L. Conditions for the formation and distribution of cryopegs on the territory of the Bovanenkovo OGCF. *Geology, geography and global energy*, 2010, no. 3 (38), pp. 93–94. In Rus.
- Sukhorukova A.F. The state of knowledge of cryopegs in the Arctic zone of Siberia. *Interexpo Geo-Siberia*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 172–176. In Rus.
- Fotiev S.M. Regularities of the formation of the ion-salt composition of natural waters of Yamal. *Cryosphere of the Earth*, 1999, vol. 3, no. 2, pp. 40–65. In Rus.
- Lange G.R., McKim H.L. Saturation, phase composition, and freezing-point depression in a rigid soil model. *Permafrost: Proceedings of an International conference*. Washington, D.C., National academy of sciences, 1966. pp. 187–192.
- Williams P.J. Suction and its effects in unfrozen water of frozen soils. *Proceedings of an International Conference*. Washington, National Academy of Sciences, 1966. pp. 225–229.

Received: 16 June 2021.

Information about the authors

Boris V. Grigoriev, Cand. Sc., head of the Applied and Technical Department Physics, Tyumen State University.

УДК 550.360; 550.832.6

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЙ ЭФФЕКТ СВОБОДНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В ВОДОНАПОЛНЕННЫХ БУРОВЫХ СКВАЖИНАХ

Демежко Дмитрий Юрьевич¹,
ddem54@inbox.ru

Хацкевич Богдан Дмитриевич¹,
disaybl@yandex.ru

Миндубаев Мансур Габдрахимович¹,
mansur_mg@mail.ru

¹ Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100.

Актуальность. Температурные измерения в водонаполненных буровых скважинах используются для решения широкого круга разведочных, промыслово-геофизических, экологических, гидрогеологических, геодинамических задач. Свободная тепловая конвекция, возникающая в скважинах при геотермическом градиенте, превышающем критическое значение, вызывает два вида термических эффектов – нестационарный и квазистационарный. Нестационарный эффект проявляется непериодическими температурными колебаниями относительно некоторого среднего значения (температурный шум) и оперирует в широком диапазоне частот – от секундных до часовых. Квазистационарный эффект связан с долговременными отклонениями температуры и градиента в скважине относительно невозмущенных характеристик окружающих пород. Последний эффект приводит к ошибочным оценкам формационных температур и тепловых потоков.

Цель: обоснование применимости аппроксимационной математической модели Раменя, описывающей термический эффект вынужденных течений, для оценки квазистационарного эффекта свободной тепловой конвекции в скважине; адаптация и верификация модели на экспериментальных данных термометрии скважин.

Методы: анализ геотермических и технологических параметров, определяющих квазистационарный эффект свободной тепловой конвекции, описываемых моделью Раменя; сопоставление расчетов по модели Раменя с данными экспериментальных исследований в скважинах.

Результаты. Обосновано и экспериментально верифицировано применение модели Раменя для оценки квазистационарного термического эффекта свободной тепловой конвекции в водонаполненных скважинах. Уменьшение измеренного температурного градиента в сравнении с невозмущенным градиентом в окружающих скважину горных породах локализуется в верхнем и нижнем интервалах скважины. Эффект проявляется заметнее, а интервалы расширяются по мере увеличения скорости конвективных течений, в свою очередь, зависящей от числа Рэлея и диаметра скважины. В меньшей степени на величину эффекта влияет глубина скважины.

Ключевые слова:

Скважина, температурный кочаж, температурный градиент, свободная тепловая конвекция, квазистационарный эффект, модель Раменя.

Введение

Явление свободной тепловой конвекции (СТК) в буровых скважинах может существенно искажать температурное поле, установившееся в окружающих скважину горных породах (так называемые формационные температуры). Между тем точное знание температуры необходимо для оценки плотности теплового потока при изучении теплового поля Земли [1–4], в гидрогеологических [5–7] и геодинамических [8, 9] исследованиях, при палеотемпературном моделировании для прогнозирования нефтегазоносности осадочных бассейнов [10–12], в палеоклиматических реконструкциях [13, 14].

Долгое время считалось, что эти искажения проявляются в виде температурных колебаний относительно реального значения температуры горных пород на данной глубине и вносят в измерения лишь случайную погрешность [2, 15]. Поэтому при оценке температуры или температурного градиента достаточно сгладить температурный шум или увеличить интервал оценки градиента. Исследованию характеров

этих колебаний посвящены работы [16–24 и др.]. Ранее [25] мы показали, что конвективный температурный шум имеет нормальное распределение и на основании большой выборки экспериментальных данных предложили соотношения, позволяющие оценивать среднеквадратическое отклонение температурных колебаний СТК в зависимости от геотермического градиента, внутреннего радиуса скважины и числа Рэлея.

Однако помимо температурного шума (нестационарного термического эффекта) СТК вызывает и т. н. квазистационарный эффект [22], проявляющийся закономерным уменьшением температурного градиента относительно его значения в горных породах. Под влиянием этого эффекта измеренная термограмма «выпрямляется». Хотя численное моделирование [22] и не позволило нам надежно оценить характеристики этого явления, мы предположили, что его термический эффект аналогичен вызываемому циркуляцией скважинной жидкости в процессе бурения или промывки скважины. В настоящей статье мы впервые показали возможность количественного описания

квазистационарного эффекта СТК с помощью аналитических соотношений – аппроксимационной математической модели Рамея [26], разработанной для описания термических эффектов вынужденных течений в скважине. Различия между свободной конвекцией и принудительной циркуляцией лишь в крайне низких скоростях свободно-конвективных течений.

Модель

В 1962 г. Г.Дж. Рамей предложил аппроксимационную математическую модель для описания распределения температуры вдоль однородного потока жидкости, закачиваемой в скважину [26]. В настоящее время эта модель и ее производные успешно используются при решении многих задач промысловой геофизики, когда требуется оценить температуру скважинных флюидов, насосно-компрессорных труб и обсадных колонн в зависимости от глубины и продолжительности производственных процессов [27–30].

Распределение температуры вдоль нисходящего потока жидкости описывается формулой:

$$T^\downarrow(z, t) = T_0(z) - Gl(t) + [T_f - T_s + Gl(t)] e^{-z/l(t)}, \quad (1)$$

где z – глубина от поверхности; t – время; $T_0(z) = T_s + Gz$ – невозмущенная температура на глубине z ; T_f – температура закачиваемого флюида; T_s – температура на поверхности; G – невозмущенный геотермический градиент. Характерная длина $l(t)$ определяется через интегральный коэффициент теплопроводности $\Lambda(t)$, учитывающий теплоперенос от потока флюида к горным породам, удельную теплоемкость флюида c_f и массовый поток флюида Φ :

$$l(t) = \frac{c_f \Phi}{\Lambda(t)}.$$

В свою очередь, поток флюида зависит от его скорости V , плотности ρ_f и радиуса скважины r : $\Phi = \pi r^2 \rho_f V$. Интегральный коэффициент теплопроводности $\Lambda(t)$ равен:

$$\Lambda(t) = 2\pi \left(\frac{2}{\lambda_f Nu} + \frac{T_D(t)}{\lambda_m} \right)^{-1},$$

где λ_f, λ_m – теплопроводности флюида и массива горных пород; Nu – число Нуссельта; $T_D(t)$ – безразмерная температура, определяющая теплообмен между потоком флюида и окружающим массивом [30]

$$T_D(t) = \ln \left(1 + 1,3 \sqrt{\frac{a_m t}{r^2}} \right).$$

где a_m – температуропроводность массива горных пород. Число Нуссельта можно выразить через числа Рейнольдса и Прандтля: $Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}$ [30]. $Pr = \nu / a_f$, где ν и a_f – кинематическая вязкость и температуропроводность флюида. Число Рейнольдса определяется как $Re = 2 \Phi / (\pi r \mu_f)$; μ_f – динамическая вязкость.

Поскольку свободная тепловая конвекция не добавляет дополнительного флюида в скважину, то $T_f = T_s$ и формула (1) упрощается

$$T^\downarrow(z, t) = T_0(z) - Gl(t) (1 - e^{-z/l(t)}).$$

Для восходящего потока можно записать:

$$T^\uparrow(z, t) = T_0(z) + Gl(t) (1 - e^{-(h-z)/l(t)}),$$

где h – глубина скважины.

Термический эффект восходящих и нисходящих потоков СТК можно оценить как

$$T(z, t) = (T^\downarrow(z, t) + T^\uparrow(z, t)) / 2,$$

а относительное изменение температурного градиента

$$\eta = \frac{dT(z, t)}{dz} \frac{1}{G}.$$

Вместо скорости потока в задаче о конвекции необходимо использовать средний модуль вертикальной компоненты скорости конвективных течений. На рис. 1–3 приведены распределения температуры и относительного изменения температурного градиента вдоль скважины в зависимости от скорости течений, глубины и радиуса скважины.

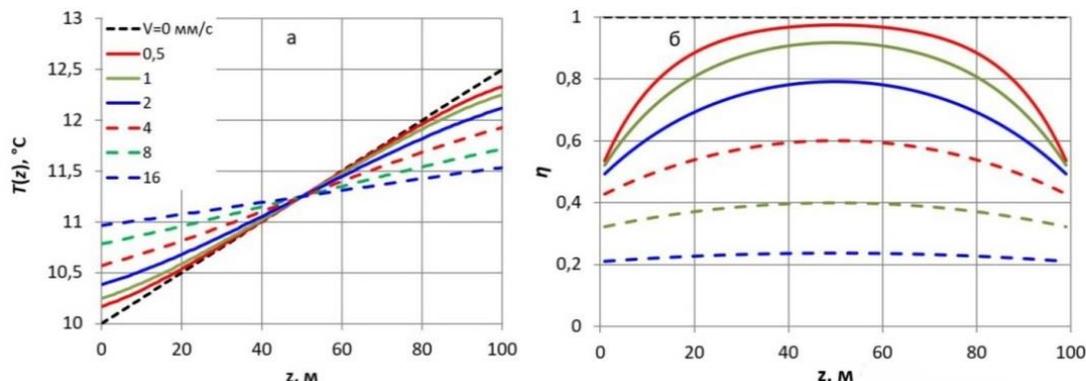


Рис. 1. Распределения температуры (а) и относительного изменения температурного градиента (б) вдоль скважины в зависимости от среднего модуля вертикальной компоненты конвективных течений. Параметры расчета: $r=0,05$ м, $h=100$ м, $T_s=10$ °С, $G=0,025$ К/м, $V=0, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16$ мм/с, $t=1$ год

Fig. 1. Distribution of temperature (a) and the relative temperature gradient change (b) along the borehole depending on the mean modulus of the vertical component of the convective current velocity. Calculation parameters are: $r=0,05$ m, $h=100$ m, $T_s=10$ °С, $G=0,025$ K/m, $V=0, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16$ mm/s, $t=1$ year

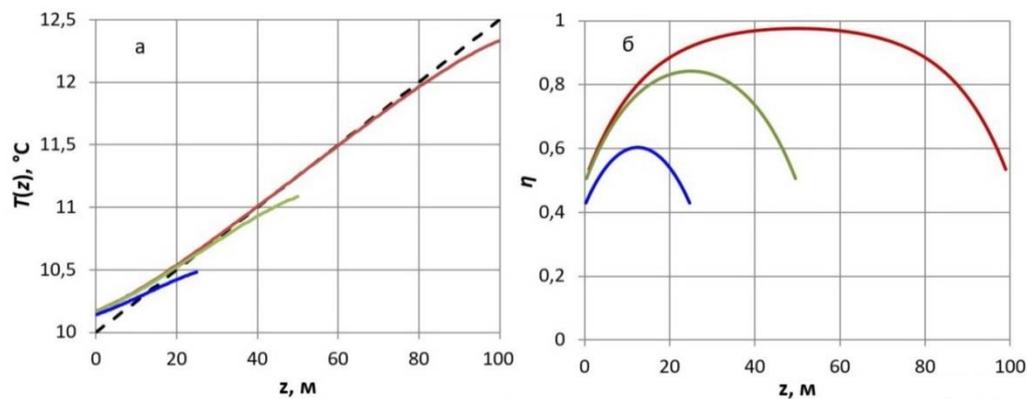


Рис. 2. Распределения температуры (а) и относительного изменения температурного градиента (б) вдоль скважины в зависимости от ее глубины. Параметры расчета: $r=0,05$ м, $T_s=10$ °С, $G=0,025$ К/м, $h=25, 50, 100$ м, $V=0,5$ мм/с, $t=1$ год

Fig. 2. Distribution of temperature (a) and relative change in the temperature gradient (b) along the borehole, depending on its depth. Calculation parameters are: $r=0,05$ m, $T_s=10$ °C, $G=0,025$ K/m, $h=25, 50, 100$ m, $V=0,5$ mm/s, $t=1$ year

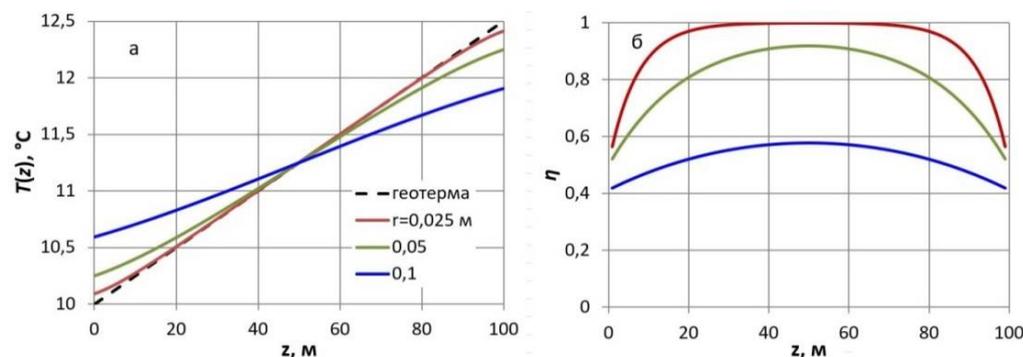


Рис. 3. Распределения температуры (а) и относительного изменения температурного градиента (б) вдоль скважины в зависимости от ее радиуса. Параметры расчета: $r=0,025, 0,05, 0,1$ м, $T_s=10$ °С, $G=0,025$ К/м, $h=100$ м, $V=1,0$ мм/с, $t=1$ год

Fig. 3. Distribution of temperature (a) and the relative change in the temperature gradient (b) along the borehole, depending on its radius. Calculation parameters are: $r=0,025, 0,05, 0,1$ m, $T_s=10$ °C, $G=0,025$ K/m, $h=100$ m, $V=1,0$ mm/s, $t=1$ year

С увеличением скорости течений и радиуса скважины температурный градиент закономерно уменьшается. Наибольшие изменения происходят вблизи верхней и нижней границ скважины (заполненного флюидом интервала). При небольших скоростях течения (среднего модуля вертикальной компоненты скорости) срединный интервал скважины сохраняет практически невозмущенный градиент. С увеличением скорости уменьшается нелинейность распределения температуры. Изначально линейный температурный профиль просто разворачивается, сохраняя постоянный градиент – так же, как и в случае циркуляции бурового раствора [15, 31, 32].

Согласно модели, температурная аномалия СТК растет со временем и достигает максимума (когда температуры в интервале конвекции полностью выравниваются, а градиент становится равным нулю) за бесконечно большой период. Однако темпы роста аномалии неодинаковы. Для условий, принятых на рис. 1, максимальное значение температурной аномалии равно 2,5 К. При $V=0,5$ мм/сек за первую минуту аномалия у границ интервала достигает 0,12 К, но уже через сутки скорость ее роста падает до 0,006 К/сутки, через год – до

0,006 К/год, то есть аномалия практически стационарируется (отсюда термин – квазистационарный эффект).

Влияние диаметра скважины на интенсивности конвекции ранее отмечалось и в неглубоких воздухонаполненных скважинах [33].

Скорости конвективных течений

Применение модели Раменя требует знания среднего модуля вертикальной компоненты скорости. Эта характеристика СТК в настоящее время остается наименее изученной. В лабораторном эксперименте [21] оценки скоростей конвективных течений были получены путем наблюдения за движением непрозрачных частиц нулевой плавучести, помещенных в прозрачный водонаполненный цилиндр, в котором поддерживался положительный температурный градиент. С увеличением числа Рэлея от 350 до 3700 модуль полного вектора скорости возрастал от 0,1 до 1,0 мм/с. Вертикальная компонента, естественно, была меньше, но имела тот же порядок.

В численном эксперименте [22] было получено соотношение для оценки вертикальной компоненты скорости:

$$V = 1,86 \frac{a_f}{r} \sqrt{Ra - Ra_{кр}}, \quad R^2 = 0,999, \quad (2)$$

где $Ra = g\beta r^4 G/va$ – число Рэлея; g – ускорение свободного падения; β – коэффициент теплового расширения; $Ra_{кр}$ – критическое значение числа Рэлея. Для открытого ствола $Ra_{кр} = 152$, для скважины, обсаженной стальной колонной $Ra_{кр} = 212$ [34].

Проверка модели в условиях реальных скважин

Скважина ИГФ-60

На рис. 4 приведены результаты температурных измерений в скважине ИГФ-60, расположенной на территории Института геофизики УрО РАН [24]. Распространение годовой температурной волны приводит к появлению в мае–июне в обводненной части скважины (>6,2 м) положительного температурного градиента, достаточного для инициации свободной тепловой конвекции. Температурный шум СТК со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 26\text{--}44$ мК (рис. 4, а) наблюдался в интервале 0–3 м ниже уровня воды;

еще ниже годовая волна затухала настолько, что температурный градиент уже не обеспечивал поддержки СТК. Таким образом, в условиях скважины ИГФ-60 тепловая конвекция и вызываемые ею термические эффекты проявлялись лишь ограниченное время и на ограниченном интервале. В конвективном режиме температурный градиент в исследуемом интервале был равен 0,03–0,07 К/м (рис. 4, б). Подавление конвекции с помощью устройства, представляющего собой вертикальные полиэтиленовые пластины [35], привело к уменьшению уровня температурного шума до $\sigma = 2\text{--}4$ мК и увеличению температурного градиента до 0,3 К/м.

Для условий скважины ИГФ-60 ($r = 0,0525$ м, $G = 0,3$ К/м, $\beta = 1,54 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $a_f = 1,32 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\nu = 1,54 \cdot 10^{-6}$ м²/с) $Ra = 1680$, а средний модуль вертикальной компоненты скорости, согласно (2), $V = 0,2$ мм/с. На рис. 4, б пунктиром обозначены теоретические оценки температурных распределений при наличии и отсутствии конвекции, полученные по модели Рамея.

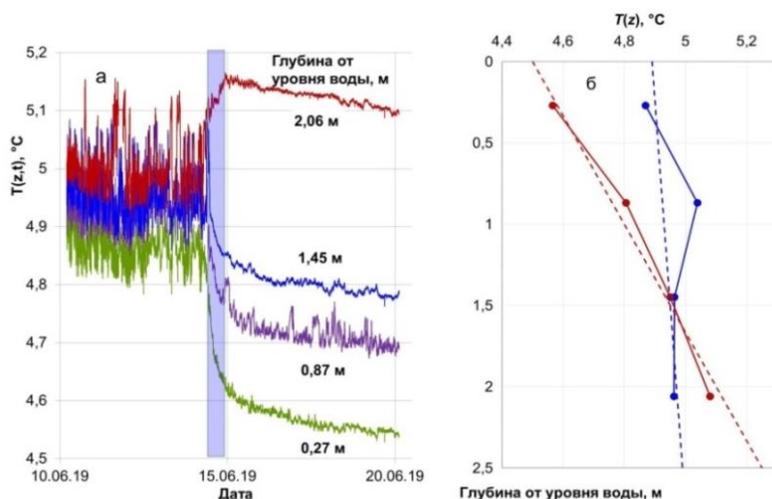


Рис. 4. Результаты температурных исследований в скважине ИГФ-60: а) графики температурного мониторинга (момент установки устройства для подавления конвекции обозначен синим прямоугольником); б) вертикальные распределения температуры до (синие маркеры) и после (красные маркеры) подавления конвекции. Пунктир – теоретические оценки по модели Рамея. Параметры расчета: $r = 0,0525$ м, $T_s = 4,5$ °С, $G = 0,3$ К/м, $h = 3$ м, $Ra = 1680$, $Ra_{кр} = 212$, $V = 0,2$ мм/с, $t = 1$ месяц

Fig. 4. Temperature investigations in the IGF-60 borehole: а) temperature monitoring (installation of the device for suppressing convection is marked with a blue rectangle); б) vertical temperature distributions before (blue markers) and after (red markers) suppression of convection. Dotted line – theoretical estimates according to the Ramey model. Calculation parameters are: $r = 0,0525$ m, $T_s = 4,5$ °C, $G = 0,3$ K/m, $h = 3$ m, $Ra = 1680$, $Ra_{cr} = 212$, $V = 0,2$ mm/s, $t = 1$ month

За исключением «выпавшей» точки на глубине 0,87 м, возможно, отражающей температурную аномалию гидрогеологической природы, теоретические распределения хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Скважина INEL-GT1

Скважина INEL-GT1 глубиной 3130 м была пробурена в 1982 г. на геотермальном полигоне в Айдахо. До глубины 2070 м скважина обсажена, ниже расположен открытый ствол диаметром 12 ¼” (156 мм). Точечные температурные измерения проводились через 0,2 м в 1990 г. [36]. Температурный градиент в от-

крытом стволе сохраняется постоянным (рис. 5), а температура на забое достигает 140 °С. Высококачественные колебания температурного градиента свидетельствуют о развитой свободной тепловой конвекции. Призабойный участок скважины демонстрирует снижение градиента, которое автор объясняет «призабойным эффектом». Такое объяснение не выглядит убедительным, поскольку этим термином (hole end effect, bottomhole temperatures) обычно обозначают не снижение, а повышение градиента, связанное с более быстрой релаксацией температурного поля в призабойной части скважины после окончания бурения ([37] и ссылки в этой работе).

Условия скважины INEL-GT1 ($r=0,156$ м, $G=0,046$ К/м, $T_{cp}=117$ °С, $\beta=7,47 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹, $a_f=1,71 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\nu=2,52 \cdot 10^{-7}$ м²/с) определяют высокие значения числа Рэлея ($Ra=3,87 \cdot 10^5$) и среднего модуля вертикальной компоненты скорости ($V=1,3$ мм/с). Рассчитанное по модели Раменя распределение градиента в призабойной части скважины приведено на рис. 5 (красная сплошная линия). Теоретическая оценка преувеличивает область проявления квазистационарного эффекта СТК, хотя амплитуда искажения градиента оценивается верно. Более или менее хорошее согласие с экспериментальным распределением обеспечивает снижение скорости течений на порядок (до $V=0,1$ мм/с). Возможно, соотношение (2), полученное численным моделированием для $Ra < 2 \cdot 10^3$, преувеличивает оценку скорости для больших Ra .

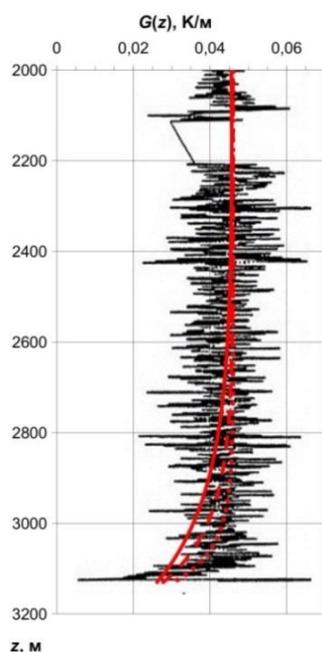


Рис. 5. Экспериментальное (черная кривая, [36]) и теоретическое (красные кривые) распределение температурного градиента в скважине INEL-GT1. $V=1,3$ мм/с (красная сплошная линия), $V=0,5$ мм/с (пунктир), $V=0,1$ мм/с (точки)

Fig. 5. Experimental (black curve, [36]) and theoretical (red curves) temperature gradient distribution in the INEL-GT1 well. $V=1,3$ mm/s (red solid line), $V=0,5$ mm/s (dotted line), $V=0,1$ mm/s (dots)

Обсуждение

Одно из главных научных приложений скважинной термометрии – оценка плотности геотермического теплового потока различных тектонических структур. Плотность теплового потока рассчитывается по данным измерений температурных градиентов и теплопроводности горных пород $q = -\lambda G$ [2, 38 и др.]. Для условий, представленных на рис. 2, вполне обычных в практике геотермических исследований, длина самого верхнего и самого нижнего интервалов, для которых ошибка η оценки геотермического градиента превышает 5 %, составляет $L_{\eta>5\%}=35$ м. Для достижения ошибки $\eta < 1$ % необходимо исключить измерения

в крайних интервалах длиной $L_{\eta>1\%}=60$ м. Величина L слабо зависит от глубины скважины. Наиболее надежные оценки теплового потока получают по данным измерений в глубоких скважинах, поэтому в случае километровой скважины остается еще достаточно места для оценки теплового потока. Длина интервалов, которые необходимо исключить из расчетов, увеличивается с ростом скорости течений. В километровой скважине при скорости 5 мм/с, достигаемой при $Ra \sim 10^6$ (остальные параметры как на рис. 2) $L_{\eta>5\%}=160$ м, а $L_{\eta>1\%}=270$ м.

Другое важное приложение температурных измерений – реконструкция температурной истории земной поверхности [13, 14, 39 и др.]. Обусловленное конвекцией уменьшение температурного градиента в верхней части термограммы может быть ложно интерпретировано как недавнее потепление. Нижняя часть, в которой наблюдается такое же уменьшение градиента, скорее всего, будет исключена из палеоклиматической интерпретации. Масштаб ложных палеоклиматических реконструкций можно оценить с помощью простой модели одноактного мгновенного увеличения температуры земной поверхности, происшедшего некоторое время до начала измерений [39, 40]. При скорости течений 0,5 мм/с (остальные параметры как на рис. 2) термический эффект конвекции примерно соответствует потеплению на 0,2 К 5 лет назад, а при $V=5$ мм/с – потеплению на 0,8 К 120 лет назад.

Таким образом квазистационарный эффект свободной тепловой конвекции, проявляющийся уменьшением температурного градиента, измеренного в скважине в сравнении с невозмущенным градиентом в окружающей скважину горных породах, необходимо учитывать при оценках теплового потока и при палеоклиматической интерпретации геотермических данных. Мы полагаем, что в большинстве существующих в настоящее время оценок потока и палеоклиматических реконструкций [41] влияние конвекции не столь велико. Большая часть оценок потока сделана вдали от границ скважины. К сожалению, в базах данных не приводятся сведения о диаметре скважины, в которой проводились измерения. Включение в них информации о конструкции скважины (внутренний диаметр, наличие обсадной колонны) позволило бы количественно оценить искажающий квазистационарный эффект СТК.

На термометрические измерения для решения задач разведочной и промысловой геофизики квазистационарный эффект СТК практически не оказывает влияния.

Заключение

Квазистационарный эффект свободной тепловой конвекции в водонаполненных скважинах выражается в уменьшении измеренного температурного градиента в сравнении с невозмущенным градиентом в окружающей скважину горных породах. Проведенные исследования позволили адаптировать аппроксимационную аналитическую модель Раменя для описания и оценки квазистационарного термического эффекта

Основные геотермические и технологические параметры, определяющие эффект: геотермический градиент, скорость конвективных течений, диаметр и глубина скважины. В глубоких скважинах эффект локализуется в ее верхнем и нижнем интервалах, длина которых определяется интенсивностью конвекции и, как следствие, вертикальной компоненты скорости течений.

Предложенная методика оценки квазистационарного эффекта позволит более эффективно планиро-

вать температурные исследования скважин и рассчитывать возможные погрешности определения формационных температур, температурных градиентов и геотермических тепловых потоков.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, проект № 19-05-00050-а (моделирование квазистационарного эффекта, анализ данных температурного каротажа и мониторинга) и госбюджетной темы НИР № 0394-2018-0002 (проведение полевых экспериментальных исследований в скважине и исследований на лабораторной установке).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любимова Е.А. Термика Земли и Луны. – М.: Наука, 1968. – 280 с.
2. Beardmore G.R., Cull J.P. Crustal heat flow: a guide to measurement and modelling. – Edinburgh: Cambridge University Press, 2001. – 324 p.
3. Terrestrial heat flow of continental China: updated dataset and tectonic implications / G. Jiang, S. Hu, Y. Shi, C. Zhang, Z. Wang, D. Hu // *Tectonophysics*. – 2019. – V. 753. – P. 36–48.
4. Burton-Johnson A., Dziadek R., Martin C. Geothermal heat flow in Antarctica: current and future directions // *The Cryosphere*. – 2020. – V. 14 (11). – P. 3843–3873.
5. Lapham W.W. Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity. – Denver: US Geological Survey Publ., 1989. – 44 p.
6. Anderson M.P. Heat as a ground water tracer // *Ground water*. – 2005. – V. 43 (6). – P. 951–968.
7. Johnsson J., Adl-Zarrabi B. Modelling and evaluation of groundwater filled boreholes subjected to natural convection // *Applied Energy*. – 2019. – V. 253. – P. 113555.
8. Свалова В. Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики // *Геология и геофизика Юга России*. – 2019. – Т. 9. – № 3. – С. 77–93.
9. He A., Singh R.P. Coseismic groundwater temperature response associated with the Wenchuan earthquake // *Pure and Applied Geophysics*. – 2020. – V. 177 (1). – P. 109–120.
10. Экспресс-районирование материнской свиты по плотности ресурсов генерированной нефти (на примере Нюрольской мегавпадины) / В.И. Исаев, О.С. Исаева, Г.А. Лобова, В.И. Старостенко, А.Н. Фомин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 3. – С. 23–37.
11. Тектоно-седиментационная интерпретация данных геотермии при выявлении и оценке позднеэоценовой эрозии на арктических месторождениях углеводородов (п-ва Ямал). / В.И. Исаев, В.И. Старостенко, Г.А. Лобова, А.Н. Фомин, А.К. Исагалиева // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 19–31.
12. Прохорова П.Н., Развозжаева Е.П., Исаев В.И. Геотермия и оценка нефтегазового потенциала Буреинского бассейна (Дальний Восток России) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 65–76.
13. Демежко Д.Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 144 с.
14. Bodri L., Cermak V. – Amsterdam: Elsevier, 2007. – 352 p.
15. Череманский Г.А. Прикладная геотермия. – Л.: Недра, 1977. – 224 с.
16. Diment W.H. Thermal regime of a large diameter borehole: instability of the water column and comparison of air- and water-filled conditions // *Geophysics*. – 1967. – V. 32. – P. 720–726.
17. Sammel E.A. Convective flow and its effect on temperature logging in small-diameter wells // *Geophysics*. – 1968. – V. 33 (6). – P. 1004–1012.
18. Cermak V., Safanda J., Bodri L. Precise temperature monitoring in boreholes: Evidence for oscillatory convection? Part I. Experiments and field data // *International Journal of Earth Sciences*. – 2008. – V. 97 (2). – P. 365–373.
19. Cermak V., Bodri L., Safanda J. Precise temperature monitoring in boreholes: Evidence for oscillatory convection? Part II. Theory and Interpretation // *International Journal of Earth Sciences*. – 2008. – V. 97 (2). – P. 375–384.
20. Eppelbaum L.V., Kutasov I.M. Estimation of the effect of thermal convection and casing on the temperature regime of boreholes: a review // *Journal of Geophysics and Engineering*. – 2011. – V. 8 (1). – P. 1–10.
21. Berthold S., Resagk C. Investigation of thermal convection in water columns using particle image velocimetry // *Experiments in fluids*. – 2012. – V. 52 (6). – P. 1465–1474.
22. Демежко Д.Ю., Миндубаев М.Г., Хацкевич Б.Д. Температурные эффекты свободной тепловой конвекции в буровых скважинах // *Геология и геофизика*. – 2017. – Т. 58. – № 10. – С. 1602–1610.
23. Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. Исследование свободной тепловой конвекции в вертикальном цилиндре методом инфракрасной термографии // *Геология и геофизика*. – 2019. – Т. 60. – № 7. – С. 1028–1035.
24. Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. Методы подавления свободной тепловой конвекции в водонаполненных скважинах при проведении температурных исследований // *Георесурсы*. – 2020. – Т. 22. – № 1. – С. 55–62.
25. Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. Оценка температурного шума свободной тепловой конвекции в водонаполненных буровых скважинах по экспериментальным данным // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 136–143.
26. Ramey H.J. Jr Wellbore heat transmission // *Journal of petroleum Technology*. – 1962. – V. 14 (4). – P. 427–435.
27. Drury M.J., Jessop A.M., Lewis T.J. The detection of groundwater flow by precise temperature measurements in boreholes // *Geothermics*. – 1984. – V. 13 (3). – P. 163–174.
28. Котляр Л.А. Математическое моделирование и интерпретация нестационарных термогидродинамических процессов в системе скважина-пласт: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2013. – 145 с.
29. Kolo I., Sousa R., Zhang T. Heat transmission in a geothermal wellbore: modelling and application // 19th Australasian Fluid Mechanics Conference. – Melbourne, 2014. – P. 1–4.
30. Способ определения профиля закачки воды в нагнетательной скважине: пат. Рос. Федерация, № 2580547, заявл. 19.12.2014; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10. – 26 с.
31. Астрахан И.М., Марон В.И. Нестационарный теплообмен при промывке скважины // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1969. – Т. 10. – № 1. – С. 148–152.
32. Heat flow from a scientific research well at Cajon Pass, California / J.H. Sass, A.H. Lachenbruch, T.H. Moses, P. Morgan // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1992. – V. 97 (B4). – P. 5017–5030.
33. Borehole diameter controls thermal-induced convection and evaporation from a shallow water table / E. Levintal, M.I. Dragila, N.G. Lensky, N. Weisbrod // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – V. 47 (18). – P. e2020GL089411.
34. Гершуни Г.Э., Жуховицкий Г.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. – 393 с.
35. Способ температурного мониторинга в водонаполненных скважинах: пат. Рос. Федерация, № 26781746, заявл. 12.03.2018, опубл. 23.01.2019, Бюл. № 3. – 8 с.

36. Blackwell D.D. Temperatures and heat flow in INEL-GT1 and WO-2 boreholes, Snake River Plain, Idaho. – Dallas, Southern Methodist University Publ., 1990. – 29 p.
37. Prenskey S. Temperature measurements in boreholes-An overview of engineering and scientific applications // The Log Analyst. – 1992. – V. 33 (3). – P. 313–333.
38. Pollack H.N., Hurter S.J., Johnston J.R. Heat loss from the earth's 1025 interior: analysis of the global data set // Review of Geophysics and Space Physics. – 1993. – V. 31. – P. 267–280.
39. Lachenbruch A.H., Marshall B.V. Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic // Science. – 1986. – V. 234 (4777). – P. 689–696.
40. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
41. International Heat Flow Commission (IHFC). URL: <http://ihfc-iugg.org> (дата обращения 02.12.2020).

Поступила 16.06.2021 г.

Информация об авторах

Демежко Д.Ю., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН.

Хацкевич Б.Д., младший научный сотрудник лаборатории геодинамики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН.

Миндубаев М.Г., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН.

UDC 550.360; 550.832.6

QUASI-STATIONARY EFFECT OF FREE THERMAL CONVECTION IN WATER-FILLED BOREHOLES

Dmitry Yu. Demezhko¹,
ddem54@inbox.ru

Bogdan D. Khatskevich¹,
disaybl@yandex.ru

Mansur G. Mindubaev¹,
mansur_mg@mail.ru

¹ Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
100, Amundsen street, Yekaterinburg, 620016, Russia.

The relevance. Temperature measurements in water-filled boreholes and wells are used for solving a wide range of exploration, geophysical, environmental, hydrogeological, and geodynamic problems. Free thermal convection that occurs in boreholes with a geothermal gradient exceeding a critical value causes two types of thermal effects – non-stationary effect and quasi-stationary one. The non-stationary effect is manifested by non-periodic temperature fluctuations relative to a certain average value (temperature noise) and operates in a wide range of frequencies – from seconds to hourly. The quasi-stationary effect is associated with long-term deviations of temperature and gradient in the borehole relative to the undisturbed characteristics in the surrounding rocks. The last effect leads to erroneous estimates of formation temperatures and heat flows.

The main aim of the research is justification of the applicability of the Ramey's approximation model describing the thermal effect of forced fluid flows to assess the quasi-stationary effect of free thermal convection. Adaptation and verification of the model by experimental borehole temperature data.

Methods: analysis of geothermal and technological parameters determining the quasi-stationary effect of free thermal convection described by the Ramey's model; comparison of calculations based on the Ramey's model with data from experimental studies in boreholes.

Results. The application of the Ramey's model for evaluating the quasi-stationary thermal effect of free thermal convection in water-filled boreholes has been substantiated and experimentally verified. The decrease in the measured temperature gradient in comparison with the undisturbed gradient in the surrounding rocks is localized in the upper and lower intervals of the borehole. The effect is more pronounced and intervals are wider as the convective flow velocity increases, which in its turn depends on the Rayleigh number and the borehole diameter. The effect is less dependent on the total depth of the borehole.

Key words:

Borehole, temperature logging, temperature gradient, free thermal convection, quasi-stationary effect, Ramey's model.

The research was supported by the RFBR, project no. 19-05-00050-a (modelling quasi-stationary effect, analysis of the temperature logging and monitoring data) and state-financed subject R&D no. 0394-2018-0002 (field experimental investigations in a well and studies on the laboratory unit).

REFERENCES

- Lubimova E.A. *Termika Zemli I Luni* [Thermics of the Earth and Moon]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 280 p.
- Beardsmore G.R., Cull J.P. *Crustal heat flow: a guide to measurement and modelling*. Edinburg, Cambridge University Press, 2001. 324 p.
- Jiang G., Hu S., Shi Y., Zhang C., Wang Z., Hu D. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications. *Tectonophysics*, 2019, vol. 753, pp. 36–48.
- Burton-Johnson A., Dziadek R., Martin C. Geothermal heat flow in Antarctica: current and future directions. *The Cryosphere*, 2020, vol. 14 (11), pp. 3843–3873.
- Lapham W.W. *Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity*. Denver, US Geological Survey Publ., 1989. 44 p.
- Anderson M.P. Heat as a ground water tracer. *Ground water*, 2005, vol. 43 (6), pp. 951–968.
- Johnsson J., Adl-Zarrabi B. Modelling and evaluation of ground-water filled boreholes subjected to natural convection. *Applied Energy*, 2019, vol. 253, p. 113555.
- Svalova V.B. Geothermics and seismicity of the Caucasus region and inverse problem of geodynamics. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2019, vol. 9 (3), pp. 79–93. In Rus.
- He A., Singh R.P. Coseismic groundwater temperature response associated with the Wenchuan earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 2020, vol. 177 (1), pp. 109–120.
- Isaev V.I., Isaeva O.S., Lobova G.A., Starostenko V., Fomin A.N. Express zoning of the parent suite on density of generated oil resources (by the example of Nyuroлка megadepression). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 3, pp. 23–37. In Rus.
- Isaev V.I., Starostenko V.I., Lobova G.A., Fomin A.N., Issagaliyeva A.K. Tectonic-sedimentation interpretation of the geothermics data when identifying and assessing the late eocene erosion on the arctic hydrocarbon fields (Yamal peninsula). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 19–31. In Rus.
- Prokhorova P.N., Razvozhayeva E.P., Isaev V.I. Geothermy and estimation of hydrocarbon potential of the Bureya basin (Russian Far East). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 65–76. In Rus.
- Demezhko D.Yu. *Geotermicheskiy metod rekonstruktsii paleoklimata (na primere Urala)* [Geothermal method for paleoclimate reconstruction (examples from the Urals, Russia)]. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2001. 144 p.
- Bodri L., Cermak V. *Borehole climatology: a new method how to reconstruct climate*. Amsterdam, Elsevier, 2007. 352 p.
- Cheremensky G.A. *Prikladnaya geotermiya* [Applied geothermy]. Leningrad, Nedra Publ., 1977. 181 p.
- Diment W.H. Thermal regime of a large diameter borehole: instability of the water column and comparison of air- and water-filled conditions. *Geophysics*, 1967, vol. 32, pp. 720–726.

17. Sammel E.A. Convective flow and its effect on temperature logging in small-diameter wells. *Geophysics*, 1968, vol. 33 (6), pp. 1004–1012.
18. Cermak V., Safanda J., Bodri L. Precise temperature monitoring in boreholes: Evidence for oscillatory convection? P. I. Experiments and field data. *International Journal of Earth Sciences*, 2008, vol. 97 (2), pp. 365–373.
19. Cermak V., Bodri L., Safanda J. Precise temperature monitoring in boreholes: evidence for oscillatory convection? P. II. Theory and Interpretation. *International Journal of Earth Sciences*, 2008, vol. 97 (2), pp. 375–384.
20. Eppelbaum L.V., Kutasov I.M. Estimation of the effect of thermal convection and casing on the temperature regime of boreholes: a review. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2011, vol. 8 (1), pp. 1–10.
21. Berthold S., Resagk C. Investigation of thermal convection in water columns using particle image velocimetry. *Experiments in fluids*, 2012, vol. 52 (6), pp. 1465–1474.
22. Demezhko D.Yu., Mindubaev M.G., Khatskevich B.D. Thermal effects of natural convection in boreholes. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58 (10), pp. 1270–1276.
23. Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G. Natural thermal convection in a vertical water-filled cylinder: infrared thermography investigation. *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60 (7), pp. 813–818.
24. Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G. Methods of suppressing free thermal convection in water-filled wells during temperature research. *Geosurvey=Georesources*, 2020, vol. 22 (1), pp. 55–62.
25. Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G. Experimental estimation of temperature noise caused by free thermal convection in water-filled boreholes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 136–143. In Rus.
26. Ramey H.J. Jr Wellbore heat transmission. *Journal of petroleum Technology*, 1962, vol. 14 (04), pp. 427–435.
27. Drury M.J., Jessop A.M., Lewis T.J. The detection of groundwater flow by precise temperature measurements in boreholes. *Geothermics*, 1984, vol. 13 (3), pp. 163–174.
28. Kotliar L.A. *Matematicheskoe modelirovanie i interpretatsiya nestatsionarnykh termogidrodinamicheskikh protsessov v sisteme skvazhina-plast*. Diss. Kand. nauk [Mathematical modelling and interpretation of non-stationary thermo-hydrodynamic processes in the «well-bed» system. Cand. Diss.]. Moscow, 2013. 145 p.
29. Kolo I., Sousa R., Zhang T. Heat transmission in a geothermal wellbore: modelling and application. *19th Australasian Fluid Mechanics Conference*. Melbourne, 2014. pp. 1–4.
30. Pimenov V.P., Sidorova M.V., Shako V.V., Theuveny B., George A.B. Sposob opredeleniya profilya zakachki vody v nagnetatelnoy skvazhine [Method for determining profile of water injection in injection well]. Patent RF, no. 2580547, 2014.
31. Astrakhan I.M., Maron V.I. Nestatsionarny teploobmen pri promyvke skvazhiny [Non-stationary heat exchange under well flushing]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1969, vol. 10, no. 1, pp. 148–152. In Rus.
32. Sass J.H., Lachenbruch A.H., Moses T.H., Morgan P. Heat flow from a scientific research well at Cajon Pass, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, vol. 97 (B4), pp. 5017–5030.
33. Levintal E., Dragila M.I., Lensky N.G., Weisbrod N. Borehole diameter controls thermal-induced convection and evaporation from a shallow water table. *Geophysical Research Letters*, 2020, vol. 47 (18), p. e2020GL089411.
34. Gershuni G., Zhukhovitskii E. *Convective stability of incompressible fluids*. Jerusalem, Keter Publ. house, 1976. 336 p.
35. Khatskevich B.D., Demezhko D.Yu., Mindubaev M.G. *Sposob temperaturnogo monitoringa v vodonapolnennykh skvazhinakh* [The way to temperature monitoring in water filled boreholes]. Patent RF, no. 2678174, 2019.
36. Blackwell D.D. *Temperatures and heat flow in INEL-GT1 and WO-2 boreholes, Snake River Plain, Idaho*. Dallas, Southern Methodist University Publ., 1990. 29 p.
37. Premsky S. Temperature measurements in boreholes – an overview of engineering and scientific applications. *The Log Analyst*, 1992, vol. 33 (03), pp. 313–333.
38. Pollack H.N., Hurter S.J., Johnston J.R. Heat loss from the earth's interior: analysis of the global data set. *Review of Geophysics and Space Physics*, 1993, vol. 31, pp. 267–280.
39. Lachenbruch A.H., Marshall B.V. Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. *Science*, 1986, vol. 234 (4777), pp. 689–696.
40. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of heat in solids*. 2nd ed. New York, Oxford Univ. Press, 1959. 510 p.
41. *International Heat Flow Commission (IHFC)*. Available at: <http://ihfc-iugg.org> (accessed 2 December 2020).

Received: 16 June 2021.

Information about the authors

Dmitry Yu. Demezhko, Dr. Sc., chief research scientist, Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

Bogdan D. Khatskevich, junior research scientist, Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

Mansur G. Mindubaev, Cand. Sc., senior research scientist, Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

УДК 661.721.422

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИНТЕЗА МЕТАНОЛА ИЗ ЗАБАЛЛАСТИРОВАННОГО АЗОТОМ СИНТЕЗ-ГАЗА

Загашвили Юрий Владимирович¹,
y.zagashvili@yandex.ru

Кузьмин Алексей Михайлович^{2,3,4},
kuzmin.lex@gmail.com

Имшенецкий Владимир Владиславович⁵,
v.imshenetskiy@ngt-synthesis.com

Лищнер Иосиф Израилевич⁶,
lii48@bk.ru

Малова Ольга Васильевна⁶,
mov58rus@yandex.ru

- ¹ ООО «ВТР»,
Россия, 195297, г. Санкт-Петербург, Ольги Форш, 15 А, к. 1.
- ² Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская, 1/21.
- ³ ООО «Генератор синтез-газа»,
Россия, 195297, г. Санкт-Петербург, ул. Ольги Форш, 15, к. 1, кв. 49.
- ⁴ Российская Академия Естественных Наук,
Россия, 190013, г. Санкт-Петербург, ул. Серпуховская, 38.
- ⁵ ООО «Новые газовые технологии-синтез» Sk,
Россия, 121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», ул. Нобеля, 7, этаж 2, помещение № 42.
- ⁶ Российская академия наук,
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Актуальность исследования обусловлена недостаточной изученностью процесса синтеза метанола из обогащенного азотом синтез-газа, а также отсутствием экспериментальных данных о влиянии состава синтез-газа на выход метанола-сырца, его качество и состав отходящих газов. Проблема особенно важна для малотоннажных установок по производству метанола в промышленных условиях с использованием технологии получения синтез-газа путем парциального окисления природного газа воздухом.

Цель: экспериментально подтвердить возможность синтеза метанола из обогащенного азотом синтез-газа и получить объективные оценки производительности процесса, оценить влияние температуры синтеза, состава и параметров забалластированного азотом синтез-газа на выход и качество метанола-сырца, состав отходящих газов.

Объекты: забалластированный азотом синтез-газ и его реакционная способность к синтезу метанола в зависимости от температуры синтеза, состава и параметров – мольных отношений компонентов и факториала (модуля) – синтез-газа.

Методы: экспериментальные лабораторные исследования синтеза метанола с катализатором C-79-7GL компании «ZüdChemie» в проточном реакторе изотермического типа.

Результаты. Экспериментально подтверждена возможность синтеза метанола из обогащенного азотом синтез-газа, получаемого парциальным окислением природного газа воздухом. При давлении 4,0–4,2 МПа и объемной скорости 1100 ч⁻¹ для различных средних температур 210, 220 и 230 °С синтеза и двух отличающихся составом сырьевых смесей определены выходы метанола-сырца, содержание воды и примесей в метаноле-сырце, составы и параметры отходящих из реактора газов, конверсии углерода. Уточнены оптимальная температура синтеза и допустимые вариации температуры в слое катализатора. Сформулированы рекомендации к параметрам процесса в установках с трехреакторными проточными каскадами синтеза метанола и приведена оценка их удельной производительности при использовании обогащенного азотом синтез-газа.

Ключевые слова:

Метанол, обогащенный азотом синтез-газ, газогенератор, парциальное окисление природного газа воздухом, конверсия углерода, факториал синтез-газа.

Введение

Важной задачей современной газо- и нефтехимии является малотоннажное производство метанола, размещаемое непосредственно вблизи мест добычи углеводородного сырья [1–7]. Она особенно актуаль-

на для удаленных и труднодоступных месторождений с неразвитой инфраструктурой, поскольку решает проблемы утилизации ПНГ и снижения больших логистических издержек на доставку метанола, предназначенного для ингибирования гидратообразования [1, 3–6].

В России известны две малотоннажные установки производительностью 12,5 и 40,0 тыс. т метанола в год, функционирующие на Юрхаровском нефтегазо-конденсатном месторождении по традиционной двух-стадийной технологии, включающей на первой стадии получение синтез-газа путем паровой каталитической конверсии природного газа [8]. Для малотоннажного производства метанола целесообразно применение парциального окисления природного газа (РОХ) воздухом, достоинствами которого являются: значительное, в 3–5 раз, уменьшение массогабаритных характеристик, модульность и транспортабельность установок; применение воздуха в качестве окислителя позволяет исключить из состава оборудования дорогостоящую систему получения кислорода; снижение на 30–50 % себестоимости синтез-газа [6–12]. И хотя генерируемый синтез-газ содержит свыше 50 об. % азота, что существенно снижает эффективность синтеза и уменьшает производительность установок [6, 12–14], повышенная безопасность эксплуатации и возможность производства метанола непосредственно в промышленных условиях обуславливают важные дополнительные преимущества РОХ.

В продолжение работ [14, 15] в настоящей статье приводятся результаты новых экспериментальных исследований процесса синтеза метанола из синтез-газа с высоким содержанием азота, получаемого парциальным окислением природного газа воздухом.

Описание установки

Метанол синтезировали на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 1. Установка состоит из: регуляторов давления – 1, 6; расходомера-регулятора массового расхода – 2; преднагревателя – 3; реактора – 4 с загрузкой катализатора C-79-7GL компании «ZüdChemie» объемом 50 см³ при высоте слоя 12 см; фильтра – 5; охлаждаемого сепаратора – 7; ловушки жидких продуктов – 8; счетчика газа («газовые часы») – 9. Реактор изотермического типа [14] оборудован термопарами, устанавливаемыми в аксиальный

канал, для измерения температуры по слою катализатора и в пристеночный канал – для регулирования температуры в реакторе. Установка содержит баллоны с синтез-газом и азотом. Перед началом экспериментов в реактор загружают катализатор и продувают азотом из баллона. После проверки герметичности реактор нагревают до заданной температуры синтеза в рекомендуемом для свежевосстановленных медьцинк-алюминиевых катализаторов диапазоне 200–230 °С [14, 16, 17].

В процессе эксперимента синтез-газ из баллона подавали под давлением 4,0–4,2 МПа через расходомер-регулятор массового расхода – 2 типа «BronkhorstEl-Flow» с погрешностью измерения ±1 % в преднагреватель – 3, где нагревали до заданной температуры. Температуру в слоях катализатора измеряли с погрешностью ±0,75 % перемещающейся по высоте термопарой. Средняя объемная скорость синтеза составляла 1100 ч⁻¹, что эквивалентно объемному расходу 55·10⁻³ м³/ч. Образующиеся в процессе химических реакций продукты синтеза после фильтра – 5 поступали в сепаратор – 7, охлаждаемый циркуляционным криотермостатом. После отделения метанола-сырца в 8 отходящие газы через газовые часы – 9 поступали на анализ в хроматограф «Хромос-1000», снабженный двумя детекторами. Для анализа водорода использовали полудиффузионный детектор, газ-носитель – аргон; анализ постоянных газов проводили на проточном двояном детекторе, газ-носитель – гелий. При анализе СО, СО₂, азота и кислорода использовали насадочную колонку «Hayesep-Q» с фазой (длиной 2 м, диаметром 3 мм, 80–100 меш.); анализ Н₂ проводили в изотермическом режиме при 50 °С с использованием насадочной колонки с цеолитом NaX (длиной 3 м, диаметром 3 мм, 60–80 меш.). Анализ жидких продуктов синтеза проводили на хроматографе «Кристаллюкс-4000М» с использованием хроматографической колонки с фазой «Db-1»; содержание воды определяли на колонке «Hayesep-Q» при 100 °С.

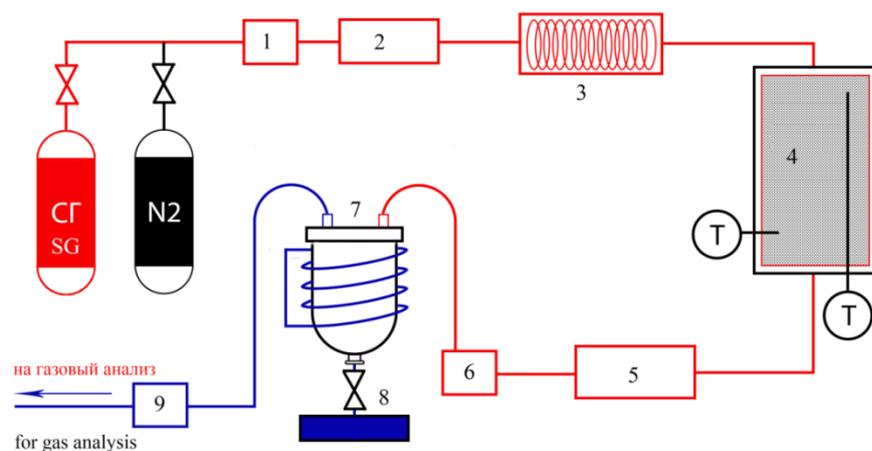


Рис. 1. Блок-схема лабораторной установки: SG – баллон с синтез-газом; N2 – баллон с азотом; 1, 6 – регулятор давления; 2 – расходомер-регулятор; 3 – преднагреватель; 4 – реактор; 5 – фильтр; 7 – сепаратор; 8 – ловушка; 9 – газовые часы, T – термопара

Fig. 1. Block diagram of a laboratory unit: SG – syngas tank; N2 – nitrogen tank; 1, 6 – pressure regulator; 2 – flow meter-regulator; 3 – preheater; 4 – reactor; 5 – filter; 7 – separator; 8 – trap; 9 – gas clock, T – thermocouple

Характеристики сырьевых смесей, используемых в экспериментах, приведены в табл. 1. Они совпадают с расчетными составами водородсодержащего газа на выходе комплекса получения синтез-газа, входящего в состав малотоннажной установки по производству метанола с проточным трехреакторным каскадом синтеза и выводом метанола-сырца после каждого реактора [9, 10]. Обе экспериментальных смеси соответствуют синтез-газу, полученному путем парциального окисления природного газа воздухом с коэффициентом избытка окислителя 0,38, и отличаются значениями показателей, применяемых для оценки реакционной способности синтез-газа – мольных отношений компонентов и факториала (модуля) [16–20]. Сырьевая смесь № 1 получена без коррекции содержания газа с выхода газогенератора и имеет показатели: $H_2/CO=1,80$, $CO/CO_2=4,73$, модуль $M=(H_2-CO_2)/(CO+CO_2)=1,31$; сырьевая смесь № 2 оптимизирована по критерию обеспечения требуемого значения модуля и имеет показатели: $H_2/CO=2,54$, $CO/CO_2=5,36$, $M=1,99$ [15].

Таблица 1. Состав сырьевых смесей

Table 1. Mixture composition

Компоненты Components	Сырьевая смесь/Feedstock mixture			
	№ 1/но. 1		№ 2/но. 2	
	Мольный состав Molar composition	Массовый состав Mass composition	Мольный состав Molar composition	Массовый состав Mass composition
H ₂	26,84±0,27	0,025	30,1±0,30	0,030
CO	14,9±0,35	0,194	11,84±0,24	0,162
CO ₂	3,15±0,11	0,065	2,21±0,08	0,047
N ₂	55,11±0,95	0,717	55,85±0,95	0,762
CH ₄ , H ₂ O	Следы/Traces			

Экспериментальные данные

В табл. 2, 3 приведен материальный баланс продуктов синтеза в зависимости от средней температуры в слое катализатора и состава синтез-газа.

Таблица 2. Материальный баланс продуктов синтеза

Table 2. Material balance of synthesis products

Наименование показателей Name of indicators	Сырьевая смесь/Feedstock mixture					
	№ 1/но. 1			№ 2/но. 2		
	Температура/Temperature, °C					
	200	210	230	200	210	230
Давление, МПа Pressure, MPa	4,22	4,22	4,22	4,02	4,02	4,02
Расход газа на входе в реактор, г/ч Gas flow rate at the inlet of the reactor, g/h	52,83	52,83	52,83	50,38	50,38	50,38
Выход метанола-сырца, г/ч Crude methanol yield, g/h	0,97	1,61	0,20	1,15	1,51	0,40
Содержание воды в метаноле-сырце, % мас. Water content in raw methanol, % wt.	22,86	5,37	3,23	35,23	5,28	3,87
Содержание примесей в метаноле-сырце, % мас. Impurity content in raw methanol, % wt.	0,9	0,08	0,47	0,52	0,28	0,81
Расход отходящего газа, г/ч Exhaust gas flow rate, g/h	51,86	51,22	52,63	49,23	48,87	49,98

Таблица 3. Материальный баланс отходящего газа

Table 3. Exhaust gas material balance

Наименование показателей Name of indicators	Сырьевая смесь/Feedstock mixture					
	№ 1/но. 1			№ 2/но. 2		
	Температура/Temperature, °C					
	200	210	230	200	210	230
Расход отходящего газа, г/ч Exhaust gas flow rate, g/h	51,86	51,22	52,63	49,23	48,87	49,98
Метанол, г/ч Methanol, g/h	2,97	3,59	3,84	2,65	3,60	3,72
Содержание метанола, % об. Methanol content, % vol.	5,63	8,14	6,08	5,20	7,95	6,21
Вода, г/ч Water, g/h	0,15	0,05	0,04	0,19	0,05	0,04
Содержание воды, % об. Water content, % vol.	0,89	0,39	0,12	1,30	0,36	0,16
CO, г/ч (g/h)	7,47	5,97	6,78	5,85	3,94	4,63
Содержание CO, % об. CO content, % vol.	12,81	10,84	11,68	9,94	7,12	8,01
CO ₂ , г/ч (g/h)	2,58	3,07	3,29	1,18	2,07	2,25
Содержание CO ₂ , % об. CO ₂ content, % vol.	2,82	3,55	3,61	1,28	2,38	2,47
H ₂ , г/ч (g/h)	0,81	0,66	0,81	0,99	0,83	0,96
Содержание H ₂ , % об. H ₂ content, % vol.	19,46	16,84	19,49	23,48	21,12	23,18
N ₂ , г/ч (g/h)	37,87	37,87	37,87	38,38	38,38	38,38
Содержание N ₂ , % об. N ₂ content, % vol.	64,02	68,38	65,10	64,00	69,02	66,18
Содержание примесей, г/ч Impurity content, g/h	0,01	0,01	Следы/Traces			

Обсуждение результатов

Анализ данных табл. 2, 3 свидетельствует об определяющем влиянии температуры катализатора на выход метанола-сырца и его качество. Максимальный абсолютный выход метанола для обеих смесей достигается при температуре 210 °C и составляет 5,12 г/ч для первой смеси и 5,03 г/ч для второй. Таким образом, удельные выходы метанола-сырца приблизительно одинаковы для обеих смесей и составляют 90 кг/ч на 1000 нм³/ч синтез-газа или 500 кг/ч на 1000 нм³/ч природного газа при парциальном окислении природного газа воздухом с коэффициентом избытка окислителя 0,38.

Наблюдается высокая чувствительность выхода метанола к изменению температуры, особенно в ее нижнем диапазоне, где при уменьшении температуры синтеза с 210 до 200 °C относительный выход метанола уменьшился примерно на 30 % для обеих смесей. Поэтому проводилась проверка изотермичности реактора синтеза путем измерения профиля температур по высоте слоя катализатора, результаты которой представлены на рис. 2. Для первой смеси при температуре нагревательного элемента 200 °C средняя температура в слое катализатора составила 195 °C, при 210 °C получили 208 °C, при 230 °C средняя температура 227 °C; для второй смеси при тех же температурах нагревательного элемента средняя температура в слое катализатора составила соответственно: 197, 207, 227 °C. При температурах ниже 200 °C катализатор становится неэффективным [14]. Интерполируя экспериментальные данные, оптимальной средней температурой в слое катализатора C-79-7GL можно считать 215–220 °C.

На основании данных табл. 1–3 рассчитаны параметры синтез-газа на входе и выходе реактора (табл. 4). Конверсия углерода, содержащегося в оксидах углерода исходных составов синтез-газа, в углерод метанола в экспериментах составила от 26,5 до 45,6 %; конверсия СО изменяется от 27 до 51,6 %. Максимальная конверсия достигается при температуре синтеза 210 °С. Учитывая коэффициенты чувстви-

тельности выхода метанола к температуре, можно прогнозировать достижение 50 %-ой конверсии по углероду и до 60 % по СО при оптимальной средней температуре в слое катализатора 215–220 °С. Для повышения конверсии СО и удельной производительности катализатора по метанолу рекомендуют увеличить объемную скорость синтеза (уменьшать время контакта) до 10000–15000 ч⁻¹ [17, 18].

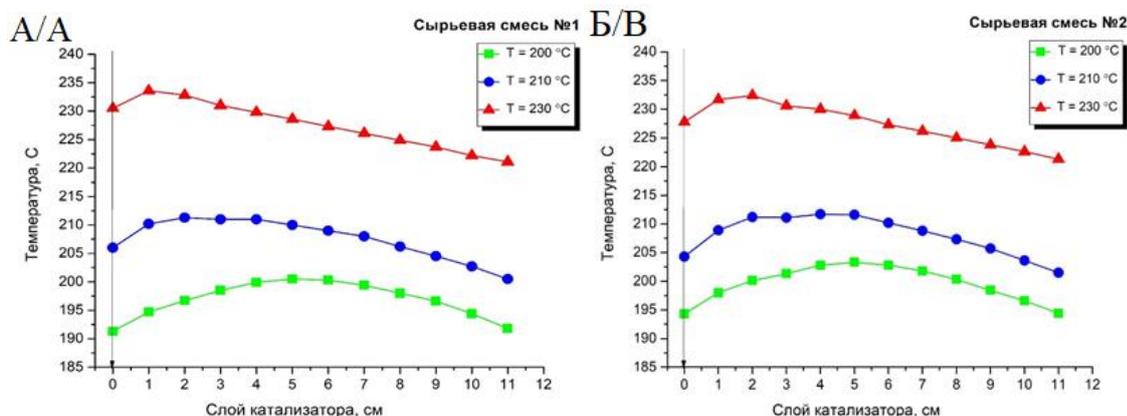


Рис. 2. Профиль температур по слою катализатора: (А) сырьевая смесь №1, (Б) сырьевая смесь №2
 Fig. 2. Temperature profile through the bed of catalyst: (A) feedstock mixture no. 1 (B) feedstock mixture no. 2

Таблица 4. Параметры газовых потоков в реакторе

Table 4. Parameters of gas flows in the reactor

Показатели/Indicators	Сырьевая смесь/Feedstock mixture					
	№ 1/no. 1			№ 2/no. 2		
	Температура, °C/Temperature, °C					
	200	210	230	200	210	230
Расход СО на входе, г/ч CO mass flow rate at the inlet, g/h	10,24	10,24	10,24	8,14	8,14	8,14
Расход С из СО на входе, г/ч C mass flow rate in CO at the inlet, g/h	4,39	4,39	4,39	3,49	3,49	3,49
Расход СО ₂ на входе, г/ч CO ₂ mass flow rate at the inlet, g/h	3,40	3,40	3,40	2,39	2,39	2,39
Расход С из СО ₂ на входе, г/ч C mass flow rate in CO ₂ at the inlet, g/h	0,93	0,93	0,93	0,65	0,65	0,65
Расход СО на выходе, г/ч CO mass flow rate at the output, g/h	7,47	5,97	6,78	5,85	3,94	4,63
Расход С в СО на выходе, г/ч C mass flow rate in CO at the output, g/h	3,20	2,56	2,91	2,51	1,69	1,98
Расход СО ₂ на выходе, г/ч CO ₂ mass flow rate at the output, g/h	2,58	3,07	3,29	1,18	2,07	2,25
Расход С в СО ₂ на выходе, г/ч C mass flow rate in CO ₂ at the output, g/h	0,70	0,84	0,90	0,32	0,56	0,61
Конверсия СО, % Carbon monoxide conversion, %	27,04	41,69	33,78	28,10	51,58	43,10
Конверсия СО ₂ , % Carbon dioxide conversion, %	24,15	9,75	3,28	50,56	13,26	5,72
Конверсия С, % Carbon conversion, %	26,54	36,12	28,46	31,63	45,55	37,22
СО/СО ₂ на входе CO/CO ₂ at the reactor inlet	4,73	4,73	4,73	5,36	5,36	5,36
СО/СО ₂ на выходе CO/CO ₂ output from the reactor	4,54	3,06	3,24	7,77	2,99	3,24
Н ₂ /СО на входе H ₂ /CO at the reactor inlet	1,80	1,80	1,80	2,54	2,54	2,54
Н ₂ /СО на выходе H ₂ /CO output from the reactor	1,52	1,55	1,67	2,36	2,97	2,89
Модуль М на входе Module M at the reactor inlet	1,31	1,31	1,31	1,99	1,99	1,99
Модуль М на выходе Module M output from the reactor	1,06	0,92	1,04	1,98	1,97	1,98

Исследования синтеза метанола в забалластрированном азотом синтез-газе с низкими отношениями H_2/CO , малыми значениями модуля M и достаточно высокими отношениями CO/CO_2 представляют большой интерес для малотоннажного производства с использованием технологии POX. Это обусловлено тем, что в синтез-газе, получаемом парциальным окислением природного газа воздухом, отношение $H_2/CO=1,6-1,8$ зависит главным образом от коэффициента избытка окислителя и меньше рекомендуемых значений $H_2/CO=2,2-2,6$ [15], отношения объемных концентраций оксидов углерода $CO/CO_2>4,5$ благоприятны для синтеза метанола [16–19] и практически не зависят от коэффициента избытка окислителя [15], величины модуля $M<1,5$ значительно меньше оптимальных $M=2,0-2,3$ [15–20].

Влияние состава и показателей синтез-газа в зависимости от температуры проявляется неоднозначно. Так, при температуре синтеза 210 °С обе сырьевые смеси имеют идентичные выходы метанола, минимальные концентрации органических примесей и максимальные степени конверсии углерода. Достаточно высокие отношения $CO/CO_2>3$ сохраняются в отходящих газах во всем диапазоне температур. Однако показатели H_2/CO и M у отходящего газа для исходной оптимизированной смеси № 2 значительно выше и близки к оптимальным рекомендуемым значениям, что потенциально способствует более высокой степени конверсии углерода в комплексах синтеза метанола на основе многореакторных проточных каскадов с промежуточным выводом метанола-сырца после каждого реактора [10, 15, 17, 18]. При средней температуре в слое катализатора 215–220 °С, увеличении объемной скорости синтеза с 1100 ч⁻¹ до промышленной 10000 ч⁻¹ и рабочего давления до 5,0 МПа можно прогнозировать увеличение степени конверсии углерода в оптимизированной смеси до 60 %, а выхода метанола в 1,3–1,5 раза. Для увеличения выхода метанола в многореакторных проточных каскадах необходимо повышать температуру синтеза в каждом следующем по ходу потока реакторе вследствие увеличения содержания инертного азота и соответствующего уменьшения концентрации реакционных компонентов в отходящих после отделения метанола-сырца газах [10, 17].

Данные эксперимента показывают хорошее совпадение с расчетными материальными балансами установки с проточным трехреакторным каскадом синтеза с промежуточным выводом метанола-сырца после каждого реактора [15]. Например, принятые в расчетах конверсии CO соответствовали фактическим, полученным при меньших значениях рабочего давления и объемной скорости; теоретический выход метанола на 1000 нм³/ч природного газа в установке с конверсией CO в реакторах 60 %–25 %–10 % составил

570 кг/ч для неоптимизированного состава синтез-газа и 635 кг/ч для оптимизированного состава.

Качество метанола-сырца зависит от содержания в нем воды и органических примесей. С увеличением температуры синтеза содержание воды в метаноле-сырце резко уменьшается с высоких концентраций для обеих смесей при температуре 200 °С до минимальных значений при 230 °С. Эта закономерность особенно сильно проявляется в нижнем диапазоне рабочих температур. Представляет интерес динамика изменения концентрации примесей в зависимости от температуры, имеющая параболическую форму с выраженным минимумом при 210 °С.

Заключение

Экспериментально подтверждена возможность синтеза метанола из обогащенного азотом синтез-газа, получаемого парциальным окислением природного газа воздухом. Показатели качества синтеза в определяющей степени зависят от температуры катализатора. При средней температуре в слое катализатора 207 °С, объемной скорости 1100 ч⁻¹ и давлении 4,0–4,2 МПа на катализаторе C-79-7GL получены следующие показатели процесса: удельный выход метанола-сырца составляет 500 кг на 1000 м³ природного газа; содержание воды менее 5,0 % масс.; конверсия углерода, содержащегося в оксидах углерода исходного синтез-газа, в углерод метанола составила от 27 до 45,6 %; содержание примесей в метаноле-сырце минимально. Содержание воды в метаноле-сырце сильно зависит от температуры в слое катализатора, особенно в нижнем диапазоне рабочих температур, поэтому необходимо предъявлять высокие требования к изотермичности реактора синтеза. При оптимальной средней температуре в слое катализатора 215–220 °С, повышении объемной скорости до 10000 ч⁻¹ и рабочего давления до 5 МПа прогнозируемое увеличение конверсии углерода и выхода метанола составит 30–50 %.

Показатели качества исходного синтез-газа (H_2/CO , M , CO/CO_2) оказывают значительное влияние на характеристики газа, отходящего после отделения метанола-сырца. Мольные отношения оксидов углерода в отходящем газе зависят в основном от температуры синтеза и сохраняют достаточно высокие значения $CO/CO_2>3$, способствующие его высокой реакционной способности. Следует отметить увеличение H_2/CO и сохранение оптимальных значений M в отходящих газах при использовании оптимизированной сырьевой смеси № 2 в сравнении с неоптимизированным составом смеси № 1. Это свидетельствует о потенциально более высокой конверсии углерода в оптимизированном составе при синтезе метанола в многореакторных проточных каскадах и обуславливает возможность оптимизации количества реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология переработки углеводородных газов / В.С. Арутюнов, И.А. Голубева, О.Л. Елисеев, Ф.Г. Жагфаров. – М.: Изд-во «Юрайт», 2020. – 723 с.

2. Wernicke H.-J., Plass L., Schmidt F. Methanol generation // Methanol: the basic chemical and energy feedstock of the future. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – P. 51–301.
3. Исследование состояния и перспектив направлений переработки нефти и газа, нефти- и газохимии в РФ / В.И. Фейгин, О.Б. Брагинский, С.А. Заболотский, И.Г. Кукушкин, А.В. Ма-

- евский, Н.И. Масленников, Ю.Г. Рыков. – М.: Изд-во «Эконинформ», 2011. – 806 с.
- Westertep K.R. New methanol processes // Energy efficiency in process technology / Ed. by P.A. Pilavachi. – Dordrecht: Springer, 1993. – P. 1142–1153.
 - Arutyunov V.S., Strekova L.N. Kinetic features and technological perspectives of the partial oxidation of light alkanes, Russia, Moscow // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2012. – V. 6 (4). – P. 486–497.
 - Арутюнов В.С., Савченко В.И., Седов И.В. О перспективах промышленных газохимических технологий на основе азотсодержащего синтез-газа // Нефтегазохимия. – 2016. – № 4. – С. 14–23.
 - Prodan V.D., Klyushenkova M.I., Borodacheva E.I. Low-tonnage methanol production, Russia // Chemical and Petroleum Engineering – 2013. – V. 49 (7–8). – P. 443–446.
 - Кемалов Р.А., Кемалов А.Ф. Технологии получения и применения метанола. – Казань: Изд-во Казан. ун-т, 2016. – 167 с.
 - Комплекс получения синтез-газа для малотоннажного производства метанола / Ю.В. Загашвили, В.Н. Ефремов, А.М. Кузьмин, И.И. Лицинер // Нефтегазохимия. – 2017. – № 1. – С. 19–26.
 - Малотоннажная установка получения метанола: пат. Рос. Федерации № 176510, заявл. 20.06.2017; опубл. 22.01.2018. Бюл. № 3. – 3 с.
 - Palguandi I.J. Syngas: production, applications, and environmental impact. – New York: Nova Science Publishers, 2013. – 365 p.
 - Experimental study and kinetics modeling of partial oxidation reactions in heavily sooting laminar premixed methane flames, China, Beijing / Q. Li, T. Wang, Y. Liu, D. Wang // Chemical Engineering Journal. – 2012. – V. 207–208. – № 1. – P. 235–244.
 - Лапидус А.Л., Елисеев О.Л., Крючков М.В. Получение углеводородов из синтез-газа, забалластрированного азотом // Технология нефти и газа. – 2011. – № 5. – С. 9–12.
 - Synthesizing methanol from nitrogen-ballasted syngas, Russia, Moscow / I.I. Lishchiner, O.V. Malova, A.L. Tarasov, V.M. Maslennikov, Y.A. Vyskubenko, L.S. Tolchinskii, Y.L. Dolinskii // Catalysis in Industry. – 2010. – V. 2. – № 4. – P. 368–373.
 - Загашвили Ю.В., Кузьмин А.М. Влияние состава водородсодержащего газа на выход метанола // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 187–195.
 - Технология синтетического метанола / М.М. Караваев, В.Е. Леонов, И.Г. Попов, Е.Т. Шепелев. – М.: Изд-во: «Химия», 1984. – 240 с.
 - Розовский А.Я., Лин Г.И. Теоретические основы процесса синтеза метанола. – М.: Изд-во «Химия», 1990. – 272 с.
 - Синтез метанола в системе проточных реакторов / А.В. Черепнова, А.А. Лендер, А.Г. Краснянская, Н.А. Бондарева // Катализ и нефтехимия. – 2000. – № 5–6. – С. 69–74.
 - Autothermal reforming technology for modern large-scale methanol plants / P.J. Dahl, T.S. Christensen, S. Winter-Madsen, S.M. KingProven. – Paris. Nitrogen+Syngas, 2014. – P. 1–12.
 - Appl M. Ammonia, methanol, hydrogen, carbon monoxide. Modern production Technologies. London: Nitrogen, 1997. – 140 p.

Поступила 30.11.2020 г.

Информация об авторах

Загашвили Ю.В., доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «ВТР».

Кузьмин А.М., кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; генеральный директор ООО «Генератор синтез-газа»; советник Российской Академии Естественных Наук.

Имшенецкий В.В., технический директор ООО «Новые газовые технологии-синтез» Sk.

Лицинер И.И., старший научный сотрудник, кандидат химических наук, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Малова О.В., кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

UDC 661.721.422

EXPERIMENTAL STUDIES OF METHANOL SYNTHESIS FROM NITROGEN-BALLASTED SYNTHESIS GAS

Yuriy V. Zagashvili¹,
y.zagashvili@yandex.ru

Aleksey M. Kuzmin^{2,3},
kuzmin.lex@gmail.com

Vladimir V. Imshenetsky⁴,
v.imshenetskiy@ngt-synthesis.com

Iosif I. Lishchiner⁵,
mov58rus@yandex.ru

Olga V. Malova⁵,
mov58rus@yandex.ru

¹ LLC «HTR»
15/1, Olga Forsh street, Saint-Petersburg, 195297, Russia.

² Baltic State Technical University,
1/21, 1st Krasnoarmeyskaya street, Saint-Petersburg, 190005, Russia.

³ LLC «GSG»,
15/1, Olga Forsh street, Saint-Petersburg, 195297, Russia.

⁴ LLC «NTG-synthesis» Sk,
r. 42, fl. 2, 7, Nobel street, territory of the Skolkovo innovation center, Moscow, 121205, Russia.

⁵ Joint Institute of high temperatures of the Russian Academy of Sciences,
13/2, Izhorskaya street, Moscow, 125412, Russia.

The research relevance is caused by the lack of knowledge of methanol synthesis from nitrogen-rich synthesis gas, as well as the lack of experimental data about the effect of the synthesis gas composition on crude methanol, its quality, quantity and the composition of tale gases. The problem is particularly important for low-tonnage methanol production plants in field conditions using the technology of synthesis gas production by partial oxidation of natural gas with air.

The aim of the research is to confirm experimentally the possibility of methanol synthesis from nitrogen-rich synthesis gas and to obtain objective estimates of productivity, to evaluate the effect of the temperature of the synthesis, composition and parameters of nitrogen-blasted synthesis gas on the quantity and quality of crude methanol, and the composition of tale gases.

Objects: nitrogen-rich synthesis gas and its reactivity to the synthesis of methanol depending on the synthesis temperature, composition and parameters of synthesis gas – molar ratios of components and factorial (module).

Methods: experimental laboratory studies of methanol synthesis with the «ZüdChemie» C-79-7GL catalyst in an isothermal flow reactor.

Results. The possibility of synthesizing methanol from nitrogen-rich synthesis gas obtained by partial oxidation of natural gas with air has been experimentally confirmed. At pressure of 4,0–4,2 MPa, volume velocity of 1100 h⁻¹, for various average temperatures of 210, 220, and 230 °C of synthesis and two different raw mixtures the authors have determined the yields of crude methanol, the content of water and impurities in crude methanol, the compositions and parameters of gases leaving the reactor, and the carbon conversion. The optimal synthesis temperature and acceptable temperature variations in the catalyst layer are specified. The paper introduces the recommendations for process parameters in the three-reactor flow units of methanol synthesis and the estimation of their productivity when using the nitrogen-rich synthesis gas.

Key words:

Methanol, nitrogen-rich synthesis gas, gas generator, partial air oxidation of natural gas, carbon conversion, factorial of synthesis gas.

REFERENCES

1. Arutyunov V.S., Golubeva I.A., Eliseev O.L., Zhagfarov F.G. *Tekhnologiya pererabotki uglevodorodnyh gazov* [Technology of hydrocarbon gas processing]. Moscow, Yurayt Publ., 2020. 723 p.
2. Wernicke H.-J., Plass L., Schmidt F. *Methanol generation. Methanol: the basic chemical and energy feedstock of the future*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. pp. 51–301.
3. Feigin V.I., Braginsky O.B., Zabolotsky S.A., Kukushkin I.G., Mayevsky A.V., Maslennikov N.I., Rykov Yu.G. *Issledovanie sostoyaniya i perspektiv napravleniy pererabotki nefiti i gaza, nefiti- i gazokhimii v RF* [Research on the state and prospects of oil and gas processing, oil and gas chemistry in the Russian Federation]. Moscow, Ekon-inform Publ., 2011. 806 p.
4. Westerterp K.R. New methanol processes. *Energy efficiency in process technology*. Ed. by P.A. Pilavachi. Dordrecht, Springer, 1993. pp. 1142–1153.
5. Arutyunov V.S., Strekova L.N. Kinetic features and technological perspectives of the partial oxidation of light alkanes, Russia, Moscow. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 2012, vol. 6, pp. 486–497.
6. Arutyunov V.S., Savchenko V.I., Sedov I.V., On the prospects of commercial gas chemical technologies based on nitrogen-containing synthesis gas. *NefteGazoKhimiya*, 2016, no. 4, pp. 14–23. In Rus.

7. Prodan V.D., Klyushenkova M.I., Borodacheva E.I. Low-tonnage methanol production, Russia. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2013, vol. 49 (7–8), pp. 443–446.
8. Kemalov R.A., Kemalov A.F. *Tekhnologii polucheniya i primeneniya metanola* [Technologies for obtaining and applying methanol]. Kazan, Kazan University Publ. house, 2016. 167 p.
9. Zagashvili Yu.V., Efremov V.N., Kuzmin A.M., Lishchiner I.I. Complex for obtaining synthesis gas for small tonnage production of methanol. *Neftegazokhimiya*, 2017, no. 1, pp. 19–26. In Rus.
10. Zagashvili Yu.V., Efremov V.N., Kuzmin A.M. *Malotonnazhnaya ustanovka polucheniya metanola* [Low-tonnage methanol production unit]. Patent RF, no. 176510, 2018.
11. Palguandi I.J. *Syngas: production, applications, and environmental impact*. New York, Nova Science Publ., 2013. 365 p.
12. Li Q., Wang T., Liu Y., Wang D. Experimental study and kinetics modeling of partial oxidation reactions in heavily sooting laminar premixed methane flames, China, Beijing. *Chemical Engineering Journal*, 2012, vol. 207–208, no. 1, pp. 235–244.
13. Lapidus A.L., Eliseev O.L., Kryuchkov M.V. Hydrocarbons production from synthesis gas, ballasted with nitrogen. *Science and Technology of Hydrocarbons*, 2011, no. 5, pp. 9–12.
14. Lishchiner I.I., Malova O.V., Tarasov A.L., Maslennikov V.M., Vyskubenko Y.A., Tolchinskii L.S., Dolinskii Y.L. Synthesizing methanol from nitrogen-ballasted syngas, Russia, Moscow. *Catalysis in Industry*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 368–373.
15. Zagashvili Yu.V., Kuzmin A.M. Influence of hydrogen-containing gas composition on methanol yield. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 187–195. In Rus.
16. Karavaev M.M., Leonov V.E., Popov I.G., Shepelev E.T. *Tekhnologiya sinteticheskogo metanola* [Synthetic methanol technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 240 p.
17. Rozovskiy A.Ya., Lin G.I. *Teoreticheskie osnovy protsessa sinteza metanola* [Theoretical basis of methanol synthesis]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 272 p.
18. Cherepnova A.V., Lender A.A., Krasnianskaya A.G., Bondareva N.A. Methanol synthesis in system of flow reactors. *Catalysis and petrochemistry*, 2000, no. 5–6, pp. 69–74. In Rus.
19. Dahl P.J., Christensen T.S., Winter-Madsen S., KingProven S.M. *Autothermal reforming technology for modern large-scale methanol plants*. Paris, Nitrogen+Syngas, 2014, pp. 1–12.
20. Appl M. *Ammonia, methanol, hydrogen, carbon monoxide. Modern production technologies*. London, Nitrogen Publ., 1997. 140 p.

Received: 30 November 2020.

Information about the authors

Yuriy V. Zagashvili, Dr. Sc., professor, general director of LLC «HTR».

Aleksey M. Kuzmin, Cand. Sc., associated professor, Baltic State Technical University; general director LLC «GSG»; council of the Russian Academy of Natural Sciences.

Vladimir V. Imshenetsky, technical Director of LLC «NTG-synthesis».

Iosif I. Lishchiner, Cand. Sc., senior researcher of the laboratory of Joint Institute of high temperatures of the Russian Academy of Sciences.

Olga V. Malova, Cand. Sc., senior researcher of Joint Institute of high temperatures of the Russian Academy of Sciences.

УДК 574.2:550.47

ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМ В ЭЛЕМЕНТНОМ СОСТАВЕ ВОЛОС ЖИТЕЛЕЙ РАЙОНОВ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

Байкенова Гулим Еркиновна¹,
guliander@bk.ru

Барановская Наталья Владимировна²,
nata@tpu.ru

Какабаев Ануарбек Аязбаевич¹,
anuarka@mail.ru

Берсимбаев Рахметкажы Искендерович³,
ribers@mail.ru

Корогод Наталья Петровна⁴,
natalya_korogod@mail.ru

Наркович Дина Владимировна²,
narkovich@tpu.ru

Куровская Влада Владиславовна²,
kurovskaya@tpu.ru

¹ Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова,
Республика Казахстан, 020000, г. Кокшетау, ул. Абая, 76.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
Республика Казахстан, 010008, г. Нур-Султан, ул. Кажымукана, 13.

⁴ Павлодарский педагогический университет,
Республика Казахстан, 140002, г. Павлодар, ул. Мира, 60.

Актуальность работы обосновывается необходимостью оценки экологической ситуации на территориях уранодобывающих и других предприятий по добыче полезных ископаемых. Таким регионом, где наблюдается высокая заболеваемость и смертность населения от злокачественных новообразований, является Северный Казахстан. На изучаемой территории находится одна из крупнейших урановорудных провинций в Казахстане – Северо-Казахстанская урановорудная провинция. Она расположена в Акмолинской и Северо-Казахстанской областях. В качестве индикатора изменения эколого-геохимического состояния территории использовали элементный состав волос населения.

Цель: оценка уровней накопления химических элементов в волосах жителей районов Северного Казахстана.

Методы. Определение 73 химических элементов в волосах было произведено методом масс-спектрометрического анализа с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в лаборатории Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета.

Результаты. Был изучен элементный состав волос жителей двух районов Северного Казахстана и проведен сравнительный анализ с другими территориями региона и отдельными областями России. Анализ показал, что в Акмолинской и Северо-Казахстанской областях отмечено высокое содержание натрия, а также редких, редкоземельных и радиоактивных (тория и урана) элементов. Установлено концентрирование специфических для эколого-геохимических условий региона элементов, в частности золота, висмута, селена. Выявлено наличие общих элементов для всех исследуемых территории Казахстана и России: Au, Ag, Se и Hg.

Ключевые слова:

Биоиндикатор, волосы, химические элементы, Северный Казахстан, элементный статус, техногенез.

Введение

Территория Республики Казахстан представляет собой уникальную биогеохимическую провинцию, сформированную в результате присутствия крупнейших месторождений полиметаллического и неметаллического сырья, а также их разработки [1]. Одним из регионов, в котором отмечены экологические проблемы, связанные, в частности, с освоением урановоруд-

ных объектов, является территория Северного Казахстана. Для этой территории характерными являются высокие показатели уровня заболеваемости и смертности населения от злокачественных опухолей и в целом неблагоприятная медико-экологическая обстановка [2].

В настоящее время на севере Казахстана осуществляется добыча урана на месторождениях Семизбай и Восток, которые расположены на террито-

рии Северо-Казахстанской урановорудной провинции. В административном отношении в данную провинцию входят Акмолинская и Северо-Казахстанская области. Эти регионы характеризуются сложной радиоэкологической ситуацией, обусловленной повышенной радиоактивностью, связанной как с наличием высокоактивных гранитов, так и с многолетней деятельностью уранодобывающих и других предприятий по добыче полезных ископаемых [3].

Для региона, где добывался уран и другая руда, необходимы исследования, которые могли бы позволить эффективно оценить экологическую ситуацию данной территории и сделать выводы о ее влиянии на организм человека. Для этого исследователи в разных странах зачастую используют биологические материалы человека, как правило волосы, кровь, ногти, мочу и некоторые другие, которые могут быть индикатором изменения окружающей среды [4–6]. Многими учеными было доказано, что использование волос в анализе эколого-токсикологических корреляций является эффективным [7, 8]. Это подтверждается и Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), которое оказывает помощь в проведении координированных исследований [9, 10].

Химический состав волос человека формируется под влиянием ряда факторов, что необходимо учитывать при их использовании в качестве индикаторного объекта [11]. Изучением данного вопроса занимаются исследователи в разных странах мира. Исследователи из США, например, выявили, что пары токсичных элементов (As-Cd, As-Se, Pb-As и Se-Cd) сильно коррелировали в волосах курящих людей, но не коррелировали в волосах некурящих, что позволяет предположить, что сигаретный дым является распространенным источником токсичных элементов в волосах населения [12]. Многие авторы подчеркивают, что основными предикторами ртути в волосах человека являются загрязненный воздух, а также потребление рыбы и курение [13–18]. На формирование элементного состава влияют патологические состояния. Исследования, которые провели российские ученые, показали, что у детей с расстройством аутистического спектра содержание эссенциальных элементов в волосах и крови понижено, а уровень токсичных микроэлементов наоборот повышен [19]. Данные, полученные исследователями из России, подтверждают гипотезу о том, что Mg, Mn и Zn могут играть значительную роль в развитии расстройства аутистического спектра и неврологического-поведенческого расстройства развития у детей [20]. Также установлено, что нет корреляции между содержанием свинца и развития расстройства аутистического спектра [21]. Некоторые результаты исследований показали, что болезнь Кашина–Бека отражается дефицитом селена в волосах [22]. Ученые из Турции провели наблюдательное исследование связи мышьяка и селена в волосах и ногтях людей с заболеванием Альцгеймера, в результате которого было выявлено, что уровни содержания As и Se были выше у пациентов с данным заболеванием, чем у контрольной группы. [23]. Китайские ученые исследовали концентрирование тория

и урана в волосах беременных женщин. В результате данного исследования выяснилось, что содержание тория коррелирует с патологией и, соответственно, может быть фактором риска ротолицевой расщелины у потомства, а в противовес этому уран не является причиной данного заболевания [24]. В результате проведенного биомониторинга волос и крови жителей, проживающих в непосредственной близости от бывшего Семипалатинского испытательного ядерного полигона и вблизи промышленных предприятий восточного и северо-восточного региона Казахстана, было выявлено, что проживание в районе бывшего Семипалатинского полигона можно считать безопасным, в то время как экологическое состояние промышленных поселений представляется довольно неблагоприятным из-за повышенного уровня токсичных металлов в биосубстратах [25]. Хорватские и российские ученые установили что, анализ мульти-биоэлементного профиля волос может иметь особое значение в эпидемиологии питания, персонализированной медицине и при изучении хронических физических и психических заболеваний, а также позволяет предвидеть более сложные структурные метаболические особенности и изучение внутренней организации и интеграции одновременно происходящих биометаболических жизненных процессов в организме человека [26]. Волосы обладают уникальным потенциалом для раскрытия ретроспективной информации. Японские исследователи обнаружили, что определение количества таллия в образцах волос, разделенных на последовательные сегменты, дает ценную информацию о периоде воздействия, даже если после влияния проходит значительное время [27].

Если кровь и моча являются мгновенными индикаторами ежедневного поступления элементов, то волосы указывают на хроническое воздействие на них, соответствующее периоду роста и длине. Это позволяет использовать данные об элементном составе волос для определения индекса нагрузки на организм и необходимого уровня питательных веществ [28].

Элементный статус человека может зависеть от места проживания и экологической обстановки региона [11, 29]. Элементный состав волос часто используется для целей экологического районирования территории [30].

Сложные ткани эпидермального происхождения, которыми являются волосы, накапливают химические элементы в высоких концентрациях. Также неинвазивность и простота подготовки их для анализа – вероятное преимущество данного биологического материала для проведения эколого-геохимического районирования территорий [30].

В целом, несмотря на полифакторный характер формирования элементного состава волос человека, его можно применять в качестве биоиндикатора изменения эколого-геохимического состояния территории. Для этого необходимо изучение регионального фона, а также проведение сравнительного анализа по другим территориям. Большинство факторов, оказывающих влияние на изменение элементного состава волос, можно исключить на стадии пробоотбора.

Цель нашего исследования – оценка уровней накопления химических элементов в волосах жителей районов Северного Казахстана и выявление региональных особенностей, сформированных в условиях уникальной полиметаллической биогеохимической провинции.

Материалы и методы

Отбор волос производился на территории Северного Казахстана осенью 2018 г. Всего исследовано 33 образца. Пробы взяты у населения Северо-Казахстанской и Акмолинской областей. В выборку включены люди без вредных привычек, постоянно проживающие на данной территории, без патологий. При отборе фиксировали полное имя, адрес проживания, возраст, пол и место рождения. В выборку включены жители абсолютно здоровые, без хронических и острых воспалительных процессов, а также достаточно долгое время (не менее 10 лет) проживающие непосредственно там, где производился отбор. Волосы были отобраны и прошли подготовку к анализу согласно рекомендациям МАГАТЭ [10, 30]. Материал отобран хирургическими ножницами из нержавеющей стали с пяти точек головы. Затем волосы упаковывались в полиэтиленовые пакетики с фиксатором. На внешнюю сторону пакетиков с фиксатором клеилась маркированная этикетка.

Пробоподготовка проводилась на кафедре географии, экологии и туризма в Кокшетауском государственном университете им. Ш. Уалиханова и в отде-

лении геологии Томского политехнического университета.

Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) было определено содержание 73 химических элементов [31]. Работа выполнялась в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета (заведующая лабораторией к.г.-м.н. А.А. Хвощевская).

Обработка полученных данных производилась посредством программ Microsoft Excel и STATISTICA 10.

Критическое значение коэффициентов корреляции определялось в соответствии с табличными значениями, исходя из количества проб в выборке, согласно рекомендациям [32]. Для Северного Казахстана при 33 пробах критическое значение коэффициента корреляции составляет 0,45 при достоверности 99,0 % [11].

Результаты исследования и их обсуждение

Полученную выборку волос по территории Северного Казахстана было решено рассмотреть с позиции административного деления территории. Мы изучили данные по результатам анализа волос жителей двух регионов Северного Казахстана – Акмолинской и Северо-Казахстанской областей. Сравнительный анализ среднеарифметических содержаний элементов с другими районами Казахстана и отдельными территориями России (Кемеровская, Томская и Читинская области) показал существенные различия в накоплении отдельных химических элементов (табл. 1).

Таблица 1. Оценочные уровни накопления химических элементов в волосах человека (мг/кг сухого вещества)

Table 1. Estimated levels of accumulation of chemical elements in human hair (mg/kg dry matter)

Элементы Elements	Акмолинская область, Akmola region, n=22	Северо-Казахстанская область, North Kazakhstan region, n=11	Казахстан, г. Экибастуз, Kazakhstan, Ekibastuz, n=10	Россия, Томская область, Russia, Tomsk region, n=32	Россия, Кемеровская область, Russia, Kemerovo region, n=23	Россия, Читинская область Russia, Chita region, n=5
Li	0,05±0,01	0,04±0,01	0,003±0,001	0,29	0,16	0,05
Be	0,03±0,01	0,02±0,005	0,001±0,0003	0,01	0,04	0,015
B	1,9±0,3	1,45±0,32	н.д.	н.д.	1,43	3,64
Na	553±112	480±106	70±15	414	186	417
Mg	223±38,4	299±74	90±28	2356	94	353
Al	11±3	3,89±1,67	11±2	36	37	13
Si	135 ±18	189±46,4	н.д.	241	н.д.	315
P	150±7	127±5,3	117±5	1796	215	154
S	106200±7335	113606±9859	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Cl	2649±483	1957±683	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
K	315±87	249±134	50±17	9996	113	549
Ca	1682±298	1830±441	1370±447	19552	1324	1678
Sc	0,05±0,005	0,05±0,005	н.д.	0,35	0,37	0,11
Ti	1,1±0,3	0,71±0,2	1,4±1,2	7,6	110	2,7
V	0,07±0,01	0,06±0,01	0,04±0,005	0,1	0,3	0,1
Cr	0,5±0,05	0,52±0,05	0,41±0,03	4,5	6,2	3
Mn	2,2±0,36	2,75±1,12	1,5±0,3	13,7	1,9	5,9
Fe	22±4	14±1,9	13±1,2	75	56	28
Co	0,19±0,06	0,21±0,07	0,03±0,01	0,5	0,1	0,01
Ni	0,97±0,25	0,7±0,27	0,6±0,3	0,9	1,9	0,9
Cu	16,2±2,7	12,5±1,33	9,0±1,5	16,1	14,9	10,3
Zn	328±49	288±86	455±130	133	162	133
Ga	0,03±0,007	0,02±0,008	0,004±0,001	0,022	0,014	0,006
Ge	0,07±0,004	0,04±0,01	0,02±0,001	0,004	0,011	0,01
As	0,07±0,01	0,04±0,007	0,04±0,02	0,17	0,55	0,16
Se	1,43±0,3	0,87±0,22	0,44±0,03	0,98	0,76	0,48
Br	1,9±0,3	1,42±0,33	н.д.	32,1	н.д.	4,3
Rb	0,14±0,05	0,12±0,06	0,03±0,01	4,16	0,11	0,46

Sr	12±2,3	14±3,6	6±2	27,6	2,9	4,8
Y	0,02±0,009	0,01±0,003	0,003±0,001	0,014	0,016	0,011
Zr	0,07±0,01	0,12±0,07	0,14±0,04	0,2	0,48	0,45
Nb	0,04±0,0009	0,03*	0,0005±0,0001	0,027	0,005	0,004
Mo	0,04±0,007	0,05±0,007	0,04±0,006	0,11	0,04	0,04
Ru	0,01±0,0002	0,01±0,003	н.д.	н.д.	н.д.	0,005
Rh	0,005±0,002	0,004±0,002	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Pd	0,01±0,002	0,009±0,004	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Ag	0,4±0,2	0,54±0,17	0,08±0,02	1	0,2	2,9
Cd	0,22±0,12	0,17±0,09	0,04±0,01	0,13	0,09	0,25
In	0,03±0,003	0,03±0,004	0,001±0,0002	0,004	0,001	0,003
Sn	0,5±0,2	0,4±0,16	0,3±0,06	0,72	0,71	1,71
Sb	0,07±0,02	0,07±0,03	0,02±0,006	0,05	0,45	0,07
Te	0,1±0,016	0,13±0,02	0,005*	0,009	0,005	0,004
I	1,18±0,33	0,7±0,24	н.д.	1,9	н.д.	0,3
Cs	0,01±0,002	0,01±0,002	0,001±0,00001	0,006	0,004	0,004
Ba	2,4±1,26	1,5±0,49	2,1±0,6	11,63	3,14	3,05
La	0,02±0,005	0,01±0,002	0,005±0,001	0,026	0,02	0,022
Ce	0,03±0,009	0,02±0,003	0,01±0,002	0,038	0,038	0,045
Pr	0,004±0,001	0,001±0,0004	0,001±0,0001	0,005	0,004	0,003
Nd	0,02±0,005	0,01±0,001	0,003±0,001	0,009	0,013	0,015
Sm	0,01±0,001	0,01±0,002	0,001±0,00005	0,002	0,002	0,002
Eu	0,01±0,001	0,01±0,002	0,0002±0,000002	0,001	0,001	0,001
Gd	0,01±0,002	0,005±0,002	0,001±0,0001	0,002	0,003	0,006
Tb	0,01±0,002	0,01±0,002	0,001*	0,001	0,001	0,001
Dy	0,004±0,001	0,005±0,002	0,001±0,00001	0,001	0,002	0,002
Ho	0,004±0,002	0,01±0,003	0,0002*	0,0004	0,001	0,001
Er	0,007±0,002	0,008±0,003	0,001*	0,001	0,003	0,001
Tm	0,01±0,002	0,009±0,002	0,001*	0,0005	0,0004	0,001
Yb	0,01±0,001	0,01±0,002	0,001*	0,001	0,001	0,001
Lu	0,01±0,002	0,01±0,002	0,001*	0,0004	0,0004	0,001
Hf	0,03±0,006	0,03±0,007	1,34 ±0,5	0,004	0,009	0,009
Ta	0,01±0,001	0,02±0,001	0,001*	0,003	0,004	0,001
W	0,03±0,002	0,03*	0,02±0,003	0,21	0,05	0,11
Re	0,006±0,002	0,002±0,0001	н.д.	н.д.	0,0002	0,001
Os	0,02±0,001	0,02±0,002	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Ir	0,015±0,002	0,01±0,002	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Pt	0,008±0,002	0,007±0,003	0,007±0,005	0,01	0,002	н.д.
Au	0,06±0,01	0,12 ±0,06	0,009±0,002	0,016	0,006	0,049
Hg	0,24±0,05	0,22±0,04	0,2±0,05	0,48	0,21	0,23
Tl	0,005±0,002	0,008±0,003	0,0003±0,0001	0,001	0,001	0,005
Pb	1,55±0,45	0,72±0,29	1,1±0,4	1,91	2,09	4,35
Bi	0,62±0,6	0,02±0,007	0,004±0,002	0,23	0,06	0,19
Th	0,02±0,0009	0,02±0,0007	0,001±0,0001	0,003	0,003	0,004
U	0,32±0,067	0,3±0,09	0,2±0,04	0,014	0,031	0,015

Примечание: * – предел определения, содержание элемента ниже предела; среднее арифметическое содержание ± стандартная ошибка среднего; н.д. – нет данных.

Note: * – detection limit, the content of the element is below the limit; mean ± standard error of mean; н.д. – no data.

Так, для территории Северного Казахстана характерно более высокое содержание Na, In, Te, Cs, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Ta, Th как по сравнению с российскими областями, так и в отношении районов Казахстана – города Экибастуза в Павлодарской области. В Акмолинской, Северо-Казахстанской и Павлодарской областях встречаются в повышенных концентрациях такие элементы, как Hf и U. Эколого-геохимическая ситуация Северного Казахстана влияет на более высокое концентрирование радиоактивных, редкоземельных и редких элементов, что отражает природно-техногенную специфику региона исследования. Урановая специализация Павлодарской области, по-видимому, обусловлена поступлением этого элемента с водой, в составе которой отмечается его высокое содержание по данным изучения накипи питьевых вод [33].

В отличие от регионов Казахстана для Томской области наблюдается высокое содержание Mg, P, K,

Fe, Br, Rb, Sr и Ba. В волосах жителей Кемеровской области концентрируются в большей степени Al, Ti, Cr. Максимальное содержание B, Si, Ag, Sn, Pb отмечено в Читинской области. Высокое накопление данных элементов на территориях российских областей объясняется как эколого-геохимической ситуацией природного характера, так и значительным влиянием техногенеза на локальных территориях [34, 35].

Для выявления региональной геохимической специфики природной среды активно используют показатели коэффициентов концентрации, получаемые относительно условного фона или установленного среднего для выборки. Данные, полученные нами при нормировании на среднее арифметическое для волос жителей Северного Казахстана, позволили установить региональную особенность волос населения двух областей (рис. 1).

Очевидно, что даже две близлежащих области значительно отличаются по концентрированию элементов

в составе волос жителей. Так, в отличие от Северо-Казахстанской области в Акмолинской концентрируются такие элементы, как Bi, Pr, Al, Pb, Ce, Nd, I, Ti, Fe, Ba, Ni, B, Cu, As, Br, Y, Cd, Sn, Li, Hf более значимо. В то же время выявляется общий спектр элементов, характерных для двух территорий. К ним относятся Na, Mg, Ca – элементы, биологическая роль которых весьма значима в организме человека. Кроме того, установлена высокая концентрация кремния, который может характеризовать пылевую составляющую, оказывающую влияние на формирование элементного состава

данного биосубстрата. Специфика формирования геохимической составляющей волос населения хорошо демонстрируют геохимические ряды:

- Акмолинская область – $Bi_{1,41} > Pr_{1,28} > Al_{1,23} > Pb_{1,21} > Ce_{1,19} > Nd_{1,16} = I_{1,16} > Ti_{1,13} = Fe_{1,13} = Ba_{1,13} > Ni_{1,1} > B_{1,08} = Cu_{1,08} = As_{1,08} = Br_{1,08} > Y_{1,07} = Cd_{1,07} = Sn_{1,07} > Li_{1,05} = Hf_{1,05} > P_{1,04} = Zn_{1,04} > Rb_{1,03} = Sb_{1,03} = Hg_{1,03} > U_{1,02} > V_{1,01} = La_{1,01} > Na_1 = Mg_1 = Si_1 = S_1 = Cl_1 = K_1 = Ca_1$.
- Северо-Казахстанская область – $Si_{1,27} > Zr_{1,26} > Ag_{1,22} > Sr_{1,2} > Mg_{1,18} > Mn_{1,14} > Ca_{1,09} > Sc_{1,05} > Co_{1,04} > Na_1$.

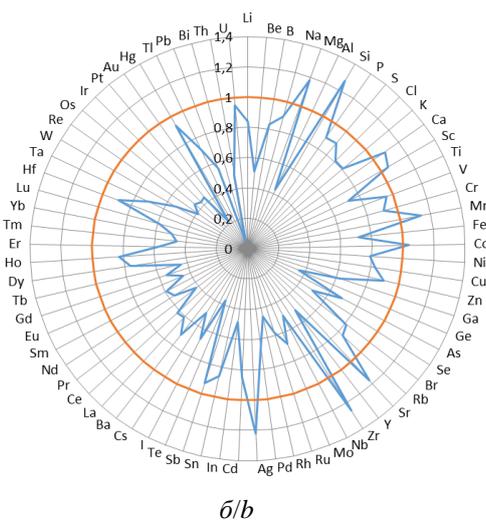
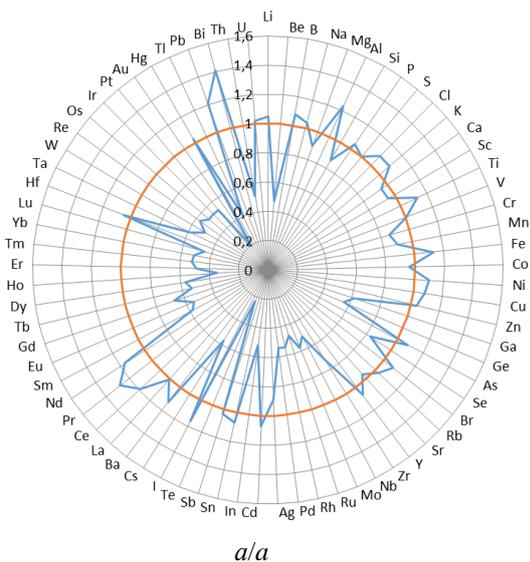


Рис. 1. Геохимическая специализация волос жителей Акмолинской (а) и Северо-Казахстанской (б) областей относительно регионального среднего

Fig. 1. Geochemical specialization of the hair of residents of Akmola (a) and North Kazakhstan (b) regions in relation to the regional average levels

Таблица 2. Биогеохимическая специфика волос населения Акмолинской и Северо-Казахстанской областей и других регионов относительно кларка ноосферы

Table 2. Biogeochemical specificity of hair of the population of Akmola and North Kazakhstan regions and other regions relative to the clark of the noosphere

Регион/Region	Геохимический ряд/Geochemical series
Акмолинская область Akmola region (N=22)	$Bi_{97} > Au_{87} > S_{62,5} > Te_{15,6} > Re_{12,8} > Ag_8 > Zn_7 > Se_5 > Ir_4 > I_2 > Cd_{1,4} > Hg_{1,3}$
Северо-Казахстанская область North-Kazakhstan region (N=11)	$Au_{174} > S_{66,8} > Te_{20,3} > Ag_{10} > Zn_{6,3} > Re_{4,3} > Bi_{3,12} > Se_{3,1} > Ir_{2,6} > I_{1,3} > Hg_{1,2} > Cd_{1,06}$
Павлодарская область, Экибастуз Pavlodar region, Ekibastuz (N=10)	$Au_{13} > Zn_{10} > Ag_{1,6} > Se_{1,57} > Hg_{1,1}$
Томская область Tomsk region (N=32)	$Bi_{36} > Au_{23,2} > Ag_{20} > P_{3,6} > I_{3,5} = Se_{3,5} > Zn_{2,9} > Hg_{2,7} > Te_{1,4} > Br_{1,23} > Cd_{1,22}$
Кемеровская область Kemerovo region (N=23)	$Bi_{9,3} > Au_{8,7} > Ag_4 > Zn_{3,5} > Se_{2,7} > Hg_{1,2}$
Читинская область Chita region (N=5)	$Au_{71} > Ag_{58} > Bi_{29,7} > Zn_{2,9} > Re_{2,1} > Se_{1,7} > Cd_{1,5} > Hg_{1,3}$

Примечание: коэффициенты концентрации рассчитаны только для тех элементов, которые представлены в работе М.А. Глазовской [36].

Note: The concentration ratios are calculated only for elements represented in the work of M.A. Glazovskaya [36].

Элементная специфика волос населения Акмолинской и Северо-Казахстанской областей и других регионов преимущественно сохраняется при нормировании относительно других показателей, например, кларка ноосферы, что представлено в табл. 2.

Проведенный анализ показал, что содержание химических элементов в волосах жителей Акмолинской и Северо-Казахстанской областей относительно кларка ноосферы [36] имеет высокую концентрацию золота, что обусловлено деятельностью предприятий по добыче золота в Северном Казахстане. Остаются максимальными концентрации висмута, ртути, а также йода, специфика накопления которых обусловлена природными особенностями изучаемой территории, учитывая ее геологическую составляющую и наличие высокоминерализованных соленых вод. Также накопления таких элементов, как: S, Te, Re, Ag, Zn, Se, Ir, Cd, свидетельствуют о влиянии природной геолого-геохимической составляющей и возможного влияния техногенных источников на их поступление.

Для волос жителей города Экибастуза характерным является концентрирование Au, Zn, Ag, Se, Hg. А отличительной чертой волос населения российских регионов является накопление висмута, золота, сере-

Заключение

В результате проведенных исследований на территории Северного Казахстана были установлены оценочные уровни накопления химических элементов в составе волос населения двух областей – Акмолинской и Северо-Казахстанской. Полученные данные о средних содержаниях 73-х химических элементов, изученных методом ИСП-МС, могут являться оценочными в дальнейших эколого-геохимических исследованиях.

Концентрирование определенного спектра элементов относительно кларковых и среднестатистических показателей в волосах населения Северного Казахстана показывает влияние металлогенических особенностей территории и специфики подземных вод как основных факторов формирования их элементного состава. Роль техногенной составляющей является незначительной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин М.С. Экология Казахстана. – Семипалатинск: СемГПУ, 2005. – 548 с.
2. Какабаев А.А. Цитогенетическая оценка уровня мутагенеза у рабочих уранодобывающей промышленности Северного Казахстана: дис. ... канд. биол. наук. – Алматы, 2000. – 125 с.
3. Беркинбаев Г.Д., Федоров Г.В., Бенсман В.А. Обращение с радиоактивными отходами в Казахстане // Экология и промышленность Казахстана. – 2013. – № 2 (38). – С. 42–49.
4. Ковальский В.В. Геохимическая среда и жизнь. – М.: Наука, 1987. – 76 с.
5. Baranovskaya N.V., Shvetsova D.V., Rikhvanov L.P. Element content in children hair samples (Tomsk Region, Russia) // Trace Elements in Human: New Perspectives: Proc. of the 7th Intern. Symp. – Athens, Greece, 2009. – P. 290–303.
6. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сает, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, А.И. Ачкасов, И.Л. Башаркевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, С.Ш. Саркисян, Р.С. Смирнова, Н.Я. Трефилова. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
7. Кист А.А. Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. – Ташкент: ФАН, 1987. – 235 с.
8. Kist A.A., Zhuk L.I. Human hair composition and the problems of global ecology. – Tashkent, USSR: Institute of Nuclear Physics of the Uzbek Academy of Sciences, 1991. – 60 p.
9. Ryabukhin Yu.S. Activation analysis of hair as an indicator of contamination of man by environmental trace element pollutants. – Vienna: IAEA, 1978. – 134 p.
10. Element analysis of biological materials. Current problems and techniques with special reference to trace elements // App. II. Technical reports series. № 197. – Vienna: IAEA, 1980. – P. 351–367.
11. Влияние техногенеза на формирование элементного состава волос детского населения / Д.В. Наркович, Н.В. Барановская, Е.В. Коваль, Н.П. Корогод // Известия Томского политехнического университета. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 116–128.
12. Environmental biomonitoring of essential and toxic elements in human scalp hair using accelerated microwave-assisted sample digestion and inductively coupled plasma optical emission spectroscopy / H. Kumakli, A.V. Duncan, K. McDaniel, T.F. Mehari, J. Stephenson, L. Maple, Z. Crawford, C.L. Macemore, C.M. Babyak, S.O. Fakayode // Chemosphere. – 2017. – V. 174. – P. 708–715.
13. Biomonitoring of mercury in hair of children living in the Valencian Region (Spain). Exposure and risk assessment / R. Perez, T. Suelves, Y. Molina, F. Corpas-Burgos, V. Yusà // Chemosphere. – 2019. – V. 217. – P. 558–566.
14. Biomonitoring of mercury in hair of breastfeeding mothers living in the Valencian Region (Spain). Levels and predictors of exposure / V. Yusà, R. Pérez, T. Suelves, F. Corpas-Burgos, M. Gormáz, P. Dualde, C. Coscolla, J. Quiles, M. Roca, M. Vento // Chemosphere. – 2017. – V. 187. – P. 106–113.
15. Human exposure assessment to mercury through hair analysis in coastal villages of the Valparaiso region (Chile) / M.A. Bravo, S. Parra, W. Quiroz, A. Neaman // Journal of the Chilean Chemical Society. – 2019. – V. 64. – P. 4480–4483.
16. Hair mercury concentrations and associated factors in an electronic waste recycling area, Guiyu, China / Wenqing Ni, Yaowen Chen, Yue Huang, Xiaoling Wang, Gairong Zhang, Jiayi Luo, Kusheng Wu // Environmental Research. – 2014. – V. 128. – P. 84–91.
17. Temporal variation of total mercury levels in the hair of pregnant women from the Maternal-Infant Research on Environmental Chemicals (MIREC) study / A.O. Lukina, M. Fisher, Ch. Khoury, J. Than, M. Guay, J.-F. Paradis, T.E. Arbuckle, M. Legrand // Chemosphere. – 2021. – V. 264 (P. 1). – 128402.
18. Hui-Wen Hsiao, Ullrich S.M., Tanton T.W. Burdens of mercury in residents of Temirtau, Kazakhstan I: Hair mercury concentrations and factors of elevated hair mercury levels // Science of the Total Environment. – 2011. – V. 409. – P. 2272–2280.
19. Уровень биоэлементов в волосах и сыворотке крови у детей с расстройствами аутистического спектра / О.А. Денисенко, П.С. Новиков, Н.А. Черевко, А.Н. Кучер, Е.С. Ихалайнен, В.И. Отмахов, А.В. Обухова // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 2019. – № 3. – С. 198–203.
20. Hair trace element concentrations in autism spectrum disorder (ASD) and attention deficit/hyperactivity disorder (ADHD) / A.V. Skalny, A.L. Mazaletskaia, O.P. Ajsuvakova, G. Björklund, M.G. Skalnaya, S.V. Notova, L.N. Chernova, A.A. Skalny, T.I. Burtseva, A.A. Tinkov // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2020. – V. 61. – 126539.
21. Bao-Qiang Guo, Hong-Bin Li, Ying-Ying Liu Association between hair lead levels and autism spectrum disorder in children: a systematic review and meta-analysis // Psychiatry Research. – 2019. – V. 409. – P. 239–249.
22. Selenium content and/or T-2 toxin contamination of cereals, soil, and children's hair in some areas of Heilongjiang and Gansu Provinces, China / Liyan Sun, Silu Cui, Qing Deng, Hui Liu, Yanhong Cao, Shaoping Wang, Jun Yu // Biological Trace Element Research. – 2019. – V. 191. – P. 294–299.
23. Arsenic and selenium measurements in nail and hair show important relationships to Alzheimer's disease in the elderly / E. Koseoglu, B. Kutuk, O.U. Nalbantoglu, R. Koseoglu, M. Kendirci // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2021. – V. 64. – 126684.
24. Levels of uranium and thorium in maternal scalp hair and risk of orofacial clefts in offspring / Yihui Wei, Lei Jin, Zhiwen Li, Jufen Liua, Linlin Wang, Xin Pia, Shengju Yina, Chengrong Wang, Aiguo Rena // Journal of Environmental Radioactivity. – 2019. – V. 204. – P. 125–131.
25. Trace element biomonitoring in hair and blood of occupationally unexposed population residing in polluted areas of East Kazakhstan and Pavlodar regions / Y. Semenova, Y. Zhunussov, L. Pivina, A. Abisheva, A. Tinkov, T. Belikhina, A. Skalny, M. Zhanaspayev, T. Bulegenov, N. Glushkova, A. Lipikhina, M. Dauletyarova, T. Zhunussova, G. Björklund // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2019. – V. 56. – P. 31–37.
26. In search of decoding the syntax of the bioelements in human hair – a critical overview / B. Momčilović, J. Prejac, A.V. Skalny, N. Mimica // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2018. – V. 50. – P. 543–553.

27. Changes in thallium distribution in the scalp hair after an intoxication incident / T. Matsukawa, M. Chiba, A. Shinohara, Y. Matsumoto-Omori, K. Yokoyama // Forensic Science International. – 2018. – V. 291. – P. 230–233.
28. Sukumar A. Hair elements for biomonitoring of human exposure, effects and health hazards // Encyclopedia of Environmental Health. – 2019. – V. 2. – P. 382–393.
29. Определение элементного статуса человека с целью оценки экологической безопасности регионов / В.И. Отмахов, А.В. Обухова, С.А. Ондар, Е.В. Петрова // Вестник Томского государственного университета. Химия. – 2017. – № 9. – С. 50–59.
30. Наркович Д.В. Элементный состав волос детей как индикатор природно-техногенной обстановки территории (на примере Томской области): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 21 с.
31. Determination of Cl, Br and I in granola: development of an accurate analytical method using ICP-MS / G.T. Druzian, M.S. Nascimento, U.M.F.M. Cerqueira, C.G. Novaes, M.A. Bezerra, F.A. Duarte, E.M.M. Flores // Food Chemistry. – 2021. – V. 344. – 128677.
32. Поцелуев А.А., Сарнаев С.И. Методические указания к выполнению цикла лабораторных работ с элементами научных исследований по курсу «Математические методы в геохимических исследованиях» для студентов специальности 08.01.04 (специализация геология и разведка месторождений радиоактивных и редких металлов). – Томск: Изд-во ТПУ, 1994. – 38 с.
33. Солевые образования питьевых вод как индикаторная среда в эколого-геохимических и металлогенических исследованиях / Б.Р. Соктоев, Л.П. Рихванов, Ш.Ж. Усенова, Т.А. Монголина, Н.В. Барановская // Вестник Иркутского государственного технического университета. Науки о Земле. – 2014. – Т. 84. – № 1. – С. 40–44.
34. Рихванов Л.П. и др. Биогеохимический мониторинг в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом микробиологических факторов трансформации минеральных компонентов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 437 с.
35. Влияние антропогенных геохимических факторов среды обитания на элементный статус детей п. Хапчеранга (Восточное Забайкалье) / Ю.А. Витковский, Л.А. Михайлова, Е.А. Бондаревич, М.А. Солонухина, Е.С. Эпова, О.В. Еремин, О.Г. Алексеева, Н.М. Бурлака, С.Э. Лапа, Н.В. Барановская, Е.В. Агеева // Забайкальский медицинский вестник. – 2018. – № 2. – С. 14–23.
36. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов. – М.: Географический факультет МГУ, 1988. – 328 с.

Поступила 03.03.2021 г.

Информация об авторах

Байкенова Г.Е., магистр естественных наук, докторант кафедры географии, экологии и туризма Кокшетауского университета им. Ш. Уалиханова.

Барановская Н.В., доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Какабаев А.А., кандидат биологических наук, доцент кафедры географии, экологии и туризма, советник ректора по международной интеграции Кокшетауского университета им. Ш. Уалиханова.

Берсимбаев Р.И., доктор биологических наук, академик НАН Республики Казахстан, профессор, заведующий кафедрой общей биологии и геномики Евразийского Национального университета им. Л.Н. Гумилева.

Корогод Н.П., кандидат биологических наук, доцент кафедры общей биологии Павлодарского педагогического университета.

Наркович Д.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Куровская В.В., инженер отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 574.2:550.47

INDICATORS OF THE STATE OF THE ECOSYSTEMS BASED ON THE HAIR COMPOSITIONS OF THE NORTHERN KAZAKHSTAN RESIDENTS

Gulim E. Baikenova¹,
guliander@bk.ru

Natalia V. Baranovskaya²,
nata@tpu.ru

Anuarbek A. Kakabaev¹,
anuarka@mail.ru

Rakhmetkazhy I. Bersimbaev³,
ribers@mail.ru

Natalya P. Korogod⁴,
natalya_korogod@mail.ru

Dina V. Narkovich²,
narkovich@tpu.ru

Vlada V. Kurovskaya²,
kurovskaya@tpu.ru

¹ Sh. Ualikhanov Kokshetau University,
76, Abay street, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ L. Gumilev Eurasian National University,
13, Kazhymukana street, Nur-Sultan, 010008, Republic of Kazakhstan.

⁴ Pavlodar Pedagogical University,
60, Mira street, Pavlodar, 140002, Republic of Kazakhstan.

The relevance of the work is justified by the need to evaluate the environmental situation in the territories of uranium mining and other mining enterprises. Such region, with high morbidity and mortality of the population from malignant neoplasms, is Northern Kazakhstan. One of the largest provinces in the Kazakhstan is situated in the Northern Kazakhstan region – the North Kazakhstan uranium ore province. This province is located in the Akmola and North Kazakhstan regions. Hair, which is capable of depositing chemical elements in its structure, was used as a bioindicator of changes in the ecological and geochemical state of the territory.

Purpose: to evaluate the levels of accumulation of chemical elements in the hair of inhabitants of the Northern Kazakhstan regions.

Methods. 73 chemical elements in hair have been identified using inductively coupled plasma mass-spectrometry (ICP-MS).

Results. The content of elements in the inhabitant's hair of two regions of Northern Kazakhstan was studied and a comparative analysis with other territories of the region and individual regions of Russia was carried out. The analysis showed that in the Akmola and North Kazakhstan regions there was a high content of Na, In, Te, Cs, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Ta, Th, Hf and U. A general spectrum of elements characteristic of two regions of the North Kazakhstan: Na, Mg, Si, Ca. The following elements specific to the Clarke noosphere in the Northern region: such as Bi, Au, S, Te, Re, Ag, Zn, Se, Ir, I, Cd, Hg, were established. General spectrum of elements for all studied territories of Kazakhstan and Russia are Au, Ag, Se and Hg.

Key words:

Bioindicator, hair, chemical elements, Northern Kazakhstan, elemental status, technogenesis.

The research was partially financially supported by the RSF grants no. 20-67-47005 and 20-67-47021 in analytical studies of samples from the territory of Chita region.

REFERENCES

1. Panin M.S. *Ekologiya Kazakhstana* [Ecology of Kazakhstan]. Semipalatinsk, SemGPU Publ, 2005. 548 p.
2. Kakabayev A.A. *Tsitogeneticheskaya otsenka urovnya mutageneza u rabochikh uranodobyvayushchey promyshlennosti Severnogo Kazakhstana. Dis. Kand. nauk* [Cytogenetic assessment of the level of mutagenesis in workers of the uranium mining industry in Northern Kazakhstan. Cand. Diss.]. Almaty, 2000. 125 p.
3. Berkinbayev G.D., Fedorov G.V., Bensman V.A. Obrashchenie s radioaktivnymi otkhodami v Kazakhstane [Radioactive waste management in Kazakhstan]. *Ekologiya i promyshlennost Kazakhstana*, 2013, no. 2 (38), pp. 42–49.
4. Kovalskiy V.V. *Geokhimicheskaya sreda i zhizn* [Geochemical environment and life]. Moscow, Nauka Publ, 1987. 76 p.
5. Baranovskaya N.V., Shvetsova D.V., Rikhvanov L.P. Element content in children hair samples (Tomsk Region, Russia). *Trace*

- Elements in Human: New Perspectives: Proc. of the 7th Intern. Symp.* Athens, Greece, 2009. pp. 290–303.
6. Sayet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Achkasov A.I., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Sarkisyan S.Sh., Smirnova R.S., Trefilova N.Ya. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
 7. Kist A.A. *Fenomenologiya biogeokhimii i bioneorganicheskoy khimii* [Phenomenology of biogeochemistry and bioinorganic chemistry]. Tashkent, FAN Publ., 1987. 235 p.
 8. Kist A.A., Zhuk L.I. *Human hair composition and the problems of global ecology*. Tashkent, USSR, Institute of Nuclear Physics of the Uzbek Academy of Sciences Publ., 1991. 60 p.
 9. Ryabukhin Yu.S. *Activation analysis of hair as an indicator of contamination of man by environmental trace element pollutants*. Vienna, IAEA Publ., 1978. 134 p.
 10. Element analysis of biological materials. Current problems and techniques with special reference to trace elements. *App. II. Technical reports series. № 197*. Vienna, IAEA Publ., 1980. pp. 351–367.
 11. Narkovich D.V., Baranovskaya N.V., Koval E.V., Korogod N.P. Influence of technogenesis on forming element composition of childrens hair. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 116–128. In Rus.
 12. Kumakli H., Duncan A.V., McDaniel K., Mehari T.F., Stephenson J., Maple L., Crawford Z., Macemore C.L., Babyak C.M., Fakayode S.O. Environmental biomonitoring of essential and toxic elements in human scalp hair using accelerated microwave-assisted sample digestion and inductively coupled plasma optical emission spectroscopy. *Chemosphere*, 2017, vol. 174, pp. 708–715.
 13. Perez R., Suelves T., Molina Y., Corpas-Burgos F., Yusà V. Biomonitoring of mercury in hair of children living in the Valencian Region (Spain). Exposure and risk assessment. *Chemosphere*, 2019, vol. 217, pp. 558–566.
 14. Yusà V., Pérez R., Suelves T., Corpas-Burgos F., Gormáz M., Dualde P., Coscolla C., Quiles J., Roca M., Vento M. Biomonitoring of mercury in hair of breastfeeding mothers living in the Valencian Region (Spain). Levels and predictors of exposure. *Chemosphere*, 2017, vol. 187, pp. 106–113.
 15. Bravo M.A., Parra S., Quiroz W., Neaman A. Human exposure assessment to mercury through hair analysis in coastal villages of the Valparaiso region (Chile). *Journal of the Chilean Chemical Society*, 2019, vol. 64, pp. 4480–4483.
 16. Wenqing Ni, Yaowen Chen, Yue Huang, Xiaoling Wang, Gairong Zhang, Jiayi Luo, Kusheng Wu. Hair mercury concentrations and associated factors in an electronic waste recycling rea, Guiyu, China. *Environmental Research*, 2014, vol. 128, pp. 84–91.
 17. Lukina A.O., Fisher M., Khoury Ch., Than J., Guay M., Paradis J.-F., Arbuckle T.E., Legrand M. Temporal variation of total mercury levels in the hair of pregnant women from the Maternal-Infant Research on Environmental Chemicals (MIREC) study. *Chemosphere*, 2021, vol. 264 (P. 1). 128402.
 18. Hui-Wen Hsiao, Ullrich S.M., Tanton T.W. Burdens of mercury in residents of Temirtau, Kazakhstan I: hair mercury concentrations and factors of elevated hair mercury levels. *Science of the Total Environment*, 2011, vol. 409, pp. 2272–2280.
 19. Denisenko O.A., Novikov P.S., Cherevko N.A., Kucher A.N., Ikhalaian E.S., Otmakhov V.I., Obukhova A.V. The level of bioelements in hair and blood serum in children with autism spectrum disorders. *Herald of Moscow University. Series 2. Chemistry*, 2019, no. 3, pp. 198–203. In Rus.
 20. Skalny A.V., Mazaletskaia A.L., Ajsuvakova O.P., Bjørklund G., Skalnaya M.G., Notova S.V., Chernova L.N., Skalny A.A., Burtseva T.I., Tinkov A.A. Hair trace element concentrations in autism spectrum disorder (ASD) and attention deficit/hyperactivity disorder (ADHD). *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2020, vol. 61. 126539.
 21. Bao-Qiang Guo, Hong-Bin Li, Ying-Ying Liu. Association between hair lead levels and autism spectrum disorder in children: a systematic review and meta-analysis. *Psychiatry Research*, 2019, vol. 276, pp. 239–249.
 22. Liyan Sun, Silu Cui, Qing Deng, Hui Liu, Yanhong Cao, Shaoping Wang, Jun Yu. Selenium content and/or T-2 toxin contamination of cereals, soil, and children's hair in some areas of Heilongjiang and Gansu Provinces, China. *Biological Trace Element Research*, 2019, vol. 191, pp. 294–299.
 23. Koseoglu E., Kutuk B., Nalbantoglu O.U., Koseoglu R., Kendirci M. Arsenic and selenium measurements in nail and hair show important relationships to Alzheimer's disease in the elderly. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2021, vol. 64. 126684.
 24. Yihui Wei, Lei Jin, Zhiwen Li, Jufen Liua, Linlin Wang, Xin Pia, Shengju Yina, Chengrong Wang, Aiguo Rena. Levels of uranium and thorium in maternal scalp hair and risk of orofacial clefts in offspring. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, vol. 204, pp. 125–131.
 25. Semenova Yu., Zhunussov Y., Pivina L., Abisheva A., Tinkov A., Belikhina T., Skalny A., Zhanaspayev M., Bulegenov T., Glushkova N., Lipikhina A., Dauletyarova M., Zhunussova T., Bjørklund G. Trace element biomonitoring in hair and blood of occupationally unexposed population residing in polluted areas of East Kazakhstan and Pavlodar regions. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2019, vol. 56, pp. 31–37.
 26. Momčilović B., Prejac J., Skalny A.V., Mimica N. In search of decoding the syntax of the bioelements in human hair – a critical overview. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2018, vol. 50, pp. 543–553.
 27. Matsukawa T., Chiba M., Shinohara A., Matsumoto-Omori Y., Yokoyama K. Changes in thallium distribution in the scalp hair after an intoxication incident. *Forensic Science International*, 2018, vol. 291, pp. 230–233.
 28. Sukumar A. Hair elements for biomonitoring of human exposure, effects and health hazards. *Encyclopedia of Environmental Health*, 2019, vol. 2, pp. 382–393.
 29. Otmakhov V.I., Obuhova A.V., Ondar S.A., Petrova E.V. Determining people's element status to assess the ecological safety of regions. *Tomsk State University Journal. Chemistry*, 2017, no. 9, pp. 50–59. In Rus.
 30. Narkovich D.V. *Elementny sostav volos detey kak indikator prirodno-tehnogennoy obstanovki territorii (na primere Tomskoy oblasti)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Elemental composition of children's hair as an indicator of the natural and technogenic situation of the territory (the case of of the Tomsk region) Cand. Diss. Abstract]. Tomsk. 2012. 21 p.
 31. Druzian G.T., Nascimento M.S., Cerqueira U.M.F.M., Novaes C.G., Bezerra M.A., Duarte F.A., Flores E.M.M. Determination of Cl, Br and I in granola: development of an accurate analytical method using ICP-MS. *Food Chemistry*, 2021, vol. 344. 128677.
 32. Potseluev A.A., Sarnaev S.I. *Metodicheskie ukazaniya k vy-polneniyu tsikla laboratornykh rabot s elementami nauchnykh issledovaniy po kursu «Matematicheskie metody v geokhimiicheskikh issledovaniyakh» dlya studentov spetsialnosti 08.01.04 (spetsializatsiya geologiya i razvedka mestorozhdeniy radioaktivnykh i redkikh metallov)* [Methodical instructions for performing a cycle of laboratory work with elements of scientific research in the course «Mathematical methods in geochemical research» for students of the specialty 08.01.04 (specialization in geology and exploration of deposits of radioactive and rare metals)]. Tomsk, TPU Publ., 1994. 38 p.
 33. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Usenova Sh.Zh., Mongolina T.A., Baranovskaya N.V. Drinking water salt sediments as indicative media in ecogeochemical and metallogenic researches. *Bulletin of Irkutsk State Technical University. Earth Sciences*, 2014, vol. 84, no. 1, pp. 40–44. In Rus.
 34. Rikhvanov L.P. *Biogeokhimicheskiy monitoring v zonakh khvostokhranilishch gornodobyvayushchikh predpriyatiy s uchetom mikrobiologicheskikh faktorov transformatsii mineralnykh komponentov* [Biogeochemical monitoring of tailings of mining industry, taking into account microbiological factors of the mineral component transformation]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2017. 437 p.
 35. Vitkovsky Y.A., Mikhaylova L.A., Bondarevich E.A., Solodukhina M.A., Epova E.S., Eremin O.V., Alekseeva O.G., Burlaka N.M., Lapa S.E., Baranovskaya N.B., Ageeva E.V. Influence of anthropogenous geochemical habitat factors on elemental status of children living in Khapcheranga village (Eastern Transbaikalia). *Transbaikal Medical Bulletin*, 2018, no. 2, pp. 14–23. In Rus.
 36. Glazovskaya M.A. *Geokhimiya prirodnykh i tehnogennykh landshaftov* [Geochemistry of natural and technogenic landscapes]. Moscow, Geography Faculty of Moscow State University Publ., 1988. 328 p.

Received: 3 March 2021.

Information about the authors

Gulim E. Baikenova, master, doctoral student, Sh. Ualikhanov Kokshetau University.

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anuarbek A. Kakabayev, Cand. Sc., associate professor, Sh. Ualikhanov Kokshetau University.

Rakhmetkazhy I. Bersimbaev, Dr. Sc., professor, academician of NASRK, L. Gumilev Eurasian National University.

Natalya P. Korogod, Cand. Sc., associate professor, Pavlodar Pedagogical University.

Dina V. Narkovich, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vlada V. Kurovskaya, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 681.518:622.276

МЕТОДИКА УЧЕТА РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПЛАСТОВ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТКА ГЕОЛОГО-ПРОМЫСЛОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Курганов Дмитрий Владимирович,
kourganov@rambler.ru

Самарский государственный технический университет им. В.В. Куйбышева,
Россия, 443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Актуальность работы связана с истощением и длительной разработкой существующих месторождений, при этом особую важность приобретает исследование малоизученных участков перспективной нефте- и газоносности. Зачастую предприятия нефтегазодобывающей отрасли сталкиваются с проблемами оценки потенциальных участков в условиях явного недостатка геолого-промысловой информации.

Целью работы является обоснование методики оценки проницаемости коллектора – одного из важнейших параметров, влияющих на прогнозирование дальнейшей разработки, при этом он же зачастую представляется и самым сложноопределяемым, особенно в условиях отсутствия промысловых исследований и разработки либо в силу имеющихся противоречий в промысловых данных.

Методы. Представлен новый подход для учета и систематизации имеющейся информации по определению проницаемости с одновременным использованием двух инструментов – известного вероятностного подхода к оценке запасов (P10/50/90) и терцилей распределения проницаемости. Комбинация этих подходов позволяет учесть проницаемость, полученную из разных источников – например, по результатам опробования или гидродинамических исследований вместе с данными, полученными в петрофизической модели.

Результатом работы является алгоритм, который позволяет комплексировать данные по проницаемости пластов, в том числе определенных недостаточно достоверно, существенно не вдаваясь в причины подобных расхождений. Существенным условием для применения метода в то же время является наличие статистически значимого количества данных, которое можно учесть, привлекая информацию по соседним месторождениям и прилегающим участкам. Также методику представляется возможным применить для определения некоторых других геологических параметров.

Ключевые слова:

Нефть, проницаемость, скважина, запасы, прогноз, вероятность, данные, гидродинамические исследования, петрофизическая модель.

Введение

Проблема определения проницаемости нефтегазодобываемых пластов является чрезвычайно актуальной для добывающих предприятий и недропользователей, поскольку продуктивность скважин напрямую связана с проницаемостью [1]. Конечная нефтеотдача также существенно зависит от проницаемости [2]. Зачастую ее определение является недостоверным, как в силу сложного строения коллекторов, так и в силу неизбежных погрешностей замеров. Для слабоизученных участков недр на первое место выходят проблемы недостатка геолого-физической информации [3]. Учесть же всю информацию для оценки проницаемости месторождений на зрелой стадии не всегда возможно, поскольку петрофизические модели и результаты испытаний часто противоречат друг другу [4]. Далее на конкретном примере предлагается статистический подход, позволяющий учесть данные не только по интересующему участку, но также и по соседним площадям.

Объект исследования

В качестве примера далее рассматривается один из таких участков [5], расположенных в Западной Сибири (площадь около 40 тыс. км²). Рассматриваемая территория изучена крайне неравномерно. На части площади полностью отсутствуют сейсморазведочные работы и поисковое бурение. В зоне проведения исследований (территория+20 км) собраны данные по 61 поисково-оценочной и разведочной скважине (фактические дан-

ные). В оценке площади использовано 53 поисково-оценочные и разведочные скважины (исключены скважины без каротажа и недобуренные до баженновской свиты). В интервале неокома опробования проведены в 39 скважинах, в юрских отложениях – в 33 скважинах. В рассматриваемом районе (рис. 1) присутствует 121 нефтяное месторождение. Промышленный интерес на участке вызывают шельфовые (пласты АС, ВС) и юрские (пласты Ю) отложения.

Большинство поисково-разведочных скважин было пробурено 30–50 лет назад, в период проведения в регионе широкомасштабных геологоразведочных работ. Исследования по ним либо не проводились, либо проводились по упрощенной технологии, не позволяющей определить ФЕС пластов (например, по многим скважинам приводятся лишь полученные притоки, без депрессий). Кроме этого, по многим скважинам получен приток воды без признаков нефтенасыщения, что предопределило отсутствие дальнейших исследований. Указанные обстоятельства крайне затрудняют оценку проницаемости пластов, особенно учитывая значительные расстояния между поисковыми скважинами.

Методика оценки надежности петрофизической информации, содержащейся в материалах, состоит в следующем:

- детальный анализ результатов исследования керна;
- анализ обоснованности по данным керна методов и алгоритмов интерпретации материалов ГИС;

- анализ объема и качества материалов ГИС;
- оценка использованных методов интерпретации каротажных данных и степени достоверности полученных результатов определения параметров пластов-коллекторов, используемых при подсчете запасов нефти.
- Традиционно в качестве источников определения проницаемости используются следующие: гидродинамические и керновые исследования, исследования различных зависимостей по данным ГИС [6–8]. Также можно отметить распространенную практику определения (уточнения) проницаемости по результатам адаптации фильтрационных моделей к фактической истории разработки месторождения [9]. В силу различных обстоятельств значения проницаемости, полученной из разных источников, зачастую противоречат друг другу. В качестве возможных причин можно отметить несовершенство замеров, осложненную пластовую среду, например, из-за двойной пористости [10, 11], недостоверную историю разработки. В межскважинном пространстве определение проницаемости обычно осуществляется с помощью интерполяции [12].
- В данном случае лишь по нескольким скважинам имеются ГДИ, которые удовлетворительно согласуются с проницаемостью из принятой петрофизической модели (рис. 2). По большинству скважин существует информация по дебитам и депрессиям, полученным при опробовании пластов. По нескольким скважинам имелись только результаты дебитов (без депрессий). Также несколь-

ко скважин освоить не удалось, приток по ним не был получен.

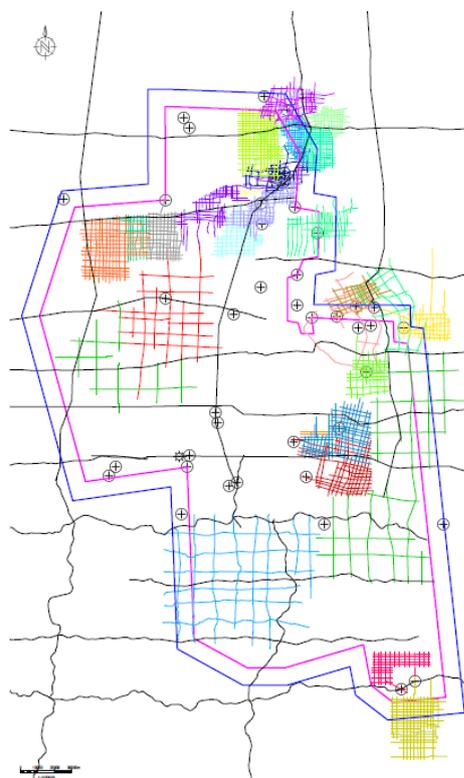


Рис. 1. Состояние изученности участка недр (сейсмопрофили и поисково-разведочные скважины)

Fig. 1. State of knowledge of the area (seismic profiles and exploration wells)

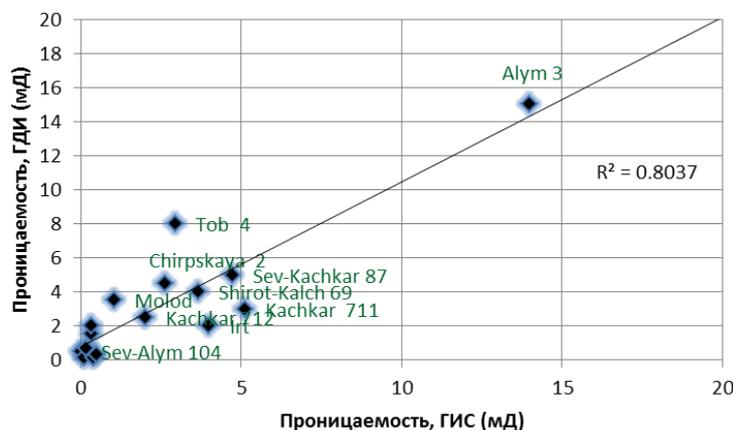


Рис. 2. Сопоставление проницаемости керн/ГИС по условным пластам шельфовых отложений (АС+ВС)

Fig. 2. Comparison of core/logging permeability for conditional layers of shelf deposits (AS+BS)

Методика исследования

Для скважин с фактическими притоками и депрессиями при расчете проницаемости использовалась известная формула Дарси для псевдоустановившегося режима притока жидкости к скважине [13]:

$$q_o = \frac{Kh(\bar{P}_r - P_{wf})}{18,41\mu_0 B_0 \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - 0,75 + S \right]}$$

где q_o – дебит жидкости ($\text{м}^3/\text{сут}$); K – проницаемость (мД) (эффективная проницаемость); h – эффективная мощность пласта (м); P_r – среднее пластовое давление (атм); P_{wf} – забойное давление (атм); μ_0 – вязкость жидкости (сПз) (в пластовых условиях); B_0 – объемный коэффициент жидкости ($\text{м}^3/\text{м}^3$); r_e – радиус дренирования (м); r_w – радиус скважины (м); S – скин.

В качестве h был взят интервал перфорации из испытаний, радиус дренирования принят 500 м (экспертно основываясь на том, что скважины разведоч-

ные), объемный коэффициент жидкости принят 1, т. к. по большинству испытаний получена вода, вязкость по ней также принята 1 сп, радиус скважины 0,07 м. Скин-фактор экспертно принят 1 в силу того, что испытания скважин проводились много лет назад, в то время технологии бурения и освоения скважин не позволяли добиться нулевого скин-фактора [13]. В случае отсутствия информации для расчета забойного давления использовались динамические уровни по скважинам.

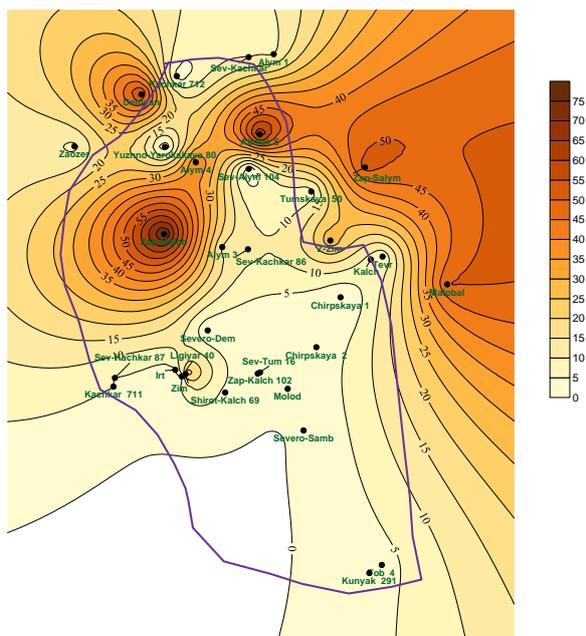


Рис. 3. Распределение проницаемости по условным пластам шельфовых отложений (АС+БС) для P50, мД
Fig. 3. Permeability distribution over conditional formations of shelf sediments (AS+BS) for P50, mD

Для анализа взяты скважины с результатами опробования и данными по депрессии, по ним рассчитана проницаемость (раздельно по шельфовым и юрским пластам [14]). Скважины взяты в пределах площади, а также ближайшие, примыкающие к контуру. По совокупности данных, полученных на соседних месторождениях и скважинах с рассчитанной проницаемостью получены медианные значения по условным пластам. Далее скважинам в пределах площади без данных о депрессии, но с притоком в результате испытаний присвоено медианное значение проницаемости. Скважинам без притоков присвоена нулевая проницаемость.

Полученные значения проницаемости в скважинах плохо согласуются с данными, полученными по петрофизической модели. По-видимому, это связано как с упрощениями, принятыми для расчета проницаемости по закону Дарси, так и с несовершенством петрофизической модели [15, 16], особенно принимая во внимание значительную площадь исследуемого участка.

Поскольку в данном случае использована вся имеющаяся информация, улучшить прогнозы по ФЕС не представляется возможным, равно как и уточнить

базу данных по опробованиям, которая, очевидно, содержит ошибки.

Таблица. Проницаемость по скважинам и участкам для расчета терцилей

Table. Permeability by wells and sections for calculating terzils

Площадь Location	Проницаемость, мД Permeability, mD	Среднее значение терциля проницаемо- сти, мД (вероятность) Average value of terzile, mD (probability)			
Чирпская 1/Chirpskaya 1	0,01	0,95	<-P90 (S _h)		
Сев-Тюм 16/Sev-Tum 16	0,12				
Сев-Алум 104 Sev-Alum 104	0,17				
Южно-Ярокская 80 Yuzhno-Yarokskaya 80	0,32				
Зап-Кальч 102 Zap-Kalch 102	0,34				
Северо-Дем Severo-Dem	0,40				
Северо-Самб Severo-Samb	0,49				
Молод/Molod	1,03				
Качкар 712/Kachkar 712	2,01				
Чирпская 2/Chirpskaya 2	2,63				
Тоб 4/Tob 4	2,97				
Куньяк 291/Kunyak 291	3,38			5,76	<-P50 (S _m)
Широт-Кальч 69 Shirot-Kalch 69	3,66				
Лигияр 40/Ligiyar 40	3,96				
Ирт/Irt	4,00				
Сев-Качкар 87 Sev-Kachkar 87	4,72				
Качкар 711/Kachkar 711	5,12				
Кальч/Kalch	8,00				
Тевр/Tevr	5,50				
Тюмская 50 Tyumskaya 50	7,27				
Заозер/Zaozer	8,52				
Алум 1/Alum 1	9,20				
Сев-Качкар Sev-Kachkar	10,00	39,03	<-P10 (S _i)		
Сев-Качкар 86 Sev-Kachkar 86	12,00				
Алум 3/Alum 3	13,99				
Зим/Zim	24,00				
З-Зим/Z-Zim	29,00				
Алум 4/Alum 4	40,26				
Малобал/Malobal	50,00				
Зап-Салым/Zap-Salym	52,00				
Демьян/Demyan	57,00				
Абалак 5/Abalak 5	65,11				
Зап-Малоб/Zap-Malob	76,00				

Выходом в данной ситуации может служить применение известной методики SPE-PRMS для оценки запасов [17]. Основным ее допущением является признание того факта, что любому прогнозу добычи нефти (динамике дебита, полноте извлечения) свойственна неопределенность. А в условиях неопределенности методически верно спрогнозировать не единственный конкретный результат будущей деятельности, а возможный диапазон результатов и соответствующие вероятности их реализации.

Неопределенность, присущая любым прогнозам добычи углеводородов, выражается в существовании риска (или вероятности) того, что прогнозы подтвердятся или не подтвердятся в будущем и если не подтвердятся, то насколько. Система SPE-PRMS, в частности, позволяет отнести оцененные извлекаемые количества нефти и газа к категориям, характеризующимся различной степенью неопределенности: доказанная, вероятная и возможная (Proved, Probable и Possible), соответственно. Упрощенно определения этих категорий, данных в SPE-PRMS, можно трактовать следующим образом:

- Оцененный объем доказанных запасов имеет вероятность извлечения не менее 90 %. Оценку по категории «доказанная» называют «минимальной оценкой» и обозначают как 1P.
- Оцененный вероятный объем запасов занимает промежуточное положение по шкале обоснованности; существует одинаковая вероятность (50 %) того, что фактический объем добычи будет больше или меньше суммы оцененных доказанных и вероятных объемов. Суммарную оценку по категориям «доказанная» и «вероятная» принято называть «наилучшей оценкой» и обозначать как 2P.
- Оцененный объем категории «возможная» характеризуется наименьшей вероятностью извлечения; вероятность того, что фактический объем добычи будет равен или превысит сумму оцененных доказанных, вероятных и возможных объемов, должна составлять не менее 10 %. Оценку по сумме категорий «доказанная», «вероятная» и «возможная» принято называть «максимальной оценкой» и обозначать как 3P.

Концепция отнесения геологических объемов углеводородов к той или иной категории строится в SPE-PRMS на понятии единичной области дренирования. Она предполагает выявление скважин, которые при опробовании или в процессе эксплуатации дали промышленные притоки нефти, и их использование в качестве исходной точки при построении ячеек дренирования, содержащей доказанные геологические объемы нефти. Далее в качестве доказанных также принимаются ближайшие примыкающие к ней ячейки дренирования. Согласно рекомендациям SPE-PRMS, если имеются обоснованные данные о выдержанности продуктивного пласта, то следующие примыкающие ячейки классифицируются как содержащие вероятные объемы нефти, а ячейки за их пределами – возможные. При этом размер ячеек определяется на основе плотности сетки разбуривания анализируемого объекта. Отметим, что сходный подход реализован и в действующей российской классификации запасов углеводородов.

В рамках оценки обоснованности прогнозных профилей добычи нефти, кроме достоверности величин начальных геологических запасов, большое значение имеет достоверность представлений о фильтрационных свойствах пласта коллектора, поскольку они определяют продуктивность будущих эксплуатационных скважин, их необходимое количество и накопленный отбор нефти. Другими словами, продуктив-

ность (возможный дебит) проектных скважин во многом формирует конечную эффективность проекта. Проницаемость является основным параметром, влияющим на продуктивность.

Согласно принципам системы SPE-PRMS, для участка была выполнена оценка прогнозной продуктивности скважин и профилей добычи нефти, которые характеризуются разной вероятностью реализации, а именно: доказанная (наименьшая оценка, 1P), доказанная+вероятная (наилучшая оценка, 2P), доказанная+вероятная+возможная (наибольшая оценка, 3P).

В качестве доказанного (сценарий 1P) принимался прогнозный профиль добычи нефти, построенный исходя из: а) результатов добычи, опробования и испытания скважин, освоенных на анализируемые эксплуатационные объекты; б) обосновано (наиболее уверенно) ожидаемой минимальной величины нефтеотдачи при внедрении той технологии разработки, которая планируется в финансово-экономической модели компании; в) календарных планов компании по вводу эксплуатационных скважин в работу на рассматриваемую перспективу.

Профиль добычи по сценарию 2P основывался на более оптимистичных (наиболее вероятных) предположениях относительно режима работы залежей и эффективности планируемой системы разработки, чем в доказанном варианте.

Профиль, заложенный в прогнозы компании, согласно которому за прогнозный период ожидается извлечение наибольшего объема нефти, рассматривается как максимальный (сценарий 3P).

Согласно классификации SPE-PRMS, прогноз добычи из скважин, бурение которых планируется на доказанные геологические объемы нефти, относится к доказанной категории. В свою очередь, прогнозы добычи из скважин, буримых на вероятные и возможные объемы, будут относиться к вероятной и возможной, но не доказанной категориям. После разделения существующего и проектного фонда добывающих скважин на категории согласно их положению на геологических картах объектов, подготавливаются отдельные прогнозы добычи по соответствующим категориям.

Необходимо напомнить, что согласно SPE-PRMS, к вероятной и возможной категориям относятся ожидаемые объемы добычи не только их скважин на вероятной и возможной площади залежей, но и дополнительные прогнозные объемы добычи их скважин на доказанной площади, которые оцениваются при допущениях и сценариях прогноза, более оптимистичных, чем принятых для доказанной категории. Аналогично скважинам на вероятной площади приписывают дополнительные прогнозные возможные объемы добычи. В итоге при использовании данного подхода скважинам на территории с доказанным объемом нефти в пласте приписываются три вероятностных сценария (прогноза) добычи: доказанный, Вероятный и Возможный. Скважинам на территории с вероятным объемом нефти в пласте – два вероятных сценария – вероятный и возможный, а на территории с Возможным объемом нефти в пласте – только один – возможный сценарий прогноза.

Результаты

Обозначим далее D – проницаемость, полученную из результатов опробования; P – проницаемость, полученную по петрофизической модели.

В таблице приведены проницаемости по соседним месторождениям и скважинам, вскрывшим разновозрастные отложения, примыкающие к исследуемому участку. Разделив далее массив на три терциля, обозначим S_h – верхний терциль проницаемости, полученный по всем значениям из соседних месторождений и скважин; S_m – средний, S_l – соответственно нижний терциль проницаемости.

Для расчета кривых добычи по категории P90 предлагается медианное значение проницаемости по скважинам, имеющим притоки, присвоить:

- для возможного варианта – $\max(D, P, S_h)$;
- для вероятного варианта – среднее (D, P, S_m) ;
- для доказанного варианта – $\min(D, P, S_l)$.

Для расчета кривых добычи по категории P50 предлагается медианное значение проницаемости по скважинам, имеющим притоки, присвоить:

- для возможного варианта – $\max(D, P, S_h)$;
- для вероятного варианта – среднее (D, P, S_m) .

Для расчета кривых добычи по категории P10 предлагается медианное значение проницаемости по скважинам, имеющим притоки, присвоить:

- для возможного варианта – $\max(D, P, S_h)$.

В качестве примера на рис. 3 приведены распределения проницаемости, полученные по описанной методике для категории P50 по шельфовым отложениям.

Заключение

Описанная методика определения проницаемости, обладая понятийной логикой, позволяет комплексировать как результаты испытаний скважин, так и данные по месторождениям, как в пределах участка, так и в непосредственной близости, в областях и блоках, примыкающих к границам [18,19]. Следует отметить, что подобный подход, связанный одновременно с методикой PRMS и статистикой, можно распространить и на некоторые другие пластовые параметры, традиционно определяемые со слабой степенью достоверности [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курганов Д.В. О численном решении одной задачи минимизации в моделировании пластовых систем // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2003. – Т. 6. – № 1. – С. 51–59.
2. Курганов Д.В. Об одном методе классификации коллекторов для расчета конечной нефтеотдачи // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22. – № 5. – С. 106–113.
3. Зейман Ю.В., Токарева Н.М. Анализ и регулирование разработки нефтяного месторождения с целью достижения потенциальной нефтеотдачи // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 1. – С. 81–99.
4. Силайчева В.А. Прогнозирование значения проницаемости по совокупности данных гидродинамических и геолого-геофизических исследований (на примере батырбайского месторождения) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – Т. 11. – № 3. – С. 26–29.
5. Бембель С.Р. Геология и картирование особенностей строения месторождений нефти и газа Западной Сибири. – Тюмень: ТИУ, 2016. – 215 с.
6. Permeability evaluation in low permeability reservoirs based on multifractal characteristics of NMR logs / Z. Jiang, J. Mao, Y. Fu, D. Shi, G Wang., J. Li // European Association of Geoscientists & Engineers, Conference Proceedings, 81st EAGE Conference and Exhibition. – New-York, June 2019. – P. 1–5.
7. Al-Ibadi H., Al-Jawad S.N. Permeability evaluation of carbonate reservoir using hydraulic unit analysis: case study from Middle East Region // European Association of Geoscientists & Engineers, Conference Proceedings, 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition Workshop Programme. – Abu-Dhabi, December 2020. – P. 1–10.
8. Permeability evaluation in heterogeneous formations using geophysical well logs and geological interpretations / S. Ameri, D. Molnar, S. Mohaghegh, K. Aminian // Society of Petroleum Engineers. – 1993. – V. 1. – P. 31–39. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/36819035/permeability-evaluation-in-heterogeneous-formations-using-> (дата обращения 15.05.2021).
9. Курганов Д.В. Расчет эффекта от перевода добывающей нефтяной скважины в нагнетательный фонд в рамках управ-

- ления разработкой нефтяным месторождением // Управление большими системами. – 2019. – Вып. 81. – С. 147–167.
10. Under stress permeability determination of the Meuse/Haute-Marne mudstone / S. Escoffier, F. Homand, A. Giraud, N. Hoteit, Su. Kun // Engineering Geology. – 2005. – V. 81 (3). – P. 329–340.
11. Губайдуллин Д.А., Никифоров А.И., Садовников Р.В. Идентификация тензоров коэффициентов проницаемости неоднородного анизотропного трещиновато-пористого пласта // Вычислительная механика сплошных сред. – 2011. – Т. 4. – № 4. – С. 11–19.
12. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
13. Паникаровский Е.В., Паникаровский В.В. Определение продуктивности сложнопостроенных коллекторов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2011. – № 3. – С. 47–52.
14. Брехунцов А.М., Монастырев Б.В., Нестеров И.И. Закономерности размещения нефти и газа в Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 8. – С. 1001–1012.
15. Dullien F.L. Porous media, fluid transport and pore structure. 2nd ed. – San Diego: Academic Press Inc., 2012. – 598 p.
16. Breyse D., Gérard B. Modelling of permeability in cement-based materials: P. 1. Uncracked medium // Cement and Concrete Research. – 1997. – V. 27 (5). – P. 761–775.
17. Guidelines for application of the petroleum resources management system. – Houston, 2018. – 61 p. URL: https://www.spe.org/media/filer_public/ab/fdabf524-ceac-4db5-ba53-672c33b44069/prmgmtsystem_v101_rus_final_v102.pdf (дата обращения 11.01.2021).
18. Pal L., Joyce M.P.D., Fleming A. Simple method for calculation of the permeability coefficient of porous media // TAPPI journal. – 2015. – V. 5. – № 9. – P. 10–16.
19. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 628 с.
20. Курганов Д.В. Об одном методе классификации нефтяного месторождения с использованием комплекса геолого-промышленных данных и машинного обучения // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2020. – Т. 18. – № 1. – С. 27–35.

Поступила 30.12.2020 г.

Информация об авторах

Курганов Д.В., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Самарского государственного технического университета им. В.В. Куйбышева.

UDC 681.518:622.276

METHOD OF ACCOUNTING DIFFERENT SOURCES FOR PERMEABILITY ESTIMATION UNDER LACK OF GEOLOGICAL AND FIELD INFORMATION

Dmitri V. Kurganov,
Kourganov@rambler.ru

Samara State Technical University,
244, Molodogvardeiskaya street, Samara, 443110, Russia.

The relevance of the work is associated with the depletion and long-term development of existing fields, while the study of poorly explored areas of promising oil and gas content is of particular importance. Often, companies in the oil and gas industry meet the problems in assessing potential sites in the face of a clear lack of geological information.

The main aim of the research is prediction of the reservoir permeability – one of the most important parameters influencing the prediction of further development while it is often the most difficult to determine, especially in the absence of field research and development, or due to existing contradictions in the field data.

Methods. The paper presents the accurate method for accounting and systematization of the available information on permeability estimation with the simultaneous use of two tools – the well-known probabilistic approach to estimating reserves (P10/50/90), as well as the one with the use of terziles. The combination of these approaches allows one to take into account the permeability obtained from different sources – for example, from the well test together with data obtained in the petrophysical model. It is well known, in cases of complex reservoirs, data from different sources may contradict each other.

Results. The specified algorithm allows integrating the data on the permeability of reservoirs, including the data determined not sufficiently reliably, without significantly going into the reasons for such discrepancies. At the same time, an essential condition for applying the method is the presence of a statistically significant amount of data, which can be taken into account by using information on neighboring fields and adjacent areas. It also seems possible to generalize the method to the determination of some other geological parameters.

Key words:

Oil, permeability, well, reserves, forecast, probability, data, welltest, petrophysical model.

REFERENCES

- Kurganov D.V. *O chislenom reshenii odnoy zadachi minimizatsii v modelirovanii plastovykh sistem* [On the numerical solution of one minimization problem in modeling reservoir systems]. *Sib. Zh. Ind. Mat.*, 2003, vol. 6, no. 1, pp. 51–59.
- Kurganov D.V. [Oil reservoir classification for ultimate oil recovery estimation by means of machine learning. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 22, no. 5, pp. 106–113. In Rus.
- Zeigman Yu.V., Tokareva N.M. Analysis and regulation of oil field development in order to achieve potential oil recovery. *Neftegazovoe delo*, 2012, no. 1, pp. 81–99. In Rus.
- Silaicheva V.A. Forecasting the value of permeability based on the totality of hydrodynamic and geological-geophysical research data (using the example of the Batyrbay field). *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2012, vol. 11, no. 3, pp. 26–29. In Rus.
- Bembel S.R. *Geologia i kartirovanie osobennostei stroeniya mestorozhdeniy nefii i gaza Zapadnoy Sibiri* [Geology and mapping of Western Siberia oil and gas deposits]. Tyumen, TIU publ., 2016. 215 p.
- Jiang Z., Mao J., Fu Y., Shi D., Wang G., Li J. Permeability evaluation in low permeability reservoirs based on multifractal characteristics of NMR logs. *European Association of Geoscientists & Engineers, Conference Proceedings, 81st EAGE Conference and Exhibition*. New-York, June 2019, pp. 1–5.
- Al-Ibadi H., Al-Jawad S.N. Permeability evaluation of carbonate reservoir using hydraulic unit analysis: case study from Middle East Region. *European Association of Geoscientists & Engineers, Conference Proceedings, 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition Workshop Programme*. Abu-Dhabi, December 2020, pp. 1–10.
- Ameri S., Molnar D., Mohaghegh S., Aminian K. Permeability evaluation in heterogeneous formations using geophysical well logs and geological interpretations. *Society of Petroleum Engineers*, 1993, vol. 1, pp. 31–39. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/read/36819035/permeability-evaluation-in-heterogeneous-formations-using> (accessed 15 May 2021).
- Kourganov D. Calculation of additional oil production after well's conversion to injector in oil reservoir management. *Large-Scale Systems Control*, 2019, vol. 81, pp. 147–167. In Rus.
- Escoffier S., Homand F., Giraud A., Hoteit N., Kun Su. Under stress permeability determination of the Meuse/Haute-Marne mudstone. *Engineering Geology*, 2005, vol. 81 (3), pp. 329–340.
- Gubaidullin D., Nikiforov A.I., Sadovnikov R. *Identifikatsiya tenzorov koeffitsiyentov pronitsayemosti neodnorodnogo anizotropnogo treshchinovato-poristogo plasta* [Identification of permeability tensors of a heterogeneous anisotropic fractured porous reservoir]. *Computational continuum mechanics*, 2011. Vol. 4, no. 4, pp. 11–19. In Rus.
- Demyanov V.V., Savelyeva E.A. *Geostatistika: teoriya i praktika* [Geostatistics: theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 327 p.
- Panikarovskiy E.V., Panikarovskiy V.V. Determination of productivity of reservoirs with a complex structure. *Oil and Gas Studies*, 2011, no. 3, pp. 47–52. In Rus.
- Brekhtunsov A.M., Monastirev B.V., Nesterov I.I. (Jr.). Distribution patterns of oil and gas accumulations in West Siberia. *Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 8, pp. 1001–1012. In Rus.
- Dullien F.L. *Porous media, fluid transport and pore structure*. 2nd ed. San Diego, Academic Press Inc., 2012. 598 p.
- Breyse D., Gérard B. Modelling of permeability in cement-based materials. P. 1. Uncracked medium. *Cement and Concrete Research*, 1997, vol. 27 (5), pp. 761–775.
- Guidelines for application of the petroleum resources management system*. Houston, 2018. 61 p. Available at: https://www.spe.org/media/filer_public/fd/ab/fdabf524-ceac-4db5-ba53-672c33b44069/pmgmtsystem_v101_rus_final_v102.pdf (accessed 11 January 2021).
- Pal L., Joyce M.P.D., Fleming A. Simple method for calculation of the permeability coefficient of porous media. *TAPPI journal*, 2015, vol. 5, no. 9, pp. 10–16.
- Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* [Applied Mathematical Statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 628 p.
- Kurganov D.V. On one method of classifying an oil field using a complex of geological field data and machine learning. *Novosibirsk State University Journal of Information Technologies*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 27–35. In Rus.

Received: 30 December 2020.

Information about the authors

Dmitri V. Kurganov, Cand. Sc., associated professor, Samara State Technical University.

UDC 621.314

CURRENT CONTROL OF Z-SOURCE FOUR-LEG INVERTER FOR AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC SYSTEM BASED ON MODEL PREDICTIVE CONTROL

Mohamed T. Boussabeur¹,
boussabeur-mtayeb@univ-eloued.dz

Boualaga Rabhi²,
Boualaga@yahoo.fr

Raef Aboelsaud³,
rsahmed@eng.zu.edu.eg

Ahmed Ibrahim⁴,
ibragim@tpu.ru

Djaafar Toumi¹,
toumi-djaafar@univ-eloued.dz

Laid Zellouma¹,
Zellouma13@yahoo.fr

Alexander G. Garganeev⁴,
Garganeev@rambler.ru

¹ University of El-Oued,
48, El Oued street, El-Oued, 39000, Algeria.

² University of Biskra,
145, Shagar street, Biskra, 7044, Algeria.

³ Zagazig University,
90, University street, Zagazig, 44519, Egypt.

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. Renewable energy resources for electrical power generation have gained higher interest over the traditional underground fuels due to geo-reasons, such as the low generation cost and clean energy resources. Moreover, renewable energy resources, especially photovoltaic generation system, can efficiently be used as an autonomous power supply for consumers geographically located in remote, inaccessible areas. The performance of autonomous power supply depends mainly on the conversion system and its control technique. Therefore, this paper uses a new and alternative control system based on the finite control set model predictive control strategy to control the load current of the Z-source four-leg inverter employed for the autonomous photovoltaic generation system.

The main aim of the research is the development of a control algorithm based on finite control set model predictive control strategy to regulate the load currents of Z-source four-leg inverter for a geographical stand-alone photovoltaic generation system.

Methods: mathematical and computer modeling using the MatLab/Simulink software environment.

Results. Due to using Z-source four-leg inverter, the power conversion system for the photovoltaic generation systems is reduced to be single-stage, instead of two-stage power conversion. The results show that the proposed control algorithm can effectively regulate load current under balanced/unbalanced issues with high controllability. The proposed control algorithm has excellent steady-state and transient performances.

Key words:

Renewable energy resources, autonomous photovoltaic systems, model predictive control, four-leg inverter, Z-source inverter.

Introduction

Renewable energy resources (RER), such as photovoltaic, wind, and geothermal power systems have gained higher interest over the traditional underground fuels because these energy resources have low generation cost and no pollution. Due to the fact that the solar energy resource is the most geographically available in the world, the photovoltaic (PV) generation system, can efficiently be used as an autonomous power supply (APS) for consumers geographically located in remote, inaccessible areas. The performance of the stand-alone PV systems depends mainly on the power converter topologies and their control structures [1]. Generally, two-stage power conversion is performed to transfer the electric power from DC PV modules to the AC loads [2–5]. The power converter in the first stage is employed to boost the DC voltage and extract the maximum power from the PV modules [6, 7], while the second conversion stage uses the

power DC-AC inverter to convert from DC to AC and to control the load voltage or load current [8, 9]. On the other hand, the Z-source inverter (ZSI) topology is proposed as an alternative power converter topology for PV systems [10–13]. The ZSI can combine the functions of the two-stage conversion system in a one-stage system with a lower number of power electronics switches [14, 15].

The unbalanced loads of the stand-alone power supply system can cause unbalancing and harmonic distortion in the load voltage [8, 16]. The Z-source four-leg inverter (ZSFLI) topology has been proposed to handle this issue. ZSFLI provides a neutral wire for circulating the unbalanced current under unbalanced load conditions [17]. With proper control, the ZSFLI can regulate the load current or voltage in high power quality regardless of the loads unbalancing issues.

The control of the power converter plays a vital role in the stand-alone power supply system [18–20]. In literature, a number of control techniques have been proposed

to control the four-leg inverter and the ZSI. Recently, the Finite Control Set Model Predictive Control (FSMPC) has gained high interest in the power electronics sphere due to its features. The FSMPC has provided direct control action to the converter switches without using the modulation stage. Moreover, the FSMPC has a rapid transient response and its algorithm is intuitive and can be easily modified and designed according to the control objective [8, 9].

This paper presents the FSMPC technique for ZSFLI to control the load current of the stand-alone PV system with high performance and quality, and also control the ZS network capacitor voltage. To achieve this goal, an accurate discrete-time model of the stand-alone PV system is derived to allow the FSMPC to perfectly predict and regulate its controllable signal. Simulation results are introduced to assure the effectiveness of the presented technique.

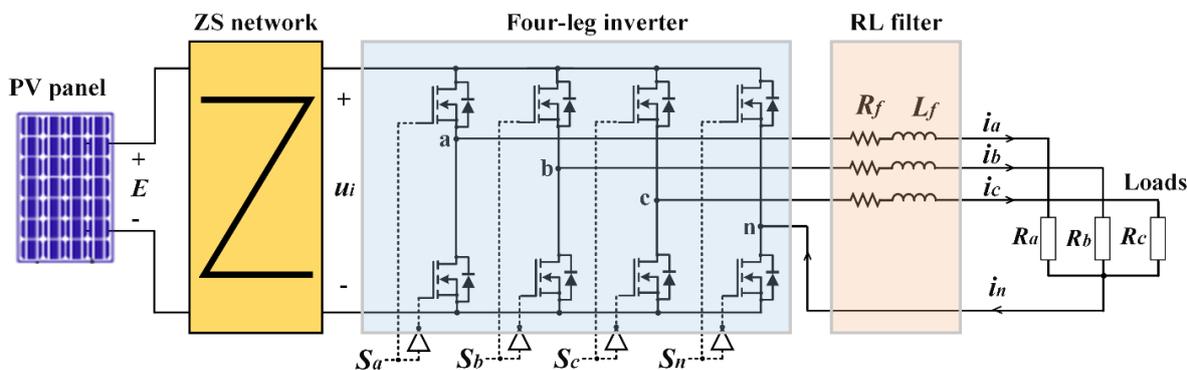


Fig. 1. Stand-alone PV system with ZSFLI

Рис. 1. Автономная фотоэлектрическая система на основе Z-инвертора

Mathematical model of the stand-alone PV system

The PV system under investigation, consisting of a ZSFLI, an RL-filter, and a load, is shown in Fig. 1. The ZSFLI has the ZS network which can be used instead of the dc-dc converter in traditional two-stage power conversion. The PV module in the PV system can be considered as an ideal source.

Mathematical model of ZS network

The ZS network has two operation states [21]: non-shoot-through state and shoot-through state. The equivalent circuits of the ZS network with its states are shown in Fig. 2. The ZS network contains two inductors (L_1 and L_2) and two capacitors (C_1 and C_2) as it is shown in Fig. 2. For simplification, it can be assumed that two inductors have the same inductance and two capacitors have the same capacitance to make the ZS network symmetrical. This symmetry can be observed in the expression (1):

$$U_{C1}=U_{C2}=U_C; u_{L1}=u_{L2}=u_L. \quad (1)$$

In the shoot-through zero state, for the interval (T_0), during the switching cycle (T), two semiconductor switches in the same leg of the inverter are simultaneously closed to create short-circuit across the dc link. During this state, the inverter is modeled as a short circuit for the ZS network as it is shown in Fig. 2, b. In this case, energy is transferred in the ZS network from the capacitors to the inductors, resulting in boosting the dc voltage. From the equivalent circuit (Fig. 2, b) the inductor voltage (u_L), diode voltage (u_d), DC-link voltage (u_i) are expressed in (2):

$$u_L=U_C; u_d=2U_C; u_i=0. \quad (2)$$

The other normal states, where the switches of the same leg are not simultaneously closed, are considered as non-shoot-through states. The ZSFLI has 16 normal non-shoot-through states and one shoot-through zero state,

while the traditional four-leg inverter has only the normal 16 states. In the non-shoot-through state for the interval (T_0), during the switching cycle (T), the inverter is modeled as a constant current source as depicted in Fig. 2, c. From the equivalent circuit, one can obtain expression (3):

$$u_L=E-U_C; u_d=E; u_i=U_C-u_L=2U_C-E, \quad (3)$$

where E is the DC voltage from the PV panel. The average voltage of the inductors over one switching period ($T=T_0+T_1$) across the inverter should be zero in steady-state, from (2) and (3), one has:

$$U_L = \frac{T_0 U_C + T_1 (E - U_C)}{T}, \quad (4)$$

$$\frac{U_C}{E} = \frac{T_1}{T_1 - T_0}. \quad (5)$$

Similarly, the average dc-link voltage across the inverter bridge can be found in (6):

$$U_{i_{av}} = \frac{T_0 \times 0 + T_1 (2U_C - E)}{T} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} E = U_C. \quad (6)$$

The peak dc-link voltage across the inverter bridge is expressed in (3) and can be rewritten as in (7):

$$U_{i_{peak}} = U_C - u_L = 2U_C - E = \frac{T}{T_1 - T_0} E = BU_C, \quad (7)$$

where

$$B = \frac{T}{T_1 - T_0} = \frac{T}{1 - 2\frac{T_0}{T}} \geq 1 \quad (8)$$

is the boosting factor which is caused by the shoot-through zero state.

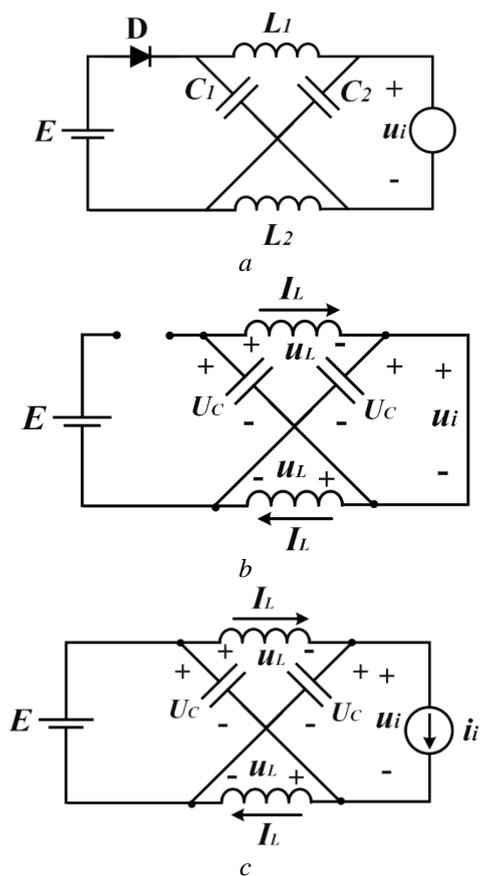


Fig. 2. a) equivalent circuit of the Z-source inverter; b) in shoot-through zero states; c) in non-shoot-through state
Рис. 2. а) эквивалентная схема Z-инвертора при (b) нулевом состоянии переключения и (c) обычном состоянии переключения

Mathematical model of the four-leg inverter

The four-leg inverter with RL-filter and loads is shown in Fig. 1. The output inverter voltage can be expressed in (9):

$$\left. \begin{aligned} u_{an} &= (S_a - S_n)u_i \\ u_{bn} &= (S_b - S_n)u_i \\ u_{cn} &= (S_c - S_n)u_i \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

by applying the Kirchhoffs voltage law to the output circuit of the inverter, the output inverter voltages can be expressed as in (10):

$$\left. \begin{aligned} u_{an} &= (R_{fa} + R_a)i_a + L_{fa} \frac{di_a}{dt} \\ u_{bn} &= (R_{fb} + R_b)i_b + L_{fb} \frac{di_b}{dt} \\ u_{cn} &= (R_{fc} + R_c)i_c + L_{fc} \frac{di_c}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

This equation can be expressed in (11):

$$u_j = (Rf_j + R_j)i_j + Lf_j \frac{di_j}{dt}, \quad (11)$$

where $j=a, b, c$. Neutral current can be expressed as:

$$i_n = i_a + i_b + i_c. \quad (12)$$

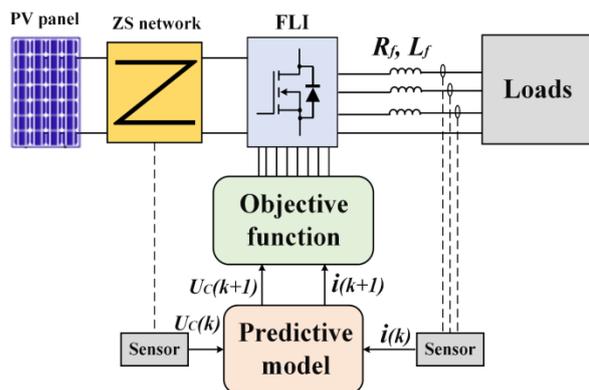


Fig. 3. Block diagram of the proposed FSMPC for the stand-alone PV system

Рис. 3. Топологическая схема автономной фотоэлектрической системы на основе ПУ

The proposed FSMPC

The block diagram of the proposed FSMPC scheme for the FLZSI is depicted in Fig. 3. This control technique can be considered as a digital control technique because its algorithm uses the discrete model of the system and is repeated for a determined sampling period (T_s). The proposed FSMPC algorithm uses the discrete predictive model of the PV system to predict the load current (i_j) and the voltage (U_C) and current (I_L) of the ZS network for a one-step prediction horizon ($k+1$), where k – sampling instant. This prediction is performed for each switching state of FLZSI. The objective function is used to select the best switching state that minimizes the error between the predicted currents and voltages values and the reference values. Finally, the selected switching state is applied to the inverter switches. The flow chart of this algorithm is depicted in Fig. 4.

The predictive model of the system

The predictive model is derived in two parts:

1) Predictive Model part (I):

This part is used to predict the load currents. From (11), the derivative value of load currents can be written as it is shown in (13):

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{Lf_j} [u_j - (Rf_j + R_j)i_j]. \quad (13)$$

By using the forward Euler rule [22], the predicted load current for the next sampling instant ($k+1$) can be expressed as it is shown in (14):

$$\begin{aligned} i_j(k+1) &= \frac{T_s}{L_f + (R_j + R_{ff})T_s} u_j(k+1) + \\ &+ \frac{T_s}{L_f + (R_j + R_{ff})T_s} i_j(k). \end{aligned} \quad (14)$$

2) Predictive Model part (II):

This part is used to predict the capacitor voltage of the ZS network (U_C). From the equivalent circuit of the ZS network shown Fig. 2, a, the ZS capacitor current can be expressed as it is shown in (15):

$$i_c = C \frac{dU_c}{dt}, \quad (15)$$

where C is the capacitance of the ZS capacitor. From (15), the capacitor voltage can be derived as it is shown in (16):

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C} i_c. \quad (16)$$

By using the forward Euler rule, the predicted value of the capacitor voltage for the next sampling instant ($k+1$) can be obtained as it is shown in (17):

$$U_c(k+1) = U_c(k) + \frac{T_s}{L} i_c(k), \quad (17)$$

where $i_c(k)$ is ZS capacitor current for the present sampling instant (k) which depends on the states of the ZSFLI topology (non-shoot-through and shoot-through states):

a) for the non-shoot-through state:

$$i_c = I_L - (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c); \quad (18)$$

b) for the shoot-through state:

$$i_c = -I_L. \quad (19)$$

Objective function

The proposed FSMPC uses three objective functions combined in one multi-objective function: one objective function for the load current, and two other objective functions for ZS inductor current and capacitor voltage, respectively. The multi-objective function can be expressed as it is shown in (20):

$$g = g_i + \lambda g_c, \quad (20)$$

where g_i is the objective function of the load current and can be written as it is shown in (21):

$$g_i = [i_j^* - i_j(k+1)]^2, \quad (21)$$

where $j=a, b, c$; i_j^* is the reference load current; g_c is the objective function of the ZS capacitor voltage and is expressed as it is shown in (23):

$$g_c = [U_c^* - U_c(k+1)]^2, \quad (23)$$

where U_c^* is the reference ZS capacitor voltage. The weighting factor (λ) was determined by using the objective function classification technique that was explained in [23].

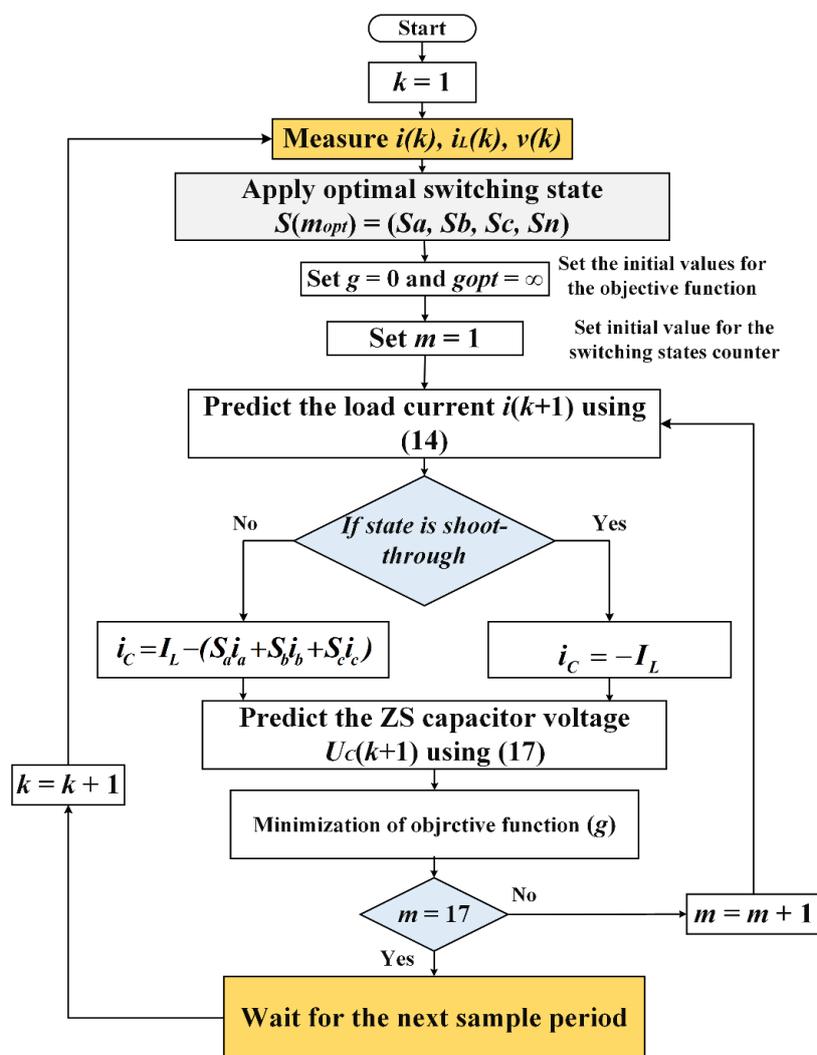


Fig. 4. Flowchart of the proposed FSMPC algorithm for FLZSI

Рис. 4. Блок-схема алгоритма прогнозирующего управления Z-инвертором

Proposed FSMPC algorithm

The flowchart for the proposed FSMPC algorithm is given in Fig. 4. The algorithm of the FSMPC can be summarized as follows:

- Measure the load currents, ZS inductor current, and ZS capacitor voltage.
- By using the predictive model, for each switching state, predict the load currents, ZS inductor current, and ZS capacitor voltage.
- For each switching state, evaluate the objective function (g).
- Select the best switching state that gives the minimum value for the objective function (g).
- Apply the switching state to the ZSFLI switches.

Results and discussion

To verify the theoretical analysis and confirm the proposed FSMPC technique of ZSFLI, simulation has been conducted with the configuration shown in Fig. 1 in Matlab/Simulink. The system parameters are given in Table.

Table. System parameters

Таблица. Параметры системы

Parameters/Параметры	Values/Значения
Output voltage of PV panel Выходное напряжение фотоэлектрической панели	$V_{dc}=150-250$ V
Reference capacitor voltage Эталонное напряжение конденсатора	$U_c=635$ V
ZS inductances Индуктивность индукторов Z-инвертора	$L_1=L_2=L=1,5$ mH
ZS capacitances Юмкость конденсатора	$C_1=C_2=C=470$ μ F
Load resistance Спротивление нагрузки	$R=5-10$ Ω
Filter parameters Параметры RL-фильтра	$L_f=10$ mH, $R_f=0,05$ Ω
Nominal frequency Номинальная частота	$F=50$ Hz
Sampling time Время выборки	$T_s=20$ μ s

Three case studies are performed, two cases in the steady-state mode, and one case in the transient mode. In steady-state mode, the proposed FSMPC is used to control the ZSFLI with unbalanced references load currents ($i_a^*=15$ A, $i_b^*=5$ A, and $i_c^*=15$ A) in one case, and balanced references load currents ($i_a^*=i_b^*=i_c^*=20$ A) in another case, while the loads are unbalanced ($R_a=5$ Ω , $R_b=10$ Ω , and $R_c=10$ Ω) in the two cases. The results with balanced and unbalanced references load currents are shown in Fig. 5, a, b, respectively. From the results, it can be observed that the proposed FSMPC algorithm can regulate each phase current independently while the dc-link voltages are kept unchanged. The neutral current flows through the neutral wire when the load currents are unbalanced.

In transient mode, a step change is carried out for the reference load currents from 0 to 20 A. For this test, reference load currents and loads are balanced ($R_a=R_b=R_c=10$ Ω). From the results shown in Fig. 6, it can be observed that the FSMPC control technique has a very rapid transient reaction with a small overshoot. In

this test, the neutral current is zero because the load current is balanced.

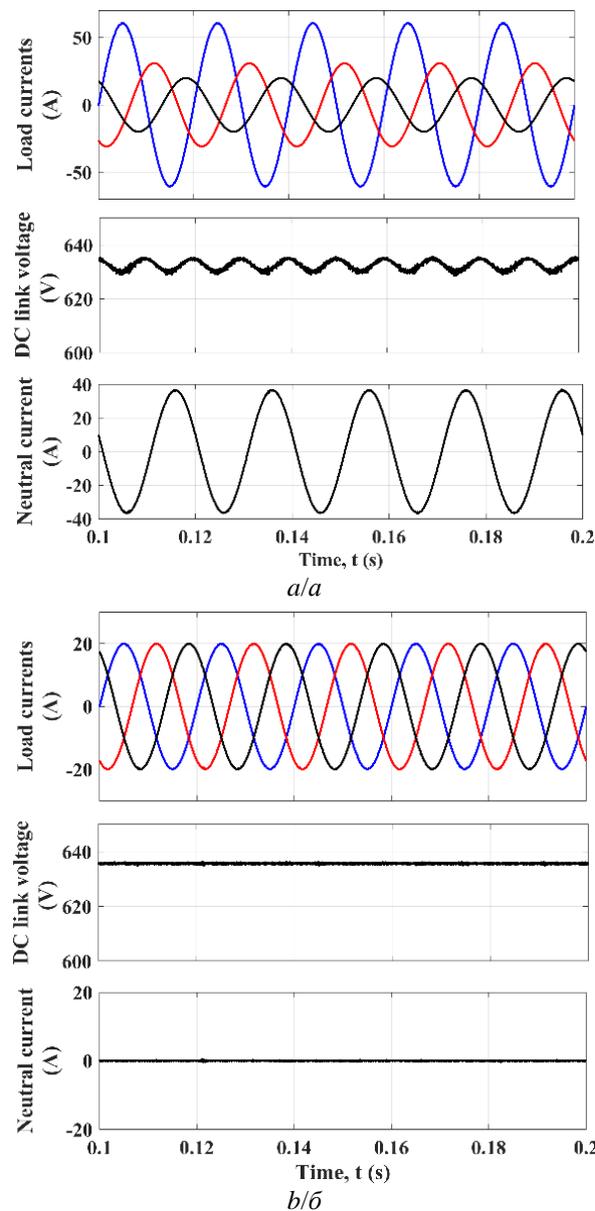


Fig. 5. Steady state results with (a) unbalanced references of load current (b) balanced references of load current

Рис. 5. Результаты при статическом режиме (а) несбалансированными эталонами тока нагрузки (б) сбалансированными эталонами тока нагрузки

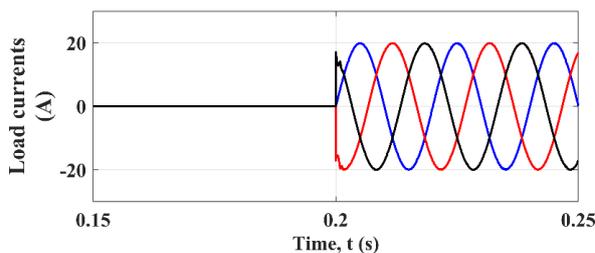


Fig. 6. Load currents in transient mode

Рис. 6. Токи нагрузки при динамическом режиме

Conclusion

This paper presents the FSMPC algorithm for current control of ZSFLI in the PV system. The main advantage of using ZSFLI is to achieve single-stage power conversion for PV generation systems with handling unbalanced issues with high controllability. The proposed FSMPC is

used to regulate the load currents and the capacitor voltage of the ZS network. Case studies were performed to verify the performance of the ZS inverter topology of the proposed control strategy. The results show that the proposed technique has excellent steady-state and transient performances.

REFERENCES

1. Zhang G., Li Z., Zhang B., Halang W.A. Power electronics converters: past, present and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 81, pp. 2028–2044.
2. Chatterjee A., Mohanty K.B. Current control strategies for single phase grid integrated inverters for photovoltaic applications – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 92, pp. 554–569.
3. Zeb K., Uddin W., Khan M.A. A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, June 2018, vol. 94, pp. 1120–1141.
4. Wang X., Guerrero J.M., Blaabjerg F., Chen Z. A review of power electronics based microgrids. *Journal of Power Electronics*, 2012, vol. 12, (1), pp. 181–192.
5. Aboelsaud R., Ibrahim A., Garganev A.G. Review of three-phase inverters control for unbalanced load compensation. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2019, vol. 10 (1), pp. 242–255.
6. Obukhov S., Ibrahim A., Diab A.A.Z., Al-Sumaiti A.S., Aboelsaud R. Optimal performance of dynamic particle swarm optimization based maximum power trackers for stand-alone PV system under partial shading conditions. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 20770–20785.
7. Ibrahim A., Aboelsaud R., Obukhov S. Maximum power point tracking of partially shading PV system using cuckoo search algorithm. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2019, vol. 10 (2), pp. 1081–1089.
8. Aboelsaud R., Al-Sumaiti A.S., Ibrahim A. Assessment of model predictive voltage control for autonomous four-leg inverter. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 101163–101180.
9. Aboelsaud R., Ibrahim A., Garganev A.G. Comparative study of control methods for power quality improvement of autonomous 4-leg inverters. *International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering*, Moscow, Russia, 2019, pp. 1–6.
10. Li T., Cheng Q. A comparative study of Z-source inverter and enhanced topologies. *Ces Transactions On Electrical Machines And Systems*, 2018, vol. 2 (3), pp. 284–288.
11. Liu Y., Ge B., Abu-Rub H., Peng F.Z. Overview of space vector modulations for three-phase Z-source/quasi-Z-source inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29 (4), pp. 2098–2108.
12. Hasan Babayi Nozadian M., Babaei E., Hosseini S.H., Shokati Asl E. Steady-state analysis and design considerations of high voltage gain switched Z-source inverter with continuous input current. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64 (7), pp. 5342–5350.
13. Yu Z., Hu X., Zhang M., Chen L., Jiang S. A transformerless boost inverter for stand-alone photovoltaic generation systems. *PEDG 2019 – 2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*. China, 2019, pp. 570–575.
14. Singh S.A., Carli G., Azeez N.A., Williamson S.S. Modeling, design, control, and implementation of a modified Z-source integrated PV/Grid/EV DC charger/inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65 (6), pp. 5213–5220.
15. Liu J., Wu J., Qiu J., Zeng J. Switched Z-source/quasi-Z-source DC-DC converters with reduced passive components for photovoltaic systems. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 40893–40903.
16. Yaramasu V., Rivera M., Wu B., Rodriguez J. Predictive control of four-leg power converters. *Proc. 2015 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE)*. Valparaiso, Chile, 2015. pp. 121–125.
17. Guo X., Yang Y., He R., Wang B., Blaabjerg F. Transformerless Z-source four-leg PV inverter with leakage current reduction. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34 (5), pp. 4343–4352.
18. Han Y., Jiang A.T., Coelho E.A.A., Guerrero J.M. Optimal performance design guideline of hybrid reference frame based dual-loop control strategy for stand-alone single-phase inverters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018, vol. 33 (2), pp. 730–740.
19. Wang X., Lin Y., Wang B., Liu W., Bai K. Output voltage control of BESS inverter in stand-alone micro-grid based on expanded inverse model. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 3781–3791.
20. Bayhan S., Trabelsi M., Abu-Rub H., Malinowski M. Finite-control-set model-predictive control for a quasi-Z-source four-leg inverter under unbalanced load condition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64 (4), pp. 2560–2569.
21. Fang Zheng P., Peng F.Z. Z-source inverter. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2003, vol. 39 (2), pp. 504–510.
22. Nguyen-Van T., Hori N. New class of discrete-time models for non-linear systems through discretisation of integration gains. *IET Control Theory and Applications*, 2013, vol. 7 (1), pp. 80–89.
23. Rodriguez J., Cortes P. *Predictive control of power converters and electrical drives*. Valparaiso, Chile, John Wiley & Sons, Ltd, 2012. pp. 163–176.

Received: 16 June 2021.

Information about the authors

Mohamed T. Boussabaur, postgraduate student, University of El-Oued.

Boualaga Rabhi, Dr. Sc., professor, University of Biskra.

Raef Aboelsaud, Cand. Sc., associate professor, Zagazig University.

Ahmed Ibrahim, Cand. Sc., associate professor, Zagazig University.

Djaafar Toumi, postgraduate student, University of El-Qued.

Laid Zellouma, Dr. Sc., associate professor, University of El-Oued.

Alexander G. Garganev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.314

УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ Z-ИНВЕРТОРА С ЧЕТВЕРТОЙ СТОЙКОЙ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Мохамед Т. Буссабер¹,
boussabeur-mtayeb@univ-eloued.dz

Джаафар Туми¹,
toumi-djaafar@univ-eloued.dz

Буалага Рабхи²,
Boualaga@yahoo.fr

Лейд Зеллума¹,
Zellouma13@yahoo.fr

Раиф Абуэлсауд³,
rsahmed@eng.zu.edu.eg

Гарганеев Александр Георгиевич⁴,
Garganeev@rambler.ru

Ахмед Ибрагим³,
ibragim@tpu.ru

¹ Университет Эль-Куэд,
Алжир, 39000, Эль-Куэд, ул. Эль-Куэд, 48.

² Университет Бискры,
Алжир, 7044, Бискра, улица Шагар, 145.

³ Загазигский университет,
Египет, 44519, Загазиг, пр. Университета, 90.

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Возобновляемые источники для производства электроэнергии вызывают большой интерес у учёных и исследователей по сравнению с традиционными источниками, работающими на основе использования углеводородного топлива. Одним из типов возобновляемых источников энергии, отвечающих реализации концепции «зеленая энергетика», являются фотоэлектрические системы, способные эффективно использоваться в качестве автономной системы электроснабжения для потребителей, географически расположенных в отдаленных, труднодоступных районах. Производительность автономной системы электроснабжения во многом определяется системой преобразования и ее алгоритмами управления. В статье рассмотрена новая и альтернативная система управления автономных фотоэлектрических станций, основанная на стратегии прогнозирующего управления напряжением и током нагрузки Z-инвертора с четвертой стойкой.

Цель: разработка алгоритма, основанного на стратегии прогнозирующего управления, для регулирования токов нагрузки автономной фотоэлектрической системы электроснабжения.

Методы: математическое и компьютерное моделирование с использованием программной среды MatLab/Simulink.

Результаты. Благодаря использованию Z-инвертора система преобразования энергии для фотоэлектрических систем генерации сокращается до одноступенчатой структуры. Результаты показывают, что предложенный алгоритм управления может эффективно регулировать ток нагрузки при сбалансированных и несбалансированных нагрузках с высокой эффективностью управления. Предлагаемый алгоритм управления имеет отличные характеристики в установившихся и переходных режимах.

Ключевые слова: Возобновляемые источники энергии, автономные фотоэлектрические системы, управление с прогнозированием модели, инвертор с четвертой стойкой, Z-инвертор.

Информация об авторах

Мохамед Т. Буссабер, аспирант кафедры электротехники лаборатории LEVRES, Университет Эль-Куэд.

Буалага Рабхи, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники лаборатории LMSE, Университет Бискры.

Раиф Абуэлсауд, кандидат технических наук, доцент, кафедра электроэнергетики, Загазигский университет.

Ахмед Ибрагим, кандидат технических наук, доцент, кафедра электроэнергетики, Загазигский университет.

Джаафар Туми, аспирант, Исследовательская лаборатория VTRS, Университет Эль-Куэд.

Лейд Зеллума, доктор технических наук, доцент, кафедра электротехники, лаборатории LEVRES, Университет Эль-Куэд.

Гарганеев А.Г., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Поступила 16.06.2021 г.

УДК 622.867.324:658.567.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ САМОСПАСАТЕЛЕЙ НА ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННОМ КИСЛОРОДЕ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ КАРБОНАТНОЙ ЖЕСТКОСТИ ШАХТНОЙ ВОДЫ

Высоцкий Сергей Павлович¹,
sp.vysotsky@gmail.com

Плотников Денис Александрович¹,
d.a.plotnikov@donnasa.ru

Мамаев Валерий Владимирович²,
respirator@mail.dnmchs.ru

¹ Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
Украина, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2.

² Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР,
Украина, 283048, г. Донецк, ул. Артема, 157.

Актуальность. В угледобывающей промышленности Донбасса существует потребность в использовании большого количества индивидуального аварийно-спасательного оборудования, содержащего регенерирующие продукты. В настоящее время необходимая процедура утилизации этих отходов в регионе не предусмотрена. Таким образом, закономерно, происходит неорганизованное скопление опасного для человека и окружающей среды продукта, содержащего надпероксид калия, к тому же являющегося ценным и дорогостоящим продуктом. Вторая острая экологическая проблема региона – образование большого количества шахтных вод на угледобывающих предприятиях и последующий их сброс в поверхностные водоемы. Одним из этапов очистки шахтной воды для последующего ее применения в хозяйственных циклах является умягчение (удаление соединений жесткости). Для этих целей обычно используются вещества, аналогичные отходам регенеративных продуктов самоспасателей, например, известь и карбонат натрия в отстойниках и осветлителях. Такая схема повторного использования будет выгодным и современным подходом к экологической безопасности региона.

Цель: исследование возможности повторного использования отходов регенеративного продукта непригодных к эксплуатации самоспасателей для дальнейшего их применения в хозяйственно-бытовых нуждах предприятий.

Объект: отходы самоспасателей на кислородсодержащем продукте на основе надпероксида калия, шахтные воды Донбасского региона.

Методы: экспериментальные исследования по очистке шахтной воды отходами регенеративного продукта шахтных самоспасателей на химически связанном кислороде методом реагентного умягчения.

Результаты. Экспериментально установлено, что очистка шахтных вод отходами регенеративного продукта шахтных самоспасателей обеспечивает высокую степень умягчения шахтных вод. Шахтные воды Донбасского региона, обработанные регенерирующим средством, соответствуют требованиям к использованию в хозяйственных целях и при дозе реагента 4 мг-экв/дм³ имеют следующие показатели качества: электропроводность – 2891 мкСм/см; водородный показатель (рН)=8,66; Ж=6,3 мг-экв/дм³; $CO_3^{2-}=0$; $HCO_3^-=6,5$ мг-экв/дм³.

Ключевые слова:

Шахтные самоспасатели, утилизация отходов, регенеративный продукт, надпероксид калия, шахтная вода.

Состояние вопроса

Метод, применяемый для оценки процессов, защищающих окружающую среду, наряду с потреблением ресурсов и энергии от наиболее благоприятных до наименее благоприятных действий, называется иерархия отходов [1]. Иерархия отражает продвижение материала или продукта через последовательные этапы управления отходами и представляет последнюю часть жизненного цикла каждого продукта.

Предотвращение образования отходов считается оптимальным вариантом использования, а утилизация (например, путем сжигания) – наихудшим вариантом (рис. 1). Иерархический порядок должен учитывать потребности региона, в котором образовались отходы, а также количественный и качественный состав отходов [1, 2].

Цель иерархии отходов – получение наибольшей практической выгоды из продуктов утилизации и наименьшего количества отходов. Правильное использование иерархии отходов способно дать ряд преимуществ. Например, возможность предупредить выбросы парниковых газов, снизить количество загрязняющих веществ, сберечь ценные ресурсы и инициировать развитие экологических технологий [1, 2].



Рис. 1. Структура иерархии отходов

Fig. 1. Waste hierarchy structure

Важнейшей составляющей концепции жизнеобеспечения в закрытых пространствах являются системы регенерации воздуха по двуокиси углерода и кислороду, которые можно разделить на две принципиально отличающиеся друг от друга группы: регенерационные системы на химически связанном кислороде и системы с применением сжатого кислорода. Супероксиды натрия или калия, сформованные в виде блоков из механических смесей порошков, таблеток или гранул, являются основными источниками химически связанного кислорода. Регенеративные продукты на основе химически связанного кислорода широко используются как средства коллективной и индивидуальной защиты в различных сферах: подземные горные работы, горноспасательные и пожарные спасательные службы, при строительстве и обслуживании подземных коммуникаций, метро, тоннелей, военных объектов, а также в других ситуациях, где возможен риск образования несовместимой для дыхания среды [3]. Продукты химической регенерации предусмотрены для восстановления состава воздуха по диоксиду углерода и кислороду в замкнутых циклах системах жизнеобеспечения.

Самоспасатели используются для защиты органов дыхания на конкретный период времени в случае аварий, чрезвычайных ситуаций, при аварийно-спасательных работах. Система самоспасения подземного персонала в чрезвычайных ситуациях представляет собой совокупность организационных мероприятий и технических средств, предназначенных

обеспечивать безопасность пребывания персонала в несовместимой для дыхания среде до восстановления нормального режима вентиляции или эвакуации из подземных выработок [4].

Самоспасатели с кислородосодержащим продуктом (рис. 2) широко распространены в РФ, Украине, их также используют Германия, Китай, Индия, Индонезия, ЮАР и др. [5]. Изолирующие самоспасатели, работающие на сжатом воздухе, распространены по большей части в США и Австралии, а в странах Европы, Азии и Африки практически не применяются из-за своей высокой стоимости. В угольной промышленности РФ на 2019 г. задействовано 158 угледобывающих предприятий, в том числе 112 разрезов и 53 шахты с общей производительностью 419,2 млн т угля в год. Общая численность персонала всех угледобывающих предприятий за 2018 г. составила 179,1 тыс. человек. В Донбасском регионе шахтные самоспасатели (ШСС) выпускаются единственным производителем – «DEZEGA» (Донецкий завод горноспасательного оборудования) – и в качестве компонента, генерирующего кислород, применяются регенеративные продукты на основе супероксида калия (KO_2), обладающего способностью поглощать из воздуха двуокись углерода и пары влаги и одновременно производить достаточное для дыхания количество кислорода [5, 6]. Состав регенеративного продукта ОКЧ-3: супероксид калия (KO_2) – 85–88 %; оксид кальция (CaO) – 10–15 %; хризотилловый асбест ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – 1,5–2 % [6, 7].



Рис. 2. Шахтный самоспасатель ШСС-1П

Fig. 2. Mine self-extractor SSS-1P

Принцип работы ШСС: пусковое устройство срабатывает при вскрытии самоспасателя, в результате чего выделяется кислород и влага, в аппарате значительно повышается температура. До начала реакции в регенеративном патроне в первые секунды после включения пользователь начинает дышать кислородом, заполнившим дыхательный мешок от пускового устройства. Пары воды, тепло и воздушная смесь, выдыхаемая пользователем, реагируют в регенеративном картридже. Вдыхаемая газовая дыхательная

смесь проходит через гофрированную трубку и теплообменник в регенеративный картридж, дыхательная смесь очищается от диоксида углерода, насыщается кислородом и поступает в дыхательный мешок (обратный процесс идет при вдохе). Избыток дыхательной смеси стравливается через предохранительный клапан.

Срок службы самоспасателя, по данным производителя, гарантированно составляет 5 лет, после его окончания аппарат подлежит утилизации или обез-

вреживанию. По данным Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий в Донецкой Народной Республике (ДНР) необходимость ежегодная утилизация составляет порядка 10 т ШСС, на территории РФ ежегодно образуется более 450 т самоспасателей, утративших потребительские свойства. Однако, несмотря на потребность в обезвреживании такого значительного объема регенеративного продукта, вопросы утилизации отходов самоспасателей с кислородсодержащим веществом остаются нерешенными. Исследования оптимального метода нейтрализации или повторного использования не проводились, более того, использованные аппараты и кислородсодержащий продукт, невзирая на долговременную практику их использования, внесены в Федеральный классификационный каталог отходов (ФККО) как отдельный вид отходов только в 2016 г. [1, 5].

В ФККО указано, что изолирующие самоспасатели с химически связанным кислородом относятся к III классу опасности, согласно Федеральным законам [6, 7] отходы такого класса опасности подлежат утилизации либо обезвреживанию в специализированной организации, имеющей лицензии на сбор, транспортирование, утилизацию и обезвреживание данных отходов.

Для осуществления деятельности по утилизации изолирующих средств индивидуальной защиты органов дыхания специализированные организации должны иметь лицензии Федеральной службой по надзору в сфере природопользования, а также разрешения и технологические регламенты утилизации самоспасателей, согласованные с заводами-изготовителями.

В инструкциях по эксплуатации ШСС производители указывают на необходимость утилизации отработанных и утративших срок годности аппаратов. Требования завода-изготовителя, как правило, ограничиваются необходимостью передачи аппаратов в специализированные организации, имеющие лицензию на их утилизацию (отметим, что в ДНР на 2020 г. такие организации не зарегистрированы). Конкретные методы утилизации или нейтрализации кислородсодержащего регенерата, являющегося токсичным и пожароопасным продуктом, не приводятся. Основной способ утилизации аппаратов на данный момент – разборка ШСС на составляющие части с последующей утилизацией (металлических, пластиковых и резиновых частей) и нейтрализацией кислородсодержащих отходов (регенеративного вещества). Проведенный литературный анализ позволил выявить основные способы обращения с отходами самоспасателей, в табл. 1 отображены их главные проблемы и недостатки.

Таблица 1. Характеристика основных способов обращения с отходами самоспасателей

Table 1. Characteristics of the main methods of disposal of self-rescuers

Наименование способа утилизации самоспасателей Method of disposal of self-rescuers	Сжигание Incineration	Гашение водой с последующим сливом в специальную канализацию Extinguishing with water followed by draining into a special sewer	Нейтрализация путем добавления слабого раствора соляной, серной или азотной кислоты Neutralization by adding a weak solution of hydrochloric, sulfuric or nitric acid	Повторное использование за счет извлечения регенеративного продукта из использованного самоспасателя с последующим применением в новом аппарате Reuse by removing the regenerative product from the used self-rescuer with subsequent use in a new apparatus
Годы применения Years of application	1960–1970	с 1980-х гг. до н.в. from 1980-s till now	с 1990-х гг. до н.в. from 1990-s till now	
Основные недостатки способа Main disadvantages of the method	значительный вред окружающей среде significant harm to the environment	в результате реакции с водой образуется опасная щелочь as a result of reaction with water, dangerous alkali is formed	опасность реакции кислотной утилизации, высокая стоимость Hazard of acid disposal reaction, high cost	низкий процент объема продукта пригоден для повторного использования, остальной дорогостоящий продукт сливается в канализацию после нейтрализации low percentage of product volume is suitable for reuse, the rest of the expensive product is discharged into the sewer after neutralization

При выборе способов утилизации необходимо учитывать, что любые действия с кислородсодержащим веществом представляют значительную опасность в связи с его токсичностью для человека и окружающей среды, а также высокой пожароопасностью и реакционной способностью. Регенеративный продукт способен самовоспламениться, реагировать с влагой из воздуха, превращаясь в опасную концентрированную щелочь с высоким содержанием остаточного кислорода, выделяющегося при растворении или контакте с воздухом. Наиболее распространенные схемы обращения с данными отходами на сегодняшний день:

- повторное использование за счет извлечения регенеративного продукта из самоспасателя с ис-

текшим сроком эксплуатации с последующим применением в новом аппарате, если установлено, что кислородсодержащее вещество не подвергалось воздействию и находится в заводском герметично закрытом брикете [8, 9];

- нейтрализация кислородсодержащего вещества путем обезвреживания кислотным раствором его компонентов реакции. В емкость, наполненную слабым раствором соляной, уксусной, серной или азотной кислоты, после вскрытия брикета пересыпают кислородсодержащий продукт, контролируя pH. По достижении pH 6,5–8,5 раствор сливают в бетонную яму, нерастворимый осадок вывозится на полигон промышленных отходов совместно со строительным мусором.

Опыт работы Сибирского центра утилизации по обезвреживанию самоспасателей показывает, что лишь незначительное количество аппаратов пригодного для повторного использования, около 10 % от всего объема, остальное нужно нейтрализовать. Кислородсодержащее вещество, растворяясь в воде, образует высококонцентрированную щелочь (как правило, гидроксид калия), которая требует большого количества кислоты для нейтрализации, что тре-

бует дополнительных затрат. Кроме того, уничтожаются тонны ценного продукта с высоким содержанием калия.

Супероксид калия – дорогостоящий продукт, который широко используется в таких сферах, как промышленность, городское и сельское хозяйство, охрана окружающей среды и др. Перспективные направления и сферы использования продуктов, содержащих супероксид калия, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Перспективные направления использования продуктов, содержащих супероксид калия

Table 2. Promising areas of application of products based on potassium superoxide

Вещество Substance	Область применения/Application area	Направления применения/Directions of application
Надпероксид калия K ₂ O ₂ Potassium superoxide K ₂ O ₂	Промышленность/Industry	1. Композиции герметических составов. Compositions of hermetic compositions. 2. Отбелка целлюлозосодержащих материалов. Bleaching of cellulose-containing materials. 3. Источник кислорода в металлургии. Oxygen source in metallurgy.
	Сельское хозяйство/Agriculture	1. Ускорение процесса перегнивания. Acceleration of the decay process. 2. Аэрация (оксидация) почвы и воды. Soil and water aeration (oxidation). 3. Ускорение адаптации пересаженных растений. Accelerating the adaptation of transplanted plants.
	Решение военно-прикладных задач Solution of military applications	1. Детоксикация и утилизация токсичных химикатов. Detoxification and disposal of toxic chemicals. 2. Ремедиация загрязнений территорий. Remediation of contaminated areas.
	Охрана окружающей среды Environmental protection	1. Фунгицид для почв (токсинов). Fungicide for soils (toxins). 2. Регулятор pH почвы. Soil pH regulator. 3. Очистка водоемов от ионов металлов. Purification of reservoirs from metal ions. 4. Дезодорирующий агент. Deodorant agent.
	Бытовые нужды Household needs	1. Фармацевтические и косметические препараты. Pharmaceutical and cosmetic preparations. 2. Реагент для очистки воды. Reagent for water purification. 3. Устранение запахов фекальных отходов. Elimination of odors of fecal waste. 4. Препараты для дезинфекции и фунгицидной обработки. Preparations for disinfection and fungicidal treatment.

На ценность кислородсодержащего продукта (супероксида калия) оказывают влияние следующие факторы:

- трудозатраты при производстве;
- высокая опасность и вредность производства;
- дороговизна продукта;
- опасность для человека и окружающей среды;
- обязательная и дорогостоящая утилизация.

Одним из перспективных направлений использования кислородсодержащего продукта отходов самоспасателей в условиях Донбасского региона является применение регенеративного продукта в качестве реагента для очистки и умягчения шахтной воды. Ежедневно шахты откачивают и сбрасывают (после отстаивания) большое количество сточной шахтной воды в водоемы Донбасского региона, данные приведены в табл. 3. Помимо экономических затрат для предприятий (шахт), сточные шахтные воды вносят основной вклад в загрязнение дефицитной воды в поверхностных водоемах региона. Состав шахтных вод

в различных регионах может существенно различаться [10–12].

Очищенная шахтная вода, принимая во внимание дефицит ресурсов пресной воды в Донецкой области, в перспективе может быть применена для восполнения потерь воды в системах коммунального водоснабжения, например, для хозяйственно-бытовых нужд предприятий (шахт). Таким образом, основной целью исследования возможности повторного использования отходов регенеративного продукта самоспасателей является дальнейшее их применение в хозяйственно-бытовых нуждах предприятий.

Методика

Проведены исследования условий удаления из шахтной воды соединений жесткости реагентным методом, а также условия снижения водородного показателя (pH) и показателей электропроводности (κ) воды до нормируемых значений. Обработка шахтной воды проводилась раствором, приготовленным из отходов самоспасателей ШСС-1, содержащих в каче-

стве кислородсодержащего компонента ОКЧ-3 (супероксид калия – 85–88 %), растворенный в дистиллированной воде реагента концентрацией 10 г/дм³. Подготовленный реагент в разных количествах – от 1 до 7 мг-экв/дм³ – постепенно дозировался в пробы шахтной воды, объем шахтной воды с раствором доводил-

ся до 50 мл. Перед исследованием образцы обработанной воды отфильтровывались обеззоленными фильтрами ФМ – 125 мм «синяя лента». Показатели электропроводности измерялись при помощи кондуктометра «Ohaus» ST10C-B, водородный показатель (pH) – с использованием прибора DLS-986.

Таблица 3. Сброс сточных шахтных вод и их компонентный состав

Table 3. Mine waste water discharge and their component composition

Наименование предприятия (шахты) Name of the enterprise (mine)	Количество сбрасываемой воды, м ³ /сутки Discharged water amount, m ³ /day	Содержание в сточных водах, мг/дм ³ Content in wastewater, mg/dm ³				
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Сухой остаток Dry residue	Окисляемость Oxidizability
Лидиевка/Lidievka	1050	370	1488	205	2979	6,4
Запореваляная/Zaprevalnaya	1200	420	2028	–	4428	7,2
Красногвардейская Krasnogvardeyskaya	10000	790	2540	–	6970	142,0
Калининская/Kalininskaya	2750	2750	2200	446	9212	2,1
Бутовка Донецкая Butovka Donetsk	3050	5057	2452	390	13127	22,9
Кировская/Kirovskaya	6850	3062	7206	666	18474	37,7
Центр. Заводская Tsentralno Zavodskaya	10450	2926	8464	1057	22154	–
Засядько/Zasyadko	7400	7770	6216	1184	24938	65,9
Челюскинцев/Chelyuskintsev	11250	9675	24986	8161	45641	79,9
Октябрьская/Oktyabrskaya	17550	8038	17900	2950	53900	230,0
Трудовская/Trudovskaya	11540	9500	20344	3226	62885	72,3

Обсуждение экспериментальных данных

Результаты экспериментальных исследований показателей уровня pH и электропроводности после обработки шахтной воды раствором на основе регенеративного продукта ОКЧ-3 приведены на рис. 3. Снижение электропроводности происходит вследствие осаждения карбоната кальция и гидроксида

магния при добавлении раствора реагента, а последующее ее повышение обусловлено избытком карбонат-ионов после достижения эквивалентности. Исследования поведения карбоната кальция в щелочных и кислых средах, а также при различных механических и физических воздействиях встречаются в работах [13–19].

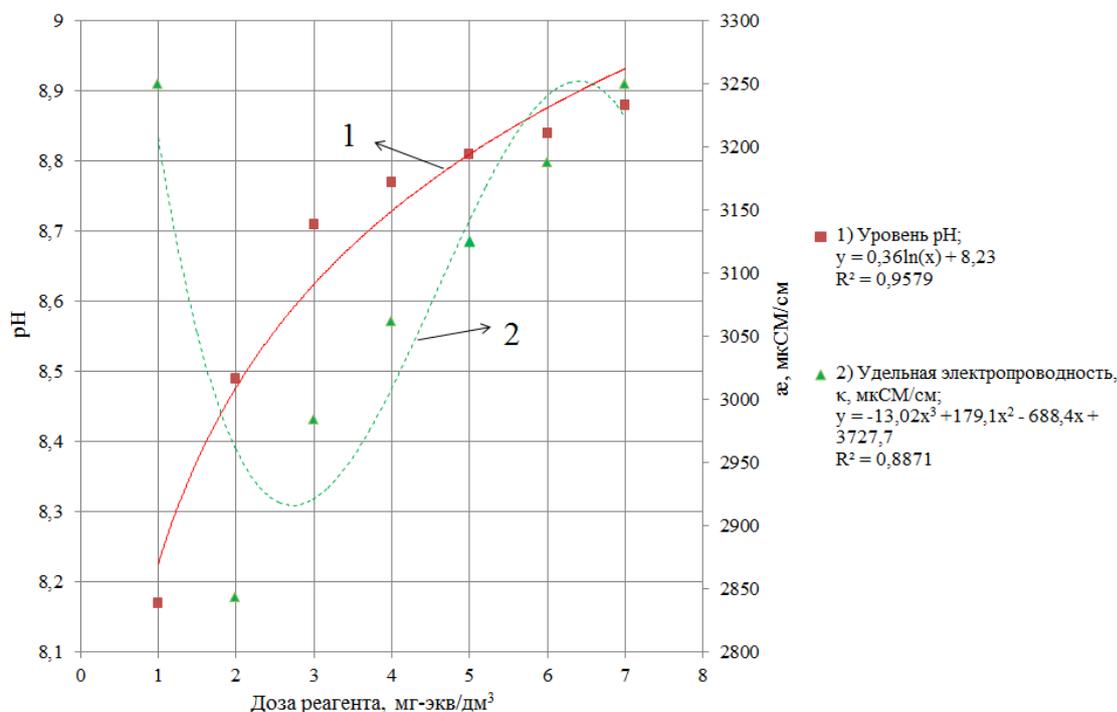


Рис. 3. Показатели электропроводности и pH обработанной шахтной воды раствором из отхода регенеративного продукта

Fig. 3. Indicators of electrical conductivity and pH of the treated mine water with a solution from the waste of the regenerative product

Показатели общей жесткости и щелочности шахтной воды, обработанной раствором на основе отхода кислородсодержащего продукта, приведенные на рис. 4, 5, показывают, что скорость осаждения ионов при обработке шахтной воды раствором реагента достаточно

медленная, на полный цикл осаждения уходит примерно 24 ч. Пропорционально количеству раствора реагента снижается содержание гидрокарбонат-ионов и ионов жесткости, при этом концентрация карбонат-ионов в обработанной шахтной воде увеличивается.

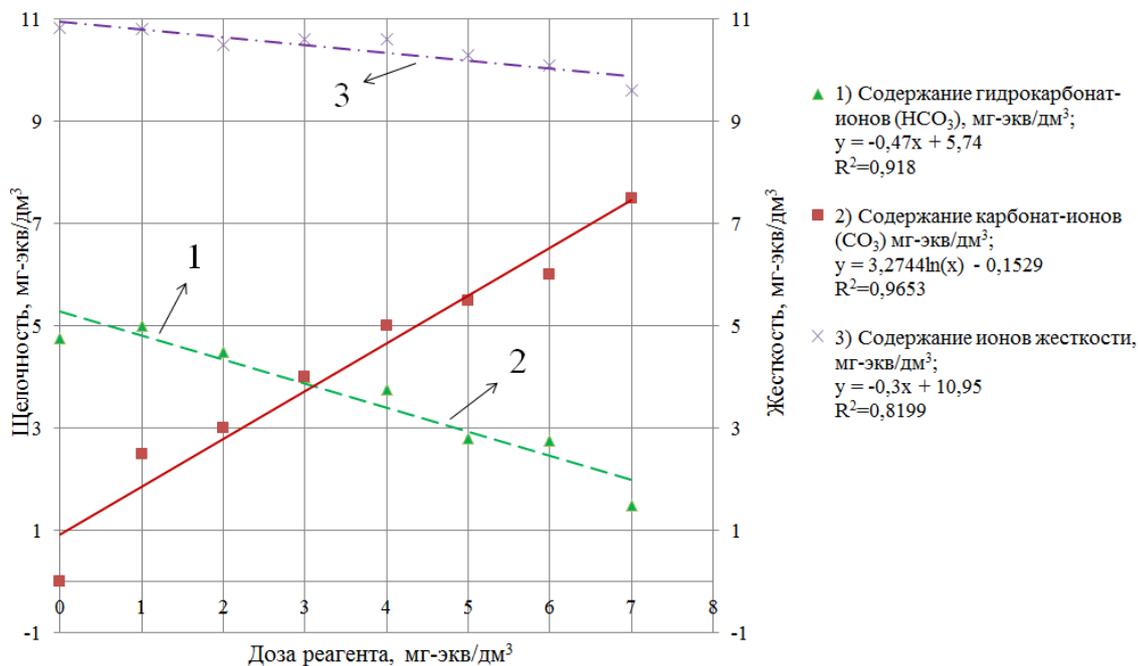


Рис. 4. Показатели общей жесткости и щелочности обработанной шахтной воды раствором из отхода регенеративного продукта ($t=2$ ч)

Fig. 4. Indicators of the total hardness and alkalinity of the treated mine water with a solution from the waste of the regenerative product ($t=2$ h)

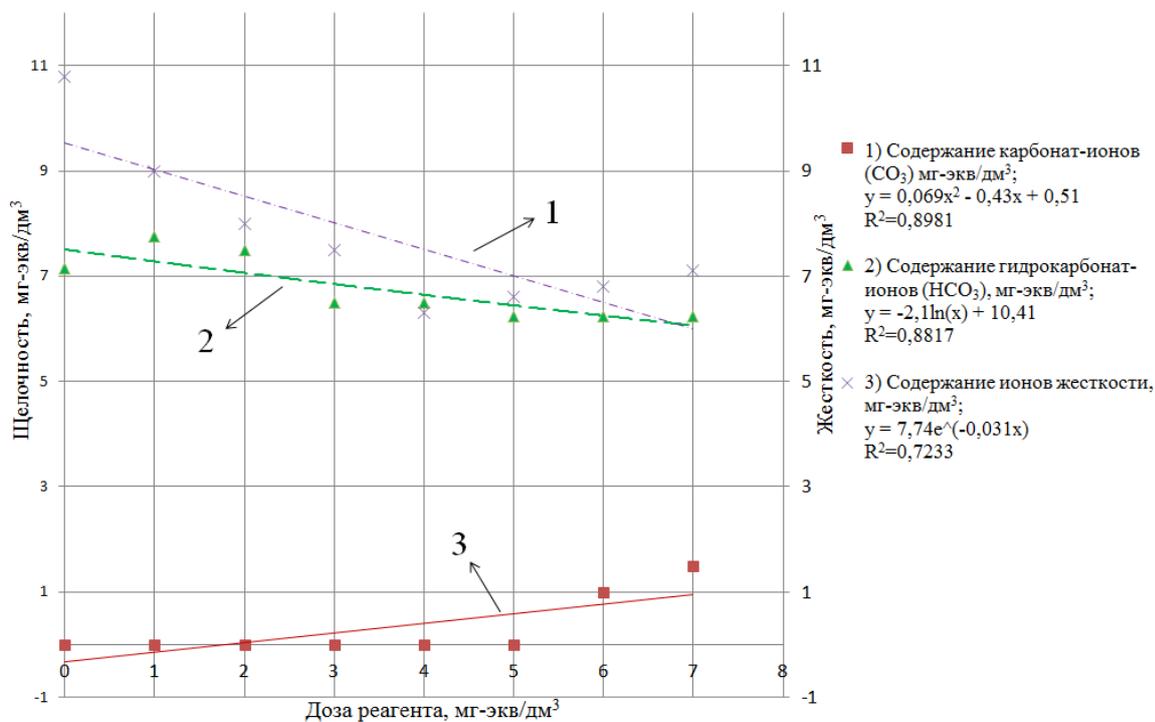
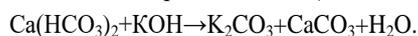


Рис. 5. Показатели общей жесткости и щелочности обработанной шахтной воды раствором из отхода регенеративного продукта ($t=24$ ч)

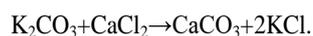
Fig. 5. Indicators of the total hardness and alkalinity of the treated mine water with a solution from the waste of the regenerative product ($t=24$ h)

Представленные на рис. 5 данные отображают уменьшение степени образования карбонат-ионов в шахтной воде, обработанной регенеративным раствором, которая выдерживалась более 24 ч. Вероятно, это связано с наличием в шахтной воде значительного количества двуокси углерода, который со временем удаляется из воды в результате естественной дегазации. Особенности поведения диоксида углерода, а также полного и частичного их удаления из подземных вод рассмотрено в литературных источниках [20, 21].

Высокие показатели снижения карбонатной жесткости шахтной воды при обработке регенеративным раствором объясняются тем, что на первом этапе очистки гидроксид калия (KOH), образующийся в результате растворения ОКЧ-3 в дистиллированной воде (раздел Методика), вступая в реакцию с гидрокарбонатом кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, формирует новые соединения, такие как карбонат калия (K_2CO_3):



Образовавшийся в результате реакции карбонат калия дополнительно осаждает соли хлорида калия (CaCl_2), таким образом увеличивая показатели умягчения шахтной воды:



Аналогично должно происходить снижение магниевой жесткости за счет реакции гидроксида калия с ионами магния.

Проведенные исследования показали, что шахтная вода Донбасского региона, типичными представителями которой являются шахты им. М.И. Калинина, им. А.Ф. Засядько, Челюскинцев и т.д., умягченная отходами регенеративных продуктов самоспасателей пригодна для использования в хозяйственно-бытовых целях, после ее подготовки. Обычно для очистки воду обрабатывают аналогичным по действующим свойствам гидроксиду калия более доступным раствором едкого натра (гидроксид натрия). Процессы и результаты исследования по осаждению солей жесткости (карбоната кальция) подробно описаны в литературных источниках [22–26]. Оценивая экономический эффект от результата умягчения воды с применением отхода ОКЧ-3, необходимо учитывать следующие факторы. По известным причинам реагенты для очистки воды ввозятся из РФ, стоимость едкого натра в Донецке составляет примерно 32000 р. за тонну. Показатель

жесткости исследуемой воды для коммунальных нужд после осветления и обеззараживания составляет примерно 13 г-экв/т. Обработывая воду аналогичным по свойствам и применяющимся повсеместно едким натром, при удельном расходе 1,0 г-экв/г-экв затраты на него составят 37 г-экв/т, или 2,04 кг/т умягченной воды. Следовательно, на реагенты для умягчения воды при ее потреблении 2,59 тыс. м³ в год потребуется затратить $2,59 \times 10^5 \times 3,2 \times 10^{-3} \cdot 2,04 = 406$ тыс. р. в год для предприятия. Итоговая экономия для предприятия с учетом стоимости потребляемой воды, а также платы за стоки может составить порядка 815 тыс. р. в год. Очистка шахтной воды отходом ШСС по полученным данным позволяет снизить жесткость воды до нормативного значения – не более 7 г-экв/т, соответственно, сэкономить на стоимости реагентов и утилизировать отход III класса опасности. Также необходимо учитывать последующее сокращение потребления дефицитной для региона воды из канала Северский Донец-Донбасс, в перспективе получится сэкономить $2,59 \times 10^5 \times 12,72 = 3,29$ млн р. в год.

Выводы

1. В угледобывающей промышленности Донбасса (ДНР) ежегодно накапливается большое количество отходов индивидуального аварийно-спасательного оборудования (самоспасателей), представляющих как высокую опасность (III класс опасности), так и материальную ценность как реагент, который может быть использован для умягчения воды.
2. Установлено, что очистка шахтных вод отходами регенеративного продукта шахтных самоспасателей обеспечивает высокую степень умягчения шахтных вод.
3. Экспериментально установлено, что шахтные воды Донбасского региона, обработанные регенерирующим средством, соответствуют требованиям к использованию в хозяйственных целях и при дозе реагента 4 мг-экв/дм³ имеют следующие показатели качества: электропроводность – 2891 мкСм/см; водородный показатель (рН)=8,66; Ж=6,3 мг-экв/дм³; $\text{CO}_3^{2-}=0$; $\text{HCO}_3^- = 6,5$ мг-экв/дм³.
4. Повторное использование кислородсодержащего продукта отходов самоспасателей для предприятия в качестве реагента для очистки шахтной воды может приносить экономическую выгоду около 815 тыс. р. в год.
4. Nemtsev A.V., Westmoreland E.M. Actual issues on using of insulating industrial self-rescuers. Self-rescuers on chemically bound oxygen // Labor Safety in Industry. – 2013. – V. 2. – P. 62–66.
5. Гудков С.В., Милосердов А.В. Средства защиты органов дыхания подземного персонала угольных шахт – современное состояние и перспективы развития с учетом мирового опыта // Системы и технологии жизнеобеспечения, индикации, химической разведки и защиты человека от негативного воздействия факторов химической природы: Материалы Международной научно-практической конференции. – Тамбов, 2013. – С. 118–119.
6. Федеральный закон Российской Федерации от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ (с изменениями на 26 июля 2019 года) «Об отходах производства и потребления». – М.: Кремль, 1998. – 11 с.
7. Федеральный закон Российской Федерации от 4 мая 2011 г. № 99-ФЗ (с изменениями на 31 июля 2020 года) «О лицензи-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guidelines for National Waste Management Strategies: moving from challenges to opportunities // Docslide. 2014. URL: https://cwm.unitar.org/national-profiles/publications/cw/wm/UNEP_UNITAR_NWMS_English.pdf. (дата обращения 30.11.2020).
2. Hoornweg D., Bhada-Tata P., Kennedy C. Environment: waste production must peak this century // Nature. – 2013. – V. 502. – P. 7473. DOI: 10.1038/502615a
3. Плотников Д.А. Анализ проблемы образования отходов шахтных самоспасателей на химически связанном кислороде в условиях ДНР // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность. – 2019. – Вып. 139. – № 5. – С. 26–31.

- ровании отдельных видов деятельности» – М.: Кремль, 2011. – 62 с.
8. Зеленцова В.В., Неверова О.А. Утилизация регенеративного калийсодержащего продукта шахтных самоспасателей // Сборник статей по материалам VIII международной научно-практической конференции. – Томск, 2017. – С. 13–18.
 9. Improving self-rescue equipment // Docslide. 2015. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:850140/FULLTEXT01.pdf>. (дата обращения 02.12.2020).
 10. Jarosite versus soluble iron-sulfate formation and their role in acid mine drainage formation at the Pan de Azúcar Mine tailings (Zn-Pb-Ag), NW Argentina / J. Murray, A. Kirschbaum, B. Dold, E.M. Guimaraes, E.P. Miner // Minerals. – 2014. – V. 4 (2). – P. 477–502.
 11. Environmental geochemistry and quality assessment of mine water of Jharia coalfield, India / A.K. Singh, M.K. Mahato, B. Neogi, B.K. Tewary, A. Sinha // Environmental Earth Sciences. – 2012. – V. 65 (1). – P. 49–65.
 12. Multivariate statistical analysis of water chemistry in evaluating groundwater geochemical evolution and aquifer connectivity near a large coal mine, Anhui, China / J. Qian, L. Wang, L. Ma, Y.H. Lu, W. Zhao, Y. Zhang // Environmental Earth Sciences. – 2016. – V. 75 (9). – № 747.
 13. Mitigation of CaCO₃ scale formation in pipes under influence of vibration and additives / W. Mangestiyono, S. Muryanto, J. Jamari, A.P. Bayuseno // Rasayan J. Chem. – 2019. – V. 12 (1). – P. 192–204. URL: <http://dx.doi.org/10.31788/RJC.2019.1215055> (дата обращения 03.12.2020).
 14. Mechanistic study of the synergetic inhibiting effects of Zn²⁺, Cu²⁺ and Mg²⁺ ions on calcium carbonate precipitation / S. Benslimane, K.-E. Bouhidel, A. Ferfache, S. Farhi // Water Research. – 2020. – V. 186. – № 116323.
 15. Effect of silica nanoparticles to prevent calcium carbonate scaling using an in situ turbidimetre / W.N. Al Nasser, U.V. Shah, K. Nikiforou, P. Petrou, J.Y.Y. Heng // Chemical Engineering Research and Design. – 2016. – V. 110. – P. 98–107.
 16. Influence of alternating electromagnetic field and ultrasonic on calcium carbonate crystallization in the presence of magnesium ions / Y. Han, C. Zhang, L. Wu, Q. Zhang, L. Zhu, R. Zhao // Journal of Crystal Growth. – 2018. – V. 499. – P. 67–76.
 17. Scale inhibition properties of metallic cations on CaCO₃ formation using fast controlled precipitation and a scaling quartz microbalance / M. Gritli, H. Cheap-Charpentier, O. Horner, H. Perrot, Y.B. Amor // Desalination and Water Treatment. – 2019. – V. 167. – P. 113–121.
 18. The use of the cavitation effect in the mitigation of CaCO₃ Deposits / D. Heath, B. Širok, M. Hocevar, B. Pecnik // Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering. – 2013. – V. 59 (4). – P. 203–215.
 19. Kiaei Z., Haghtalab A. Experimental study of using Ca-DTPMP nanoparticles in inhibition of CaCO₃ scaling in a bulk water process // Desalination. – 2014. – V. 338. – P. 84–92. DOI: 10.1016/j.desal.2014.01.027
 20. Calcium carbonate precipitation for CO₂ storage and utilization: a review of the carbonate crystallization and polymorphism / R. Chang, S. Kim, S. Lee, S. Choi, M. Kim, Y. Park // Frontiers in Energy Research. – 2017. – V. 5. – № 17.
 21. Solving the carbon-dioxide buoyancy challenge: the design and field testing of a dissolved CO₂ injection system / B. Sigfusson, S.R. Gislason, J.M. Matter, et al. // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2015. – V. 37. – P. 213–219.
 22. Calcium carbonate scale formation in pipes: effect of flow rates, temperature, and malic acid as additives on the mass and morphology of the scale / S. Muryanto, A. Bayuseno, H. Ma'mun, M. Usamah, Jotho // Procedia Chemistry. – 2014. – V. 9. – P. 69–76. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.05.009> (дата обращения 04.12.2020).
 23. Formation and inhibition of calcium carbonate crystals under cathodic polarization conditions / K. Sheng, H. Ge, X. Huang, Y. Zhang, Y. Song, F. Ge, Y. Zhao, X. Meng // Crystals. – 2020. – V. 10 (4). – № 275.
 24. Calcium carbonate scale formation in copper pipes on laminar flow / S. Raharjo, A. Bayuseno, J. Jamari, S. Muryanto // Chemical Engineering & Food Technology. – 2016. – V. 58. – № 01029. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165801029> (дата обращения 02.12.2020).
 25. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling / M. Chaussemier, E. Pourmohtasham, D. Gelus, N. Pécoul, H. Perrot, J. Lédon, H. Cheap-Charpentier, O. Horner // Desalination. – 2015. – V. 58. – P. 47–55.
 26. Calcium carbonate fouling on double-pipe heat exchanger with different heat exchanging surfaces / K.H. Teng, S.N. Kazi, A. Amiri, A.F. Habali, M.A. Bakar, B.T. Chew, A. Al-Shamma'a, A. Shaw, K.H. Solangi, G. Khan // Powder Technology. – 2017. – V. 315. – P. 216–226.

Поступила 16.06.2021 г.

Информация об авторах

Высоцкий С.П., доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Плотников Д.А., ассистент кафедры техносферной безопасности Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Мамаев В.В., доктор технических наук, профессор Государственного научно-исследовательского института горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР.

UDC 622.867.324:658.567.1

USE OF SELF-RESCUE WASTE ON CHEMICALLY BOND OXYGEN TO REDUCE THE CARBONATE HARDNESS OF MINING WATER

Sergey P. Vysotskii¹,
sp.vysotsky@gmail.com

Denis A. Plotnikov¹,
d.a.plotnikov@donnasa.ru

Valery V. Mamaev²,
respirator@mail.dnmchs.ru

¹ Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavin street, Makiivka, 286123, Ukraine.

² «Respirator» State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR,
157, Artema street, Donetsk, 283048, Ukraine.

The relevance of the research. In the coal mining industry of the Donbass region, there is a need to use large quantities of personal rescue equipment, which contain regenerative products. At present time, the necessary procedure for this waste disposal is not provided in this region. Thus, naturally, there is an unorganized accumulation of a product containing potassium superoxide that is dangerous for humans and the environment. The above mentioned product is also valuable and expensive. The second acute environmental problem of the region is the formation of a large amount of mine water at coal mining enterprises and their subsequent discharge into surface water bodies. One of the stages of mine water purification for its subsequent use in economic cycles is softening (reduction of total hardness). For these purposes, substances similar to the waste of regenerative products of self-rescuers, for example, lime and sodium carbonate in settlers and clarifiers, are commonly used. Such a reuse scheme would be a profitable and modern approach to the environmental safety of the region.

The main aim of the research is to study the possibility of re-using the waste of a regenerative product of unsuitable self-rescuers for their further use in the household needs of enterprises.

Object: waste from chemically bound oxygen self-rescuers based on potassium superoxide, mine waters of the Donbass region.

Methods: experimental research on the softening of mine water by waste of mine self-rescuers regenerative product on chemically bound oxygen by the reagent method.

Results. It has been experimentally determined that the treatment of mine water with waste of the regenerative product of mine self-rescuers provides a high degree of mine water softening. Mine waters of Donbass region treated with a regenerative product meet the requirements for use in household purposes and have the following quality indicators: specific conductivity – 2891 $\mu\text{S}/\text{cm}$; pH=8,66; hardness=6,3 mg-eq/dm³; CO₃²⁻=0; HCO₃⁻=6,5 mEq/dm³, with a reagent dose of 4 mg-eq/dm³.

Key words:

Mine self-rescuers, waste disposal, regenerative product, potassium superoxide, mine water.

REFERENCES

- Guidelines for National Waste Management Strategies: Moving from Challenges to Opportunities. *Docslide*. 2014. Available at: https://cwm.unitar.org/national-profiles/publications/cw/wm/UNEP_UNITAR_NWMS_English.pdf. (accessed 30 November 2020).
- Hoornweg D., Bhada-Tata P., Kennedy C. Environment: waste production must peak this century. *Nature*, 2013, vol. 502, 7473. DOI: 10.1038/502615a
- Plotnikov D.A. Analysis of the problem of waste formation of mine self-rescuers on chemically bound oxygen in the conditions of DPR. *Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2019, vol. 5 (139), pp. 26–31. In Rus.
- Nemtsev A.V., Westmoreland E.M. Actual issues on using of insulating industrial self-rescuers. Self-rescuers on chemically bound oxygen. *Labor Safety in Industry*, 2013, vol. 2, pp. 62–66.
- Gudkov S.V., Miloserdov A.V. Sredstva zashchity organov dykhaniya podzemnogo personala ugolnykh shakht – sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya s uchetom mirovogo opyta [Respiratory protection equipment for underground personnel of coal mines – current state and development prospects taking into account world experience]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sistemy i tekhnologii zhizneobespecheniya, indikatsii, khimicheskoy razvedki i zashchity cheloveka ot negativnogo vozdeystviya faktorov khimicheskoy prirody* [Materials of the International Scientific and Practical Conference. Systems and Technologies of Life Support, Indication, Chemical Intelligence and Human Protection from the Negative Impact of Chemical Factors]. Tambov, Tambov State Technical University, 2013. pp. 118–119.
- Federalny zakon Rossiyskoy Federatsii ot 24 iyunya 1998 g. № 89-FZ (s izmeneniyami na 26 iyulya 2019 goda) «Ob ot-khodakh proizvodstva i potrebleniya»* [Federal Law of the Russian Federation of June 24, 1998 No. 89-FZ (as amended on July 26, 2019) «On production and consumption waste»]. (1998, June 24). Moscow, Kremlin Publ., 1998. 11 p.
- Federalny zakon Rossiyskoy Federatsii ot 4 maya 2011 g. № 99-FZ (s izmeneniyami na 31 iyulya 2020 goda) «O litsenzirovanii otdelnykh vidov deyatelnosti»* [Federal Law of the Russian Federation of May 4, 2011 No. 99-FZ (as amended on July 31, 2020) «On licensing certain types of activities»]. Moscow, Kremlin Publ., 2011. 62 p.
- Zelentsova V.V., Neverova O.A. Utilizatsiya regenerativnogo kaliysoderzhashchego produkta shakhtnykh samospasateley [Utilization of the regenerative potassium-containing product of mine self-rescuers]. *Sbornik statey po materialam VIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of articles based on the materials of the VIII international scientific and practical conference]. Tomsk, 2017. P. 1. pp. 13–18.
- Improving self-rescue equipment. *Docslide*. 2015. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:850140/FULLTEXT01.pdf> (accessed 2 December 2020).
- Murray J., Kirschbaum A., Dold B., Guimaraes E.M., Miner E.P. Jarosite versus soluble iron-sulfate formation and their role in acid

- mine drainage formation at the Pan de Azúcar Mine tailings (Zn-Pb-Ag), NW Argentina. *Minerals*, 2014, vol. 4 (2), pp. 477–502.
11. Singh A.K., Mahato M.K., Neogi B., Tewary B.K., Sinha A. Environmental geochemistry and quality assessment of mine water of Jharia coalfield, India. *Environmental Earth Sciences*, 2012, vol. 65 (1), pp. 49–65.
 12. Qian J., Wang L., Ma L., Lu Y.H., Zhao W., Zhang Y. Multivariate statistical analysis of water chemistry in evaluating groundwater geochemical evolution and aquifer connectivity near a large coal mine, Anhui, China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75 (9), no. 747.
 13. Mangestiyono W., Muryanto S., Jamari J., Bayuseno A.P. Mitigation of CaCO₃ scale formation in pipes under influence of vibration and additives. *Rasayan J. Chem.*, 2019, vol. 12, vol. 1, pp. 192–204. Available at: <http://dx.doi.org/10.31788/RJC.2019.1215055> (accessed 3 December 2020).
 14. Benslimane S., Bouhidel K.-E., Ferfache A., Farhi S. Mechanistic study of the synergetic inhibiting effects of Zn²⁺, Cu²⁺ and Mg²⁺ ions on calcium carbonate precipitation. *Water Research*, 2020, vol. 186, no. 116323.
 15. Al Nasser W.N., Shah U.V., Nikiforou K., Petrou P., Heng J.Y.Y. Effect of silica nanoparticles to prevent calcium carbonate scaling using an in situ turbidimeter. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, vol. 110, pp. 98–107.
 16. Han Y., Zhang C., Wu L., Zhang Q., Zhu L., Zhao R. Influence of alternating electromagnetic field and ultrasonic on calcium carbonate crystallization in the presence of magnesium ions. *Journal of Crystal Growth*, 2018, vol. 499, pp. 67–76.
 17. Gritli M., Cheap-Charpentier H., Horner O., Perrot H., Amor Y.B. Scale inhibition properties of metallic cations on CaCO₃ formation using fast controlled precipitation and a scaling quartz microbalance. *Desalination and Water Treatment*, 2019, vol. 167, pp. 113–121.
 18. Heath D., Širok B., Hocevar M., Pecnik B. The use of the cavitation effect in the mitigation of CaCO₃ Deposits. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 2013, vol. 59 (4), pp. 203–215.
 19. Kiae, Z., Haghtalab A. Experimental study of using Ca-DTPMP nanoparticles in inhibition of CaCO₃ scaling in a bulk water process. *Desalination*, 2014, vol. 338, pp. 84–92. DOI: 10.1016/j.desal.2014.01.027
 20. Chang R., Kim S., Lee S., Choi S., Kim M., Park Y. Calcium carbonate precipitation for CO₂ storage and utilization: A review of the carbonate crystallization and polymorphism. *Frontiers in Energy Research*, 2017, vol. 5, no. 17.
 21. Sigfusson B., Gislason S.R., Matter J.M. Solving the carbon-dioxide buoyancy challenge: the design and field testing of a dissolved CO₂ injection system. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, vol. 37, pp. 213–219.
 22. Muryanto S., Bayuseno A., Ma'mun H., Usamah M., Jotho. Calcium carbonate scale formation in pipes: effect of flow rates, temperature, and malic acid as additives on the mass and morphology of the scale. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 9, pp. 69–76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.05.009> (accessed 4 December 2020).
 23. Sheng K., Ge H., Huang X., Zhang Y., Song Y., Ge F., Zhao Y., Meng X. Formation and Inhibition of Calcium Carbonate Crystals under Cathodic Polarization Conditions. *Crystals*, 2020, vol. 10 (4), no. 275.
 24. Raharjo S., Bayuseno A., J. Jamari, Muryanto S. Calcium carbonate scale formation in copper pipes on laminar flow. *Chemical Engineering & Food Technology*, 2016, vol. 58, no. 01029. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165801029> (accessed 2 December 2020).
 25. Chaussemier M., Pourmohtasham E., Gelus D., Pécoul N., Perrot H., Lédion J., Cheap-Charpentier H., Horner O. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. *Desalination*, 2015, vol. 58, pp. 47–55.
 26. Teng K.H., Kazi S.N., Amiri A., Habali A.F., Bakar M.A., Chew B.T., Al-Shamma'a A., Shaw A., Solangi K.H., Khan G. Calcium carbonate fouling on double-pipe heat exchanger with different heat exchanging surfaces. *Powder Technology*, 2017, vol. 315, pp. 216–226.

Received: 16 June 2021.

Information about the authors

Sergey P. Vysotskii, Dr. Sc., professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture.

Denis A. Plotnikov, assistant, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture.

Valery V. Mamayev, Dr. Sc., professor, «Respirator» State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR.

УДК 621.313.2: 621.7.08

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОЩЕТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Харламов Виктор Васильевич¹,
etmoe@omgups.ru

Попов Денис Игоревич¹,
etmoe@omgups.ru

Байсадыков Марсель Фаритович¹,
etmoe@omgups.ru

¹ Омский государственный университет путей сообщения,
Россия, 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Актуальность исследования определяется необходимостью повышения надежности работы подвижного состава (карьерных самосвалов), обеспечивающего добычу угля открытым способом. Такую же актуальность данная проблема имеет в отрасли железнодорожных перевозок – на подвижном составе железных дорог. Безотказность работы подвижного состава определяется надежностью функционирования его отдельных узлов. Как известно из анализа отказов подвижного состава транспортных средств с коллекторными тяговыми электродвигателями, одним из критичных элементов для них является щеточный аппарат. Известные способы прогнозирования не используют в полной мере возможности современных бортовых систем мониторинга режимов работы тяговых электродвигателей. Следовательно, актуальной задачей является повышение точности прогнозирования остаточного ресурса электрощеток за счет учета показателей режимов работы, фиксируемых бортовой системой мониторинга.

Цель: разработка способа прогнозирования остаточного ресурса электрощеток тяговых электродвигателей карьерных самосвалов с учетом показателей режимов работы, получаемых от бортовой системы мониторинга.

Объект: электрощетки тяговых электродвигателей карьерных самосвалов.

Методы: проведение математического анализа данных бортовых систем мониторинга, математическое моделирование процесса изнашивания электрощеток, синтез способа прогнозирования остаточного ресурса щеток тягового электродвигателя.

Результаты. Разработан способ прогнозирования остаточного ресурса щеток тяговых электродвигателей, позволяющий учесть показатели режимов работы в условиях реальной эксплуатации. Повышена точность определения остаточного ресурса электрощеток за счет применения в процессе прогнозирования массивов данных, полученных от бортовой системой мониторинга. Разработан алгоритм прогнозирования, который может быть применен в бортовых электронных системах подвижного состава для индикации остаточного ресурса электрощеток.

Ключевые слова:

Карьерный самосвал, тяговый электродвигатель, износ электрощеток, прогнозирование остаточного ресурса, массивы данных, система мониторинга, математическое моделирование.

Введение

По данным Министерства энергетики РФ за последние десять лет, за исключением 2020 г., наблюдается устойчивый рост добычи угля в Российской Федерации (рис. 1) [1]. Значительная часть добычи осуществляется открытым способом на угольных карьерах с применением автосамосвалов. Согласно Программе развития угольной промышленности до 2035 г. планируется увеличить добычу угля до 485–685 млн т в год [2].

Решение задачи обеспечения бесперебойной добычи угля на угольных карьерах невозможно без контроля технического состояния и осуществления своевременного обслуживания и ремонта карьерных самосвалов. Аналогичная задача стоит для железнодорожного транспорта в рамках обеспечения надежного функционирования подвижного состава (электропоездов, тепловозов и др.). Как показывает анализ статистических данных по отказам подвижного состава с

коллекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД), в обеих названных отраслях промышленности повышенный износ щеток и неисправности, связанные с коллекторно-щеточным узлом наряду с повреждениями подшипниковых узлов и изоляции токопроводящих частей, являются наиболее частыми [3–6] (рис. 2).

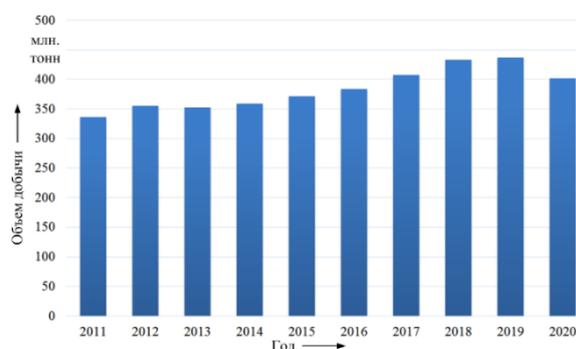


Рис. 1. Объем добычи угля в России в 2011–2020 гг.

Fig. 1. Volume of coal production in Russia in 2011–2020



Рис. 2. Статистика отказов ТЭД постоянного тока карьерных самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 220 т
Fig. 2. Failure statistics of DC traction motors of BelAZ dump trucks with a carrying capacity of 220 tons

Как показывает анализ статистики отказов коллекторных ТЭД карьерных самосвалов БЕЛАЗ, значительная доля отказов приходится на повреждения коллектора и щеточного аппарата, из которых каждый четвертый приходится непосредственно на щеточный аппарат.

С точки зрения возможной тяжести последствий выхода из строя коллекторно-щеточный узел может быть назван критическим элементом [7].

Текущее состояние разработанности проблемы

Известны различные способы определения ресурса работы щеток коллекторных электродвигателей, которые сводятся к сравнению текущей ($l_{щ}$) и допустимой высоты щетки $l_{щ,д}$ и вычислению интенсивности ее изнашивания $\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$ [8–11]. Зная данные величины, можно определить ресурс щеток по выражению:

$$T_{щ,р} = \frac{l_{щ} - l_{щ,д}}{\frac{\Delta I}{\Delta t}}. \quad (1)$$

Математическая модель процесса изнашивания электрощеток представляет собой выражение, в котором интенсивность износа складывается из трех составляющих – фрикционной $\left(\frac{\Delta I_{ф}}{\Delta t}\right)$, электрокоррозионной $\left(\frac{\Delta I_{к}}{\Delta t}\right)$ и электроэрозионной $\left(\frac{\Delta I_{эр}}{\Delta t}\right)$ [11–13]:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = K_{ф} n N_{к,ср} + K_{к} \cdot n^4 I_{щ}^2 N_{к,ср} + K_{эр} n P_{щ},$$

где $K_{ф}$, $K_{к}$, $K_{эр}$ – имеющие размерность коэффициенты, определяющие интенсивность соответствующих составляющих износа, зависящие от конструктивных параметров коллекторно-щеточного узла; n – частота вращения якоря, об/мин; $N_{к,ср}$ – среднее нажатие щетки на коллектор, принимаемое равным среднему нажатию рычага щеткодержателя на щетку $N_{р,ср}$, Н; $I_{щ}$ – сила тока, проходящего по щетке, А; $P_{щ}$ – мощность искрения, о. е.

Различные способы определения ресурса работы электрощеток имеют свои недостатки. Наиболее обоснованным с точки зрения простоты и точности практического определения коэффициентов $K_{ф}$, $K_{к}$, $K_{эр}$ является способ, приведенный в [12]. В соответствии с данным способом в связи с нелинейной зависимостью электрокоррозионной составляющей от силы нажатия ($N_{к}$) предложено учитывать колебания данной силы, обусловленные воздействием профиля коллектора, путем математического моделирования движения щетки в щеткодержателе. При описании данного способа в [12] обосновано применение математической модели механического взаимодействия щетки с коллектором в двух степенях свободы, представляющее собой систему из двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + F_{трщ1}(y, \dot{z}) + F_{трщ2}(y, \dot{z}) - \\ - N_p - Mg + N_k(y, z, \eta) = 0; \\ M\ddot{y} + F_{трр}(N_p, \dot{y}) + F_{трк}(N_k, \dot{y}) - Y_1(y) + Y_2(y) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где z , y – обобщенные координаты щетки по вертикальной и горизонтальной осям; M – масса щетки с учетом массы рычага щеткодержателя; $F_{трр}$, $F_{трк}$ – сила трения между щеткой и рычагом щеткодержателя и между щеткой и коллектором; N_p – сила нажатия на щетку; g – ускорение свободного падения на поверхности Земли; η – одномерная матрица со значениями высот всех коллекторных пластин (профиль коллектора); $F_{трщ1}$, $F_{трщ2}$ – силы трения между щеткой и стенками щеткодержателя; Y_1 , Y_2 – горизонтальные упругие силы в местах контакта щетки со стенками щеткодержателя.

Приведенная математическая модель механического взаимодействия щетки с коллектором позволяет получить массивы данных со значениями силы воздействия профиля коллектора на щетку $N_{к}$, изменяющейся в процессе вращения якоря, и построить диаграмму плотности вероятности распределения данной силы по заданным интервалам.

С учетом механического взаимодействия щетки с коллектором электрокоррозионная составляющая интенсивности износа принимает вид:

$$\frac{\Delta I_k}{\Delta t} = K_k n^4 I_{щ}^2 \left(\sum_j (N_{kj} P(N_{kj})) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где $P(N_{kj})$ – плотность вероятности нахождения значения силы N_k в j -м диапазоне.

Постановка проблемы

Известные способы позволяют определить ресурс работы щеток коллекторных электродвигателей только для усредненных показателей режимов работы, влияющих на износ (сила тока $I_{щ}$, частота вращения якоря n , мощность искрения $P_{и}$) [14–17]. Однако, исходя из представленной выше математической модели процесса изнашивания электрощеток, зависимость ее износа (ΔI) от силы проходящего по ней тока ($I_{щ}$) и частоты вращения якоря (n) является нелинейной [14]. Следовательно, при эксплуатации тяговых электродвигателей с варьированием данных показателей с большими отклонениями в широком диапазоне применение усредненных значений показателей $I_{щ}$ и n при моделировании процесса изнашивания неприемлемо.

В настоящее время самосвалы и новый подвижной состав железных дорог оснащаются системами мониторинга показателей режимов работы. Данные системы в режиме реального времени осуществляют измерение и запись широкого набора показателей режимов работы, в число которых у карьерных самосвалов входят: ток якоря, скорость вращения якоря и интенсивность искрения, у локомотивов – ток якоря и скорость движения. При известных параметрах коллекторно-щеточного узла, зная ток якоря, можно рассчитать силу тока $I_{щ}$, проходящего по щетке. По известным диаметру колеса, передаточному числу тягового редуктора и скорости движения может быть найдена частота вращения якоря n . Интенсивность искрения, измеренная в баллах по ГОСТ 2582-2013 [18], может быть переведена в мощность искрения в относительных единицах. Функциональную зависимость данных величин можно получить после обработки результатов коммутационных испытаний на соответствующем тяговом двигателе с применением прибора контроля коммутации [19, 20].

Таким образом, массивы данных, формируемые системами мониторинга, могут быть применены для формирования прогноза по износу электрощеток с учетом режимов работы тяговых электродвигателей в реальных условиях эксплуатации.

Обработка данных, полученных системой мониторинга параметров режимов работы

Пример временных диаграмм, полученных системой мониторинга параметров режимов работы, приведен на рис. 3.

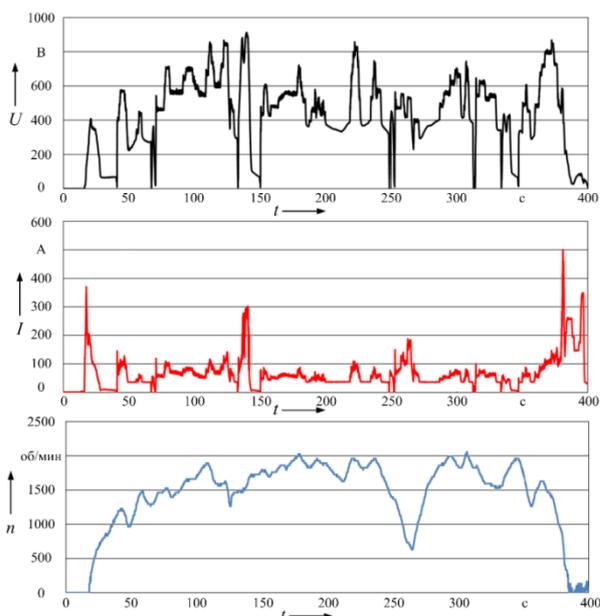


Рис. 3. Временные диаграммы показателей режима работы тягового электродвигателя, полученные бортовой системой мониторинга карьерного самосвала

Fig. 3. Time diagrams of the traction motor operating mode indicators obtained by the on-board monitoring system of the mining dump truck

Массивы данных, полученные с применением бортовых систем мониторинга, позволяют получить диаграммы распределения показателей режимов работы. Примеры полученных распределений мощности искрения под щетками тяговых двигателей карьерных самосвалов приведены на рис. 4.

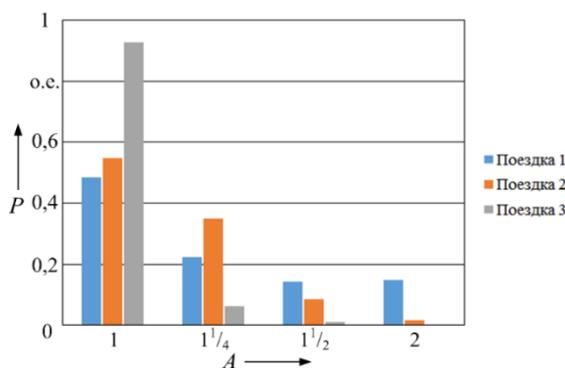


Рис. 4. Распределения интенсивности искрения щеток ТЭД карьерных самосвалов, работающих на различных угольных разрезах

Fig. 4. Distribution of sparking intensity of traction motors brushes of mining dump trucks operating at various coal mines

Примеры распределений показателей режимов работы, фиксируемых системами мониторинга, полученные для тяговых двигателей электровозов, тепловозов и карьерных самосвалов, приведены на рис. 5.

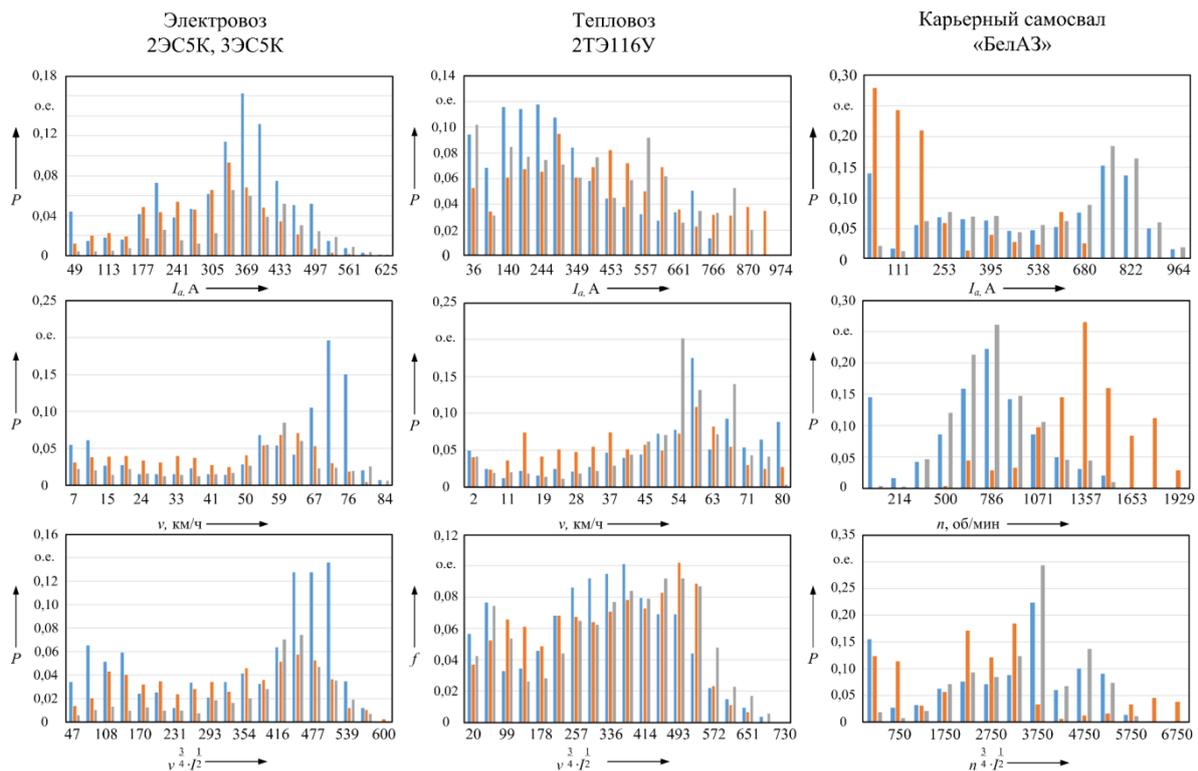


Рис. 5. Распределения показателей режимов работы тяговых электродвигателей электровозов, тепловозов и карьерных самосвалов

Fig. 5. Distributions of indicators of operating modes of traction electric motors of electric locomotives, diesel locomotives and mining dump trucks

Предлагаемый способ прогнозирования остаточного ресурса электрощеток тяговых электродвигателей и алгоритм его реализации

При наличии обработанных массивов данных, полученных от бортовой системы мониторинга показате-

лей режимов работы ТЭД, может быть реализован следующий способ прогнозирования остаточного ресурса электрощеток, иллюстрируемый блок-схемой алгоритма, приведенной на рис. 6.

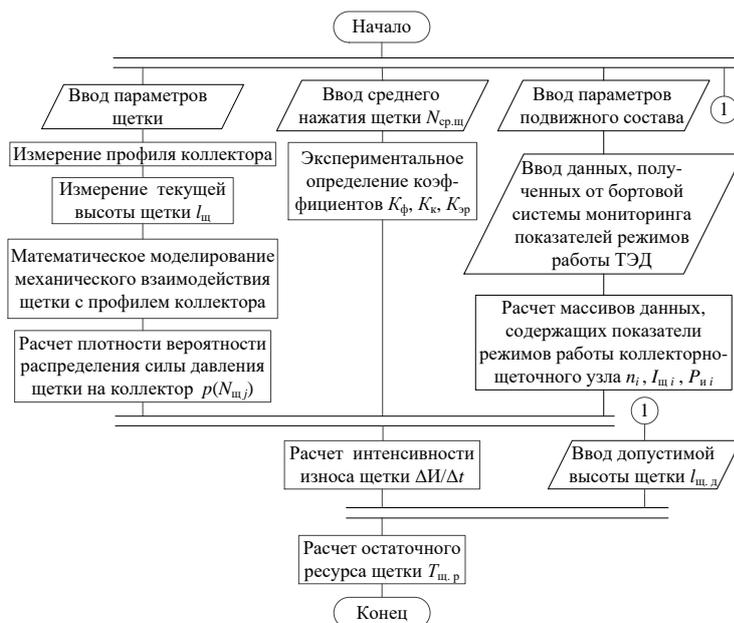


Рис. 6. Блок-схема алгоритма прогнозирования остаточного ресурса электрощеток с учетом массивов данных о показателях режимов работы тягового электродвигателя

Fig. 6. Block diagram of the algorithm for predicting the residual life of electric brushes taking into account the data sets on the indicators of the traction motor operating modes

В соответствии с приведенной диаграммой для расчета остаточного ресурса электрической щетки тягового электродвигателя требуется определить интенсивность износа щетки как сумму трех составляющих:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\Delta I_{\phi}}{\Delta t} + \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta t} + \frac{\Delta I_{\text{эп}}}{\Delta t}.$$

Для вычисления составляющих интенсивности износа необходимо выполнить три параллельных процесса.

В первом параллельном процессе осуществляется ввод параметров щетки: масса $m_{\text{щ}}$, высота $l_{\text{щ}}$ и ширина $b_{\text{щ}}$, которые могут быть известны из технической документации по электродвигателю либо измерены любыми общеизвестными доступными средствами измерений, имеющими достаточную точность (например, электронные весы и микрометр).

Далее необходимо провести измерение профиля коллектора, т. е. высот коллекторных пластин над произвольно заданным нулевым уровнем, находящемся на некотором расстоянии от оси вращения. Для выполнения этой задачи необходим прибор, позволяющий провести данные измерения (профилометр). Известно множество приборов данного типа с различными принципами действия, например, прибор контроля профиля коллектора машин постоянного тока [20, 21].

На основании известных параметров щетки и профиля коллектора [22, 23] выполняется математическое моделирование механического взаимодействия щетки с профилем коллектора [24] в соответствии с системой уравнений (2). Математическое моделирование позволяет найти силу давления щетки на коллектор в дискретно заданное множество моментов времени, следующих друг за другом через равные промежутки [24]. В результате может быть получена плотность вероятности распределения силы давления щетки на коллектор $p(N_{\text{щ}i})$.

Во втором параллельном процессе осуществляется ввод среднего нажатия щетки $N_{\text{ср.щ}}$ и определяются значения коэффициентов K_{ϕ} , K_{κ} , $K_{\text{эп}}$, которые обусловлены параметрами материала щетки и коллектора и являются постоянными в процессе работы двигателя. Для определения данных коэффициентов проводят три опыта: за равные промежутки времени Δt измеряется износ (например, микрометром), обусловленный только фрикционной составляющей, одновременно фрикционной и электрокоррозионной составляющими, сразу тремя составляющими (фрикционной, электрокоррозионной и электроэрозионной).

В первом опыте необходимо без тока обеспечить частоту вращения якоря двигателя n в течение заданного промежутка времени Δt при постоянной величине нажатия на щетки $N_{\text{ср.щ}}$. В данном и следующих опытах для контроля значения частоты вращения якоря необходим тахометр, отсчет промежутка времени Δt ввиду его относительно большого значения (порядка десятков часов) может быть произведен, например, с помощью таймера (или обычных бытовых часов), величина нажатия на щетку может быть измерена динамометром. По полученному в опыте значению ΔI_{ϕ} можно определить коэффициент:

$$K_{\phi} = \frac{nN_{\text{ср.щ}}\Delta t}{\Delta I_{\phi}}.$$

Во втором опыте необходимо в течение заданного промежутка времени Δt при неизменных $N_{\text{ср.щ}}$ и n обеспечить протекание тока $I_{\text{щ}}$ по щетке при отсутствии искрения под щетками. По полученному в опыте значению $(\Delta I_{\phi} + \Delta I_{\kappa})$ можно определить коэффициент:

$$K_{\kappa} = \frac{(\Delta I_{\phi} + \Delta I_{\kappa})}{\Delta t} - K_{\phi}nN_{\text{ср.щ}}.$$

$$n^{\frac{3}{4}}I_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}}N_{\text{ср.щ}}^{\frac{1}{2}}.$$

В третьем опыте необходимо при неизменных $N_{\text{ср.щ}}$ и n обеспечить протекание тока $I_{\text{щ}}$ по щетке при искрении под щетками с мощностью $P_{\text{и}}$. По полученному в опыте значению $(\Delta I_{\phi} + \Delta I_{\kappa} + \Delta I_{\text{эп}})$ можно определить коэффициент:

$$K_{\text{эп}} = \frac{(\Delta I_{\phi} + \Delta I_{\kappa} + \Delta I_{\text{эп}})}{\Delta t} - K_{\phi}nN_{\text{ср.щ}} - K_{\kappa}n^{\frac{3}{4}}I_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}}N_{\text{ср.щ}}^{\frac{1}{2}}.$$

$$nP_{\text{и}}$$

Уровень искрения в третьем опыте задается исследователем путем подпитки или отпитки током добавочных полюсов (что приводит соответственно к усилению или ослаблению их магнитодвижущей силы), к обмотке которых параллельно подключают внешний источник ЭДС (в качестве которого может служить управляемый выпрямитель с возможностью регулирования тока на выходе). При этом необходимо производить объективную оценку мощности искрения $P_{\text{и}}$ под щетками двигателя (в относительных единицах), для чего может быть использовано, например, устройство для измерения интенсивности искрения на коллекторе электрической машины [20] подвижного состава (количество щеток в щеткодержателях, размеры щеток, число параллельных ветвей обмотки якоря, передаточное число тягового редуктора, диаметр качения колесной пары), а также данных, полученных от бортовой системы мониторинга показателей режимов работы ТЭД. Данная система мониторинга должна осуществлять фиксацию текущего времени, токов якоря ТЭД, скорости движения, мощности искрения под щетками (в относительных единицах). Введенные параметры и данные позволяют расчетным путем найти массивы данных, содержащих по $N_{\text{изм}}$ значений частоты вращения якоря n_i , тока щетки $I_{\text{щ}i}$ и мощности искрения $P_{\text{и}i}$, где $i=1 \dots N_{\text{изм}}$.

По имеющимся массивам данных производится расчет трех составляющих интенсивности износа щетки, в котором мощность искрения $P_{\text{и}}$ принимают равной среднеарифметическому значению массива элементов $P_{\text{и}i}$.

Определение электроэрозионной составляющей интенсивности износа щетки осуществляется с учетом плотности распределения давления в контакте $p(N_{\text{щ}})$, найденной из математической модели механического взаимодействия щетки с профилем коллектора по выражению (2).

Расчет фрикционной составляющей интенсивности износа щетки производится по выражению:

$$\frac{\Delta I_{\text{ф}}}{\Delta t} = K_{\text{ф}} n N_{\text{ср.щ}}$$

Расчет электроэрозионной составляющей интенсивности износа щетки производится по выражению:

$$\frac{\Delta I_{\text{эп}}}{\Delta t} = K_{\text{эп}} n P_{\text{и}} \quad (4)$$

При расчете электроэрозионной составляющей интенсивности износа щетки в выражение (4) необходимо подставить мощность искрения $P_{\text{и}}$, измеренную тем же оборудованием и в тех же единицах измерения, как это осуществлено выше при определении $K_{\text{эп}}$.

При расчете фрикционной и электроэрозионной составляющих интенсивности износа щетки частоту вращения n принимают равной среднеарифметическому значению массива элементов n_i .

Расчет электрокоррозионной составляющей интенсивности износа щетки выполняют по выражению

$$\frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta t} = K_{\text{к}} \frac{1}{N_{\text{изм}}} \sum_i \left(n_i^{\frac{3}{4}} I_{\text{щ}i}^2 \right) \left(\sum_j (N_{\text{щ}j} P(N_{\text{щ}j})) \right)^{\frac{1}{2}}$$

Остаточный ресурс работы щетки, выраженный в часах, при усредненных показателях работы ТЭД определяется по выражению (1).

Для апробации разработанного способа прогнозирования остаточного ресурса ТЭД выполнены испытания щеток восьми различных производителей, применяемых на локомотивах 2ТЭ116У. С применением данных, полученных из систем мониторинга локомотивов данного типа, по выражению (3) рассчитаны составляющие износа щеток ($\Delta I_{\text{ф}}$, $\Delta I_{\text{к}}$, $\Delta I_{\text{эп}}$), усредненное соотношение которых приведено на рис. 7.

С целью верификации математической модели изнашивания электрощеток, лежащей в основе разработанного способа прогнозирования их остаточного ресурса, выполнено сравнение результатов 31 эксперимента с соответствующей выборкой расчетных данных. Экспериментальные данные получены на установке с двигателем типа 2ПН. Износ определялся гранулометрическим методом [25, 26] при варьировании в широком диапазоне тока и частоты вращения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистика // Министерство энергетики Российской Федерации. 2021. URL: <https://minenergo.gov.ru/activity/statistic> (дата обращения 25.02.2021).
2. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года (Утверждена распоряжением правительства Российской Федерации от 13.06.2020 № 1582-Р) // Министерство энергетики Российской Федерации. 2020. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/433> (дата обращения 25.02.2021).
3. Доманов К.И. Анализ непланового ремонта электрического оборудования электровозов постоянного тока в сервисных локомотивных депо // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной конференции, посвященной Дню российской науки. – Омск: ОмГУПС, 2016. – С. 167–173.

якоря, а также интенсивности искрения под щетками от 1 до 1½ балла. Оценка адекватности математической модели проведена с применением критерия Вилкоксона:

$$u - Mu = u_{\text{кр}}$$

где u – полное число инверсий значений выборок; Mu – математическое ожидание u .

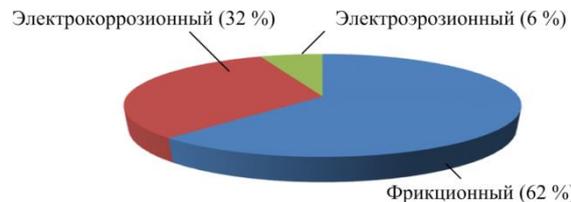


Рис. 7. Соотношение составляющих износа электрощеток

Fig. 7. Proportions of components of wear of electric brushes

Полученные значения: $u=466$, $Mu=480,5$. Для уровня значимости 0,05 табличное значение $u_{\text{кр}}=139$. Следовательно, различия выборок являются статистически достоверными.

Заключение

Разработанный способ прогнозирования остаточного ресурса щеток тяговых электродвигателей позволяет учесть показатели режимов работы в условиях реальной эксплуатации и может быть рекомендован для корректировки регламента обслуживания отдельных ТЭД в части введения дополнительного технического обслуживания в случае малого прогнозного значения остаточного ресурса. Алгоритм данного способа может быть применен в бортовых электронных системах подвижного состава для индикации остаточного ресурса электрощеток.

Применение в процессе прогнозирования массивов данных, полученных бортовой системой мониторинга, позволяет повысить точность определения остаточного ресурса электрощеток.

В качестве дальнейших исследований необходимо с целью повышения точности прогнозирования остаточного ресурса электрощеток ТЭД уточнить требуемую периодичность контроля профиля коллектора, обусловленную его изменением в процессе работы.

4. Повышение коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов / В.В. Харламов, Е.Ю. Чупрына, Р.В. Сергеев, П.К. Шкодун, Д.И. Попов, Ю.В. Москалев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 138–147.
5. Попов Ю.И. Повышение ресурса тяговых электрических машин электровозов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2018. – 24 с.
6. Kubín J., Ferková Ž., Richter A. Pairing of traction DC motors, long term experiences from practice and simulations // 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE). – Slovakia, The High Tatras, 2019. – P. 201–206.
7. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 1997. – 18 с.

8. Izotov A., Timoshenko V., Izotov S. Study of feasibility of controlling tribological situation in sliding current collection assembly of electric machines // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Russia, Sochi, 2020. – P. 1–5.
9. Способ контроля износа щеток и работы щеточно-коллекторного узла электрической машины: пат. Рос. Федерация, № 2548020 С2, заявл. 05.07.2013; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10. – 10 с.
10. Качин О.С., Качин С.И. Увеличение ресурса скользящего контакта электрических машин: монография. – Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 165 с.
11. Способ определения ресурса щеток тяговых коллекторных электродвигателей: пат. Рос. Федерация, № 2677243 С1, заявл. 18.07.2017; опубл. 16.01.2019. Бюл. № 2. – 11 с.
12. Myshkin N.K., Konchits V.V. Tribology of electrical contacts // Tribologie Und Schmierungstechnik / Eds. Q.J. Wang, Y-W. Chung. – Boston, MA: Springer US, 2015. – V. 64. – P. 5–12.
13. Харламов В.В., Байсадыков М.Ф., Попов Д.И. Методика определения параметров математической модели износа электрических щеток // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной конференции. – Омск: ОмГУПС, 2017. – С. 109–116.
14. Castevens J.M., Rylander H.G., Eliezer Z. Influence of high velocities and high current densities on the friction and wear behavior of copper-graphite brushes // Wear. – 1978. – V. 49. – № 1. – P. 121–130. URL: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(78\)90142-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(78)90142-4) (дата обращения 01.05.2021).
15. Chmelik K., Veselka F. Kluzny kontakt v elektrických strojích. – Ostrava: KEY Publ. s.r.o., 2007. – 256 p.
16. Klopp R.W., Dugnani R., Edmonds J.S. The role of brush spring kinking in a generator flash-over incident // North American Power Symposium. – Boston, MA, 2011. – P. 1–6.
17. Commutation characteristics and brush wear of DC motor at high rotation speed / K. Sawa, M. Isato, T. Ueno, K. Nakano, K. Kondo // 2017 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. – Denver, CO, 2017. – P. 176–181.
18. ГОСТ 2582-2013 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2015. – 102 с.
19. Sawa K., Ueno T., Nakano K. Evaluation of ARC EROSION of Cu-graphite brush used in small DC motors with and without quenching device // 2020 IEEE 66th Holm Conference on Electrical Contacts and Intensive Course (HLM). – San Antonio, TX, USA, 2020. – P. 170–175.
20. Авиллов В.Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: монография. – Омск: Омский научный вестник, 2013. – 355 с.
21. Авиллов В.Д., Исмаилов Ш.К. Методика нормирования качества коммутации в тяговых электрических машинах // Известия Транссиба. – 2012. – № 2 (10). – С. 2–6.
22. Eliseev A.V., Eliseev S.V., Orlenko A.I. Mathematical modeling of continuous tossing of the brush with the gap from the commutator // International journal of electrical and electronic engineering and telecommunications. – 2019. – V. 2. – P. 72–77. DOI: 10.18178/ijeetc.8.2.72-77
23. Shantarenko S., Ponomarev E., Borodin A. Contact interaction «brush–collector» and working efficiency of locomotive traction electric motor // MATEC Web Conf. – Омск: OSTU, 2018. – V. 239.
24. Харламов В.В., Попов Д.И., Байсадыков М.Ф. Оценка влияния профиля коллектора машины постоянного тока на работу скользящего контакта // Омский научный вестник. – 2016. – Вып. 4 (148). – С. 62–65.
25. Забоин В.Н., Веселка Ф. Исследование интенсивности износа электрических щеток методом оптической микроскопии // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 6. – Тверь: ТвГТУ, 2013. – С. 80–85.
26. Забоин В.Н., Веселка Ф. Новый метод определения износа электрощеток // Мировая наука и образование в условиях современного общества: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – М.: ООО «АР-Консалт», 2014. – С. 115–118.

Поступила 16.06.2021 г.

Информация об авторах

Харламов В.В., доктор технических наук, заведующий кафедрой электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

Попов Д.И., кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

Байсадыков М.Ф., преподаватель кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

UDC 621.313.2: 621.7.08

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR PREDICTING THE RESIDUAL LIFE OF ELECTRIC TRACTION MOTOR BRUSHES

Viktor V. Kharlamov¹,
emoe@omgups.ru

Denis I. Popov¹,
emoe@omgups.ru

Marsel F. Baysadykov¹,
emoe@omgups.ru

¹ Omsk State Transport University,
35, Marks avenue, Omsk, 644046, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to improve the rolling stock (quarry dump trucks) operation reliability, providing open-pit coal mining. This problem is also relevant in the railway transportation industry – on the rolling stock of railways. The reliability of the rolling stock is determined by the reliability of the functioning of its individual components. As it is known from the analysis of failures of rolling stock of vehicles with collector traction motors, one of the critical elements for them is the brush machine. The known methods of forecasting do not fully use the capabilities of modern on-board systems for monitoring the operating modes of traction motors. Therefore, an urgent task is to increase the accuracy of predicting the residual life of electric brushes by taking into account the indicators of the operating modes recorded by the on-board monitoring system.

The main aim of the research is to develop a method for predicting the residual life of electric brushes of traction electric motors of mining dump trucks, taking into account the indicators of operating modes obtained from the on-board monitoring system.

Objects: electric brushes of traction electric motors of mining dump trucks.

Methods: mathematical analysis of data from on-board monitoring systems, mathematical modeling of electric brushes wear, synthesis of a method for predicting the residual life of traction motor brushes.

Results. A method for predicting the residual life of the brushes of traction motors has been developed, which allows taking into account the indicators of the operating modes in real operation conditions. The accuracy of determining the residual life of electrical panels is increased due to the use of data arrays obtained from the on-board monitoring system in forecasting. The authors have developed the prediction algorithm that can be used in on-board electronic systems of rolling stock to indicate the residual life of electric brushes.

Key words:

Mining dump truck, traction motor, electric brush wear, residual life forecasting, data sets, monitoring system, mathematical modeling.

REFERENCES

1. *Statistika. Ministerstvo energetiki Rossiyskoy federatsii* [Statistics. 2021. Ministry of Energy of the Russian Federation]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/activity/statistic> (accessed 25 February 2021).
2. *Programma razvitiya ugolnoy promyshlennosti Rossii na period do 2035 goda (Uverzhdena rasporyazheniem pravitelstva Rossiyskoy federatsii ot 13.06.2020 № 1582-P)*. Ministerstvo energetiki Rossiyskoy federatsii [The Program of development for coal industry of Russia up to 2035 (Approved by Decree of the Government of the Russian Federation from 13.06.2020 № 1582-R). 2020. Ministry of Energy of the Russian Federation]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/433> (accessed 25 February 2021).
3. Domanov K.I. Analiz neplanovogo remonta elektricheskogo oborudovaniya elektrovozov postoyannogo toka v servisnykh lokomotivnykh depo [Analysis of unscheduled repairs of DC locomotive electrical equipment at locomotive service depots]. *Innovatsionnyye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoy konferentsii, posvyashhennoy Dnyu rossiyskoy nauki* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport: Proc. of a scientific conference dedicated to Russian Science Day]. Omsk, OSTU Publ., 2016. pp. 167–173.
4. Kharlamov V.V., Chupryna E.Yu., Sergeev R.V., Shkodun P.K., Popov D.I., Moskalev Yu.V. Enhancement of commutation stability of traction motors EDP800 trucks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 138–147. In Rus.
5. Popov Yu.V. Povyshenie resursa tyagovykh elektricheskikh mashin elektrovozov ekspluatiruemykh v slozhnykh prirodno-klimaticheskikh usloviyakh. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Improving the service life of electric traction machines of electric locomotives operating in harsh natural and climatic conditions. Cand. Diss. Abstract]. Omsk, 2018. 24 p.
6. Kubin J., Ferková Ž., Richter A. Pairing of traction DC motors, long term experiences from practice and simulations. *International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*. Slovakia, The High Tatras, 2019. pp. 201–206.
7. GOST 27.310-95. *Nadezhnost v tekhnike. Analiz vidov, posledstviy i kritichnosti otkazov. Osnovnye polozheniya* [State Standard 27.310-95. Reliability in engineering. Analysis of types, effects and criticality of failures. Fundamentals]. Moscow, StandardInform Publ., 1997. 18 p.
8. Izotov A.I., Timoshenko V.N., Izotov S. A. Study of feasibility of controlling tribological situation in sliding current collection assembly of electric machines. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. Sochi, Russia, 2020. pp. 1–5.
9. Malafeev S.I., Tikhonov Yu.V. *Sposob kontrolya iznosa shchetok i raboty shchetочно-kollektornogo uzla elektricheskoy mashiny* [Method of monitoring brush wear and brush-collector assembly of an electrical machine]. Patent RF, no. 2548020 C2, 2013.
10. Kachin O.S., Kachin S.I. *Uvelichenie resursa skolzyashchego kontakta elektricheskikh mashin: monografiya* [Increasing sliding contact life of electrical machines: monography]. Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 165 p.
11. Kharlamov V.V., Popov D.I., Baysadykov M.F. *Sposob opredeleniya resursa shchetok tyagovykh kollektornykh elektrodvigatelye* [Method for determining the brush life of traction collector motors]. Patent RF, no. 2677243 C1, 2019.
12. Myshkin N.K., Konchits V.V., Braunovich M. The mechanics and tribophysics of electrical contacts. *Journal of Friction and Wear*, 2015, vol. 36, pp. 454–467.

13. Kharlamov V.V., Baysadykov M.F., Popov D.I. Metodika opredeleniya parametrov matematicheskoy modeli iznosa elektricheskikh shchetok [Methodology for determining the parameters of a mathematical model for electrical brush wear]. *Innovatsionnyye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte. Materialy nauchnoy konferentsii* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport. Proc. of a scientific conference]. Omsk, OSTU Publ., 2017. pp. 109–116.
14. Castevens J.M., Rylander H.G., Eliezer Z. Influence of high velocities and high current densities on the friction and wear behavior of copper-graphite brushes. *Wear*, 1978, vol. 49, no. 1, pp. 121–130.
15. Chmelik K., Veselka F. *Kluznyy kontakt v elektricheskikh stroyakh*. Ostrava, KEY Publ. s. r. o., 2007. 256 p.
16. Klopp R.W., Dugnani R., Edmonds J.S. The role of brush spring kinking in a generator flash-over incident. *North American Power Symposium*. Boston, MA, 2011. pp. 1–6.
17. Sawa K., Isato M., Ueno T., Nakano K., Kondo K. Commutation characteristics and brush wear of DC motor at high rotation speed. *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Denver, CO, 2017. pp. 176–181.
18. *GOST 2582-2013. Mashiny elektricheskoy vrashchayushchiesya tyagovyye* [State Standard 2582-2013. Electric rotating traction machines. General specifications]. Moscow, StandardInform Publ., 2015. 102 p.
19. Sawa K., Ueno T., Nakano T. Evaluation of ARC EROsion of Cu-graphite brush used in small DC motors with and without quenching device. *IEEE 66th Holm Conference on Electrical Contacts and Intensive Course (HLM)*. San Antonio, TX, USA, 2020. pp. 170–175.
20. Avilov V.D. *Optimizatsiya kommutatsionnogo protsessa v kollektornykh elektricheskikh mashinakh postoyannogo toka: monografija* [Optimisation of the commutation process in collector-type DC electric machines: monography]. Omsk, Omskiy nauchnyy vestnik Publ., 2013. 355 p.
21. Avilov V.D., Ismailov S.K. Metodika normirovaniya kachestva kommutatsii v tyagovykh elektricheskikh mashinakh [Methodology for rationing the quality of switching in traction electric machines]. *Izvestiya Transsiba*, 2012, no. 2 (10), pp. 2–6.
22. Eliseev A.V., Eliseev S.V., Orlenko A.I. Mathematical modeling of continuous tossing of the brush with the gap from the commutator. *International journal of electrical and electronic engineering and telecommunications*, 2019, vol. 2, pp. 72–77.
23. Shantarenko S.G., Ponomarev E.V., Borodin A.V. Contact interaction «brush–collector» and working efficiency of locomotive traction electric motor. *MATEC Web Conference*, Omsk, OSTU, 2018. Vol. 239.
24. Kharlamov V.V., Popov D.I., Baysadykov M.F. Otsenka vliyaniya profilya kollektora mashiny postoyannogo toka na rabotu skolzyashchego kontakta [Evaluating the effect of DC machine collector profile on the operation of the sliding contact]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2016, no. 4 (148), pp. 62–65.
25. Zaboyn V.N., Veselka F. Issledovanie intensivnosti iznosa elektricheskikh shchetok metodom opticheskoy mikroskopii [Research of the wear intensity in electric brushes by optical microscopy]. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 6* [Mechanics and physics of processes on the surface and in the contact of solids, parts of technological and power equipment. Interuniversity collection of scientific papers. Iss. 6]. Tver, TSTU Publ., 2013. pp. 80–85.
26. Zaboyn V.N., Veselka F. Novyy metod opredeleniya iznosa elektroshchetok [New method for determining the wear of electric brushes]. *Mirovaya nauka i obrazovanie v usloviyakh sovremennogo obshchestva. Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [World science and education in modern society. Collection of scientific papers on the materials of the international scientific-practical conference]. Moscow, 2014. pp. 80–85.

Received: 16 June 2021.

Information about the authors

Viktor V. Kharlamov, Dr. Sc., head of the department, Omsk State Transport University.

Denis I. Popov, Cand. Sc., associate professor, Omsk State Transport University.

Marsel F. Baysadykov, lecturer, Omsk State Transport University.

УДК 630:628.8:911.5/9

ОЦЕНКА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ЛЕСНЫХ ГАРЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СО СПУТНИКОВ LANDSAT

Токарева Ольга Сергеевна¹,
ost@tpu.ru

Алшаиби Ахмед Джамал Абдулрахман²,
ahmedalshaiby88@gmail.com

Пасько Ольга Анатольевна³,
oap@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Главное управление образования Диялы,
Ирак, 32001, г. Бакуба, пр. Альмухафада, 1.

³ Агрофизический научно-исследовательский институт,
Россия, 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14.

Актуальность. До 400 тысяч лесных пожаров, ежегодно возникающих на Земле, ведут к попаданию в атмосферу до четырех миллиардов тонн углерода и выгоранию до 0,5 % площади лесов. Лесные пожары уничтожают древесные ресурсы, снижают эффективность их использования, наносят экономике гигантский урон. Оперативная и объективная информация об их последствиях востребована для решения комплекса теоретических и практических задач в области землеустройства, кадастра и мониторинга земель лесного фонда, а также для научного обоснования использования, восстановления, охраны и защиты лесов.

Объект: земли лесного фонда, подвергшиеся пожарам.

Предмет: пост-пирогенная динамика растительного покрова на примере лесных гарей Томской области.

Методы: тематическое картирование территории по состоянию растительности; оценка значений NDVI (Normalize Difference Vegetation Index) и нормализованного индекса гарей NBR (Normalized Burn Ratio) по данным дистанционного зондирования Земли; анализ информации со спутников Landsat 5 (камера TM), 7 (ETM+) и 8 (OLI) с использованием геоинформационных технологий и статистической обработки полученных данных.

Результаты. Произведена оценка состояния растительного покрова гарей в сравнении с тестовым лесным участком сходного породного состава (46 % – сосна сибирская, 36 % – береза повислая, 11 % – осина обыкновенная, 7 % – сосна обыкновенная и лиственница сибирская). Степень повреждения растительного покрова изученных гарей охарактеризована как низкая. Для гарей и фонового участка рассчитаны нормализованный вегетационный индекс (NDVI) и индекс гарей (NBR). Выявлены резкие перепады их значений и аномальный ход годовой динамики для гарей. Значения NDVI для гарей и тестового участка различались на 3–56 %, значения NBR на 20–198 %. Различия сохранялись и спустя 17 лет после пожара. Корреляционный анализ выявил достоверную связь между значениями индексов NBR и NDVI гарей и средними значениями температуры воздуха и количества осадков в пожароопасный сезон. Она оказалась отрицательной средней и слабой силы для мая; сильной и средней для июля и слабой для августа. Осадки связаны со значениями индексов NBR и NDVI гарей со средней силой: в мае и июне отрицательно, в августе положительно. Это свидетельствует о достаточном увлажнении экотопов в начале вегетационного периода, последующем просыхании почвы, оптимальном для жизнедеятельности деревьев, и ее иссушении, предопределяющем возможность возникновения лесных пожаров. Отмечена явная территориальная изменчивость значений NDVI и NBR в границах гари.

Ключевые слова:

NDVI, лесная гарь, растительный покров, дистанционное зондирование, NBR, лесной пожар.

Введение

Ежегодно практически на всех континентах возникает от 300 тыс. до трех млн лесных пожаров, что связывают с природными явлениями (молнии) [1], ростом городов и плотности населения, изменением моделей землепользования, ухудшением социальной и экологической защиты окружающей среды, усилением хозяйственной и промышленной деятельности человека [2].

Обширные лесные пожары типичны для Евразии (Греция, Испания, Португалия, Россия, Франция) [3], Северной Америки (США, Канада) [2] и Австралии. В двадцати четырех странах Европы (за исключением России), крупномасштабные (>40 га) пожары ежегодно затрагивают около 300 тыс. га территории [4]; в Север-

ной Америке прирост площади гари и горельников составляет 0,1 % от площади лесов [5]. В Юго-Восточной Азии выгорание лесов сезонно, особенно в засушливые периоды из-за неконтролируемых лесозаготовок [6].

В России сосредоточено более четверти мировых запасов древесины (82 млрд м³). Более двух третей ее территории покрыто лесами [7], поэтому пожары как неуправляемое опасное природное явление [8] ведут к крупнейшим экономическим потерям страны [9], а также деградации лесных ресурсов и лесорастительных условий [10].

В России ежегодно возникает 10–34 тыс пожаров. Они уничтожают лесные массивы на территории более 18 млн га, из которых 1,2 млн га охраняются активно, а 12–36 тыс. га – особо [11]; в категорию гарей

переходит 10–20 % площади лесных земель, пройденных пожарами. В настоящее время накопленная площадь гарей составляет 28,4 млн га.

К наиболее пожароопасным регионам России относят Дальневосточный, Приволжский и Сибирский федеральные округа. Леса Сибири занимают около 80 % лесопокрытой территории России (552 млн га). Ежегодно на них возникает около 30 тыс. пожаров площадью около 10 млн га. В 2010 г. отмечено более 39 тыс. лесных пожаров, в ходе которых на корню сгорело более 150 млн м³ лесов. В Томской области ежегодно возникают 64–527 лесных пожаров на площади до 22,5 тыс. га [12], около трети которой превращается в непродуктивные территории, в т. ч. гари [13]. Происходит гибель древостоя, обезлесение и заболачивание территории, нарушение естественного лесовосстановления леса на несколько столетий и соответствующее снижение эколого-экономической ценности лесных ресурсов [14].

Ликвидация последствий пожаров требует значительных средств [15], что повышает требования к объективности, актуальности и точности измерения площадей лесов, пройденных пожарами. Существует острая потребность в оперативном выявлении площадей лесных пожаров и в оценке степени повреждения древостоев, в т. ч. удаленных и труднопроходимых территорий земель лесного фонда, а также в мониторинге сукцессии растительного покрова на нарушенных землях. Решить эти задачи позволяют современные методы дистанционного зондирования Земли и программные средства мониторинга состояния древостоя [16–18]. Многошаговые процедуры обработки разновременных спутниковых снимков в сочетании с вегетационными индексами повышают точность оценки временно-территориальной динамики растительного покрова [19]. С их помощью выявляют причины возгорания, прогнозируют распространение пожаров [20], дают количественную и качественную оценку выгоревшим лесам [21–24], анализируют и прогнозируют последствия [25], что особенно важно на территории

нефтедобычи [26]. Архивы спутниковых данных за длительные промежутки времени позволяют оценивать динамику состояния растительного покрова.

Глобальное потепление климата ведет к прогнозируемому усилению пожароопасной обстановки на планете [27–29], росту грозовой активности [30] и др. Это актуализирует учет климатических и метеорологических условий возникновения лесных пожаров и развития гарей. Целью исследования является оценка пост-пирогенной динамики древостоя путем анализа ретроспективных данных спутниковых снимков Landsat в Томской области с учетом погодных условий.

Объекты и методика

Для анализа пост-пирогенной динамики древостоя использован тестовый участок на территории Васюганского лесничества (рис. 1). Леса, расположенные на нем, по целевому назначению являются эксплуатационными, т. е. их освоение предназначено для устойчивого и максимально эффективного получения высококачественной древесины и других лесных ресурсов с условием обеспечения полезных функций лесов. При выборе участка учтены следующие требования: большое число ежегодных пожаров; необходимое и достаточное число архивных безоблачных снимков на максимальную глубину (18 лет); возможность определения периода возникновения гарей (1998–1999 гг.). Важным моментом является территориальная близость к нему объектов нефтегазового комплекса, для которых лесные пожары крайне опасны в связи с возможностью выхода и воспламенения топлива при повреждении трубопроводов. Информация о динамике лесных пожаров, степени повреждения и восстановления растительного покрова позволяет прогнозировать вероятность хода развития событий и принимать соответствующие превентивные меры.

Пространственное разрешение использованных снимков со спутников Landsat составляет 30 м. Они загружены из архива Геологической службы США. Дополнительно использован интернет-сервис Earth Explorer.

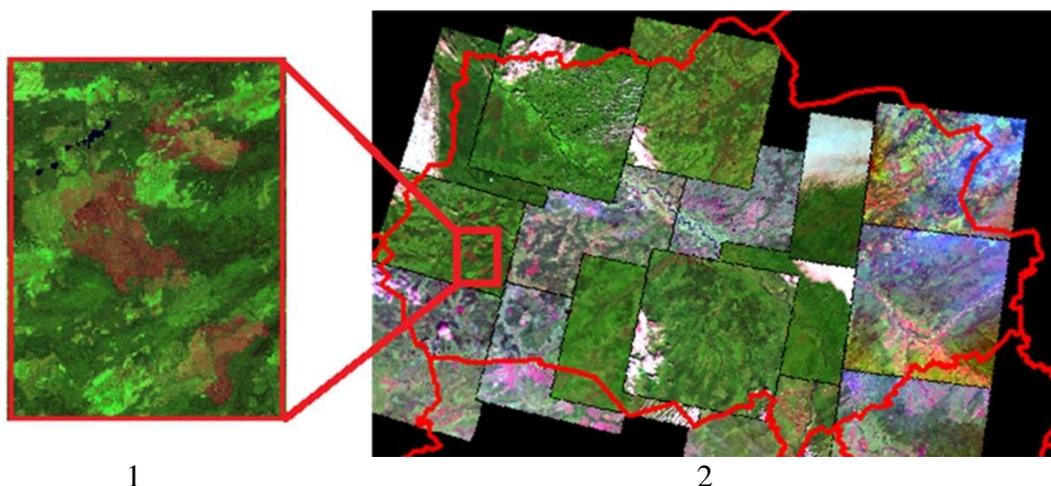


Рис. 1. Схема покрытия космоснимками территории Томской области (1) с указанием тестового участка с нанесенными полигонами (гарь) в 1999 г. (2)

Fig. 1. Scheme of the coverage of the Tomsk region territory with satellite images (1) with indication of the test area with applied polygons (burnt forest area) in 1999 (2)

Объективным интегральным показателем состояния растительности является ее отражательная способность, которая имеет ярко выраженные особенности в определенных областях электромагнитного спектра. Для таежной зоны Западной Сибири наиболее информативен показатель количества фотосинтетически активной биомассы NDVI (нормализованный относительный индекс растительности) [31], который рассчитывают по формуле (1):

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}, \quad (1)$$

где ρ_{nir} – значения спектральной яркости пикселей в ближней инфракрасной, ρ_{red} – в красных областях электромагнитного спектра.

Путем сравнения значений NDVI по разновременным снимкам производят оценку динамики состояния растительности территорий [26].

Критерием для выявления границ лесных гарей является снижение спектральной яркости пикселей в ближней инфракрасной области спектра. Для его количественной оценки используют значения нормализованного индекса гарей NBR (Normalized Burn Ratio), рассчитываемые по формуле (2) [32]:

$$NBR = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir2}}{\rho_{nir} + \rho_{swir2}}, \quad (2)$$

где ρ_{nir} , ρ_{swir2} – значения спектральной яркости пикселей в ближней и средней инфракрасных областях электромагнитного спектра соответственно.

Значения индексов NBR и NDVI в высокой степени коррелируют с данными полевых обследований гарей и горельников. Их уверенно используют в лесной службе США для практической оценки степени повреждения лесов от пожаров [3], выделения границ свежих гарей и оценки степени повреждения огнем растительного покрова разных участков (табл. 1).

Таблица 1. Соответствие степени повреждения огнем растительного покрова значениям dNBR

Table 1. Correspondence of the degree of fire damage to vegetation cover to the dNBR values

Степень повреждения растительного покрова Degree of damage to vegetation cover	dNBR
Отсутствует/Absent	Меньше 0,085 Less than 0,085
Низкая/Low	0,084–0,25
Средняя/Average	0,25–0,6207
Сильная/Strong	Больше 0,6207 More than 0,6207

Для оценки восстановительной динамики растительности на месте лесных гарей на тестовом участке в работе использованы космоснимки со спутников Landsat 5 и Landsat 7 (камера TM и ETM+, соответственно), а также Landsat 8 (сканер OLI) [33]. Перечень снимков приведен в табл. 2. Данные, полученные в калиброванном виде, пересчитаны в коэффициенты спектральной яркости по алгоритмам, представленным в [33, 34].

Породный состав деревьев определен с использованием лесотаксационной карты тестового участка,

далее рассчитаны площади, занятые каждой породой. Для фонового участка и каждого типа выгоревшего леса рассчитаны средние значения индексов NDVI и NBR по годам [32]; проведено сравнение постпирогенной динамики растительного покрова. Фоновый участок выбран максимально близко от территории гари. По площади он сопоставим с ней и характеризуется близким породным составом деревьев.

Таблица 2. Список снимков, покрывающих территорию тестового участка (1998–2015 гг.)

Table 2. List of images covering the test site (1998–2015)

Дата съемки Shooting date	Идентификаторы снимков Path-Row в системе WRS-2 Ids of Path-Row snapshots in the WRS-2 system	Номер спутника Landsat Landsat satellite number
21.05.1998, 31.08.2006, 17.07.2007, 20.06.2009, 14.06.2011	153-19	5
24.06.2008, 19.06.2010	154-19	
03.07.1999	153-19	7
02.07.2002	154-19	
25.06.2013, 29.06.2014, 2.06.2016	154-19	8
21.06.2015	153-19	

Для определения влияния метеорологических факторов на динамику гарей проведен корреляционный анализ зависимости средних значений NDVI и NBR от температуры и количества осадков в пожароопасный сезон (по месяцам) по данным Гидрометеоцентра Томской области [37]. Теснота связи между показателями оценена с помощью опции «Сводная таблица» программы EXCEL.

Результаты и обсуждение

На основе анализа космического снимка дано описание гарей тестового участка в 1999 г. (рис. 1, табл. 3). Породный состав леса был на 46 % представлен сосной сибирской, на 36 % – березой повислой, на 11 % – осиной обыкновенной и на 7 % – сосной обыкновенной, лиственницей сибирской и пихтой. Гарь А имела площадь 38,647 км². Нарушенность древостоя пожарами была низкой, характерной либо для периферийных участков затухающих интенсивных пожаров, либо для гарей, пройденных низовыми пожарами. Гарь Б по площади была примерно в два раза больше и отличалась менее сильными повреждениями леса огнем. Однако на обеих гарях имеются участки со средней степенью повреждения.

Таблица 3. Характеристика гарей тестового участка

Table 3. Characteristics of the burnt forest area of the test area

Название гари Name of the burnt forest area	Год образования Year of formation	Площадь, км ² Area, km ²	Среднее значение dNBR Average dNBR value	Степень повреждения огнем Degree of fire damage
А	1999	38,647	0,22	Низкая Low
Б/В		71,521	0,08	

На рис. 2 представлены расчетные значения NDVI за 16 лет, полученные по снимкам с близкими датами съемки (03.07.1999, 02.07.2002, 24.06.2008, 20.06.2009 и 21.06.2015 гг.). Обращает на себя внимание синхронность изменений значений NDVI на обеих гарях: рост с 1999 по 2002 гг., снижение с 2002 по 2009 гг. и

подъем с 2009 по 2015 гг. Обработка снимков и анализ полученных значений dNBR выявили возникновение повторных пожаров в 2008 и 2009 гг. внутри обеих гарей (рис. 2). Вызванные ими повреждения древостоя отразились в минимальных значениях NDVI выгоревших лесных участков.



Рис. 2. Графики изменения NDVI (1) и dNBR (2) гарей по годам

Fig. 2. Graphs of changes in NDVI (1) and dNBR (2) of burned-out area by year

В 2006 г. площадь гари А выросла на 1,423 км², на расстоянии 18 км от нее появилась гарь С (рис. 3, 1). В 2013 г. площадь гари А увеличилась еще на 59,423 км², гари Б – на 74,11 км². Появилась новая большая гарь Д площадью 245,047 км².

Для подробного анализа динамики восстановления растительного покрова выбрана гарь А, возникшая в

1999 г., поскольку на ней трижды в течение периода с 1999 по 2016 гг. возникали пожары (рис. 3, 2), и на ее территорию имеются снимки за указанный период. Установлено, что значения NDVI распределены по площади гари неравномерно, что говорит о наличии выраженной территориальной изменчивости этого показателя.

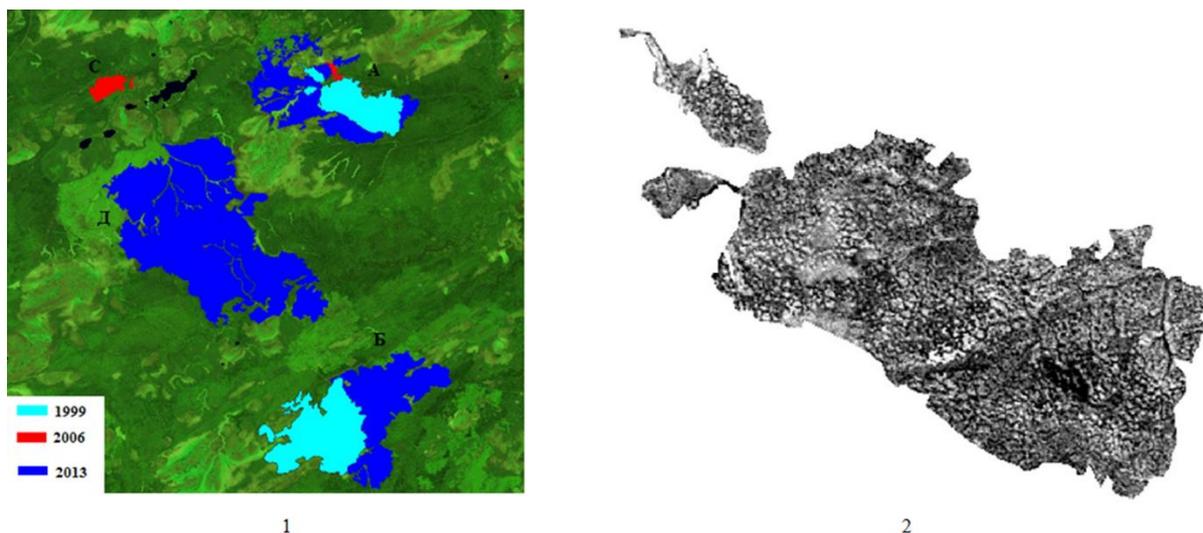


Рис. 3. 1 – гари на тестовом участке по годам возникновения (1999, 2006, 2013); 2 – карта NDVI для гари А в 1999 г.

Fig. 3. 1 – burned-out areas in the test area by year of occurrence (1999, 2006, 2013); 2 – NDVI map for burned-out area A in 1999

Имеются явно выраженные устойчивые очаги возгорания на северо-восточной части территории, что свидетельствует о ее предрасположенности к возник-

новению лесных пожаров. На юго-западе повреждения менее значительны. Причины локализации лесных пожаров, территориальной изменчивости плотности и со-

стояния растительности до и после них представляет тему отдельных комплексных исследований. Графики хода средних значений NDVI и NBR приведены на рис. 4. Выявлены anomalно резкие перепады показателей гари по сравнению с фоном. Значения NDVI для

гарей и тестового участка различаются на 3–56 %, NBR на 20–198 %. Различия сохраняются и спустя 17 лет после пожара, что свидетельствует о длительности эколого-динамических процессов восстановления повреждений, нанесенных пожаром лесу.

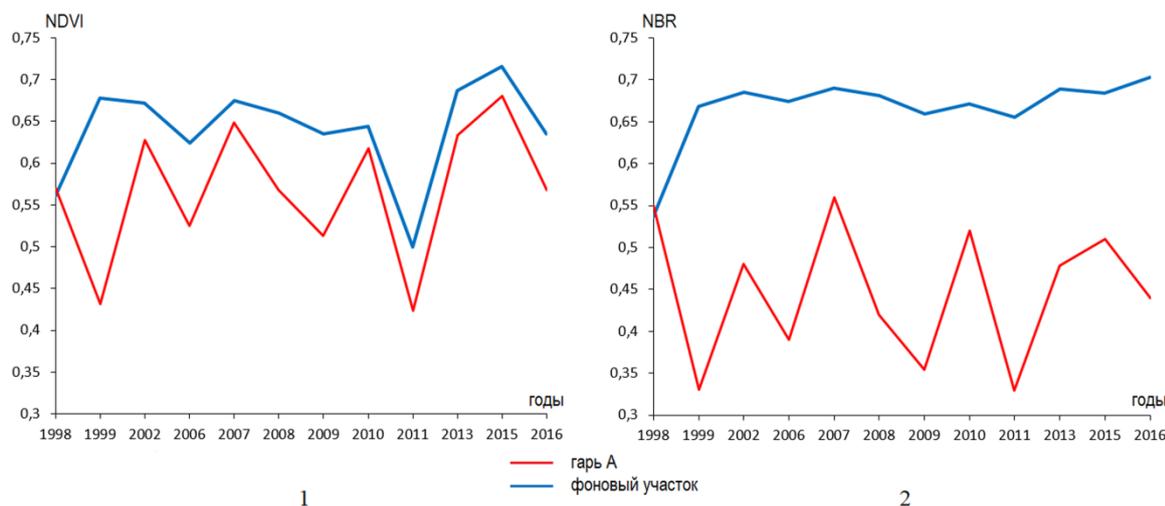


Рис. 4. Ход средних значений NDVI (1) и dNBR (2) гари и тестового участка по годам

Fig. 4. Course of the average values of NDVI (1) and dNBR (2) of the burnt forest area and the test area by year

Корреляционный анализ выявил достоверную и погодными условиями в пожароопасный сезон связь между значениями индексов NBR и NDVI гарей (табл. 4) при уровне значимости, равном 0,05.

Таблица 4. Погодные условия и характеристики исследуемых гарей в 1999–2016 гг. [37]

Table 4. Weather conditions and characteristics of the studied burned-out area in 1999–2016 [37]

Год Year	Температура Temperature, °C				Осадки, мм Precipitation, mm				Значения NDVI NDVI Values		Значения NBR NBR values	
	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Гарь/Burned-out area			
									А	Б	А	Б
1999	15,0	14,2	21,4	15,3	64	20	36	19	0,43	0,43	0,33	0,38
2002	12,5	16,2	17,5	15,2	88	93	87	43	0,63	0,60	0,48	0,47
2006	8,7	19,4	18,5	12,5	49	122	73	76	0,53	0,54	0,39	0,47
2007	9,6	13,8	20,5	15,0	54	100	85	31	0,65	0,63	0,56	0,57
2008	10,8	16,3	19,4	15,0	79	93	55	31	0,57	0,59	0,42	0,48
2009	9,8	13,2	18,6	15,7	81	31	60	50	0,51	0,52	0,35	0,40
2010	7,2	15,2	16,5	15,6	61	104	61	54	0,62	0,61	0,52	0,54
2011	10,4	19,4	15,5	14,0	46	72	45	45	0,42	0,48	0,33	0,44
2013	6,7	14,1	19,2	16,8	32	24	78	67	0,63	0,64	0,48	0,53
2015	11,9	18,4	18,9	15,9	36	86	63	28	0,68	0,67	0,51	0,54
2016	9,1	19,0	19,9	17,1	26	95	94	75	0,56	0,61	0,44	0,53

Корреляция между значениями индексов NBR и NDVI гарей и средними значениями температуры воздуха и количества осадков оказалась отрицательной средней и слабой для мая; сильной и средней для июля и слабой для августа. Осадки связаны со значениями индексов NBR и NDVI гарей со средней силой: в мае и июне отрицательно, в августе положительно. Это свидетельствует о достаточном увлажнении экотопов в начале вегетационного периода, последующем просыхании почвы, оптимальном для жизнедеятельности деревьев, и ее последующем иссушении, предопределяющем возможность возникновения лесных пожаров.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Отрицательная корреляция про-

дуктивности фитоценозов с погодными условиями (температура воздуха и количество атмосферных осадков) свидетельствует о неоптимальности погодных условий в начале вегетационного периода. Дальнейшая стимуляция роста и развития вегетативной сферы индуцируется умеренными осадками и высокими температурами воздуха, что объяснимо изменением направленности метаболизма: в начальный период роста органы вегетативной сферы деревьев активно потребляют питательные вещества, накопленные в древесине [38]; с июля они сами становятся донорами ассимилятов. Жаркие и сухие условия июля ведут к постепенному снижению влажности почвы – судя по значениям NDVI, они оптимальны в начале и субоптимальны в конце месяца. Иссушение почвы

сопровождается снижением значений NDVI. Происходит возгорание древостоя, регистрируемое по росту значений NBR гарей.

Заключение

В ходе исследования с помощью дистанционного зондирования Земли из космоса и геоинформационных технологий проведен сравнительный анализ динамики пост-пирогенного изменения состояния растительного покрова тестового участка. Выявлены резкие перепады значений NDVI и NBR гарей по сравнению с тестовым участком. Аномальный ход их динамики обусловлен пройденными пожарами, причем достоверная разница между средними значениями индекса NBR гарей и тестового участка является значительной спустя 17 лет после пожара, что свидетельствует о длительности эколого-динамических процессов восстановления повреждений, нанесенных пожаром лесу. По данным корреляционного анализа установлены закономерности зависимости значений NDVI и NBR от погодных условий. С их помощью выявлены особенности развития деревьев в разных гидротермических условиях и предрасположенность экотопов к возникновению пожаров и образованию гарей. Показана достоверная связь между изученными параметрами участков и средними значениями температуры воздуха и количества осадков в разные

месяцы пожароопасного периода. Она является отрицательной средней и слабой силы для мая; сильной и средней для июля и слабой для августа. Осадки связаны со значениями индексов NBR и NDVI гарей со средней силой: в мае и июне отрицательно, в августе положительно.

Следует отметить, что лесные пожары являются естественным природным процессом, а для некоторых типов леса, к примеру кедровых, необходимым звеном сукцессионного цикла. Их отсутствие ведет к снижению качества лесных ресурсов, накоплению горючих материалов и провоцирует обширные неконтролируемые пожары. Особенностью современного периода является нарушение природной ритмики пожаров потеплением, хозяйственной деятельностью человека, инвазией разного вида вредителей леса и т. д. Представленные в исследовании ряды наблюдения, несомненно, коротки и не охватывает сукцессионного цикла в 100 и более лет. Вместе с тем они позволяют выявить определенные закономерности пост-пирогенной динамики лесов для анализа скорости и направленности этих процессов, а также использования в практической деятельности.

Работа выполнена в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hirschberger P. Forests ablaze. Causes and effects of global forest fires. – Deutschland, Berlin: WWF, 2017. – 108 p. URL: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Study-Forests-Ablaze.pdf> (дата обращения 15.03.2021).
2. US Forest Service. URL: <https://www.fs.fed.us> (дата обращения 15.03.2021).
3. Green Policy. URL: <http://www.greenpolicy360.net> (дата обращения 15.03.2021).
4. Bery L.E., Arsenault A. Regional case studies. the ecological importance of mixed-severity fires. – 2015. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128027493/the-ecological-importance-of-mixed-severity-fires> (дата обращения 15.03.2021).
5. Giglio L., Randerson J.T., Van der Werf G.R. Analysis of daily, monthly and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4) // Journal of Geophysical Research. – 2013. – V. 118. – P. 1–12. DOI: 10.1002/jgrg.20042.
6. Göltenboth F., Langenberger G., Widmann P. Tropical lowland evergreen rainforest // Ecology of Insular Southeast Asia. – 2006. – P. 297–383. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527394500176> (дата обращения 15.03.2021).
7. Пасько О.А., Захарченко А.В., Ковязин В.Ф. Анализ землеустройства лесного фонда // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 127–138.
8. Baranovskii N.V., Kirienko V.A. Ignition of forest combustible materials in a high-temperature medium // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2020. – V. 93 (5). – P. 1266–1271. DOI: 10.1007/s10891-020-02230-4.
9. Korovin G.N., Isaev A.S. Forest fire protection as the most important element of national security of Russia // Forest Bulletin. – 1998. – P. 8–9. URL: https://ec.europa.eu/echo/what-we-do/civil-protection/forest-fires_en (дата обращения 15.03.2021).
10. Kovyazin V., Romanchikov A., Pasko O. Comparative analysis of forest lands cadastral appraisal estimated with regards to wood and food resources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27 (1). DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012039.
11. Оценка состояния припоселковых кедровников Томской области с использованием данных дистанционного зондирования Земли / О.А. Пасько, О.С. Токарева, А.Д.А. Алшаби, Т.Ю. Черникова, П. Кабраль // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 98–109.
12. Лесной комплекс Томской области. URL: <http://tomsk.gov.ru/ru/ekonomika/lesnoy-kompleks> (дата обращения 15.03.2021).
13. Экологический мониторинг: Состояние окружающей среды Томской области в 2008 году / А.М. Адам, В.А. Конышкин, С.Н. Воробьев, Н.В. Горина. – Томск: Изд-во «Оптимум», 2009 – 144 с.
14. Spatial organization of forestfund / O.A. Pasko, V.F. Kovyazin, A.V. Zakharchenko, N.A. Lebedeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/574/1/012061>
15. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, Ю.А. Полевщикова, С.А. Лежнин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 4. – С. 124–134.
16. The Worldwide Reference System. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/worldwide-reference-system> (дата обращения 15.03.2021).
17. Aboveground biomass prediction by Sentinel1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel 2 data / G.V. Laurin, J. Balling, P. Corona, W. Mattioli, D. Papale, N. Puletti, M. Rizzo, J. Truckenbrodt, M. Urban // Journal of Applied Remote Sensing. – 2018. – V. 12 (1). – 016008. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.12.016008> (дата обращения 15.03.2021).
18. Катаев М.Ю., Кислов А.В., Самохин Е.А. Оценка состояния хвойных растений методами компьютерного зрения // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 23. – № 1. – С. 70–75.
19. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 / A. Krylov, J.L. Mc Carty, P. Potapov, T. Loboda, A. Tyukavina, S. Turubanova, M. Hansen // Env. Res. Lett. – 2014. – V. 9 (10). – P. 1–8. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105007> (дата обращения 15.03.2021).
20. Барталев С.А., Стыченко Ф.В., Егоров В.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. – 2015. – № 2. – С. 83–94.

21. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 1. – С. 36–48.
22. Экспресс-картографирование поврежденных лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat / С.А. Бартаев, Е.А. Лупян, Ф.В. Стыченко, О.Ю. Панова, В.Ю. Ефремов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11. – № 1. – С. 9–20.
23. Использование данных дистанционного зондирования в задачах лесной отрасли / В.А. Хамедов, В.Н. Копылов, Ю.М. Полищук, С.В. Шимов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Т. 11. – № 4. – С. 217–229.
24. Epting J., Verbyla D. Landscape-level interactions of prefire vegetation, burn severity, and postfire vegetation over a 16-year period in interior Alaska // Canadian journal of forest research. – 2005. – V. 35. – P. 1367–1377. URL: <http://dx.doi.org/10.1139/x05-060> (дата обращения 15.03.2021).
25. Щербов Б.Л., Лазарева Е.В., Журкова И.С. Лесные пожары и их последствия. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2015. – 154 с.
26. Kovalyov A.V., Tokareva O.S. Using MODIS NDVI products for vegetation state monitoring on the oil production territory in Western Siberia // MATEC Web of Conferences. – Les Ulis: Space Engineering, 2016. – V. 48. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20164805003> (дата обращения 15.03.2021).
27. Wotton B.M., Flannigan M.D., Marshall G.A. Potential climate change impacts on fire intensity and key wildfire suppression thresholds in Canada // Environmental Research Letters. – 2017. – V. 12 (9). URL: <http://iopscience.iop.org/1748-9326/12/9/095003> (дата обращения 15.03.2021).
28. Flannigan M.D., Cantin A.S. Climate change impacts on future boreal fire regimes // Forest Ecology and Management. – 2012. – V. 294. – P. 35–44. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.09.027.
29. Wildfire management in Canada: review, challenges and opportunities / C. Tumpstra, B. Stocks, X. Cai, M.D. Flannigan // Progress in Disaster Science. – 2020. – V. 5. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590061719300456> (дата обращения 15.03.2021).
30. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming / D. Romps, J. Seeley, D. Volaro, J. Molinari // Science. – 2014. – V. 346 (6211). – P. 851–854. DOI: 10.1126/science.1259100
31. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS / J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Scheel, D.W. Deering // 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium. – USA, Washington, 10–14 December 1974. – V. 1. – P. 309–317.
32. Hudak A.T., Morgan P., Bobbitt M.J. The relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects // Fire Ecology Special Issue. – 2007. – V. 3 (1). – P. 64–90. URL: <https://fireecology.springeropen.com/articles/10.4996/fireecology.0301064> (дата обращения 15.03.2021).
33. Landsat Missions. Documents. URL: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/files> (дата обращения 15.03.2021).
34. Handbook for detecting land cover changes with Landsat data archive. URL: <https://docplayer.net/20015286-Handbook-for-detecting-land-cover-changes-with-landsat-data-archive.html> (дата обращения 15.03.2021).
35. Коррекция материалов Landsat. URL: <http://gis-lab.info/qa/landsat-data-correction.html> (дата обращения 15.03.2021).
36. Мониторинг природных пожаров со спутников. URL: <http://fires.ru> (дата обращения 15.03.2021).
37. Архив погоды в Томске. URL: https://tp5.ru/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B2_%D0%A2%D0%BE%D0%B%D1%81%D0%BA%D0%B5 (дата обращения: 15.03.2021).
38. Велиевич С.Н., Хуторной О.В. Влияние климатических факторов на радиальный рост кедра и лиственницы в экотопах с различной влажностью почвы на юге Западной Сибири // Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2009. – V. 1 (2). – P. 117–132. URL: <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/1220> (дата обращения: 15.03.2021).

Поступила: 09.04.2021 г.

Информация об авторах

Токарева О.С., кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Алшаиби А.Д.А., ведущий сотрудник Главного управления образования Диялы.

Пасько О.А., доктор сельскохозяйственных наук, кандидат биологических наук, заведующий сектором экспериментальных исследований Агрофизического научно-исследовательского института.

UDC 630:628.8:911.5/9

ASSESSMENT OF RESTORATION DYNAMICS OF BURNT FOREST AREA VEGETATION USING LANDSAT SATELLITE DATA

Olga S. Tokareva¹,
ost@tpu.ru

Ahmet D.A. Alshaibi²,
ahmedalshaiby88@gmail.com

Olga A. Pasko³,
oap@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² General Department of Education, Diyala,
1, Almuhafada avenue, Baquba, 32001, Iraq.

³ Agrophysical Research Institute,
14, Grazhdansky avenue, St-Petersburg, 195220, Russia.

Relevance. Up to 400 thousand forest fires that occur annually on Earth lead to the release of up to four billion tons of carbon into the atmosphere and the burning of up to 0,5 % of the forest area. Forest fires destroy wood resources, reduce the efficiency of their use, and cause enormous damage to the economy. Operational and objective information about their consequences is in demand for solving a set of theoretical and practical problems in the field of land management, cadastre and monitoring of forest lands, as well as for scientific justification of the use, restoration, conservation and protection of forests.

Object: forest lands that exposed to fires.

Subject: post-pyrogenic dynamics of vegetation cover on the example of forest harems of the Tomsk region.

Methods: thematic mapping of the territory according to the state of vegetation; estimation of the amount of photosynthetically active biomass NDVI (Normalize Difference Vegetation Index) and normalized burn index NBR (Normalized Burn Ratio) according to remote sensing data; use of satellite images from the archive of the US Geological Survey and the Internet service Earth Explorer 1999–2017; analysis of information from Landsat satellites 5 (camera TM), 7 (ETM+) and 8 (OLI) using geoinformation technologies and statistical processing of the received data.

Results. The authors have assessed the vegetation state of the burnt forest areas in comparison with the background forest area of similar breed composition (46 % – Siberian Pine, 36 % – Hanging birch, 11 % – Common Aspen, 7 % – Common Pine and Siberian Larch). The disturbance of the vegetation of the studied burnt forest areas is characterized as low. The study uses Landsat satellite images acquired in the period from 1998 to 2016 and obtained from the archives of the US Geological Survey. The NDVI and NBR were calculated for the burnt forest areas and background areas. Sharp differences in their values and anomalous course of annual dynamics for burnt forest area are revealed. The NDVI values for the burnt forest areas and the background area differed by 3–56 %, and the NBR values by 20–198 %. The differences persisted 17 years after the fire. The correlation analysis revealed a significant relationship between the values of the NBR and NDVI of the burnt forest areas and the average values of air temperature and precipitation in the fire season. It turned out to be negative medium and weak strength for May; strong and medium for July and weak for August. Precipitation is associated with the values of the NBR and NDVI of the burnt forest areas with an average strength: negative in May and June, positive in August. This indicates sufficient moisture of the ecotopes at the beginning of the growing season, subsequent drying of the soil, optimal for the vital activity of trees, and its desiccation, which determines the possibility of forest fires. There is a clear territorial variability of the NDVI and NBR values within the burnt forest area boundaries.

Key words:

NDVI, burnt forest area, vegetation cover, remote sensing, NBR, forest fire.

The research was carried out at Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program.

REFERENCES

1. Hirschberger P. *Forests ablaze. Causes and effects of global forest fires*. Deutschland, Berlin, WWF, 2017. 108 p. Available at: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Study-Forests-Ablaze.pdf> (accessed 15 March 2021).
2. *US Forest Service*. Available at: <https://www.fs.fed.us> (accessed 15 March 2021).
3. *Green Policy*. Available at: <http://www.greenpolicy360.net> (accessed 15 March 2021).
4. Berry L.E., Arsenault A. Regional case studies. *The Ecological Importance of Mixed-Severity Fires*, 2015. Available at: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128027493/the-ecological-importance-of-mixed-severity-fires> (accessed 15 March 2021).
5. Giglio L., Randerson J.T., Van der Werf G.R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). *Journal of Geophysical Research*, 2013, vol. 118, pp. 1–12. DOI: 10.1002/jgrg.20042.
6. Göltenboth F., Widmann P. *Tropical lowland evergreen rainforest. Ecology of Insular Southeast Asia*, 2006. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527394500176> (accessed 15 March 2021).
7. Pasko O.A., Zakharchenko A.V., Kovyazin V.F. Analysis of land management of the forest fund. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic*

- University. *Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no 2, pp. 127–138. In Rus.
8. Baranovskii N.V., Kirienko V.A. Ignition of forest combustible materials in a high-temperature medium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2020, vol. 93 (5), pp. 1266–1271. DOI: 10.1007/s10891-020-02230-4.
 9. Korovin G.N., Isaev A.S. Forest fire protection as the most important element of national security of Russia. *Forest Bulletin*, 1998, pp. 8–9. Available at: https://ec.europa.eu/echo/what-we-do/civil-protection/forest-fires_en (accessed 15 March 2021).
 10. Kovyazin V., Romanchikov A., Pasko O. Comparative analysis of forest lands cadastral appraisal estimated with regards to wood and food resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27 (1). DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012039.
 11. Pasko O.A., Tokareva O. S., Alshaibi A.D.A., Chernikova T.Yu., Kabral P. Assessment of the state of near-village cedar forests of the Tomsk region using remote sensing data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 98–109. In Rus.
 12. *Lesnoy kompleks Tomskoy oblasti* [Forest complex of Tomsk region]. Available at: <http://tomsk.gov.ru/ru/ekonomika/lesnoy-kompleks> (accessed 15 March 2021).
 13. Adam A.M., Konyashkin V.A., Vorobyov S.N., Gorina N.V. *Ekologicheskii monitoring: sostoyanie okruzhayushey sredi Tomskoy oblasti v 2008 godu* [Ecological monitoring: the state of the environment of the Tomsk region in 2008]. Tomsk, Optimum Publ. house, 2009. 144 p.
 14. Pasko O.A., Kovyazin V.F., Zakharchenko A.V., Lebedeva N.A. Spatial organization of forestfund. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020. DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/574/1/012061>.
 15. Vorobev O.N., Kurbanov E.A., Polevshchikova Yu.A., Lezhnin S.A. Evaluation of the dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Volga region based on Landsat images. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2015, vol. 12, no. 5, pp. 203–221. In Rus.
 16. *The Worldwide Reference System*. Available at: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/worldwide-reference-system> (accessed 15 March 2021).
 17. Laurin G.V., Balling J., Corona P., Mattioli W., Papale D., Puletti N., Rizzo M., Truckenbrodt J., M. Urban Aboveground biomass prediction by Sentinel1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel 2 data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, vol. 12, no. 1, 016008. Available at: <http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.12.016008> (accessed 15 March 2021).
 18. Kataev M.Yu., Kislov A.V., Samokhin E.A. Assessment of the state of coniferous plants by computer vision methods. *Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 70–75. In Rus.
 19. Krylov A., Mc Carty J. L., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, vol. 9 (10), pp. 1–8. Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105007> (accessed 15 March 2021).
 20. Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A. Satellite assessment of the death of Russian forests from fires. *Forest Science*, 2015, no. 2, pp. 83–94. In Rus.
 21. Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A. Assessment of the accuracy and comparability of thematic maps of forest cover of different spatial resolution on the example of the Middle Volga region. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2016, vol. 13. no. 1, pp. 36–48. In Rus.
 22. Bartalev S.A., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Panova O.Yu., Efremov V.Yu. Express mapping of forest damage in Russia by fires from satellite images. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2014, vol. 11, no. 1, pp. 9–20. In Rus.
 23. Khamedov V.A., Kopylov V.N., Polishchuk Yu.M., Shimov S.V. The use of remote sensing data in the problems of the forest industry. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2006, vol. 11, no. 4, pp. 217–229.
 24. Epting J., Verbyla D. Landscape-level interactions of prefire vegetation, burn severity, and postfire vegetation over a 16-year period in interior Alaska. *Canadian journal of forest research*, 2005, vol. 35, pp. 1367–1377.
 25. Shcherbov B.L., Lazareva E.V., Zhurkova I.S. *Lesnye pozhary i ikh posledstviya* [Forest fires and their consequences]. Novosibirsk, SO RAN Publ., branch GEO, 2015. 154 p.
 26. Kovalyov A.V., Tokareva O.S. Using MODIS NDVI products for vegetation state monitoring on the oil production territory in Western Siberia. *MATEC Web of Conferences. Les Ulis: Space Engineering*, 2016, vol. 48. Available at: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20164805003> (accessed 15 March 2021).
 27. Wotton B.M., Flannigan M.D., Marshall G.A. Potential climate change impacts on fire intensity and key wildfire suppression thresholds in Canada. *Environmental Research Letters*, 2017, vol. 12 (9). Available at: <http://iopscience.iop.org/1748-9326/12/9/095003> (accessed 15 March 2021).
 28. Flannigan M.D., Cantin A.S. Climate change impacts on future boreal fire regimes. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 294, pp. 35–44. DOI:10.1016/j.foreco.2012.09.027.
 29. Tymstra C., Stocks B., Cai X., Flannigan M.D. Wildfire management in Canada: review, challenges and opportunities. *Progress in Disaster Science*, 2020, vol. 5. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590061719300456> (accessed 15 March 2021).
 30. Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*. USA, Washington, 10–14 December, 1974. Vol. 1, pp. 309–317.
 31. Romps D., Seeley J., Vollaro D., Molinari J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science*, 2014, vol. 346 (6211), pp. 851–854. DOI: 10.1126/science.1259100
 32. Hudak A.T., Morgan P., Bobbitt M.J. The relationship of multi-spectral satellite imagery to immediate fire effects. *Fire Ecology Special Issue*, 2007, vol. 3 (1), pp. 64–90.
 33. *Landsat Missions. Documents*. Available at: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/files> (accessed 15 March 2021).
 34. *Handbook for detecting land cover changes with Landsat data archive*. Available at: (accessed 15 March 2021).
 35. *Korrektaiya materialov Landsat* [Correction of Landsat materials.]. Available at: <http://gis-lab.info/qa/landsat-data-correction.html> (accessed 15 March 2021).
 36. *Monitoring prirodnykh pozharov so sputnikov* [Monitoring of wildfires from satellites]. Available at: <http://fires.ru> (accessed 15 March 2021).
 37. *Arhiv pogody* [Weather archive]. Available at: https://rp5.ru/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B2_%D0%A2%D0%BE%D0%BC%D1%81%D0%BA%D0%B5 (accessed 15 March 2021).
 38. Velisevich S.N., Khutornoy O.V. Influence of climatic factors on the radial growth of cedar and larch in ecotopes with different soil moisture in the south of Western Siberia. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2009, vol. 1 (2), pp. 117–132. In Rus.

Received: 9 April 2021.

Information about the authors

Olga S. Tokareva, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ahmet D.A. Alshaibi, leading employee, General Department of Education, Diyala.

Olga A. Pasko, Dr. Sc., Cand. Sc., head of the experimental research sector, Agrophysical Research Institute.

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

Подписано к печати 30.07.2021. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 23,26. Уч.-изд. л. 21,04.
Заказ 139-21. Тираж 500 экз. Цена 1020 руб.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.