

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 331, № 9, 2020

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2020

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

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 331, № 9, 2020

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY. GEO ASSETS ENGINEERING

Editorial Board

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

AIMS AND SCOPE

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

- Geo Assets exploration and refining;
- Geo Assets mining 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

- Совершенствование кислотных обработок в коллекторах, характеризующихся различной карбонатностью (на примере нефтяных месторождений Пермского края)
Мартышев Д.А., Новиков В.А.
- Численное исследование влияния избытка первичного воздуха на процессы горения в топочной камере энергетического котла с многоканальными вихревыми горелками
Гиль А.В., Заворин А.С., Кокшарев О.М., Воронцова Е.С.
- Геохимические особенности распределения ртути в листьях и годовых кольцах тополя урбанизированных территорий на примере г. Новосибирск
Турсуналиева Е.М., Юсупов Д.В., Рихванов Л.П., Ляпина Е.Е.
- Эволюция концептуальной модели низкопроницаемого трещиноватого коллектора
Ахмерова А.В., Галлямова Д.Ч., Мельников А.В., Харитонцева П.А.
- Сравнительная петрофизическая характеристика юрских разрезов Останинского и Двуреченского месторождений (в связи с нефтегазоносностью доюрских отложений Томской области)
Алеева А.О., Исаев В.И., Лобова Г.А.
- Резерв повышения эффективности разработки малоомощных рудных месторождений
Голки В.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Стадник Д.А.
- Пространственное распределение химических элементов в водотоке штольни 504 площадки «Дегелен»
Шакенов Е.З., Дюсембаева М.Т., Лукашенко С.Н., Темирганова А.Е., Есильканов Г.М., Мухамедияров Н.Ж.
- Моделирование законов распределений мощности ветроэнергетических и солнечных станций
Манусов В.З., Лемешко Б.Ю., Халдаров Ш.К.
- Выбор топлива для тепловых электростанций в районах нового освоения с учетом фактора неопределенности
Шакиров В.А.
- Климатические и гидрологические факторы, действующие в районе створа для строительства моста «Сахалин–материк»
Мелкий В.А., Верхотуров А.А., Пищальник В.М., Братков В.В.
- Адаптивная информационно-измерительная система для мониторинга протекания физико-химического процесса
Цавнин А.В., Филипас А.А., Беляев А.С., Рожнев Н.В.
- Повышение эффективности ремедиации нефтезагрязненных почв в природно-климатических условиях севера Томской области и сопредельных регионов с применением аборигенных микроорганизмов
Франк Ю.А., Никитчук К.Л., Сапега А.А., Лукьянова Е.А., Ивасенко Д.А., Косов А.В., Герасимчук А.Л., Евсеева Н.С.
- Исследование трещиноватости на месторождении облицовочного камня с привлечением метода георадиолокации
Данильев С.М., Данильева Н.А., Исакова Е.П., Ашкар Г.Х.
- Влияние поверхностно-активных веществ на искривление скважин при бурении в анизотропных горных породах
Нескормных В.В., Пушмин П.С., Попова М.С.
- Литоология и коллекторские свойства докембрийских отложений Лено-Анабарской нефтегазоносной области
Вараксина И.В., Шаваров Р.Д.
- Люминесценция кварц-халцедоновых образований Кузбасса и её связь с геохимическими особенностями агатовой минерализации
Борозновская Н.Н., Звягинцева Е.В., Корнева А.П., Небера Т.С.

CONTENTS

- 7 Improving acidizing in the collectors characterized by different carbonate content (on the example of oil fields of Perm krai)
Martyushev D.A., Novikov V.A.
- 18 Numerical study of effect of primary air excess on combustion in a furnace chamber of a utility boiler with multi-channel swirl burners
Gil A.V., Zavorin A.S., Koksharev O.M., Vorontsova E.S.
- 28 Geochemical characteristics of mercury distribution in poplar leaves and annual rings of urbanized territories on the example of Novosibirsk
Tursunaliyeva E.M., Yusupov D.V., Rikhsanov L.P., Lyapina E.E.
- 39 Evolving of a low permeability fractured reservoir conceptual model
Akhmerova A.V., Gallyamova D.Ch., Melnikov A.V., Kharitontseva P.A.
- 49 Comparative petrophysical characteristic of the Jurassic sections of the Ostaninskoe and Dvurechenskoe fields (in relation to petroleum potential of pre-Jurassic deposits of the Tomsk region)
Aleeva A.O., Isaev V.I., Lobova G.A.
- 63 Reserve for increasing efficiency of development of low-powered ore deposits
Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z., Stadnik D.A.
- 70 Spatial distribution of chemical elements in the streamflow of tunnel 504 at «Degelen» site
Shakenov Ye.Z., Dyusembayeva M.T., Lukashenko S.N., Temirzhanova A.E., Yesilkanov G.M., Mukhamediyarov N.Zh.
- 84 Modeling of distribution laws for wind turbine and solar battery output power
Manusov V.Z., Lemesheko B.Yu., Khaldarov Sh.K.
- 96 Choice of fuel for heat power plants in areas of new development taking into account the uncertainty factor
Shakirov V.A.
- 108 Climatic and hydrological factors operating in the area of leading line for construction of bridge «Sakhalin–Continent»
Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Pishchalnik V.M., Bratkov V.V.
- 122 Adaptive information and measurement system for monitoring physical and chemical process behavior
Tsavnin A.V., Filipas A.A., Belyaev A.S., Rozhnev N.V.
- 130 Improvement of the efficiency of oil-contaminated soils remediation in the natural conditions of the north Tomsk region and the nearby regions by indigenous microorganisms application
Frank Yu.A., Nikitchuk K.L., Sapega A.A., Lukyanova E.A., Ivasenko D.A., Kosov A.V., Gerasimchuk A.L., Evseeva N.S.
- 140 Research of cracking at facing stone deposit using the georadar method
Daniliev S.M., Danilieva N.A., Isakova E.P., Ashkar G.K.
- 146 Influence of surfaces on boring of wells while drilling in anisotropic rocks
Neskoromnykh V.V., Pushmin P.S., Popova M.S.
- 159 Lithology and reservoir properties of Precambrian deposits of the Lena-Anabar oil-and-gas region
Varaksina I.V., Shavarov R.D.
- 170 Luminescence of quartz-chalcedony formations of Kuzbass and its relation to geochemical characteristics of agates
Boroznovskaya N.N., Zvyagintseva E.V., Korneva A.P., Nebere T.S.

- | | |
|--|---|
| <p>Проблема использования отходов лакокрасочных материалов и их утилизация
 Барханаджян А.Л., Хакимов Р.М., Ибрагимов Б.Д., Собирова Д.К., Абдукаримова Г.У., Айрапетов Д.А.</p> <p>Выделение петрофизических типов карбонатных пород по данным ядерного магнитного резонанса с учетом их литологических особенностей
 Путилов И.С., Разницын А.В.</p> <p>Геология и минералогия карбонатитов линейно-трещинного типа рудопроявления Майке Маятасского рудного района (Северный Улытау)
 Степанец В.Г., Левин В.Л., Ли Е.С., Бекенова Г.К., Жуков Н.М., Хакимжанов М.С.</p> <p>Обоснование технологических параметров термометрического контроля состояния ледопородного ограждения
 Семин М.А., Зайцев А.В., Паршаков О.С., Желнин М.С.</p> | <p>179 Problem of using waste of paint and varnishing materials and their disposal
 Barkhanadzhyan A.L., Khakimov R.M., Ibragimov B.D., Sobirova D.K., Abdukarimova G.U., Ayrapetov D.A.</p> <p>186 Identification of carbonate rocks petrophysical types with nuclear magnetic resonance experiments data taking into account their lithological characteristics
 Putilov I.S., Raznitsyn A.V.</p> <p>199 Geology and mineralogy of carbonatites of linear-cracked type in Mayke ore occurrence of Mayatas ore region (North Ulytau)
 Stepanets V.G., Levin V.L., Li E.S., Bekenova G.K., Zhukov N.M., Khakimzhanov M.S.</p> <p>215 Substantiation of technological parameters of thermal control of the frozen wall
 Semin M.A., Zaitsev A.V., Parshakov O.S., Zhelnin M.S.</p> |
|--|---|

УДК 622.276

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КИСЛОТНЫХ ОБРАБОТОК В КОЛЛЕКТОРАХ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХСЯ РАЗЛИЧНОЙ КАРБОНАТНОСТЬЮ (НА ПРИМЕРЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПЕРМСКОГО КРАЯ)

Мартюшев Дмитрий Александрович¹,
martyushevdm@inbox.ru

Новиков Владимир Андреевич²,
novikov.vladimir.andr@gmail.com

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

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

Актуальность работы обусловлена тем, что технологические параметры проведения кислотной обработки (время выдержки в пласте и объем состава) значительно влияют на результат геолого-технического мероприятия. По мнению многих специалистов, требует изучения вопрос о необходимости в технологическом процессе проведения обработки этапа выдержки кислоты в пласте и его продолжительности. Удельный объем кислотного состава, или его количество в расчете на метр обрабатываемой толщины пласта, определяется различными факторами, такими как состав горной породы, свойства призабойной зоны, желаемая глубина проникновения состава в пласт и др.

Цель: оценка влияния технологических параметров проведения кислотных обработок на эффективность мероприятия на нефтяных месторождениях Пермского края, характеризующихся различной карбонатностью горных пород.

Методом исследования является проведение лабораторных экспериментов с использованием прибора для определения карбонатности горных пород – карбонатомера КМ-04М, фильтрационных установок с моделированием пластовых условий УИК-5ВГ и АФС-300, а также установки микрофокусной рентгенооскопии.

Результаты. На образцах керн месторождений Пермского края, отличающихся содержанием компонентов «кальцит-доломит-нерастворимый остаток» проведено моделирование кислотного воздействия с использованием двух кислотных составов с определением коэффициента изменения проницаемости и рентгеномографическими исследованиями. Рентгеномографические эксперименты на одном образце керна выполнены дважды: до и после моделирования кислотного воздействия. По данным фильтрационных и рентгеномографических экспериментов подобраны условия эффективного применения кислотных составов на рассматриваемых месторождениях. Обобщение всех результатов позволило разработать рекомендации по оптимизации технологических параметров проведения обработок на рассматриваемых объектах. Применение рентгеновской томографии позволило выделить случаи, для которых в результате воздействия характерен прирост пустотности, но снижение проницаемости. Данный факт позволит проводить дальнейшие работы по совершенствованию рецептур составов и технологий их применения.

Ключевые слова:

Кислотные обработки, карбонатные коллектора, фильтрационные исследования, томографические исследования, коэффициент восстановления проницаемости, технологические параметры, время выдержки в пласте, объем закачиваемого состава, технологическая эффективность.

Введение

Одним из наиболее распространенных методов повышения продуктивности скважин на месторождениях Пермского края является проведение соляно-кислотных обработок различных видов. Данный метод является наиболее простым и имеет большой опыт применения как на месторождениях Пермского края, так и за его пределами. Несмотря на это, стоит серьезно относиться к планированию кислотного воздействия, так как по статистике около 45 % проведенных операций не достигают ожидаемого эффекта [1–7].

При проведении кислотных обработок значительное влияние на результат мероприятия оказывают технологические параметры, к которым относят:

- наличие этапа выдержки кислотного состава в пласте на реакцию и его продолжительность;
- расход кислотного состава на метр обрабатываемой толщины пласта;

- скорость закачки кислотного состава в пласт.

Необходимость в технологическом процессе проведения обработки этапа выдержки кислоты в пласте и времени его продолжительности, по мнению многих специалистов, требует изучения.

По данным [8] известны две технологические схемы проведения обработок. Первая заключается в продажке кислотного состава технологической жидкостью в объеме, равном объему насосно-компрессорных труб (НКТ), и выдерживании в пласте на реакции до нейтрализации кислоты. По второй схеме, предложенной В.М. Березиным, объем продажной жидкости увеличивается на величину объема растворенной породы и скважина осваивается без выдерживания кислоты на реакции.

Так, в [9] приводится информация о том, что при обработке карбонатных коллекторов выдержка кислоты нежелательна, так как в пластовых условиях она нейтрализуется еще на этапе прохождения по поровым каналам и трещинам, а своевременное удаление

состава после реакции позволит предотвратить закупорку пустотного пространства.

Удельный объем кислотного состава, или его количество в расчете на метр обрабатываемой толщины пласта, определяется различными факторами, такими как свойства призабойной зоны, желаемая глубина проникновения состава в пласт и др.

На практике объемы закачиваемых кислотных составов обычно определяют эмпирическим путем [9]. При первичной кислотной обработке, направленной на растворение пород и примесей, обычно закачивают 0,5 м³/м кислотного состава. При повторной обработке расход принято увеличивать вдвое.

В работе [10] автор приводит выводы о том, что увеличение удельного расхода кислотного состава является одним из путей повышения технологической эффективности кислотных обработок.

Таким образом, подбор технологических параметров (объем состава, время выдержки, скорость закачки) проведения кислотного воздействия на карбонатные коллектора должен проводиться с учетом строения и петрофизических свойств горных пород.

Для определения оптимальных технологических параметров проведения кислотной обработки различными составами авторами проведена серия фильтрационных испытаний на современном оборудовании при термодинамических условиях, соответствующих пластовым, для рассматриваемых объектов [11–17]. К исследованию приняты два кислотных состава (Состав 1 и Состав 2 – *реальные названия составов не указаны в связи с конфиденциальностью данной информации*), которые наиболее распространены на территории Пермского края и применяются в настоящее время. Основные свойства кислотных составов приведены в табл. 1.

Для моделирования кислотного воздействия на образцах керна с различными технологическими параметрами нами были выбраны семь карбонатных объектов (одного геологического возраста) месторождений Пермского края, характеризующиеся значительными остаточными извлекаемыми запасами и отличающиеся между собой карбонатностью горных пород. Основные геолого-физические характеристики рассматриваемых объектов представлены в табл. 2.

Таблица 1. Основные свойства кислотных композиций

Table 1. Basic properties of acid compositions

Показатель Indicator	Состав 1 Composition 1	Состав 2 Composition 2
Внешний вид Appearance	Прозрачная жидкость от бесцветной до темно-коричневого цвета Clear liquid from colorless to dark brown	Прозрачная жидкость от бесцветной до коричневого цвета Clear liquid from colorless to brown color
Массовая доля соляной кислоты, % в пределах Mass fraction of hydrochloric acid, % within	10,5–14,5	10,5–14,5
Плотность при 20 °C, г/см ³ , в пределах Density at 20 °C, g/cm ³ , within	1,04–1,09	1,04–1,08
Компонентный состав Component composition	Водный раствор соляной кислоты Aqueous hydrochloric acid solution	
	Ингибитор коррозии Corrosion inhibitor	Высокоэффективные целевые добавки Highly effective target supplements
	ПАВ surfactants	ПАВ surfactants
	–	Модифицирующие компоненты Modifying components

Таблица 2. Геолого-физическая характеристика исследуемых объектов

Table 2. Geological and physical characteristics of the studied objects

Параметр Indicator	Месторождение/Field						
	Гагаринское Gagarinskoe	Магдовское Magovskoe	им. Сухарева behalf of Sukharev	Озерное Ozernoe	Баклановское Baklanovskoe	Винниковское Vinnikovskoe	Дороховское Dorokhovskoe
Средняя глубина залегания, м Average depth, m	2001,0	2270,0	1950,0	1997,0	1300,0	1795,0	1959,0
Пористость, % Porosity, %	11,0	10,0	11,0	9,0	15,0	10,0	11,0
Проницаемость, мД Permeability, md	39,0	4,0	25,0	29,0	26,0	18,0	42,0
Средняя эфф. нефтенас. толщина, м Average net pay thickness, m	12,3	22,2	13,2	15,7	3,4	2,1	4,2
Вязкость нефти в пл. усл., мПа*с Oil viscosity at reservoir conditions, MPa * c	1,13	0,97	1,5	1,31	7,8	6,8	1,98
Газосодержание, м ³ /т Gas content, m ³ /t	185,6	291,6	125,0	141,0	30,3	43,5	76,0
Рпл начальное, МПа Initial reservoir pressure, MPa	20,7	23,0	21,5	18,2	12,6	17,8	17,8
Давление насыщения, МПа Saturation pressure, MPa	14,4	16,2	12,0	11,0	9,4	7,2	10,7

Оценка карбонатности горных пород и проведение исследований в свободном объеме

Карбонатность, характеризующая содержание в горной породе кальцита, доломита и других компонентов, является важнейшей характеристикой, определяющей успешность того или иного химического

воздействия. С целью оценки карбонатности образцов горных пород выполнены специальные исследования с применением прибора – карбонатомера. Карбонатность горных пород рассматриваемых месторождений Пермского края представлена в табл. 3.

Таблица 3. Результаты определения карбонатности горных пород

Table 3. Results of determination of carbonate rocks

Месторождение Field	Количество исследований Number of studies	Компонент/Component		
		Кальцит Calcite	Доломит Dolomite	Нерастворимый остаток* Insoluble residue
Гагаринское Gagarinskoe	18	85,3 – 87,6** 86,5	8,6 – 9,7 9,2	3,8 – 5,0 4,3
Маговское Magovskoe	15	85,9 – 88,6 87,1	1,2 – 1,3 1,3	10,1 – 12,9 11,6
им. Сухарева behalf of Sukharev	15	54,2 – 59,6 57,5	28,1 – 30,1 29,3	11,2 – 16,1 13,2
Озерное Ozernoe	18	9,2 – 12,7 10,8	75,6 – 78,2 77,1	11,7 – 12,6 12,1
Баклановское Baklanovskoe	22	55,0 – 58,9 57,3	2,3 – 2,9 2,7	38,8 – 42,1 40,0
Винниковское Vinnikovskiy	12	0	82,5 – 87,3 84,6	12,7 – 17,5 15,4
Дороховское Dorokhovskoe	20	95,5 – 97,3 96,2	0 – 0,7 0,3	2,7 – 4,3 3,5

Примечание: * нерастворимый остаток в основном представлен аргиллитами и алевролитовой кварцевой примесью; ** интервал изменения компонента/среднее значение.

Note: * the insoluble residue is mainly represented by mudstones and siltstone quartz impurities; ** the range of variation of component/average.

Важным параметром при расчете дизайна кислотного воздействия является время нейтрализации кислотного состава, который зависит от компонентов, входящих в состав горной породы [18–20]. Факт наличия или отсутствия реакции можно оценить как по выделению углекислого газа (визуально), так и регулярным измерением pH показателя с помощью прибора S47 Seven Multi (табл. 4).

Таблица 4. Оценка времени нейтрализации кислотных составов

Table 4. Time neutralize acidic formulations

Месторождение Field	Время нейтрализации, мин Neutralization time, min	
	Состав 1 Composition 1	Состав 2 Composition 2
Гагаринское Gagarinskoe	320	420
Маговское Magovskoe	320	420
им. Сухарева behalf of Sukharev	400	500
Озерное Ozernoe	440	500
Баклановское Baklanovskoe	380	200
Винниковское Vinnikovskiy	450	420
Дороховское Dorokhovskoe	210	420

Из табл. 3 и 4 видно, что различное содержание компонентов «кальцит–доломит–нерастворимый остаток» в горной породе оказывает существенное влияние на время нейтрализации кислотных составов. Проведение

таких исследований позволяет подобрать наиболее эффективную технологию (время выдержки композиции в пласте) проведения кислотного воздействия.

Проведение фильтрационных исследований

В качестве основного параметра, характеризующего эффективность кислотного воздействия по данным фильтрационных экспериментов, принята величина коэффициента изменения (восстановления) проницаемости ($K_{н2}/K_{н1}$). Данный коэффициент представляет собой отношение проницаемости образца керна по нефти после кислотного воздействия ($K_{н2}$) к значению этой проницаемости до воздействия ($K_{н1}$). Использовались образцы горных пород размером 30×30 мм.

В ходе экспериментов моделировались разнообразные условия проведения обработок для каждого из представленных месторождений: с наличием этапа выдержки состава в пласте (1, 2, 4, 6 час) и с его отсутствием; с различными объемами закачиваемого состава (1, 2, 4, 6 поровых объемов) и скоростями закачки. Каждый фильтрационный эксперимент дублировался (проведено порядка 300 исследований), в табл. 1 представлены результаты фильтрационных испытаний кислотных составов на образцах керна.

В табл. 5 стоит отметить отдельные эксперименты, которые сопровождались рентгеномографическими исследованиями.

В одном случае на образце керна Озерного месторождения Составом 1 результаты эксперимента оказались неудачными – проницаемость несколько уменьшилась (0,91). При этом совместный анализ результатов фильтрационных экспериментов и рент-

геновской томографии образца керна обнаруживает весьма противоречивую ситуацию: с одной стороны, моделирование на образце кислотной обработки Составом 1 приводит к образованию весьма выраженного канала фильтрации (рис. 1); с другой – к снижению

проницаемости образца по нефти. Причиной отмеченного явления может быть кольматация вновь образованного канала фильтрации продуктами, сопутствующими реакции, что весьма вероятно, учитывая шестичасовую выдержку состава в пласте.

Таблица 5. Результаты фильтрационных испытаний кислотных составов

Table 5. Results of filtration tests of acid compositions

Месторождение Field	Объем прокачки КС в объемах пор Volume of pumping acid composition in pore volumes	Тв, час Holding time, hour	Кн2/Кн1	
			Состав 1 Composition 1	Состав 2 Composition 2
Гагаринское Gagarinskoe	1	0/1/2/4/6	1,1/1,2/1,8/1,1/0,06*	1,5/3,2/6,6/7,5/8,8
	2	0/1/2/4/6	1,3/1,2/1,9/2,1/0,8	1,5/2,5/3,8/6,8/1,6
	4	0/1/2/4/6	0,38/0,8/7,1/5,5/7,8	0,9/1,1/1,7/2,1/1,4
	6	0/1/2/4/6	0,8/1,4/3,8/1,4/1,3	1,8/6,4/8,1/5,4/6,1
Маговское Magovskoe	1	0/1/2/4/6	–/67/452/1204/8562,8	11,2/45,3/34,9/55,6/98,6
	2	0/1/2/4/6	–/124/6741/24554/56160	144,7/188,5/253/2345/4771
	4	0/1/2/4/6	–/89/684/2246/11254	167/256/1542/2342/1984
	6	0/1/2/4/6	–/145/542/986/1145	142/159/223/1157/1845
им. Сухарева behalf of Sukharev	1	0/1/2/4/6	4,3/2,1/2,4/11,1/12,1	18,1/5,6/2,4/3,1/3,2
	2	0/1/2/4/6	1,3/10,5/24,2/12,1/11,2	12,0/15,4/12,0/22,8/30,1
	4	0/1/2/4/6	2,8/26,8/28,9/14,1/15,1	1,1/2,4/14,2/28,4/24,4
	6	0/1/2/4/6	1,2/54,9/88,6/54,2/100,3	1,8/24,6/39,9/110,2/147,5
Озерное Ozernoe	1	0/1/2/4/6	–/24,5/310,1/679,2/399,1	15,4/49,6/87,6/100,2/935,4
	2	0/1/2/4/6	–/54,1/245,1/648,6/0,9	102/468,5/864,2/1195,3/2297
	4	0/1/2/4/6	–/26,8/201,4/354,8/21,5	84,1/14,2/102,5/144,5/365,4
	6	0/1/2/4/6	–/15,4/54,6/87,6/98,6	74,6/164,2/188,4/674,5/721,2
Баклановское Baklanovskoe	1	0/1/2/4/6	–/134,1/6,7/79,3/122,1	13,2/33,3/114,7/133,5
	2	0/1/2/4/6	–/40,4/1344,3/39487,9/–	29,8/86,0/250,7/336,6
	4	0/1/2/4/6	–/176,6/245,6/252,6/301	97,1/388,1/476,8/501,8
	6	0/1/2/4/6	–/89,6/122,5/345,1/894,1	101,2/254,5/653,1/687,5
Винниковское Vinnikovskoe	1	0/1/2/4/6	–/3,9/15,1/22,1/31,5	1,2/7,4/11,2/68,7/169,3
	2	0/1/2/4/6	–/12,1/77,2/180,5/2011	6,7/221,4/754,1/1120,5/1568
	4	0/1/2/4/6	–/22,8/29,8/15,3/30,1	5,4/8,5/146,7/574,6/1214,3
	6	0/1/2/4/6	–/24,5/56,8/77,4/154,7	4,1/15,7/87,6/351,2/364,1
Дороховское Dorokhovskoe	1	0/1/2/4/6	7,3/55,2/156,4/253,1	7,5/98,6/360,7/146,7
	2	0/1/2/4/6	5,1/170,8/374,5/386,0	32,5/88,4/129,2/2931,9
	4	0/1/2/4/6	18,9/411,2/7805,5/10416	244,1/988,5/2441,2/3423,0
	6	0/1/2/4/6	41,2/2344,2/6875,9/5542	111,2/1564,8/4289,4/1201,1

Примечание: * указано среднее значение.

Note: * average value.

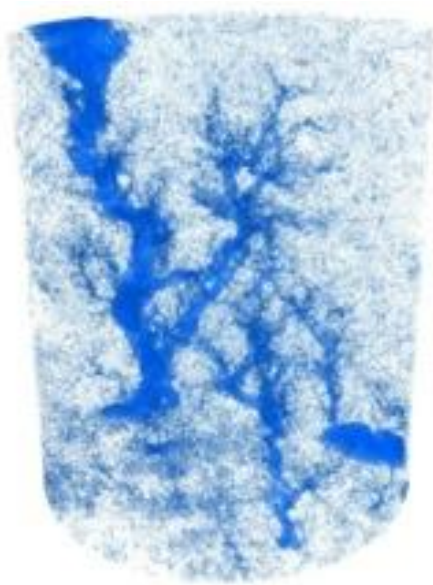


Рис. 1. Изображение образца керна после шестичасовой выдержки кислотного состава 1

Fig. 1. Core sample image in six hours of shutter of acid composition no. 1

Для оценки данного предположения на представленном образце керна после повторной экстракции проведены фильтрационные испытания с определением проницаемости по нефти. Коэффициент восстановления проницаемости в данном случае составил 7000, указывая на кольматацию ранее образованного канала продуктами, сопутствующими реакции. Проведенные опыты позволяют говорить о том, что увеличение времени выдержки не всегда приводит к более существенной эффективности обработки [21–24].

Для Маговского и Баклановского месторождений отмечается тенденция увеличения коэффициента проницаемости при росте объема закачиваемого кислотного состава при его выдержке в пласте. Как видно из рис. 2, после моделирования кислотного воздействия на образцах получены значительные по размерам каналы фильтрации – «червоточины».

Для месторождения им. Сухарева отмечается низкая эффективность составов, которая, вероятно, связана с невысокой карбонатностью и существенной глинистостью горной породы. Сравнительный анализ представленных на рис. 3 моделей образца до и после кислотной обработки позволяет сделать вывод об

увеличении общей пустотности (до 23 %) и проницаемости (в 2,4 раза).

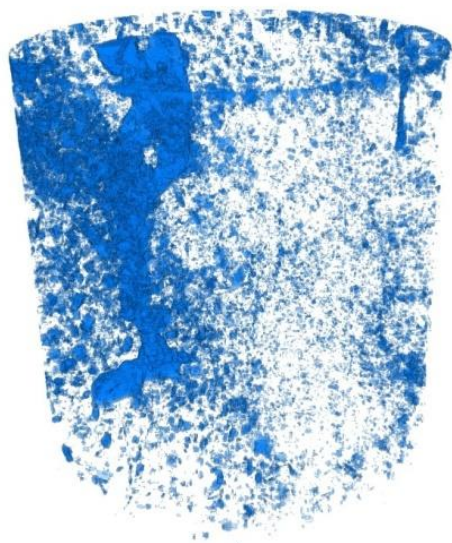


Рис. 2. Результаты томографических исследований образца Баклановского месторождения после кислотного воздействия

Fig. 2. Image of core sample from the Baklanovskoe field after acid exposure

Также интересные результаты получены при проведение фильтрационных экспериментов на образцах

керна Гагаринского месторождения. Из результатов, представленных в таблице, видно, что ни в одном случае опыты не привели к сколь значимому результату. В целом эффективность кислотного воздействия можно считать низкой (рис. 4).

По результатам исследований кислотных составов отмечено, что увеличение скорости закачки приводит к росту коэффициента проницаемости по нефти после кислотной обработки (рис. 5) [25–32].

На основе фильтрационных и томографических испытаний сформированы рекомендации по эффективному применению кислотных составов на рассматриваемых месторождениях, которые представлены в табл. 6.

Анализ проведенных кислотных обработок на Баклановском и Гагаринском месторождениях

По рекомендациям, представленным в табл. 6, проведены кислотные обработки Составом 1 на Баклановском месторождении с двух, трех и четырех часовой выдержкой в пласте, объем кислотного состава во всех случаях составлял 2 м³/м. Интервалы изменений и средние значения показателей технологической эффективности обработок представлены в табл. 7. В таблице также представлены результаты ранее проведенных кислотных обработок Составом 1 с указанным объемом состава при шестичасовой выдержке в пласте.



a/a



б/б

Рис. 3. Изображение образца керна месторождения им. Сухарева: а) до кислотного воздействия; б) после кислотного воздействия

Fig. 3. Image of the core sample field Sukharev: a) before acid exposure; b) after acid exposure

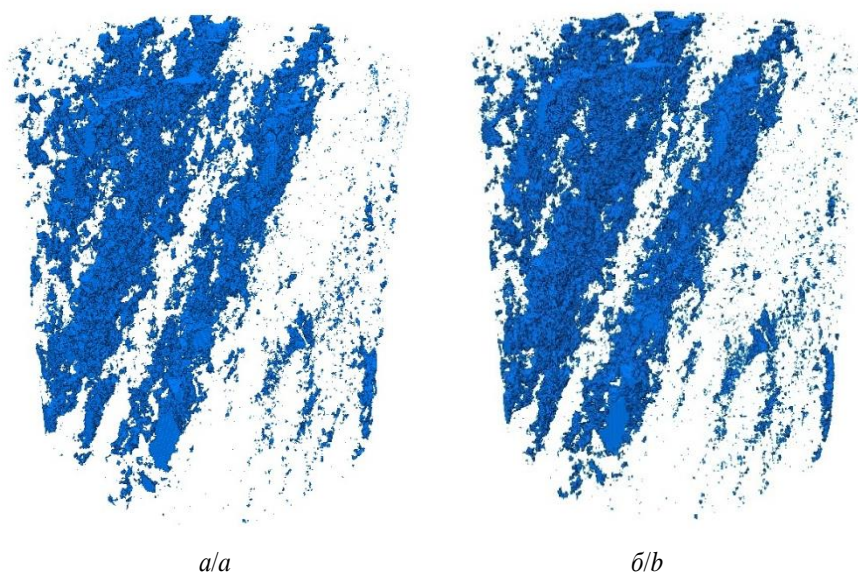


Рис. 4. Результаты томографических исследований образца Гагаринского месторождения: а) до кислотного воздействия; б) после кислотного воздействия

Fig. 4. Image of core sample from the Gagarinskoe field: a) before acid exposure; b) after acid exposure

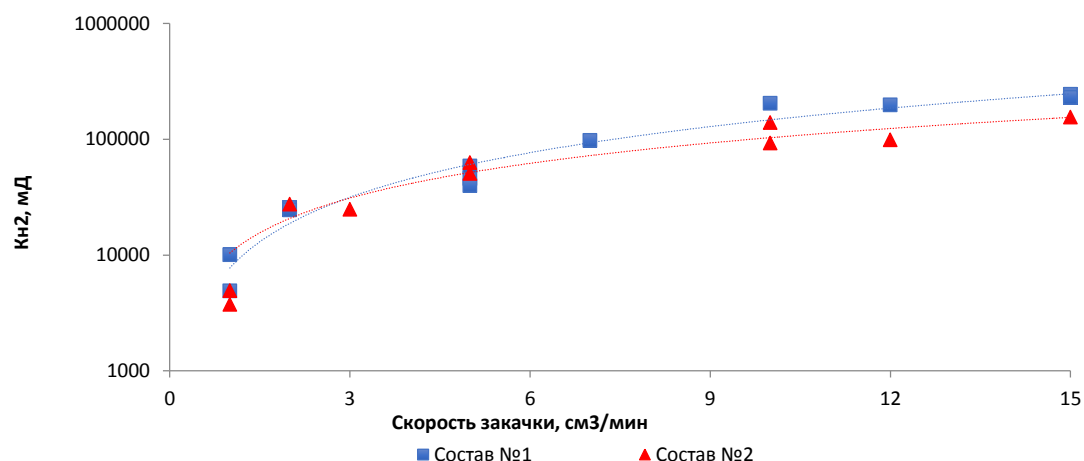


Рис. 5. Зависимость проницаемости образцов по нефти после кислотной обработки от скорости закачки кислотных составов

Fig. 5. Dependence of permeability of the samples for oil after acid treatment on injection rate of acid compositions

Таблица 6. Рекомендации по применению кислотных составов для обработок на рассматриваемых объектах

Table 6. Recommendations for using acidic compositions for treatments at the studied sites

Месторождение Field	Продолжительность выдержки, час Holding time, hour		Объем состава, м ³ /м Volume of composition, m ³ /m	
	Состав № 1 Composition № 1	Состав № 2 Composition № 2	Состав № 1 Composition № 1	Состав № 2 Composition № 2
Гагаринское Gagarinskoe	без without	без without	до 1 up to 1	до 2 up to 2
Маговское Magovskoe	до 6 up to 6	до 6 up to 6	до 2 up to 2	до 2 up to 2
им. Сухарева behalf of Sukharev	до 2 up to 2	без without	до 2 up to 2	до 2 up to 2
Озерное Ozernoe	до 4 up to 4	до 8 up to 8	до 1 up to 1	до 2 up to 2
Баклановское Baklanovskoe	до 4 up to 4	до 4 up to 4	до 4 up to 4	до 4 up to 4
Винниковское Vinnikovskoe	до 6 up to 6	до 2 up to 2	до 2 up to 2	до 1 up to 1
Дороховское Dorokhovskoe	до 4 up to 4	до 4 up to 4	до 6 up to 6	до 6 up to 6

Таблица 7. Эффективность проведенных кислотных обработок Составом 1 на Баклановском месторождении
Table 7. Effectiveness of acid treatments with composition no. 1 at the Baklanovskoe field

Показатель эффективности Performance indicator	Значение показателя эффективности (числитель – интервал изменения; знаменатель – среднее значение) Significance efficiency (numerator – change interval; denominator – average value)			
	Выдержка, ч/Holding time, h			
	2	3	4	6
Фактический прирост дебита нефти, т/сут Actual oil flow rate, t/day	$\frac{1,7 - 5,3}{3,4}$	$\frac{0,3 - 5,2}{3,2}$	$\frac{1,9 - 8,6}{4,3}$	$\frac{0,9 - 3,6}{2,6}$
Удельный фактический прирост дебита нефти, т/(сут·м) Specific actual increase in oil production rate, t/(day·m)	$\frac{0,32 - 2,62}{1,05}$	$\frac{0,05 - 2,17}{1,02}$	$\frac{0,12 - 5,12}{1,07}$	$\frac{0,10 - 2,02}{0,90}$
Время работы с эффектом, сут. Time of work with the effect, day	$\frac{13,5 - 229,6}{127,1}$	$\frac{7,0 - 285,6,0}{123,0}$	$\frac{16,4 - 205,5}{123,3}$	$\frac{12,2 - 209,9}{108,5}$
Доп. добыча нефти, т Additional oil production, tons	$\frac{37,7 - 180,9}{89,6}$	$\frac{34,2 - 254,2}{94,5}$	$\frac{48,9 - 289,5}{116,2}$	$\frac{24,5 - 227,1}{86,8}$
Количество операций Number of operations	9	7	8	7

Как следует из анализа представленных в таблице данных, показатели технологической эффективности для обработок, выполненных с четырехчасовой выдержкой кислотного Состава 1 в пласте, имеют большие значения, чем для обработок с шестичасовой выдержкой, которые применялись ранее: фактический прирост дебита увеличился на 65 % (с 2,6 до 4,3 т/сут), средняя дополнительная добыча нефти на 33 % (с 86,8 до 116,2 т/сут), продолжительность эффекта на 13 % (с 108,5 до 123,3 суток).

Составом 2 проведены кислотные обработки на Гагаринском месторождении с объемом кислотного состава 2 м³/м; обработки проводились без выдержки кислотного состава в пласте. На рис. 6 представлена зависимость среднего прироста дебита нефти после проведения кислотной обработки Составом 2 от продолжительности выдержки состава в пласте, а также эффективность ранее проведенных кислотных обработок.

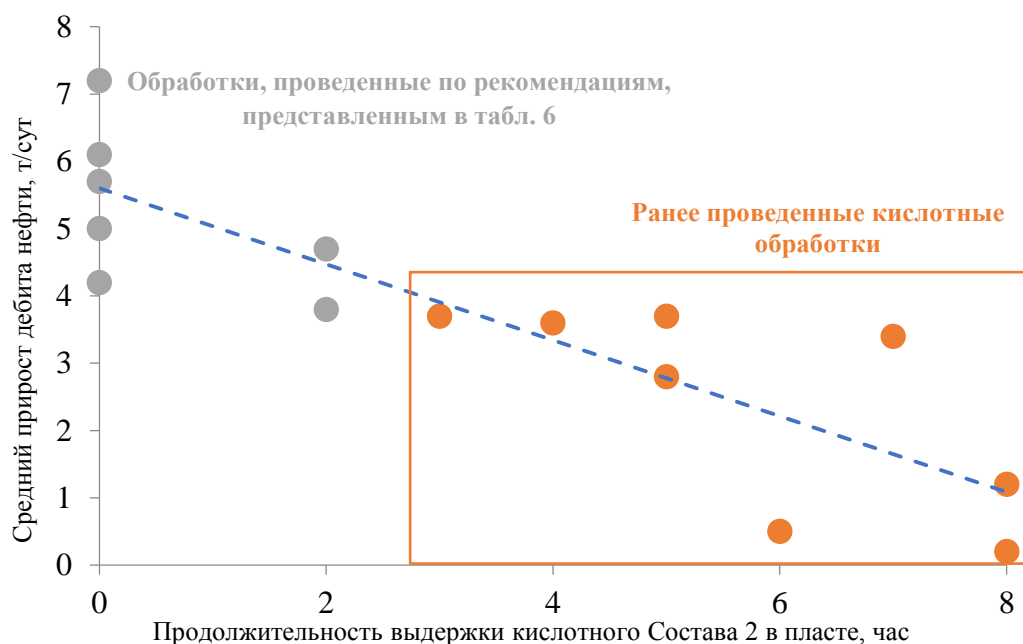


Рис. 6. Зависимость между средним приростом дебита нефти после кислотной обработки Составом 2 от времени выдержки его в пласте

Fig. 6. Relationship between the average daily increase of the composition after acid treatment no. 2 on its holding time in reservoir

Как следует из анализа представленных на рис. 6 данных, по скважинам, на которых проведены обработки Составом 2 без его выдержки в пласте на реакцию, получены более существенные значения прироста дебита нефти (в среднем увеличение на 55 %), чем у ранее проведенных обработок с выдержкой от 3 до

8 часов. Сокращение продолжительности периода выдержки кислотного состава в пласте приводит к снижению потерь добычи нефти вследствие простоя скважин на проведение мероприятия и к увеличению технологической эффективности (прирост дебита нефти) кислотного воздействия.

Заклучение

По данным фильтрационных и рентгеномногографических экспериментов подобраны условия эффективного применения двух кислотных составов для карбонатных объектов Гагаринского, Маговского, им. Сухарева, Озерного, Баклановского, Винниковского и Дороховского месторождений, отличающихся содержанием компонентов в горной породе «кальцит–доломит–нерастворимый остаток». Обобщение всех результатов позволило разработать рекомендации по оптимизации технологических параметров проведения обработок на рассматриваемых объектах, что, в свою очередь, приведет к снижению потерь добычи нефти вследствие простоя скважин на проведение мероприятия и к увеличению среднего прироста дебита скважин. Предложенные рекомендации по изме-

нению дизайна кислотного воздействия были осуществлены на двух исследуемых месторождениях. Показатели технологической эффективности для ранее используемого дизайна кислотного воздействия в некоторых случаях оказались существенно ниже, чем при предложенной технологии. Таким образом, удалось сократить потери нефти за счет снижения простоя скважины на проведение мероприятия и увеличить прирост дебита нефти.

Применение рентгеновской томографии позволило выделить случаи, для которых в результате воздействия характерен прирост пустотности, но снижение проницаемости. Данный факт позволит проводить дальнейшие работы по совершенствованию рецептур составов и технологий их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков В.А., Мартюшев Д.А. Опыт применения кислотных составов в карбонатных отложениях нефтяных месторождений Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2020. – Т. 20. – № 1. – С. 72–87.
2. Расповов А.В., Новокрещенных Д.В. Анализ результатов применения методов интенсификации на карбонатных коллекторах месторождений Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 10. – С. 73–82.
3. Modeling and simulation of wormhole formation during acidization of fractured carbonate rocks / Piyang Liu, Jun Yao, Gary Douglas Couplés, Jingsheng Ma, Hai Sun // Journal of Petroleum Science and Engineering. – June 2017. – V. 154. – P. 284–301.
4. Кристиан М., Сокол С., Константиnescу А. Увеличение продуктивности и приемистости скважин. – М.: Недра, 1985. – 84 с.
5. Иванов С.И. Интенсификация притока нефти и газа к скважинам. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 565 с.
6. Дзюбенко А.И., Никонов А.Н., Мерсон М.Э. Информационный способ повышения эффективности методов воздействия на призабойную зону пласта в действующих скважинах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16. – № 2. – С. 148–158.
7. Механический комплекс защиты пласта и технология его применения для предотвращения коагуляции призабойной зоны пласта в процессе проведения геолого-технических мероприятий / В.В. Пепеляев, И.Л. Коробков, Д.В. Пепеляев, А.М. Насыров, С.В. Галкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15. – № 21. – С. 329–339.
8. Моделирование кислотной обработки призабойной зоны скважины с учетом ее ухудшенных фильтрационно-емкостных характеристик (часть 1) / К.А. Турегелдиева, У.К. Жалбасбаев, Б.К. Асилбеков, А.Б. Золотухин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 1. – С. 50–54.
9. Дорфман М.Б., Сентемов А.А. Влияние фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны пласта на эффективность кислотной обработки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 124–130.
10. Мирзаджанзаде А.Х. Технология и техника добычи нефти. – М.: Недра, 1985. – 385 с.
11. Савицкий Я.В. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании керна нефтяных и газовых месторождений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 15. – С. 28–37.
12. X-ray microtomography of hydrochloric acid propagation in carbonate rocks / A.C. Machado, T.J.L. Oliveira, F.B. Cruz, R.T. Lopes, I. Lima // Applied Radiation and Isotopes. – February 2015. – V. 96. – P. 129–134.
13. Numerical simulation and X-ray imaging validation of wormhole propagation during acid core-flood experiments in a carbonate gas reservoir / Alireza Safari, Mojtaba Moradi Dowlatabad, Ali Hassani, Fariborz Rashidi // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – March 2016. – V. 30. – P. 539–547.
14. Naizhen Liu, Ming Liu. Simulation and analysis of wormhole propagation by VES acid in carbonate acidizing // Journal of Petroleum Science and Engineering. – February 2016. – V. 138. – P. 57–65.
15. Christophe Snoeck, Maura Pellegrini. Comparing bioapatite carbonate pre-treatments or isotopic measurements: Part 1. Impact on structure and chemical composition // Chemical Geology. – 6 December 2015. – V. 417. – P. 394–403.
16. Burgos-Cara A., Ruiz-Agudo E., Rodriguez-Navarro C. Effectiveness of oxalic acid treatments for the protection of marble surfaces // Materials & Design. – 5 February 2017. – V. 115. – P. 82–92.
17. Мартюшев Д.А. Лабораторные исследования кислотных составов для обработки коллекторов, характеризующихся различной карбонатностью и структурой пустотного пространства // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 6–12.
18. Lan-Anh Phan Thi, Huu-Tuan Do, Shang-Lien Lo. Enhancing decomposition rate of perfluorooctanoic acid by carbonate radical assisted sonochemical treatment // Ultrasonics Sonochemistry. – September 2014. – V. 21. – Iss. 5. – P. 1875–1880.
19. Tomohito Kameda, Masahito Tochinai, Toshiaki Yoshioka. Treatment of hydrochloric acid using Mg–Al layered double hydroxide intercalated with carbonate // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 25 July 2016. – V. 39. – P. 21–26.
20. Sustainability analysis of dry treatment technologies for acid gas removal in waste-to-energy plants / A. Dal Pozzo, D. Guglielmi, G. Antonioni, A. Tugnoli // Journal of Cleaner Production. – 20 September 2017. – V. 162. – P. 1061–1074.
21. Application status and research progress of shale reservoirs acid treatment technology / Nianyin Li, Jinxin Dai, Jianhui Li, Fengjun Bai, Zhifeng Luo // Natural Gas Industry B. – March 2016. – V. 3. – Iss. 2. – P. 165–172.
22. Effect of acid treatment on the characteristics and structures of high-sulfur bituminous coal / Lanjun Zhang, Zenghua Li, Yongliang Yang, Yinbo Zhou, Leilei Si // Fuel. – 15 November 2016. – V. 184. – P. 418–429.
23. Рогачев М.К., Мухаметшин В.В. Контроль и регулирование процесса солянокислотного воздействия на призабойную зону скважин по геолого-промысловым данным // Записки Горного института. – 2018. – Т. 231. – С. 275–280.
24. Мухаметшин В.В. О необходимости и создании единого комплексного метода геолого-промыслового анализа и обобщения

- эффективности воздействия на призабойную зону пласта // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 80–84.
25. Научный инжиниринг как основа процессов моделирования при разработке месторождений / М.М. Хасанов, А.Н. Ситников, А.А. Пустовских, А.П. Рощетаев, Н.С. Исмаилов, Г.В. Падерин, Е.В. Шель // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 142–148.
26. Грезина О.А., Уметбаев В.Г. Оценка условий эффективного применения кислотно-имплозионного воздействия на призабойную зону пласта // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2018. – № 2. – С. 60–66.
27. Зейгман Ю.В., Сергеев В.В., Аюпов Р.Р. Классификация физико-химических методов интенсификации добычи нефти по механизму воздействия на пластовую систему // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 1. – С. 50–53.
28. An experimental study on acid-rock reaction kinetics using dolomite in carbonate acidizing / Hyunsang Yoo, Youngmin Kim, Wonsuk Lee, Jeonghwan Lee // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 168. – P. 478–494.
29. Mohamed Mahmoud, Assad Barri, Salaheldin Elkatatny. Mixing chelating agents with seawater for acid stimulation treatment in carbonate reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 152. – P. 9–20.
30. Увеличение нефтеотдачи залежей высоковязких нефтей кислотными композициями на основе поверхностно-активных веществ, координирующих растворителей и комплексных соединений / Л.К. Алтунина, В.А. Кувшинов, Л.А. Стасьева, И.В. Кувшинов // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 4. – С. 103–113.
31. Хузин Р.А., Хижняк Г.П. Лабораторные исследования влияния концентрации и скорости закачки кислоты на развитие червоточин при пластовых условиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 356–372.
32. Шакен М.Ш. Исследование применимости кислотной обработки в конгломератных коллекторах // SOCAR Proceedings. – 2019. – № 4. – С. 23–31.

Поступила 13.03.2020 г.

Информация об авторах

Мартюшев Д.А., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Новиков В.А., инженер 2-й категории отдела проектирования и мониторинга разработки Осинской и Кунгурской группы месторождений филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

UDC 622.276

IMPROVING ACIDIZING IN THE COLLECTORS CHARACTERIZED BY DIFFERENT CARBONATE CONTENT (ON THE EXAMPLE OF OIL FIELDS OF PERM KRAI)

Dmitry A. Martyushev¹,
martyushevd@inbox.ru

Vladimir A. Novikov²,
novikov.vladimir.andr@gmail.com

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

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

The relevance of the work is caused by the fact that the technological parameters of the acid treatment, such as holding time in the reservoir and the volume of composition, significantly affect the result of the geological and technical measure. According to many experts, it is necessary to study the issue of the need for an acid stage in the reservoir and its duration in the technological process of processing. The specific volume of acid is determined by various factors, such as rock composition, the bottomhole zone properties, the desired depth of acid penetration into the reservoir, etc.

The main aim of the study is to assess the impact of the technological parameters of acid treatments on the effectiveness of geological and technical measure in the oil fields of the Perm region.

The method of study is the laboratory experiments using a device for determining the carbonate content of rocks – the carbonatometer KM-04M, filtration units with simulation of formation conditions of UIP-5VG and AFS-300, as well as the units of microfocus fluoroscopy.

The results. An acid exposure was performed using two compositions to determine the return permeability and X-ray tomographic studies for different «calcite-dolomite-insoluble residue» components of the core samples from deposits in the Perm region. X-ray tomographic experiments were performed twice on each core sample: before and after the acid treatment. The conditions for the effective use of acidic formulations in the oil fields under consideration were selected based on the results of filtration and X-ray tomographic studies. Summation of all the research results allowed developing recommendations for optimizing the technological parameters of acid treatments at the considered production target. The use of X-ray tomography made it possible to distinguish cases for which, as a result of acid exposure, an increase in the volume of void space is observed with a decrease in permeability. This fact will allow further work to improve the formulation of acid compositions and technologies for their use.

Key words:

Acid treatments, carbonate reservoirs, filtration research, tomography studies, coefficient of permeability recovery, technological parameters, holding time in reservoir, amount of injected composition, technological efficiency.

REFERENCES

- Novikov V.A., Martyushev D.A. Experience of using acid compositions in carbonate deposits of oil fields in the Perm region. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 72–87. In Rus.
- Raspopov A.V., Novokreshchennykh D.V. Analysis of the results of the use of intensification methods on carbonate reservoirs of the Perm Territory fields. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2014, no. 10, pp. 73–82. In Rus.
- Piyang Liu, Jun Yao, Gary Douglas Couples, Jingsheng Ma, Hai Sun. Modeling and simulation of wormhole formation during acidization of fractured carbonate rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, June 2017, vol. 154, pp. 284–301.
- Christian M., Sokol S., Constantinescu A. *Uvelichenie produktivnosti i priemistosti skvazhin* [Increased well productivity and injectivity]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 84 p.
- Ivanov S.I. *Intensifikatsiya pritoka nefiti i Gaza k skvazhinam* [Intensification of oil and gas inflow to wells]. Moscow, LLC Nedra-Business Center Publ., 2006. 565 p.
- Dzyubenko A.I., Nikonov A.N., Merson M.E. Information way to improve the efficiency of methods to influence the bottomhole formation zone in the existing wells. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2017, vol. 16, no. 2, pp. 148–158. In Rus.
- Pepelyaev V.V., Korobkov I.L., Pepelyaev D.V., Nasyrov A.M., Galkin S.V. Mechanical complex of reservoir protection and the technology of its use to prevent clogging of the bottomhole formation zone in the process of geological and technical measures. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2016, vol. 15, no. 21, pp. 329–339. In Rus.
- Turegeldiev K.A., Zhalbasbaev U.K., Asilbekov B.K., Zolotukhin A.B. Modeling of acid treatment of the well bottom zone taking into account its degraded reservoir characteristics (part 1). *Oil industry*, 2016, no. 1, pp. 50–54. In Rus.
- Dorfman M.B., Sentemov A.A. Influence of reservoir properties of the bottomhole formation zone on the efficiency of acid treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 124–130. In Rus.
- Mirzadzhanzade A.Kh. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefiti* [Oil production technique]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 385 p.
- Savitsky Ya.V. Modern possibilities of the method of X-ray tomography in the study of core oil and gas fields. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2015, no. 15, pp. 28–37. In Rus.
- Machado A.C., Oliveira T.J.L., Cruz F.B., Lopes R.T., Lima I. X-ray microtomography of hydrochloric acid propagation in carbonate rocks. *Applied Radiation and Isotopes*, February 2015, vol. 96, pp. 129–134.
- Alireza Safari, Mojtaba Moradi Dowlatabad, Ali Hassani, Fariborz Rashidi. Numerical simulation and X-ray imaging validation of wormhole propagation during acid core-flood experiments in a carbonate gas reservoir. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, March 2016, vol. 30, pp. 539–547.
- Naizhen Liu, Ming Liu. Simulation and analysis of wormhole propagation by VES acid in carbonate acidizing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, February 2016, vol. 138, pp. 57–65.

15. Christophe Snoeck, Maura Pellegrini. Comparing bioapatite carbonate pre-treatments or isotopic measurements: Part 1 – Impact on structure and chemical composition. *Chemical Geology*, 6 December 2015, vol. 417, pp. 394–403.
16. Burgos-Cara A., Ruiz-Agudo E., Rodriguez-Navarro C. Effectiveness of oxalic acid treatments for the protection of marble surfaces. *Materials & Design*, 5 February 2017, vol. 115, pp. 82–92.
17. Martyushev 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.
18. Lan-Anh Phan Thi, Huu-Tuan Do, Shang-Lien Lo. Enhancing decomposition rate of perfluorooctanoic acid by carbonate radical assisted sonochemical treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, September 2014, vol. 21, Iss. 5, pp. 1875–1880.
19. Tomohito Kameda, Masahito Tochitani, Toshiaki Yoshioka. Treatment of hydrochloric acid using Mg–Al layered double hydroxide intercalated with carbonate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 25 July 2016, vol. 39, pp. 21–26.
20. Dal Pozzo A., Guglielmi D., Antonioni G., Tugnoli A. Sustainability analysis of dry treatment technologies for acid gas removal in waste-to-energy plants. *Journal of Cleaner Production*, 20 September 2017, vol. 162, pp. 1061–1074.
21. Nianyin Li, Jinxin Dai, Jianhui Li, Fengjun Bai, Zhifeng Luo. Application status and research progress of shale reservoirs acid treatment technology. *Natural Gas Industry B*, March 2016, vol. 3, Iss. 2, pp. 165–172.
22. Lanjun Zhang, Zenghua Li, Yongliang Yang, Yinbo Zhou, Leilei Si. Effect of acid treatment on the characteristics and structures of high-sulfur bituminous coal. *Fuel*, 15 November 2016, vol. 184, pp. 418–429.
23. Rogachev M.K., Mukhametshin V.V. Control and regulation of the process of hydrochloric acid impact on the bottomhole zone of wells according to geological and field data. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 231, pp. 275–280. In Rus.
24. Mukhametshin V.V. On the need to create a unified and integrated method of geological and production analysis and synthesis of efficiency treatment of the bottomhole formation zone. *Oil industry*, 2017, no. 4, pp. 80–84. In Rus.
25. Khasanov M.M., Sitnikov A.N., Pustovskikh A.A., Roshchektaev A.P., Ismagilov N.S., Paderin G.V., Shel E.V. Scientific engineering as the basis of modeling processes in field development. *Georesources*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 142–148. In Rus.
26. Grezina O.A., Umetbaev V.G. Evaluation of the conditions for the effective use of acid-implosion effects on the bottomhole formation zone. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2018, no. 2, pp. 60–66. In Rus.
27. Zeigman Yu.V., Sergeev V.V., Ayupov R.R. Klassifikatsiya fiziko-khimicheskikh metodov intensifikatsii dobychi nefi po mekhanizmu vozdeystviya na plastovuyu sistem [Classification of physico-chemical methods of intensification of oil production by the mechanism of influence on the reservoir system]. *Geology, Geophysics and the development of oil and gas fields*, 2017, no. 1, pp. 50–53.
28. Hyunsang Yoo, Youngmin Kim, Wonsuk Lee, Jeonghwan Lee. An experimental study on acid-rock reaction kinetics using dolomite in carbonate acidizing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 168, pp. 478–494.
29. Mohamed Mahmoud, Assad Barri, Salaheldin Elkatatny. Mixing chelating agents with seawater for acid stimulation treatment in carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 152, pp. 9–20.
30. Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Stasieva L.A., Kuvshinov I.V. Increased oil recovery of high-viscosity oil deposits with acid compositions based on surfactants, coordinating solvents and complex compounds. *Georesources*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 103–113. In Rus.
31. Khuzin R.A., Khizhnyak G.P. Laboratory studies of the influence of the concentration and rate of acid injection on the development of wormholes in reservoir conditions. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 356–372. In Rus.
32. Shaken M.Sh. Investigation of the applicability of acid treatment in conglomerate reservoirs. *SOCAR Proceedings*, 2019, no. 4, pp. 23–31. In Rus.

Received: 13 March 2020.

Information about the authors

Dmitry A. Martyushev, Cand. Sc., senior lecturer, Perm National Research Polytechnic University.

Vladimir A. Novikov, 2nd category engineer, branch of OOO «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.

УДК 621.181:519.876

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗБЫТКА ПЕРВИЧНОГО ВОЗДУХА НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ ВИХРЕВЫМИ ГОРЕЛКАМИ

Гиль Андрей Владимирович¹,
andgil@tpu.ru

Заворин Александр Сергеевич¹,
zavorin@tpu.ru

Кокшарев Олег Максимович¹,
omk2@tpu.ru

Воронцова Елена Сергеевна¹,
ves@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска оптимальных решений по организации сжигания полифракционного пылеугольного топлива на действующих и новых тепловых электрических станциях с учетом снижения выбросов вредных веществ, в частности оксидов азота. За последнее десятилетие значительно выросли экологические требования, направленные на регулирование выбросов от угольных электростанций в атмосферу, которые были спроектированы в целях повышения тепловой эффективности. В настоящее время проблема совершенствования экологических параметров ТЭС в России обостряется тем, что большинство действующих станций не удовлетворяют современным экологическим нормам и требованиям.

Цель: установить влияние организации сжигания твердого топлива на топочные процессы при минимальной возможной модернизации действующего парового котла с использованием низкоэмиссионных горелочных устройств.

Объекты: топочная камера энергетического котла в проектной реализации и в варианте с заменой проектных горелочных устройств на низкоэмиссионные.

Методы. Численное исследование проведено с использованием пакета прикладных программ Ansys Fluent v.12.1. Математическое моделирование физико-химических процессов в топочной камере на основе Эйлера–Лагранжева подхода, который позволяет выявить главные взаимодействия процессов переноса частиц. Математические модели горения угольной пыли с кинетическими параметрами заданы и включены в код в качестве пользовательских функций.

Результаты. Разработана математическая модель на основе пакета прикладных программ с качественным представлением сложных физико-химических процессов в объеме топочной камеры. Дана оценка возможности организации сжигания каменного угля в низкоэмиссионных горелочных устройствах с учетом оптимального соотношения первичного и вторичного воздуха без изменения установочных углов лопаточных завертителей. В данном исследовании установлено снижение концентрации оксидов азота на 14 % при замене проектных двухканальных вихревых горелочных устройств на низкоэмиссионные.

Ключевые слова:

Энергетический котел, вихревые горелочные устройства, уголь, математическое моделирование, метод Эйлера–Лагранжа.

Введение

В котельных агрегатах в процессе сгорания ископаемого топлива образуются вредные загрязняющие вещества, которые выбрасываются в атмосферу, оказывая негативное влияние на биосферу и способствуя глобальному потеплению. Хотя при генерации энергии из ископаемых топлив суммарный объем выбросов парниковых газов составляет 25 % от общего объема их выбросов [1], развитые страны ставят задачи по снижению использования ископаемых топлив, в особенности углей, посредством развития и вовлечения возобновляемых источников энергии. Но поскольку уголь является наиболее распространенным энергетическим топливом и его запасы самые большие в мире, во многих странах высока доля выработки энергии с использованием пылеугольных котлов [2]. Доля тепловых электростанций, работающих на угле, в мире составляет 41 %, в Китае – 75 %, в США – 50 % [3, 4], а в России 24 % [5]. Несмотря на

то, что базовая технология организации факельного сжигания твердого топлива в котельных агрегатах разработана еще в прошлом веке, ряд проблем остаются нерешенными. К ним относятся неустойчивость горения, шлакование, высокотемпературная коррозия, неполнота сгорания топлива, выбросы золы, SO_x , NO_x и др. Для успешного решения подобных проблем очень важно понимание газодинамических процессов, определяющих распределения температур, концентраций горючих веществ и продуктов сгорания в объеме топочной камеры энергетического котла. При этом названные процессы зависят от конструкции топочной камеры, типа горелочных устройств и схемы организации сжигания, что не позволяет в значительной мере транслировать результаты исследований, полученных на одном котельном агрегате из типового ряда, на аналогичные. Поэтому использование методов численного моделирования является важнейшим инструментом для изучения процессов, про-

исходящих в топочных камерах котельных агрегатов, в особенности при вариантных исследованиях.

С учетом ужесточения экологических требований также важно оптимизировать работу энергетических котлов на действующих ТЭС [5–7]. В частности, в мировой практике широко используются такие технологии, как сжигание твердого топлива в потоке кислорода [8, 9], низкотемпературном циркулирующем кипящем слое [10], ступенчатое и нестехиометрическое сжигание [11], а также использование малоэмиссионных горелочных устройств [12], мокрая и сухая десульфатизация дымовых газов, селективное каталитическое и некаталитическое восстановление. Чтобы уменьшить загрязнение окружающей среды, разрешенные выбросы NO_x от электростанций были директивно снижены во многих странах. Например, в Европейском Союзе допустимая концентрация выбросов для электростанций мощностью более 500 МВт составляет 200 мг $\text{NO}_x/\text{нм}^3$ при 6 % O_2 [13]. В Китае установлены аналогичные строгие экологические требования [14]. В России количественные значения удельных выбросов загрязняющих веществ более высокие, но тенденция направлена на достижение уровня выбросов, как в развитых странах [6]. Так, наименьшая массовая концентрация NO_x в дымовых газах при нормальных условиях и концентрации O_2 6 % для котельных установок на твердом топливе, введенных в эксплуатацию до 31 декабря 2000 г., составляет 320 мг/м³, а для введенных в эксплуатацию после 31 декабря 2000 г. – 300 мг/м³ при паропроизводительности до 420 т/ч. С увеличением паропроизводительности значение массовой концентрации NO_x также возрастает. К сожалению, большинство ТЭС на твердом топливе, действующих в России, не удовлетворяют требованиям, предъявляемым ГОСТ Р 55173-2012 [5].

В связи с вышеизложенным актуальны работы, связанные со снижением вредных выбросов от ТЭС в окружающую среду при организации сжигания пылеугольного топлива с учетом обеспечения полноты выгорания топлива, стабильности горения, равномерности распределения тепловых потоков и отсутствия шлакования.

При организации сжигания топлив невысокого качества или с низким выходом летучих веществ в вихревых горелочных устройствах сложно соответствовать предъявляемым требованиям по массовой концентрации оксидов азота в связи с направленностью данной технологии сжигания на формирование высокотемпературного ядра горения. Одним из простых и относительно недорогих методов снижения генерации NO_x является применение малоэмиссионных горелочных устройств, которые также можно сочетать и с другими технологиями снижения выбросов NO_x [15]. В малоэмиссионных вихревых горелках реализуется ступенчатое сжигание топлива в пределах факела горелки посредством многоканальности, что приводит к снижению генерации NO_x [16]. Но при этом возможно увеличение недожога топлива, увеличение длины факела, а также изменение протекания физико-химических процессов в топочном объеме, что может

негативно отразиться на эффективности и надежности работы котельного агрегата в целом.

Для проведения подобных исследований в настоящее время наиболее целесообразно применять методы численного моделирования. Вычислительная гидродинамика позволяет обеспечить всестороннее рассмотрение информации в широком спектре для оптимизации и улучшения процессов горения, эффективности эксплуатации котла при сокращении стоимости затрат и времени в отличие от экспериментального исследования [17–19]. Наиболее распространенными подходами к моделированию с точки зрения экономичности и достаточной точности для подобного рода исследований является применение $k-\varepsilon$ модели турбулентности [20–22], Эйлера–Лагранжева подхода для моделирования газовых потоков с наличием твердых частиц [23, 24] и P1-модели для расчета радиационного теплообмена [25].

В данной работе проведены вариантные численные исследования топочных процессов при сжигании экибастузского угля в топочной камере котельного агрегата паропроизводительностью 420 т/ч применительно к замене двухканальных вихревых горелок на низкоэмиссионные четырехканальные. Необходимость проведения вариантных исследований связана с оптимизацией отношения доли первичного и вторичного воздуха к теоретически необходимому, которая достигается посредством варьирования соотношения скоростей топливно-воздушной смеси и вторичного воздуха, выходящего через каналы низкоэмиссионной горелки. С целью анализа оптимальных соотношений приняты два варианта с разной долей первичного воздуха (0,18 и 0,25) при общем коэффициенте избытка воздуха 1,2. Кроме того, представлены результаты при организации сжигания топлива по варианту с проектным исполнением горелочных устройств (с долей первичного воздуха 0,2).

Объект исследования и эксплуатационные параметры

Объект исследования представлен в виде котла с Т-образной компоновкой (рис. 1). Топка открытого типа с твердым шлакоудалением. Экраны камеры выполнены из жаропрочных труб диаметром 60 мм и шагом 64 мм [26]. Геометрические размеры верхней части топки составляют 15744×3776 мм, нижней – 15744×9024 мм.

Двенадцать пылеугольных горелок расположены на боковых стенках в один ряд по шесть штук друг напротив друга с поочередной левой и правой круткой (рис. 2, а). В конструкцию горелок входят мазутные форсунки для обеспечения растопки котла.

С целью снижения генерации оксидов азота предложено установить в те же амбразуры низкоэмиссионные вихревые горелочные устройства (рис. 2, б). Центральный канал – мазутная форсунка. Концентрично к нему канал подачи топливно-воздушной смеси и последующие три канала для ввода вторичного воздуха. Диаметры соответственно 209, 490, 670, 833, 1015 мм. При этом оси горелок соответствуют расположению горелочных устройств в базовом варианте – на отметке 6564 мм от устья холодной воронки.

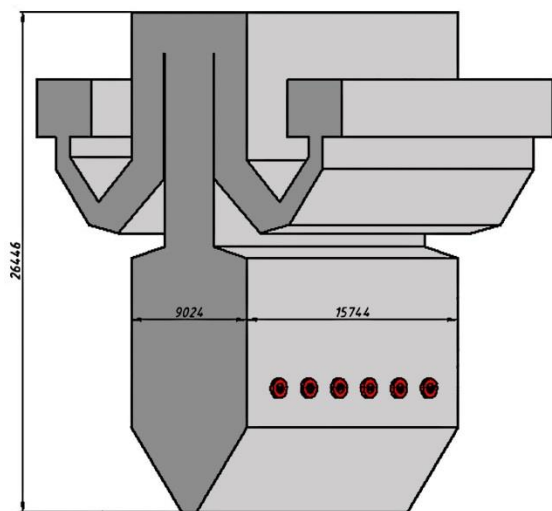


Рис. 1. Геометрическая модель топочной камеры

Fig. 1. Geometrical model of the boiler furnace chamber

Рассматриваемый экибастузский уголь обладает специфическими теплотехническими свойствами. В сочетании с низкой взрывоопасностью, малой сернистостью, хорошей сыпучестью и низкой влажностью имеет высокую зольность, которая находится в диапазоне $A^r=32,9...41,9$ % и может даже превышать 50 %. При этом большое содержание оксида кремния ($SiO_2=59...64$ %). Вследствие высокой абразивности золы принимается Т-образная компоновка топочной камеры.

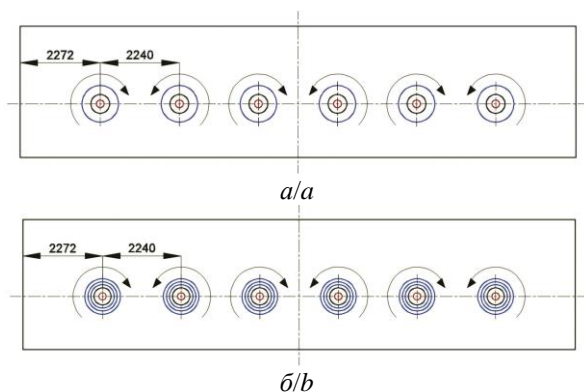


Рис. 2. Схема размещения горелок с направлением вращения: а) проектных горелок; б) малоэмиссионных горелок

Fig. 2. Scheme of burners with a marked swirl direction: a) design burners; b) low emission burners

Математическая модель

При моделировании топочных процессов в пылеугольных котельных агрегатах дополнительную сложность вносит двухфазный характер потока. Поэтому принят Эйлерово–Лагранжев подход, позволяющий детально просчитывать траектории движения отдельных частиц во всем топочном объеме. Соответственно траектория движения частиц угля описывается моделью дискретных фаз. Силы, действующие на топливную частицу при ее движении в газовом потоке, являются силами сопротивления и силами тяжести. Предполагается, что все частицы являются сферическими.

Уравнение движения частиц записывается в виде:

$$\frac{\partial \bar{u}_p}{\partial t} = F_D \cdot (\bar{u} - \bar{u}_p) + \frac{\bar{g} \cdot (\rho_p - \rho)}{\rho_p},$$

где \bar{u}_p – вектор скорости частиц угля; \bar{u} – вектор скорости газового потока; F_D – сила сопротивления на единицу массы частицы; ρ_p – плотность частиц угля; ρ – плотность газового потока.

Трехмерное течение потока газа описывается системой уравнений Навье–Стокса, усредненных по Рейнольдсу, которая состоит из уравнений сохранения массы, импульса, энергии.

Параметры турбулентности определяются с использованием k - ε модели турбулентности [27, 28]. Данная модель основана на решении уравнений переноса для турбулентной кинетической энергии (k) и скорости турбулентной диссипации (ε).

Для турбулентной кинетической энергии:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \cdot \varepsilon - Y_M + S_k.$$

Для рассеивания:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon.$$

Здесь u_i – компонент скорости в соответствующем направлении; μ – вязкость газового потока; μ_t – турбулентная (вихревая) вязкость; G_k – генерация кинетической энергии турбулентности за счет градиентов средней скорости; G_b – генерация кинетической энергии турбулентности за счет плавучести; Y_M – флуктуационная дилатация в сжимаемой турбулентности в общую скорость рассеивания; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ – константы модели турбулентности; σ_k , σ_ε – турбулентные числа Прандтля для кинетической энергии и скорости диссипации; S_k , S_ε – энthalпии.

Для правильного прогнозирования формы и температуры пламени принята точная и эффективная в вычислительном отношении P1 модель переноса теплового излучения. Качественное прогнозирование загрязняющих веществ, таких как оксиды азота, также зависит от правильности расчета теплового излучения. В данной модели газ принимался как серое тело. Поток излучения описывается уравнением:

$$q_f = -\frac{1}{3 \cdot (a + \sigma_s) - C \sigma_s} + \nabla G,$$

где a – коэффициент поглощения; σ_s – коэффициент рассеивания; C – линейно-анизотропный коэффициент фазовой функции; G – падающее излучение.

Уравнение переноса для падающего излучения выглядит следующим образом:

$$\nabla \cdot (I \nabla G) - aG + an^2 \sigma T^4 = S_G,$$

где n – показатель преломления среды; σ – постоянная Стефана–Больцмана; S_G – определяемый источник излучения.

При расчете согласованных полей скорости и давления применялась процедура SIMPLE. Численное моделирование выполнено с использованием коммерческого пакета прикладных программ ANSYS FLUENT.

Результаты исследования

Для получения качественной картины результатов исследования топочный объем разбит на 2167745 ячеек, со сгущением на уровне горелочных устройств.

При натурном исследовании температура по вертикали топки была измерена с использованием оптического и акустического пирометров через специально подготовленные отверстия в стенках топки. Измерения оптическим пирометром проводились на четырех уровнях: 6,841, 10,291, 13,591 и 20,191 м от устья холодной воронки, а на уровне 23,491 м температура измерялась с использованием акустического пирометра. Численные значения температуры представлены по центральной оси топочной камеры, отстоящей на 2,272 м от фронтальной стены. Как представлено на рис. 3, измеренные и рассчитанные значения температуры имеют небольшое рассогласование в нижней части топки, но в целом хорошо согласуются количественно и качественно. Таким образом, принятая модель позволяет получить достаточно точные представления о фактических характеристиках процессов горения угля в топке исследуемого котла.

Результаты исследования аэродинамической структуры потока представлены на рис. 4, 5. Согласно используемой технологии организации сжигания топливно-воздушная смесь поступает в центральную часть горелок, а вторичный воздух – в периферийные каналы. Несмотря на увеличение количества каналов для подачи вторичного воздуха в вариантах с низкоэмиссионными горелками (рис. 4, б, в; рис. 5, б, в) и обусловленные этим перераспределения объемов воздуха по каналам, в отличие от проектного варианта (рис. 4, а; рис. 5, а), распространение соосназакру-

ченных горелочных струй не имеет существенных отличий. На выходе из горелочных устройств закрученные соосные потоки топлива и воздуха движутся со скоростью примерно 22 м/с.

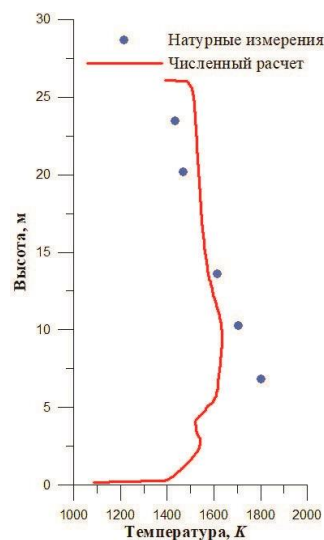


Рис. 3. Сравнение результатов численного моделирования и натурных измерений температуры по высоте топочной камеры

Fig. 3. Comparison of the simulated and measured temperature profiles along the furnace height

В верхней части топочного объема, в области его сужения (рис. 4), скорости возрастают и в среднем составляют 12 м/с во всех вариантах. В нижней части топочного объема имеются отличия, связанные с изменениями начальных значений скоростей ввода первичного и вторичного воздуха. Это наиболее отчетливо видно на рис. 5. Средние значения скоростей по объему топки составляют 7–8 м/с. Сравнивая результаты вариантных численных расчетов аэродинамической структуры потока, можно отметить более низкие значения скоростей (на 2–3 м/с) при увеличении доли первичного воздуха до 0,25.

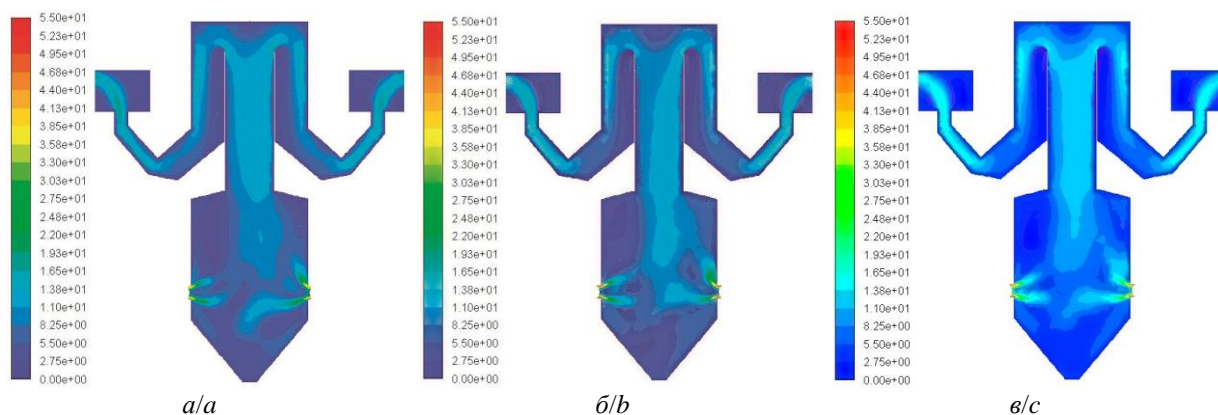


Рис. 4. Распределение скоростей (м/с) по высоте топочной камеры ($z=2,272$ м): а) проектный вариант; б) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,18; в) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,25

Fig. 4. Velocity distribution (m/s) in the height of the furnace section ($z=2,272$ m): а) design variant; б) low emission burners with a share of primary air of 0,18; в) low emission burners with a share of primary air of 0,25

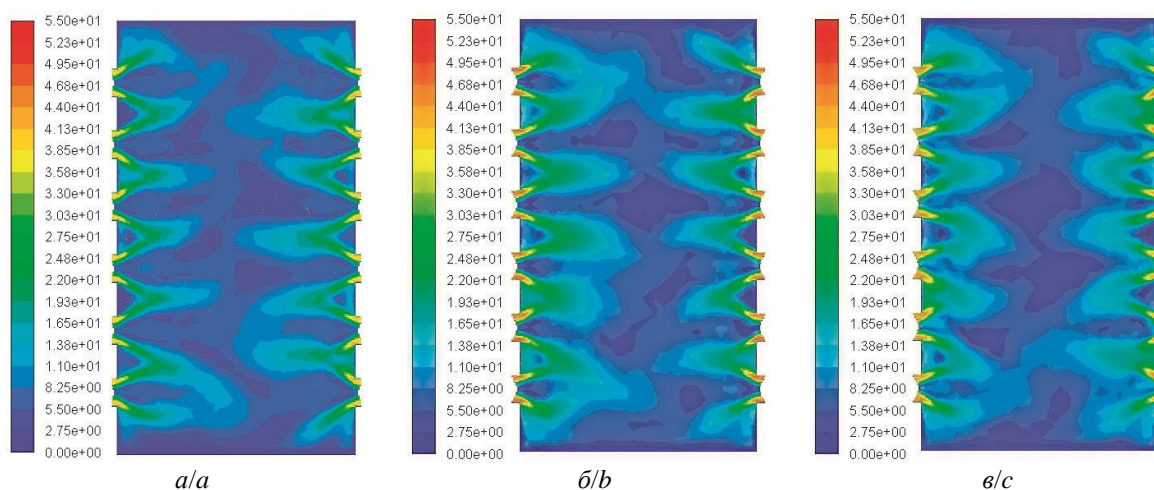


Рис. 5. Распределение скоростей (м/с) в горизонтальном сечении топочной камеры ($y=6,564$ м): а) проектный вариант; б) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,18; в) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,25

Fig. 5. Velocity distribution (m/s) in the horizontal of the furnace section ($y=6,564$ m): а) design variant; б) low emission burners with a share of primary air of 0,18; в) low emission burners with a share of primary air of 0,25

Распределение температур в вертикальном сечении по оси горелочных устройств представлено на рис. 6. Области с максимальными значениями температур располагаются на уровне горелочных устройств, а ядро горения занимает пространство от 4 до 13 м по высоте топочной камеры. Наиболее теплонпряженным представляется сечение при проектной компоновке горелочных устройств (рис. 6, а), при которой максимальное значение температур составляет 1700 К, а на выходе из топочной камеры 1500 К. При установке низкоэмиссионных горелочных устройств тепловое напряжение топочного объема снижается, в частности, на выходе из топки значения составляют 1300 и 1290 К (рис. 6, б, в).

При рассмотрении горизонтальных сечений на уровне расположения вихревых горелочных устройств высокотемпературная зона равномерно заполняет все сечение относительно центральной оси (рис. 7). На рис. 7, а, б отчетливо наблюдаются эжекционные зоны в центральных частях пригорелочного пространства, что способствует интенсификации прогрева топливно-воздушной смеси и увеличению скорости воспламенения. При увеличении доли первичного воздуха до 0,25 эжекционные центральные зоны с подводом высокотемпературных продуктов сгорания в соосназакрученных горелочных струях наблюдаются в горелках, расположенных вблизи боковых стен. При этом в приосевой части топочного объема эжекция высокотемпературных продуктов сгорания существенно ниже (рис. 7, в). Таким образом, во внутренней зоне раскрытия вихревого факела процесс воспламенения и выгорания топлива имеет более низкую интенсивность.

Если аксиальные значения скоростей на расстоянии 250 мм от амбразуры горелочных устройств имеют схожий профиль и близкие абсолютные значения по всем горелочным устройствам (рис. 8, а), то аналогичные значения температур наблюдаются в струях крайних горелочных устройств, а в остальных

они существенно различаются в приосевых зонах топки (рис. 8, б). Уровень температур в проектном (базовом) варианте в зоне эжекции достигает 1400 К, а в вариантах с низкоэмиссионными горелками с долей первичного воздуха 0,18 составляет 1200 К, и 450 К с долей первичного воздуха 0,25. Можно видеть, что в последнем варианте на удалении 250 мм от устья горелок значение температур в эжекционной области соответствует температуре первичного воздуха. Таким образом, с увеличением доли первичного воздуха ухудшается воспламенение и выгорание частиц, распространяющихся в пространственном слое с максимальной скоростью и концентрацией. Это обусловлено слабым воздействием высокотемпературных эжекционных потоков. В связи с тем, что в данной области распространяется основная масса пылеугольных частиц, прогревом именно этих слоев определяется скорость развития пламени по всему поперечному сечению топливно-воздушной смеси.

Изменение температуры, концентрации O_2 и NO_x по высоте поперечной оси топочной камеры ($z=2,272$ м), представлено на рис. 9. Во всех вариантах в данной траектории градиент изменения температур незначителен (рис. 9, а). Температурный уровень с максимальными значениями температур наблюдается при горении экибастузского угля с применением двухканальных вихревых горелочных устройств (базовый вариант), чему соответствует более высокая концентрация NO_x (рис. 9, в). Использование четырехканальных низкоэмиссионных горелочных устройств приводит к снижению уровня температур (примерно на 200 К), что соответствующим образом отражается на снижении генерации NO_x . Вместе с тем при организации сжигания экибастузского угля в низкоэмиссионных горелках наблюдается повышение содержания O_2 , что свидетельствует о неполноте выгорания топлива и соответствующем влиянии на уровень температур и концентрацию NO_x .

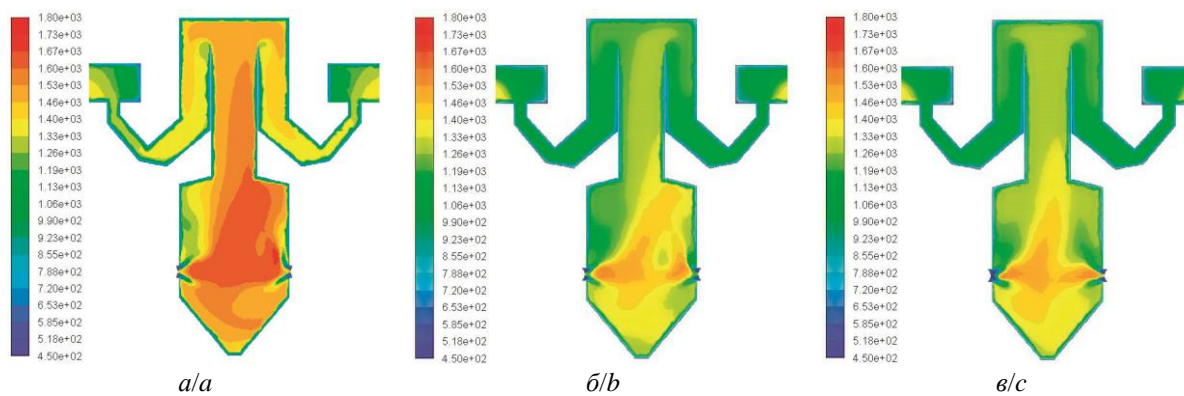


Рис. 6. Распределение температур (K) по высоте топочной камеры ($z=2,272$ м): а) проектный вариант; б) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,18; в) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,25

Fig. 6. Temperature distribution (K) in the height of the furnace section ($z=2,272$ m): design variant; b) low emission burners with a share of primary air of 0,18; c) low emission burners with a share of primary air of 0,25

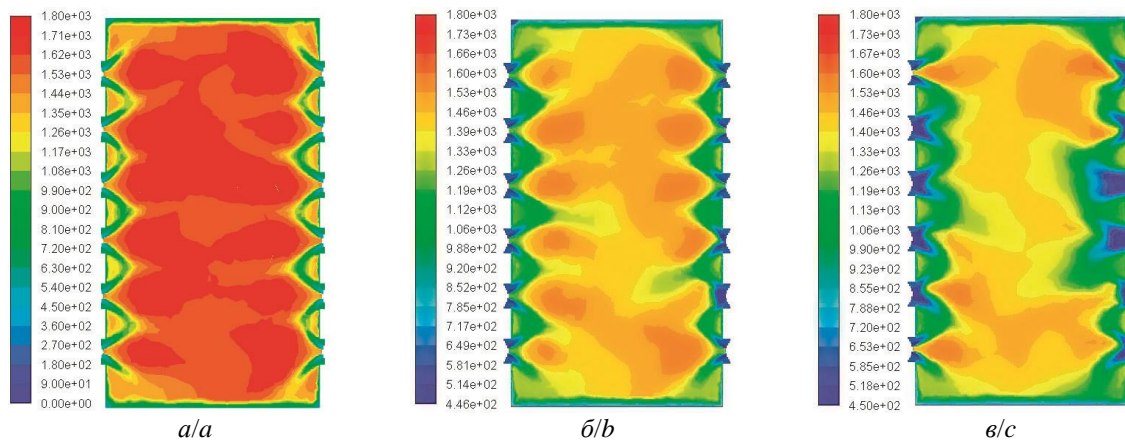


Рис. 7. Распределение температур (K) в горизонтальном сечении топочной камеры ($y=6,564$ м): а) проектный вариант; б) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,18; в) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,25

Fig. 7. Temperature distribution (K) in the horizontal section of the furnace section ($y=6,564$ m): design variant; b) low emission burners with a share of primary air of 0,18; c) low emission burners with a share of primary air of 0,25

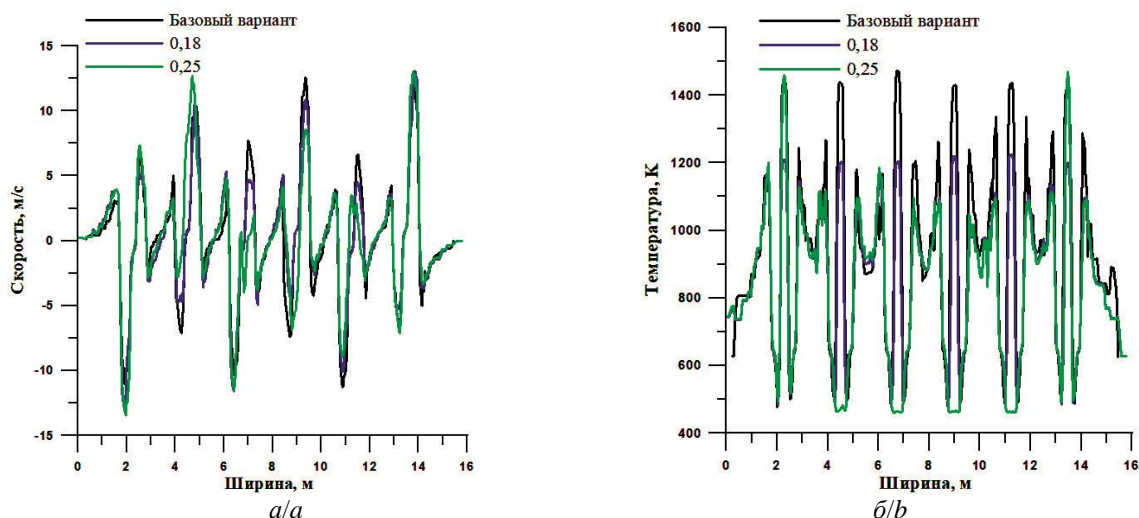


Рис. 8. Характеристики топочной среды вдоль боковой стены на расстоянии 250 мм от амбразуры горелок: а) аксиальная скорость (м/с); б) температура (K)

Fig. 8. Characteristics of the combustion medium along the side wall at a distance of 250 mm from the burners: a) axial velocity (m/s); б) temperature (K)

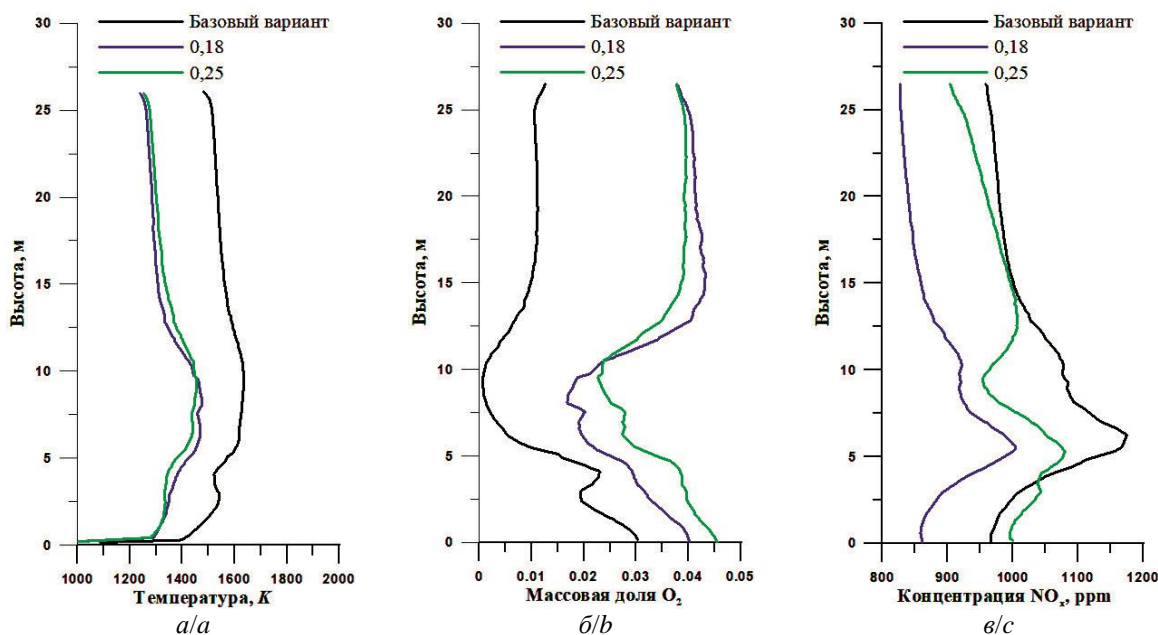


Рис. 9. Температура (а), массовая доля O_2 (б); концентрация NO_x (в) по высоте топочной камеры

Fig. 9. Temperature (a), mass fraction of O_2 (b); NO_x concentration (c) along the height of the combustion chamber

Заключение

Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с натурными измерениями температур по высоте топочной камеры, соответственно принятые численные алгоритмы и математические модели имеют высокую степень достоверности и позволят в дальнейшем проводить качественные предпроектные варианты исследования.

При увеличении доли первичного воздуха и соответствующем снижении вторичного, без изменения установочных углов лопаточных завихрителей происходит снижение параметра крутки по каналам вторичного воздуха и соответственно угла раскрытия одиночного факела. Взаимное влияние соседних горелок с противокруткой приводит к снижению тангенциальных скоростей и эжекционных областей в

приосевых зонах низкоэмиссионных вихревых горелочных устройств. Данный факт негативно отражается на скорости воспламенения полифракционного пылеугольного топлива в сооснозакрученных горелочных струях, что может негативно отразиться на стабильности горения и полноте выгорания топлива.

В целом замена двухканальных горелочных устройств на низкоэмиссионные позволяет добиться сокращения генерации оксидов азота, которое в данном исследовании составило 14 %. При этом установлено, что наиболее оптимальная доля первичного воздуха составляет 0,18–0,21 без изменений параметра крутки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект no. 18-38-00775_мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC AR5 WGII Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability // IPCC. 2014. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> (дата обращения 15.01.2020).
2. Sonia Y., Edward R.S. A centurial history of technological change and learning curves for pulverized coal-fired utility boilers // Energy. – 2007. – V. 32. – P. 1996–2005.
3. Numerical investigation of oxy-coal combustion to evaluate burner and combustor design concepts / E.H. Chui, A.J. Majeski, M.A. Douglas, Y. Tan // Energy. – 2004. – V. 29. – P. 1285–1296.
4. World Energy Resources 2016 // World Energy Council. 2016. URL: <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf> (дата обращения 15.01.2020).
5. ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках с целью производства энергии. – М.: Бюро НДТ, 2017. – 271 с.
6. ГОСТ Р 55173-2012. Установки котельные. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2014. – 32 с.
7. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) // EUR-lex. 2010. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=%20CELEX%3A32010L0075> (дата обращения 15.01.2020).
8. Barzegar R., Yozgatligil A., Atimtay A.T. Combustion characteristics of Turkish lignites at oxygen-enriched and oxy-fuel combustion conditions // Journal of the Energy Institute. – 2019. – V. 92. – P. 1440–1450.
9. Al-Abbas A.H., Naser J., Dodds D. CFD modelling of air-fired and oxy-fuel combustion in a large-scale furnace at Loy Yang A brown coal power station // Fuel. – 2012. – V. 102. – P. 646–665.
10. NO emissions under pulverized char combustion in $O_2/CO_2/H_2O$ preheated by a circulating fluidized bed / Z. Shujun, Z. Jianguo, L. Qinggang, P. Fei, Z. Yi, L. Wen // Fuel. – 2019. – V. 252. – P. 512–521.
11. Hernik B., Latacz G., Znamirski D. A numerical study on the combustion process for various configurations of burners in the novel ultra-supercritical BP-680 boiler furnace chamber // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 152. – P. 381–389.
12. Zhou H., Meng S. Numerical prediction of swirl burner geometry effects on NO_x emission and combustion instability in heavy oil-fired boiler // Applied Thermal Engineering. – 2019. – V. 159. – P. 1–10.
13. Large combustion plant directive emission limit values // European Commission. 2020 URL: https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/final_report_05app.pdf (дата обращения 19.01.2020).
14. National Standard of the People's Republic of China // Ministry of ecology and environment the People's Republic of China. 2012.

- URL: http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air_Environment/Emission_standard1/201201/20120106_222242.shtml (дата обращения 19.01.2020).
15. Алгоритм оптимального выбора наилучших доступных технологий для российских ТЭС / П.В. Росляков, О.Е. Кондратьева, А.Н. Головтеева, А.М. Сиваковский // Теплоэнергетика. – 2019. – № 4. – С. 60–72.
 16. Алехнович А.Н., Богомолов В.В. Конструкции топочно-горелочных устройств для снижения оксидов азота и шлакования, сжигания низкореакционных углей (обзор) // Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы: V науч.-практ. конф. – Челябинск: УралВТИ ОАО «Инженерный центр энергетики Урала», 2011. – С. 72–89.
 17. Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in T-shaped boilers with swirl burners // Energy. – 2019. – V. 186. – 14 p.
 18. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants / S. Belošević, I. Tomanović, V. Beljanski, D. Tucaković, T. Živanović // Applied Thermal Engineering – 2015. – V. 74. – P. 102–110.
 19. Simulation studies on direct ash recycling and reburning technology in a tangentially fired 500 MW pulverized coal boiler / M. Hwang, S. Kim, G. Kim, B. Lee, J. Song, M. Park, C. Jeon // Fuel. – 2013. – V. 114. – P. 78–87.
 20. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in mathematical models of turbulence. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.
 21. Al-Abbasa A.H., Naser J., Hussein E.K. Numerical simulation of brown coal combustion in a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions // Fuel. – 2013. – V. 107. – P. 688–698.
 22. Dugum A., Hanjalic K. Numerical simulation of coal-air mixture-flow in a real double-swirlburner and implications on combustion anomalies in a utility boiler // Energy. – 2019. – V. 170. – P. 942–953.
 23. Numerical investigation on the flow, combustion, and NOx emission characteristics in a 660 MWe tangential firing ultra-supercritical boiler / W. Sun, W. Zhong, A. Yu, L. Liu, Y. Qian // Advances in Mechanical Engineering – 2016. – V. 8. – P. 1–13.
 24. Hernik B., Latacz G., Znamirowski D. A numerical study on the combustion process for various configurations of burners in the novel ultra-supercritical BP-680 boiler furnace chamber // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 152. – P. 381–389.
 25. Siegel R., Howell J. Thermal radiation heat transfer. – New York: Taylor & Francis, 2002. – 864 p.
 26. Численное исследование влияния параметра крутки горелочных устройств на термогазодинамические процессы в топке котла БКЗ-420-140 / А.В. Гиль, А.С. Заворин, А.В. Старченко, С.В. Обухов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 26–32.
 27. Гиль А.В., Старченко А.В. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19. – № 5. – С. 655–671.
 28. The processes of formation of nitrogen oxides in the boiler furnace BKZ 320-140 / N.V. Vizgavljust, A.V. Starchenko, A.V. Gil, T.S. Taylasheva // The European Physical Journal Conferences. – 2015. – V. 82 (2). – 3 p.

Поступила 24.03.2020 г.

Информация об авторах

Гиль А.В., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Заворин А.С., доктор технических наук, профессор, руководитель научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Кокшарев О.М., аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Воронцова Е.С., ассистент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 621.181.519.876

NUMERICAL STUDY OF EFFECT OF PRIMARY AIR EXCESS ON COMBUSTION IN A FURNACE CHAMBER OF A UTILITY BOILER WITH MULTI-CHANNEL SWIRL BURNERS

Andrey V. Gil¹,
andgil@tpu.ru

Alexander S. Zavorin¹,
zavorin@tpu.ru

Oleg M. Koksharev¹,
omk2@tpu.ru

Elena S. Vorontsova¹,
ves@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. It is necessary to find optimal solutions for organizing the combustion of polyfractional pulverized coal fuel, taking into account the reduction of emissions of harmful substances, in particular nitrogen oxides, at existing and new thermal power plants. Currently, the problem of increasing the environmental parameters of thermal power plants in Russia is very acute, since most of the existing plants do not meet modern environmental standards and requirements.

The aim of the research is to determine the impact of the organization of solid fuel combustion using low-emission burners with possible modernization on combustion and to assess the possibility of efficient combustion by increasing the rate of primary air.

Object: furnace chamber of the power boiler in the design version and with the replacement of the design burners with low-emission ones.

Method. The numerical study was performed using the Ansys Fluent V.12.1 software package, mathematical modeling of physical and chemical processes – in a furnace chamber based on Euler-Lagrangian approaches.

Result. A mathematical model is developed based on a package of application programs with a qualitative representation of complex physical and chemical processes in the volume of the furnace chamber. The estimation of the possibility of organizing the burning of Eki-bastuz coal in low-emission burners with the optimal ratio of primary and secondary air without changing the installation angles of the blade swirlers is given.

Keyword:

Power boiler, vortex burners, coal, mathematical modeling, Euler–Lagrange method.

The research was financially supported by the RFBR (project no. 18-38-00775_мол_а).

REFERENCES

1. IPCC AR5 WGII Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. *IPCC*. 2014. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> (accessed 15 January 2020).
2. Sonia Y., Edward R.S. A centennial history of technological change and learning curves for pulverized coal-fired utility boilers. *Energy*, 2007, vol. 32, pp. 1996–2005.
3. Chui E.H., Majeski A.J., Douglas M.A., Tan Y. Numerical investigation of oxy-coal combustion to evaluate burner and combustor design concepts. *Energy*, 2004, vol. 29, pp. 1285–1296.
4. World Energy Resources 2016. *World Energy Council*. 2016. Available at: <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf> (accessed 15 January 2020).
5. ITS 38-2017. *Szhiganiye topliva na krupnykh ustanovkakh s tselyu proizvodstva energii* [Combustion of fuel in large installations for energy production]. Moscow, Byuro Standartinform Publ., 2017. 271 p.
6. GOST R 55173-2012. *Ustanovki kotelnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [The boiler installations. General technical requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 32 p.
7. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). *EUR-lex*. 2010. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075> (accessed 15 January 2020).
8. Barzegar R., Yozgatligil A., Atimtay A.T. Combustion characteristics of Turkish lignites at oxygen-enriched and oxy-fuel combustion conditions. *Journal of the Energy Institute*, 2019, vol. 92, pp. 1440–1450.
9. Al-Abbas A.H., Naser J., Dodds D. CFD modelling of air-fired and oxy-fuel combustion in a large-scale furnace at Loy Yang A brown coal power station. *Fuel*, 2012, vol. 102, pp. 646–665.
10. Shujun Z., Jianguo Z., Qinggang L., Fei P., Yi Z., Wen L. NO emissions under pulverized char combustion in O₂/CO₂/H₂O preheated by a circulating fluidized bed. *Fuel*, 2019, vol. 252, pp. 512–521.
11. Hernik B., Latacz G., Znamirski D. A numerical study on the combustion process for various configurations of burners in the novel ultra-supercritical BP-680 boiler furnace chamber. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 152, pp. 381–389.
12. Zhou H., Meng S. Numerical prediction of swirl burner geometry effects on NO_x emission and combustion instability in heavy oil-fired boiler. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 159, pp. 1–10.
13. Large combustion plant directive emission limit values. *European Commission*. 2020. Available at: https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/final_report_05app.pdf (accessed 19 January 2020).
14. *National Standard of the People's Republic of China*. Ministry of ecology and environment the People's Republic of China. 2012. Available at: http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air_Environment/Emission_standard1/201201/20120106_222242.shtml (accessed 19 January 2020).
15. Roslyakov P.V., Kondrateva O.E., Golovteeva A.N., Sivakovskii A.M. Optimal Choice of the Best Available Technologies for Russian Thermal Power Plants. *Thermal Engineering*, 2019, vol. 66, no. 4, pp. 268–278.
16. Alekhovich A.N., Bogomolov V.V. Konstruktsii topochnogorelochnykh ustroystv dlya snizheniya oksidov azota i shlakovaniya, szhiganiya nizkoreaktsionnykh uglei (obzor) [Designs of combustion devices for reducing nitrogen oxides and slagging,

- burning low-reaction coals (review)]. *Mineralnaya chast topliva, shlakovanie, ochistka kotlov, ulavlivanie i ispolzovanie zoly. V nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Fuel mineral part, slagging, boiler cleaning, ash catching and using. V scientific conference]. Chelyabinsk, UralVTI OAO «Inzhenerny tsentr energetiki Urala», 2011. pp. 72–89.
17. Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in T-shaped boilers with swirl burners. *Energy*, 2019, vol. 186, 14 p.
 18. Belošević S., Tomanović I., Beljanski V., Tucaković D., Živanović T. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 74, pp. 102–110.
 19. Hwang M., Kim S., Kim G., Lee B., Song J., Park M., Jeon C. Simulation studies on direct ash recycling and reburning technology in a tangentially fired 500 MW pulverized coal boiler. *Fuel*, 2013, vol. 114, pp. 78–87.
 20. Launder B.E., Spalding D.B. *Lectures in mathematical models of turbulence*. London, Academic Press, 1972. 169 p.
 21. Al-Abbasa A.H., Naser J., Hussein E.K. Numerical simulation of brown coal combustion in a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions. *Fuel*, 2013, vol. 107, pp. 688–698.
 22. Dugum A., Hanjalic K. Numerical simulation of coal-air mixture-flow in a real double-swirlburner and implications on combustion anomalies in a utility boiler. *Energy*, 2019, vol. 170, pp. 942–953.
 23. Sun W., Zhong W., Yu A., Liu L., Qian Y. Numerical investigation on the flow, combustion, and NOx emission characteristics in a 660 MWe tangential firing ultra-supercritical boiler. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8, pp. 1–13.
 24. Hernik B., Latacz G., Znamirski D. A numerical study on the combustion process for various configurations of burners in the novel ultra-supercritical BP-680 boiler furnace chamber. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 152, pp. 381–389.
 25. Siegel R., Howell J. *Thermal radiation heat transfer*. New York, Taylor & Francis, 2002. 864 p.
 26. Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V., Obuhov S.V. Numerical investigation of a burner twist parameter effect on thermogas dynamic processes in boilers BKZ-420-140. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 26–32. In Rus.
 27. Gil A.V., Starchenko A.V. Mathematical modelling of physical and chemical processes of coal combustion in chamber furnaces of boiler aggregates based on the package of applied programs FIRE 3D. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 503–519.
 28. Vizgavljush N.V., Starchenko A.V., Gil A.V., Taylasheva T.S. The processes of formation of nitrogen oxides in the boiler furnace BKZ 320-140. *The European Physical Journal Conferences*, 2015, vol. 82 (2), 3 p.

Received: 24 March 2020.

Information about the authors

Andrey V. Gil, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander S. Zavorin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg M. Koksharev, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena S. Vorontsova, assistant National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.42:546.49:581.1:504.7(571.14)

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РТУТИ В ЛИСТЬЯХ И ГОДОВЫХ КОЛЬЦАХ ТОПОЛЯ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ Г. НОВОСИБИРСК

Турсуналиева Елена Муратовна¹,
tursunalieva.em@gmail.com

Юсупов Дмитрий Валерьевич^{1,2},
yusupovd@mail.ru

Рихванов Леонид Петрович¹,
rikhvanov@tpu.ru

Ляпина Елена Евгеньевна³,
eeldv@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Амурский государственный университет,
Россия, 675027, Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21.

³ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3.

Актуальность работы обусловлена необходимостью эколого-геохимической оценки техногенного воздействия на окружающую среду и здоровье населения в связи с развитием урбанизации и промышленности в городах, повлекшее за собой загрязнение поллютантами компонентов природной среды.

Цель: оценка ртутной нагрузки на природные компоненты урбанизированной территории с промышленно развитой инфраструктурой по данным изучения листьев и керна тополя в г. Новосибирск.

Объекты: листья и годовые кольца тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.). Выбранный вид тополя широко распространен в городах умеренного пояса. Он имеет ряд особенностей, в числе которых относительно большая площадь, восковое покрытие и наличие устьиц с двух сторон листовой пластины, позволяющие улавливать в значительном количестве пылевые частицы и аэрозоли, являясь индикатором состояния воздушного бассейна.

Методы: отбор проб листьев тополя во временном периоде 2014–2018 гг. по равномерной площадной сети 4×4 со сгущением 1×1 км вблизи предполагаемого источника загрязнения; отбор проб древесного керна с отдельно стоящих деревьев на расстоянии от 0,5 до 1 км от предполагаемого источника; высушивание и измельчение; атомно-абсорбционный анализ Hg методом пиролиза; статистическая обработка данных; построение карт и графиков.

Результаты. В ходе проведения полевых и лабораторных работ получены данные по геохимическим особенностям распределения Hg в листьях и годовых кольцах тополя бальзамического (*P. balsamifera* L.) на территории г. Новосибирск. В северо-восточной части города выявлен биогеохимический ореол Hg изометричной формы размером 25 км² с содержанием более 100 нг/г. Высокая концентрация Hg (1300 нг/г) в листьях тополя зафиксирована в 2017 г. в Калининском районе, вблизи промышленной площадки Новосибирского завода химконцентратов (НЗХК). Исследования показали четкую тенденцию увеличения накопления Hg в листьях тополя в течение вегетационного периода. Максимальное среднее содержание выявлено в листовом опаде – 2006 нг/г (1153–2425 нг/г). Однако среднее содержание Hg в почве – 294 нг/г, что значительно ниже предельно-допустимых концентраций (2100 нг/г). Исследован характер распределения содержания Hg в листьях тополя по высоте кроны дерева, произрастающего в эпицентре биогеохимического ореола Hg. С наветренной стороны от источника эмиссии концентрация Hg в листьях в среднем в 1,5 раза выше, чем со стороны «ветровой тени». В ходе изучения форм нахождения Hg в листьях тополя установлено, что Hg содержится преимущественно в свободной и физически связанной формах, наиболее мобильных, склонных к повышенной миграции, трансформации и мителированию в условиях окружающей среды. По содержанию Hg в кернах тополя установлены три периода эмиссии Hg вблизи источника: 1-й – с максимальной эмиссией в 1967–1985 гг., 2-ой – снижение содержания Hg в 1991–2000 гг., 3-й – сравнительно низкий уровень содержания Hg в 2000–2017 гг. В г. Новосибирске околонулевым крупный биогеохимический ореол Hg, установлен возможный источник её эмиссии. Методом дендробиеохимии в эпицентре наиболее высокого содержания Hg установлена многолетняя динамика изменения содержания Hg в объектах исследования. Определен период с максимальным техногенным влиянием Hg на городскую среду. В сельской и промышленной зонах на северо-востоке Новосибирска в пределах крупного биогеохимического ореола Hg рекомендуется постановка эколого-геохимического мониторинга со ртутнометрической съемкой атмосферного воздуха, исследованием почвенно-растительного покрова, контроль санитарно-гигиенических показателей состояния здоровья населения.

Ключевые слова:

Ртуть, урбанизированные территории, Новосибирск, листья тополя, годовые кольца, дендробиеохимия.

Введение

В связи с урбанизацией и быстрым развитием промышленности одной из важнейших задач эколо-

гической геохимии является изучение антропогенного воздействия на объекты окружающей среды, а именно – путей поступления и поведения загрязняю-

щих веществ, масштабов загрязнения, предотвращения или же борьба с их последствиями. С учетом самого высокого показателя токсичности Hg (21) среди других элементов для живых организмов и обширными вариантами ее проявлений особое значение приобретает изучение геохимии этого элемента [1, 2]. Hg распространена повсеместно и негативно воздействует на окружающую среду и здоровье людей [3, 4]. Самым распространенным соединением Hg в окружающей среде является сульфид ртути HgS(I) – минерал киноварь. Кроме того, встречается металлическая Hg, ее органические производные и неорганические соединения. При вдыхании паров металлической Hg более 80 % абсорбируется во внутренних органах с последующим накоплением, что приводит к отрицательному влиянию на здоровье (разрушению легких, поражению почек, печени, головного мозга, нервной системы, потере зрения и т. д.) [5, 6]. В Российской Федерации в «Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды» входит только Hg, как вещество первого класса гигиенической опасности в компонентах окружающей среды [6]. Но в то же время токсичный элемент и его соединения исключены из списка веществ, подверженных контролю на предприятиях [7].

На урбанизированных территориях растения играют роль естественного барьера на пути распространения загрязняющих веществ [8]. При этом значение имеет расстояние произрастания от источника, а также индивидуальные характеристики растения (высота, размеры листовой пластины, наличие воскового покрытия, густота кроны и т. д.), условия окружающей среды и характер загрязнения [9–12]. Рядом исследований доказана способность отдельных видов растений избирательно накапливать загрязняющие вещества [13–15]. Объектами исследования могут служить листья, кора, древесина [16, 17] и корни растений. Тополь бальзамический (*P. balsamifera* L.) – широко используемое в качестве зеленых насаждений городов лиственное растение с высокой газопоглощательной способностью и устойчивостью к токсикантам [18]. Широкая поверхность, ворсистость и восковое покрытие листовой пластины позволяет лучше улавливать загрязняющие вещества и накапливать их – ряд отличительных свойств тополя, делающих его прекрасным биоиндикатором. В ходе экспериментов, проводимых учеными разных стран, установлен основной путь поступления загрязняющих веществ в листья тополя – атмосферный воздух [19–22].

Исследуемая территория

Новосибирск – город-миллионник, расположенный на пересечении важнейших транспортных коридоров, соединяющих Европу и Азию. Третий по численности населения город РФ (1618039 чел. по данным 2019 г.), расположен в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины. Площадь территории города – 502,7 км² [23], располагается на обоих берегах р. Оби. Новосибирск находится в умеренно-

климатическом поясе с характерным колебанием среднемесячных температур.

Новосибирск разделен на 10 административных районов, из них Первомайский и Завельцовский районы являются самыми загрязненными взвешенными веществами [24]. Максимально разовые концентрации загрязняющих веществ фиксируются и в других районах. В целом уровень загрязнения в городе оценивается как «высокий». В период с 2014 по 2018 гг. наблюдается рост уровня загрязнения атмосферного воздуха рядом веществ (взвешенные вещества, C₂₀H₁₂, HCHO, NO₂). Основной вклад в загрязнение города вносят: транспорт, теплоэнергетика, тяжелая и легкая промышленность. По данным на 2018 г., к основным загрязнителям относят: NH₄⁺ (ионы аммония), NO₃ (нитраты), As, Hg, B, Mn, фториды и фенолы [24].

Энергетический комплекс города хорошо развит и включает в себя 4 крупных тепловых электростанций (ТЭЦ) и большое количество котельных. Самой крупной теплоэлектростанцией является ТЭЦ-5.

В промышленный комплекс г. Новосибирска входят: пищевая промышленность, машиностроение, цветная металлургия, электроэнергетика, металлообработка и др. [23]. Новосибирский завод химконцентратов (НЗХК) – крупнейший завод ядерного топливного цикла в России по производству ядерного топлива, химикатов для промышленного применения и литья. На расстоянии 3 км от северо-восточной окраины города находится хвостохранилище для хранения пульпы, содержащей U, Hg, Li и твердых бытовых отходов [25, 26].

Объекты и методы

Для исследования ртутной нагрузки, динамики накопления Hg были отобраны пробы листьев, опада и кернов тополя бальзамического (*P. balsamifera* L.). Отбор проводили в 2014–2019 гг. на территории г. Новосибирск – по равномерной площадной сети 4×4 км в 2014 г., в районе биогеохимической аномалии Hg – 1×1 км в 2017 г. методом средней пробы. Листья тополя отбирались в сухую погоду на высоте 1,5–2 м, согласно рекомендациям [27]. Всего было отобрано 70 биогеохимических проб.

С помощью автовышки с отдельно стоящего тополя отобраны 28 проб листьев в горизонтальном (перпендикулярном) и вертикальном направлениях относительно оси кроны через каждый метр (2–15 м) с наветренной (восточной) и подветренной (западной) сторон на расстоянии около 500 м от предполагаемого источника эмиссии Hg. Для изучения уровня накопления металла в эпицентре аномалии в течение вегетационного периода отобраны пробы листьев тополя ежемесячно с июня по октябрь 2018 г. Всего отобрано 14 проб листьев и 10 проб листового опада.

Керн тополя отбирался в октябре 2017 г. в четырех точках с отдельно стоящих деревьев на разном удалении от источника. Пробы отбирали приростным буром с восточной и западной стороны дерева на высоте 1,5–2 м [28] и помещали в бумажные пеналы. Отверстие в стволе дерева после извлечения керна обрабатывалось садовым варом. Количество отобран-

ных кернов составило 10 шт. (более 200 годовых колец).

Пробы керна после сушки подвергались шлифовке, зачистке и разделению на годовые кольца с последующим измельчением при помощи скальпеля. Для точной маркировки колец использовался прибор LINTAB с программным обеспечением TSAP-Win и бинокулярный микроскоп. Измерения ширины годовых колец проводили в лаборатории динамики и устойчивости экосистем в Институте мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН (г. Томск). После разделения каждое годовое кольцо подвергалось анализу на Hg.

Содержание Hg определяли в лаборатории микроэлементного анализа в Международном инновационном научно-образовательном центре «Урановая геология» в отделении геологии Национального исследовательского Томского политехнического университета методом атомной абсорбции (метод термодеструкции) на ртутном анализаторе «РА-915М» с приставкой «ПИРО-915+» («Люмэкс»). Все отобранные пробы предварительно высушивались при комнатной температуре. Высушенные пробы листьев и листового опада тополя измельчались вручную. Нижний предел обнаружения Hg – 5 нг/г. Навеска пробы 20–40 мг. Погрешность анализа составила не более 12 %. Концентрации Hg приведены на 1 г сухого вещества.

Формы Hg определяли на том же приборе методом термодесорбции на разных температурных режимах.

Статистическая и графическая обработка данных осуществлялась посредством программ: Microsoft Excel, Statistica, CorelDraw, Surfer, Adobe Illustrator, Google Earth.

Результаты и обсуждение

В 2014–2019 гг. проведены системные исследования по оценке содержания Hg в листьях тополя в городах юга Сибири и Дальнего Востока [29]. В число исследуемых городов вошел г. Новосибирск, являющийся крупным промышленным центром не только Сибирского региона, но и России. В рамках исследования определено валовое содержание, формы нахождения металла, динамика его накопления в годовых кольцах тополя, изучено влияние ряда факторов – высоты кроны дерева, периода вегетации на распределение Hg в листьях тополя. Анализ результатов 2014 г. показал неравномерное распределение Hg с аномальными концентрациями в северо-восточной части Новосибирска, выявил площадь и условия формирования крупного биогеохимического ореола Hg [29].

Средняя концентрация Hg в листьях тополя на территории Новосибирска (таблица) 61 нг/г [28], что в 2,4 раза выше среднего регионального уровня содержания Hg в городах юга Сибири и Дальнего Востока [29].

Таблица. Статистические параметры концентрации Hg (нг/г) в сухой массе листьев тополя на территории г. Новосибирска по данным опробования 2014 и 2017 гг.

Table. Statistical parameters of Hg concentration (ng/g) in dry poplar leaves mass within the territory of Novosibirsk from the 2014 and 2017 tests

Показатель Parameter	2014	2017	Показатель Parameter	2014	2017
Среднее Mean	60,5±16,2	198,7±29,9	Стандартное отклонение Standard deviation	88,5	215,5
Минимум Minimum	13	40	Экссесс Excess	10,5	13,4
Максимум Maximum	411	1298	Коэффициент вариации, % Variation coefficient	146	721
Медиана Median	30,2	139,6	Региональный фон [Юсупов, 2018] Regional background [Yusupov, 2018]	25	
Кларк Hg в наземных растениях [Добровольский, 2003] Clark Hg in land plant [Dobrovolskiy, 2003]	12,0		Фоновое содержание в листьях деревьев [Иванов, 1997] Background concentration in the leaves of the trees [Ivanov, 1997]	17,0	

Такие высокие концентрации объясняются высокой транспортной нагрузкой, развитой промышленностью, электроэнергетикой, отдельными крупными предприятиями (в технологическом процессе которых используется Hg), организованными и несанкционированными свалками. Кроме того, в годы проведения экспериментальных исследований летние периоды характеризовались повышенными средними температурами воздуха, что способствовало испарению паров накопленной сферами экосистемы города Hg. Самым незагрязненным Hg районом оказался Первомайский, расположенный в южной части левобережья города. На втором месте Ленинский и Октябрьский районы со средним значением Hg (30 нг/г) [28], незначительно превышающим региональный фон [29]. Не смотря на

расположение в данных районах большей части промышленных предприятий, можно считать их относительно чистыми по данным ртутного анализа 2014 г.

Максимальное значение (411 и 323 нг/г) приходится на точки, расположенные на территории Калининской промышленной зоны в северо-восточной части города, в непосредственной близости от санитарно-защитной зоны промышленной площадки ПАО «НЗХК» и ТЭЦ-4 [29].

На рис. 1, а показаны биогеохимические ореолы Hg в г. Новосибирск. Концентрации Hg на территории левого берега и юго-востоке правого берега р. Обь не превышают 40 нг/г, тогда как в северной части правобережья можно выделить очаг с высоким содержанием Hg (более 100 нг/г) [29].

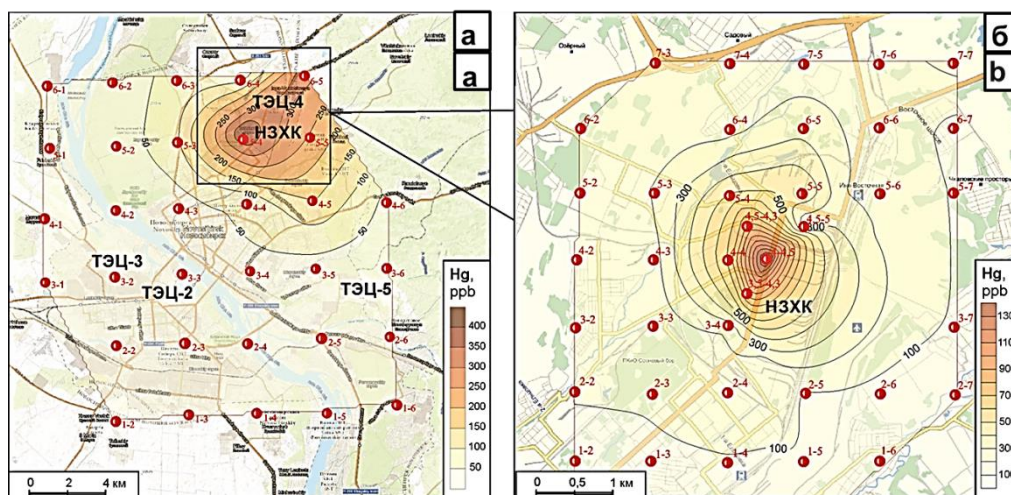


Рис. 1. Ореолы Hg в г. Новосибирск в сухой массе листьев тополя по данным 2014 (а) и 2017 (б) гг. [29]

Fig. 1. Hg halos in the city of Novosibirsk as established from dry poplar leaves mass, data for 2014 (a) and 2017 (b) [29]

В 2017 г. на для проверки содержаний Hg на территории обнаруженной в 2014 г. аномалии были дополнительно отобраны пробы листьев тополя. Сеть охватила часть Калининского и Дзержинского районов. Результаты показали максимально высокую концентрацию Hg вблизи северо-западной границы промышленной площадки ПАО «НЗХК» (рис. 1, б). Максимальное значение (1298 нг/г) (таблица) превышает региональный фон (25 нг/г) в 52 раза, и среднее значение по всей территории г. Новосибирск (60 нг/г) – в 26 раз [29].

Расчёты геоэкологических показателей концентраций Hg в листьях тополя на исследуемой территории показали значительное превышение относительно регионального фона (Фр.) [29], кларка Hg в наземных растениях (Кн.р.) [30] и фоновых содержаний в листьях деревьев (Фл.д.) [31]. Так, результаты исследования 2014 г. выявили превышения относительно Фр. в 5,1; Кн.р. – в 2,4; Фл.д. – 3,6 раза. Данные ис-

следований в выделенной аномалии 2017 г. характеризуются более высокими цифрами кратности превышения: 16,6; 8 и 11,7 соответственно. Полученные цифры свидетельствуют о значительном биологическом накоплении Hg листьями тополя на территории г. Новосибирск.

Осенью 2017 г. для оценки вклада антропогенного фактора, влияющего на состояние окружающей среды и динамики загрязнения Hg, были отобраны пробы древесного ядра в непосредственной близости от предполагаемого источника загрязнения. Годовые кольца позволяют улавливать концентрацию Hg в течение всего года, в отличие от листьев, являющихся сезонным биоиндикатором [28]. Однако источник поступления Hg в листья и древесину тополя разный.

В исследованных годовых кольцах временной период накопления Hg составляет 50 лет. При этом выделяется три интервала, среднее содержания Hg в которых значимо отличается друг от друга (рис. 2).

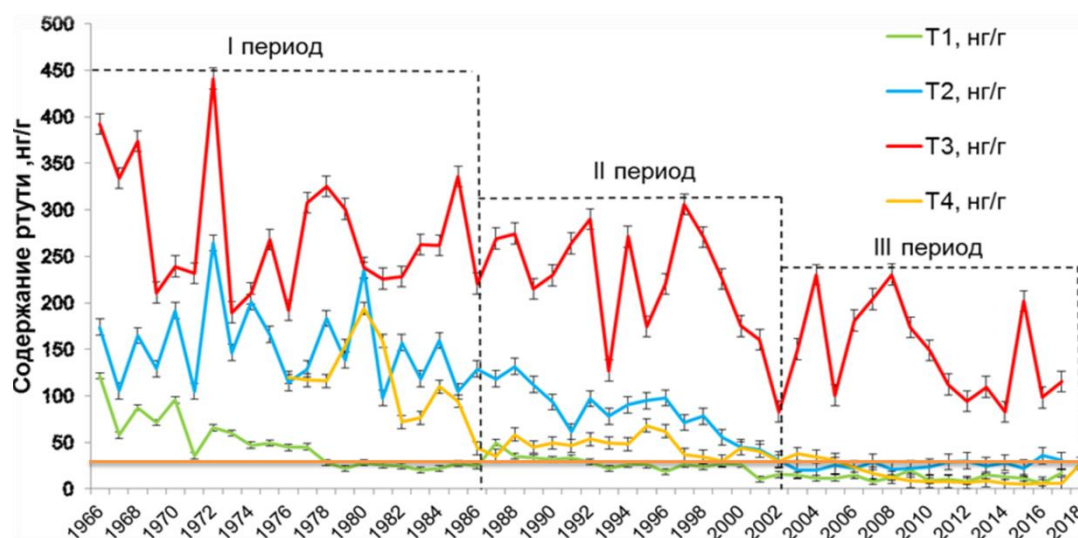


Рис. 2. Динамика поступления Hg в годовых кольцах тополя. Оранжевая линия – региональный фон (25 нг/г) [29]. Расстояние от источника загрязнения: T1 – 700 м, T2 – 600 м, T3 – 480 м, T4 – 900 м

Fig. 2. Dynamics of Hg uptake as determined from poplar annual rings. The orange line represents a regional background value (25 ng/g) [29]. Distance from pollution source: T1 – 700 m, T2 – 600 m, T3 – 480 m, T4 – 900 m

Период с самым низким содержанием Hg (6 нг/г) – с 2018 по 2002 гг. Временной интервал с самыми высокими значениями содержания Hg (441 нг/г) приходится на 1966–1986 гг. С 1987 по 2001 гг. происходит постепенное снижение средних концентраций Hg в интервале 152–98 нг/г. Похожий характер накопления Hg деревьями отражает динамику ртутной нагрузки на окружающую среду города.

Минимальные средние значения концентрации Hg в кернах тополя в зоне воздействия промышленного объекта выпадают на точку 1 (32 нг/г) и точку 4 (52 нг/г), расположенные на самом дальнем расстоянии от предполагаемого источника. Минимальные концентрации Hg в вышеуказанных точках относятся к 2016–2017 гг. Относительно других первая точка характерна низкими концентрациями (6 нг/г) в течение всего анализируемого периода. Максимальные концентрации Hg выявлены в точке 3, которая находится в 480 м от предполагаемого источника.

Такой скачок концентраций Hg можно объяснить близким расположением ПАО «НЗХК», который в

60-х гг. XX в. запустил процесс литейного производства [32]. Также возможно влияние золоотвала и ТЭЦ-4 за счет введения в строй новых агрегатов. В период с середины 50-х по начало 70-х, отмечается рост генерирующих мощностей электростанции [23]. Следует отметить, что ореол загрязнения Hg совпадает с таковым для U, природа которого техногенная, что подтверждает протяженный на 70 км в северо-восточном направлении (по розе ветров) ореол с пониженным отношением $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ по результатам снеговых съемок С.А. Артамоновой [33]. Поэтому рядом расположенная ТЭЦ не может быть поставщиком U в компоненты природной среды. Доказано, что выбросы НЗХК поставляют в окружающую среду U как в рассеянном виде, так и в виде микрочастиц оксидов U размером до 10 мкм [34].

Исследование особенностей накопления Hg кроной тополя в зависимости от высоты отбора проб и ориентации дерева относительно источника показали «полосатый» характер распределения концентраций Hg (рис. 3).

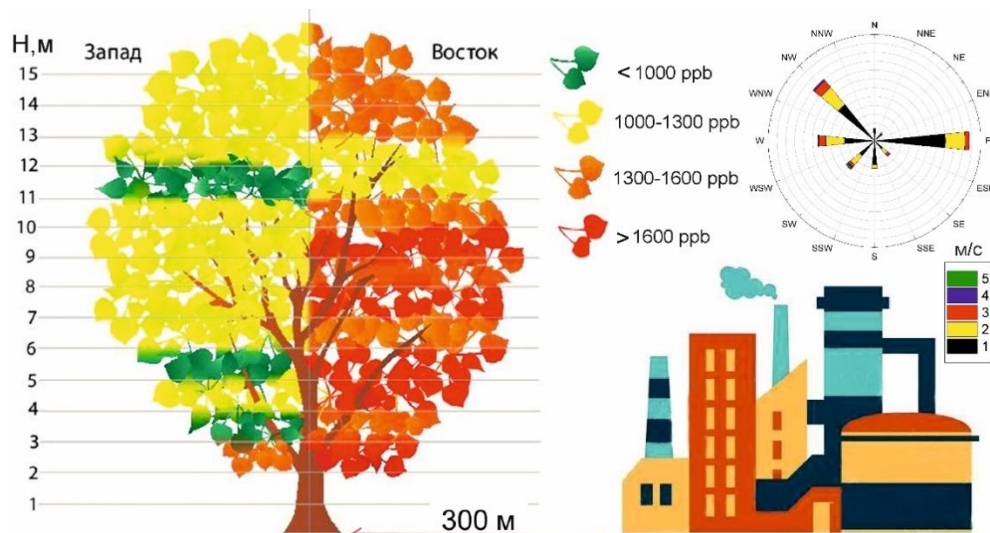


Рис. 3. Выявление характера распределения Hg по высоте кроны дерева (ppb=нг/г)

Fig. 3. Determining the nature of Hg distribution through the tree crown height (ppb=ng/g)

В ходе эксперимента обнаружено превышение концентрации Hg в пробах листьев тополя в среднем в 1,5 раза с наветренной стороны кроны над подветренной, что объясняется расположением источника загрязнения Hg к востоку от опробованного дерева. Однако на высоте 2–3 м (рекомендованная высота отбора проб) концентрация с двух сторон отличается от 1,3 до 1,6 раза. При этом следует отметить, что на высотах 3–4, 5–7 и 11–13 м крону исследуемого тополя опоясывают «ленты» шириной 1–2 м, где концентрации Hg в 1,3 раза ниже по сравнению с остальной кроной, как с восточной, так и западной стороны (рис. 3). По результатам исследования выявили уменьшение накопления Hg кроной тополя с высотой, что подтверждает роль подстилающей поверхности в качестве вторичного источника загрязнителя в листе.

Вегетационный период у большинства деревьев начинается при наступлении положительных темпе-

ратур весной в дневное время. В переходный весенний период корни деревьев только начинают заново расти, однако наземная часть уже активна. В крону начинают поступать тепло и влага, что положительно влияет на развитие дерева в период вегетации и созревание плодов.

Собственно, сам вегетационный период, который на большей территории России длится с мая по сентябрь включительно, является самым длительным периодом. У деревьев вегетация – время активной жизнедеятельности, которое характеризуется началом движения соков, распусканием почек, образованием небольших побегов, появлением бутонов, цветением, плодоношением, образованием семян, вплоть до сбрасывания листьев. В середине вегетационного периода рост дерева уже не такой активный. Однако листья продолжают функционировать, поэтому в растении и плодах накапливается крахмал, побеги дерева

покрываются древесиной, корневая система становится менее активной.

В переходный осенний период завершается покрытие древесиной побегов дерева. Крахмал, накопленный во всех частях растения, превращается в сахар, обеспечивая устойчивость растения во время зимы. В течение всего периода идет активный рост мелких всасывающих корней, продолжающийся до самых морозов [35].

В меняющихся условиях городской среды и в связи с высокими концентрациями Hg и их варьированием вблизи источника загрязнения был проведен ряд исследований для выявления особенностей накопления Hg листьями в течение вегетационного периода. Результаты эксперимента по изучению динамики содержания Hg в течение летне-осеннего периода 2017 г. показали четкую тенденцию по увеличению концентрации элемента. Самое низкое содержание Hg выявили в пробах, отобранных в конце июня (601 нг/г). К концу вегетационного периода (сентябрь) CHg увеличилась в 3,2 раза и составила 1938 нг/г в пожелтевших листьях, максимальное значение обнаружилось в листовом опаде – 2425 нг/г, собранном в октябре. Увеличение содержания Hg в пробах листьев к концу вегетации объясняется физиологическими особенностями дерева и накопительным эффектом. Максимальные содержания в опаде характеризуются потерей влаги листьями и, как следствие, концентрированием Hg.

Валовое содержание Hg отражает общее поступление и накопление Hg листьями и древесиной тополя. Однако наибольший интерес и опасность представляют формы нахождения Hg в компонентах окружающей среды. Поскольку именно формы нахождения Hg определяют степень ее токсичности и негативного воздействия на атмосферный воздух, почву, поверхностные и подземные воды, биоту и человека. В исследованных пробах листьев, опада и почв в точках опробования преобладающей Hg присутствует в основном в свободной форме (Hg^0), а также физически и химически связанная.

Было выявлено, что свободная форма Hg (Hg^0) является преобладающей в зоне выявленной ртутной аномалии и составляет от 4 до 100 % в исследованных пробах листьев, листового опада и почвы. При этом следует отметить, что Hg в газообразной форме обнаружена в 83 % проб листьев в результате площадной оценки ртутной нагрузки на территории повышенного содержания. При оценке поступления разных соединений Hg в листовую пластину в зависимости от расположения дерева относительно источника свободная форма Hg также отмечается в 83 % случаев, особенно с той стороны дерева, которая развернута от источника. В листьях тополя с той стороны кроны дерева, которая развернута к источнику, Hg присутствует как в атомарном состоянии, так и физически связана с пылеаэрозольными частицами (рис. 4). В листовом опаде и пробах почв в зоне высоких содержаний Hg элемент также в основном присутствует в виде Hg^0 (83–100 %).

Физически связанная форма в качестве преобладающей во всех изученных пробах встречается реже ($HgCl_2$). Кроме того, большинство исследованных проб листьев, опада, почв характеризуются присутствием в основном двух форм Hg – свободной и физически связанной. Данные соединения Hg являются наиболее способными к миграции и трансформации, а, следовательно, наиболее опасными с точки зрения геоэкологии. Стоит отметить также присутствие сульфидной (12 %) и изоморфной (7–9 %) форм Hg в листьях тополя. Данные соединения относятся к наиболее устойчивым в природной среде, но источник их поступления антропогенный.

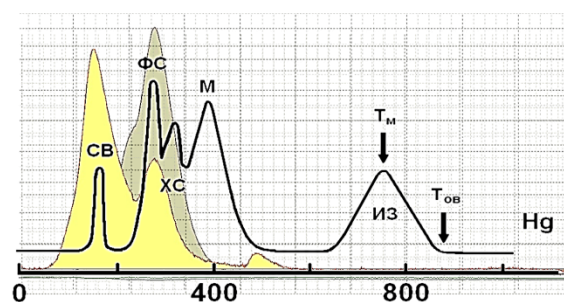


Рис. 4. Схема распределения форм Hg в пробах листьев тополя. Условные обозначения форм Hg: CB – свободная, FC – физически связанная, XC – химически связанная, M – сульфидная, ИЗ – изоморфная

Fig. 4. Scheme of distribution of Hg forms in poplar leaves samples. Symbols of forms of Hg: CB – free, FC – physically bonded, XC – chemically bonded, M – sulfide, ИЗ – isomorphic

Лишь некоторые точки отличаются присутствием всех форм Hg в исследованных пробах. В пространстве данные точки расположены в центральной части выявленного очага Hg, а также в северо-восточной и северо-западной частях.

Поступление разных форм Hg в листовую пластину с высотой характеризуется общим соотношением – максимум свободной Hg, затем физически и химически связанная Hg. Однако с наветренной стороны кроны на высотах 5 и 15 м поллютант присутствует в основном в физически связанных формах.

Кроме того, формы Hg в листовой пластине тополя в течение всего вегетационного периода подвергаются изменению. В пробах, отобранных в июне, преобладает физически связанная форма Hg (до 67 %), присутствует свободная форма (до 32 %) и менее 1 % химически связанная и сульфидная формы Hg. В конце вегетационного периода первые две формы меняются местами.

В почвах в центре очага валовые содержания Hg составляют 295 нг/г. Что касается соединений Hg, то почвы характеризуются присутствием четырех форм: свободная, физически и химически связанная, а также изоморфная. Преобладающей является свободная Hg. Это значит, что почвы в очаге повышенного содержания могут выступать в качестве вторичного источника поступления Hg в растения и атмосферный воздух.

Заключение

В г. Новосибирске оконтурен крупный биогеохимический ореол Hg, установлен возможный источник её эмиссии. Методом дендрогеохимии в эпицентре наиболее высокого содержания Hg установлена многолетняя динамика изменения содержания Hg в объектах исследования. Определен период с максимальным техногенным влиянием Hg на городскую среду. В селитебной и промышленной зонах на северо-востоке Новосибирска в пределах крупного биогеохимического ореола Hg рекомендуется организация эколого-геохимического мониторинга с ртутнометрической съемкой атмосферного воздуха, исследованием почвенно-растительного покрова, контролем санитарно-гигиенических показателей состояния здоровья

населения. Результаты исследования подтверждают индикаторные свойства листьев тополя, возможность использования этого объекта в биогеохимическом мониторинге для оценки загрязнения окружающей среды (приземного воздуха) Hg, говорят о необходимости разработки ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) Hg и других химических элементов-поллютантов в растительных объектах мониторинга.

Научные исследования выполнены в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров. Определение форм нахождения ртути в образцах листьев тополя, листового опада и почв выполнено в рамках проекта № АААА-А17-117013050031-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 169 с.
2. Аношин Г.А., Маликова И.Н., Ковалев С.И. Ртуть в окружающей среде юга Западной Сибири // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 1995. – Т. 3. – № 1–2. – С. 69–111.
3. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000 / E.G. Pacyna, J.M. Pacyna, F. Steenhuisen, S. Wilson // *Atmospheric Environment*. – 2006. – V. 40 (20). – P. 4048–4063.
4. Scenarios of global mercury emissions from anthropogenic sources / P. Rafaj, I. Bertok, J. Cofata, W. Schopp // *Atmospheric Environment*. – 2013. – V. 79. – P. 472–479.
5. Петросян В.С. Глобальное загрязнение окружающей среды ртутью и ее соединениями // *Россия в окружающем мире: 2006 (аналитический ежегодник)* / отв. ред. Н.Н. Марфенин / под общ. ред. Н.Н. Марфенина, С.А. Степанова. – М.: МНЭПУ, 2007. – С. 149–163.
6. Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 июля 2015 г. № 1316-п. URL: <http://government.ru/media/files/NQsLnpwkA9vtceGoi46TrcTSmbuxJXmH.pdf> (дата обращения 11.01.2020).
7. Пилотный проект по формированию кадастра ртутных загрязнений в РФ. URL: <https://docplayer.ru/56639052-Rezultaty-vypolneniya-pilotnogo-proekta-po-sozdaniyu-kadestra-rtutnyh-zagryazneniy-okruzhayushchey-sredy-v-rossiyskoy-federacii.html> (дата обращения 20.12.2019).
8. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments / K.V. Abhijith, K. Prashant, J. Gallagher, A. McNabola // *Atmospheric Environment*. – 2017. – V. 162. – P. 71–86.
9. Mercury dynamics of a northern hardwood canopy / J. Bushey, A. Nallana, M. Montesdeoca, C. Driscoll // *Atmospheric Environment*. – 2008. – V. 42. – P. 6905–6914.
10. Процесс загрязнения ртутью кроны деревьев и оценка её сезонного накопления на условно чистой и урбанизированной территориях / В.П. Зволинский, В.А. Андрианов, Л.И. Ермакова, Е.Г. Булаткина // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. – 2015. – № 3 (39). – С. 26–29.
11. Air/surface exchange of mercury vapor over forests – the need for a reassessment of continental biogenic emissions / S. Lindberg, P. Hanson, T. Meyers, K. Kim // *Atmospheric Environment*. – 1998. – V. 32 (5). – P. 895–908.
12. Foliar exchange of mercury-vapor – evidence for a compensation point / P. Hanson, S. Lindberg, T. Tabberer, J. Owens, K. Kim // *Water, Air, and Soil Pollution*. – 1995. – V. 80 (1–4). – P. 373–382.
13. Fine-scale mercury trends in temperate deciduous tree leaves from Ontario, Canada / E. Siwik, L. M. Campbell, G. Mierle // *Science of the Total Environment*. – 2009. – V. 407. – P. 6275–6279.
14. Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях севера / Л.В. Ветчинникова, Т.Ю. Кузнецова, А.Ф. Титов // *Тр. Карел. науч. центра РАН*. – 2013. – № 3. – С. 68–73.
15. Пац А.Ч., Сосновская Н.Е. Особенности аккумуляции пыли и тяжелых металлов древесными растениями в техногенных условиях (на примере г. Гродно) // *Природопользование: состояние и перспективы развития: материалы конф. молод. ученых*. – Минск, 2014. – С. 71–75.
16. Evaluation of historical atmospheric pollution in an industrial area by dendrochemical approaches / A. L. Austruya, L. Yungc, J.P. Ambrosio, O. Girardclos, C. Kellerb, B. Angelettib, J. Dron, P. Chamareta, M. Chalotc // *Chemosphere*. – 2019. – V. 220. – P. 116–126.
17. The history of mercury pollution near the Spolana chlor-alkali plant (Neratovice, Czech Republic) as recorded by Scots pine tree rings and other bioindicators / N. Tomas, S. Martin, B.S. James, R. Jan, H. Maria, H. Jakub // *Science of The Total Environment*. – 2017. – V. 586. – P. 1182–1192.
18. Гетко Н.В., Шобанова И.А., Жданец С.Ф. Устойчивость интродуцированных растений к газообразным соединениям серы // *Оптимизация окружающей среды средствами озеленения. (Промышленные центры Белоруссии)*. – Минск: Наука и техника, 1985. – С. 60–68.
19. Mercury uptake into poplar leaves / M. Assad, J. Parelle, D. Cazaux, F. Gimbert, M. Chalot, F. Tatin-Froux // *Chemosphere*. – 2016. – № 146. – P. 1–7.
20. Laacour A., Nater E.A., Kolka R.K. Distribution and uptake dynamics of mercury in leaves of common deciduous tree species in Minnesota, U.S.A. // *Environmental Science & Technology*. – 2013. – V. 47. – P. 10462–10470.
21. Accumulation of atmospheric mercury in forest foliage / J.A. Ericksen, M.S. Gustin, D.E. Schorran, D.W. Johnson, S.E. Lindberg, J.S. Coleman // *Atmospheric Environment*. – 2003. – V. 37. – P. 1613–1622.
22. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake / S. Muhammad, D. Camille, K. Sana, S. Eva, X. Tianian, K.N. Nabeel // *Journal of Hazardous Materials*. – 2017. – V. 325. – P. 36–58.
23. Официальный сайт города Новосибирск. URL: <http://novosibirsk.ru> (дата обращения 10.01.2020).
24. О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2018 году URL: <https://www.nso.ru/page/2624> (дата обращения 11.01.2020).
25. Девятова А.Ю. Тяжелые металлы в депонирующих средах и прогнозная модель переноса примесей от стационарных техногенных источников: на примере г. Новосибирска: автореферат дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2006. – 22 с.
26. Состояние окружающей природной среды в Новосибирской области в 2000 году: доклад департамента природных ресурсов по Сибирскому региону / под ред. Г.В. Селиверстова, В.Ю. Александрова. – Новосибирск, 2001. – 144 с.
27. Зырин Н.Г., Малахов С.Г. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / под ред. д-ра биол. наук Н.Г. Зырина. – М.: Гидрометеиздат: Моск. отд-ние, 1981. – 110 с.

28. Методы дендрохронологии / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов, В.Б. Круглов, В.С. Мазепа, М.М. Наурзбаев, Р.М. Хантемиров. – Красноярск: КрасГУ, 2000. – 80 с.
29. Ртуть в листьях тополя на урбанизированных территориях Юга Сибири и Дальнего Востока / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, Ю.В. Робертус, Е.Е. Ляпина, Е.М. Турсуналиева, Н.В. Барановская, Н.А. Осипова // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22. – № 12. – С. 56–62.
30. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: ИЦ «Академия», 2003. – 400 с.
31. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Справочник. – М.: Экология, 1997. – 576 с.
32. Официальный сайт НЗХК. URL: <http://www.ncsr.ru> (дата обращения 11.01.2020).
33. Артамонова С.Ю. Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 212–223.
34. Радиоактивные элементы (торий, уран) в листьях тополя на урбанизированных территориях и их индикаторная роль / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, А.Ф. Судыко, Н.В. Барановская, Л.А. Дорохова // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 2. – С. 61–68.
35. Все о вегетационном периоде растений: сроки, методы воздействия URL: <https://ferma.expert/rasteniya/vegetacionnyj-period-rastenij/> (дата обращения 24.02.2020).

Получена 23.03.2020 г.

Информация об авторах

Турсуналиева Е.М., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Юсупов Д.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и природопользования, Амурский государственный университет.

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

Ляпина Е.Е., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

UDC 550.42:546.49:581.1:504.7(571.14)

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF MERCURY DISTRIBUTION IN POPLAR LEAVES AND ANNUAL RINGS OF URBANIZED TERRITORIES ON THE EXAMPLE OF NOVOSIBIRSK

Elena M. Tursunaliyeva¹,
tursunaliyeva.em@gmail.com

Dmitry V. Yusupov^{1,2},
yusupovd@mail.ru

Leonid P. Rikhvanov¹,
rikhvanov@tpu.ru

Elena E. Lyapina³,
eeldv@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Amur State University,
21, Ignatievskoe highway, Blagoveshchensk, 675027, Russia.

³ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
10/3, Akademicheskoye avenue, Tomsk, 634055, Russia.

Relevance of the study is determined by the necessity to provide ecological and geochemical assessment of technogenic impact on environment and population health related to urbanization and industrial development resulting in contamination of natural assets with various pollutants.

The aim of the study is to assess mercury loads onto the natural components of an urbanized territory with a well-developed industrial infrastructure by studying leaves and cores of balsam poplar (*P. balsamifera* L.).

Subjects of research are poplar leaves and annual rings. This species of poplar is very common in urban localities of temperate zone. It has a number of features allowing it to capture significant amounts of dust particles and aerosols, namely, relatively large area, wax covering and presence of both abaxial and adaxial stomata; the tree serves as an indicator of community air.

Research methods were sampling of poplar leaves through the period of 2014–2018 and following a 4×4 uniform area grid with a further concentration of 1×1 km near assumed pollution sources; sampling of wood from separate trees at a distance of 0,5 to 1 km from the assumed pollution source; atomic absorption spectrometry of Hg by pyrolysis; statistical processing of data; plotting maps and graphs.

Results. During the field and laboratory works, the authors have obtained the data on geochemical features of Hg distribution through the leaves and annual rings of balsam poplar (*P. balsamifera* L.) in the territory of the city of Novosibirsk. In the northwestern part of the city, a biogeochemical halo of Hg concentrations was identified; it is isometric in form, has an area of approximately 25 km² and is characterized by Hg content of over 100 ng/g. In 2017, a high Hg concentration (1300 ng/g) in poplar leaves was recorded in Kalininsky district, near the industrial site of the Novosibirsk Chemical Concentrates Plant. The studies have shown a clear trend for Hg accumulation in poplar leaves throughout the vegetation period. Maximum average content was found in leaf litter at 2006 ng/g (the range is 1153–2425 ng/g). However, the average Hg content in soil is 294 ng/g, which is significantly lower than the maximum allowable concentration of 2100 ng/g. Distribution of Hg content in poplar leaves depending on leaf position in the tree crown was studied for a tree in the epicenter of biogeochemical halo of Hg concentrations. Upwind the emission source, Hg concentration in the leaves is on average 1,5 times higher than in the wind shadow. During the studies of Hg forms in poplar leaves it was established that Hg is primarily found in free and physically-bound forms, which are the most mobile, prone to increased migration, transformation and methylation under the environmental conditions. Studies of wood cores in the vicinity of the pollution source allowed establishing three periods of Hg emission: the first period, with the maximum emission covers 1967–1985, the second period of 1991–2000 shows a decrease in Hg content; the third period of 2000–2007 is characterized with a relatively low level of Hg concentration.

A large biogeochemical halo of Hg concentrations was mapped in the city of Novosibirsk, a possible emission source was found. Dendro-biogeochemical methods applied in the epicenter of the area with the highest mercury content allowed establishing long-term dynamics in Hg content in the subjects of the study. A period with the highest technogenic impact on the urban environment was established. In residential and industrial zones in the northeast of Novosibirsk, in the territory of a large biogeochemical Hg-related halo, the authors recommend to establish environmental and geochemical monitoring with mercury metering of air samples, studies of soil and plant cover, monitoring of sanitary and hygienic indicators of population's health.

Key words:

Hg, urban territories, Novosibirsk, poplar leaves, annual rings, dendrobiogeochemistry.

The research was carried out within the Program of enhancement of TPU competitiveness among the leading world's research centers. Hg occurrence forms in poplar leaves samples, leaf litter and soil were determined within the project no. AAAA-A17-117013050031-8.

REFERENCES

- Yanin E.P. *Rtut v okruzhayushchey srede promyshlennogo goroda* [Mercury in the environment of an industrial city]. Moscow, IMGRE Publ., 1992. 167 p.
- Anoshin G.A., Malikova I.N., Kovalev S.I. *Rtut v okruzhayushchey srede yuga Zapadnoy Sibiri* [Mercury in the environment of southern Western Siberia]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 1995, vol. 3, no. 1–2, pp. 69–111.
- Pacyna E.G., Pacyna J.M., Steenhuisen F., Wilson S. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000. *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40 (22), pp. 4048–4063.
- Rafaj P., Bertok I., Cofata J., Schopp W. Scenarios of global mercury emissions from anthropogenic sources. *Atmospheric Environment*, 2013, vol. 79, pp. 472–479.
- Petrosyan V.S. Globalnoe zagryaznenie okruzhayushchey sredy rtuty i ee soedineniyami [Global pollution of the environment with mercury and its compounds]. *Rossiya v okruzhayushchem mire: 2006* [Russia in the environment]. Moscow, MNEPU Publ., 2007. pp. 149–163.
- Perechen zagryaznyayushchikh veshchestv, v otnoshenii kotorykh primenayutsya меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды* [The list of pollutants in relation to which the measures of state regulation in the field of environmental protection are applied]. Order of the Government of the Russian Federation dated July 8, 2015 No. 1316-r. Available at: <http://government.ru/media/files/NQsLnpwkA9vtceGj46TRcTSm6yxJXmH.pdf>. (accessed 11 January 2020).
- Pilotnyy projekt po formirovaniyu kadastra rtutnykh zagryazneniy v RF* [A pilot project for the formation of an inventory of mercury pollution in the Russian Federation]. Available at: <https://docplayer.ru/56639052-Rezultaty-vypolneniya-pilotnogo-proekta-po-sozdaniyu-kadastra-rtutnykh-zagryazneniy-okruzhayushchey-sredy-v-rossiyskoy-federacii.html> (accessed 20 December 2019).
- Abhijith K.V., Prashant K., Gallagher J., McNabola A. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments. *Atmospheric Environment*, 2017, vol. 162, pp. 71–86.
- Bushey J., Nallana A., Montesdeoca M., Driscoll C. Mercury dynamics of a northern hardwood canopy. *Atmospheric Environment*, 2008, vol. 42, pp. 6905–6914.
- Zvolinskiy V.P., Andrianov V.A., Ermakova L.I., Bulatkina E.G. The process of mercury contamination of tree crowns and assessment of its seasonal accumulation in relatively clean and urban areas. *Izvestiya Nizhnevolskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie*, 2015, no. 3 (39), pp. 26–29. In Rus.
- Lindberg S., Hanson P., Meyers T., Kim K. Air surface exchange of mercury vapor over forests —the need for a reassessment of continental biogenic emissions. *Atmospheric Environment*, 1998, vol. 32 (5), pp. 895–908.
- Hanson P., Lindberg S., Tabberer T., Owens J., Kim K. Foliar exchange of mercury-vapor – evidence for a compensation point. *Water, Air, Soil Pollutions*, 1995, vol. 80 (1–4), pp. 373–382.
- Siwik E.I.H., Campbell L.M., Mierle G. Fine-scale mercury trends in temperate deciduous tree leaves from Ontario, Canada. *Science of the Total Environment*, 2009, vol. 407, pp. 6275–6279.
- Vetchinnikova L.V., Kuznetsova T.Y., Titov A. F. Patterns of heavy metal accumulation in leaves of trees in urban areas in the north. *Karelskiy nauchnyy centr Rossiyskoy akademii nauk*, 2013, no. 3, pp. 68–73. In Rus.
- Pac A.Ch., Sosnovskaya N.E. Osobennosti akumulatsii pyli i tyazhelykh metallov drevesnymi rasteniyami v tekhnogennykh usloviyakh (na primere g. Grodno) [Features of accumulation of dust and heavy metals by woody plants in technogenic conditions (for example, Grodno)]. *Prirodopolzovanie: sostoyanie i perspektivy razvitiya. Materialy konferentsii molodykh uchenykh* [Nature management: state and prospects of development. Materials of Conference of young scientists]. Minsk, 26–27 March 2014. pp. 71–75.
- Austraya A.L., Yungc L., Ambrosib J.P., Girardcloc O., Kellerb C., Angelettib B., Dron J., Chamareta P., Chalotc M. Evaluation of historical atmospheric pollution in an industrial area by dendrochemical approaches. *Chemosphere*, 2019, vol. 220, pp. 116–126.
- Tomas N., Martin S., James B.S., Jan R., Maria H., Jakub H. The history of mercury pollution near the Spolana chlor-alkali plant (Neratovice, Czech Republic) as recorded by Scots pine tree rings and other bioindicators. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 586, pp. 1182–1192.
- Getko N.V. Ustoychivost introdutsirovannykh rasteniy k gazoobraznym soedineniyam sery [Resistance of introduced plants to sulfur gas compounds]. *Optimizatsiya okruzhayushchey sredy sredstvami ozeleneniya (Promyshlennye tsentry Belorussii)* [Optimization of the environment by means of landscaping (Industrial centers of Belarus)]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1985. pp. 60–68.
- Assad M., Parelle J., Cazaux D., Gimbert F., Chalot M., Tatin-Froux F. Mercury uptake into poplar leaves. *Chemosphere*, 2016, no. 146, pp. 1–7.
- Laacouri A., Nater E.A., Kolka R.K., Distribution and uptake dynamics of mercury in leaves of common deciduous tree species in Minnesota, U.S.A. *Environmental Science & Technology*, 2013, vol. 47, pp. 10462–10470.
- Ericksen J.A., Gustin M.S., Schorran D.E., Johnson D.W., Lindberg S.E., Coleman J.S. Accumulation of atmospheric mercury in forest foliage. *Atmospheric Environment*, 2003, vol. 37, pp. 1613–1622.
- Muhammad S., Camille D., Sana K., Eva S., Tiantian X., Nabeel K.N. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: a comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, vol. 325, pp. 36–58.
- Ofitsialnyy sayt goroda Novosibirsk* [Official WEB site of the Novosibirsk city]. Available at: <http://novo-sibirsk.ru> (accessed 10 January 2020).
- Sostoyaniye i ob olhrane okruzhayushchey sredy Novosibirskoy oblasti v 2018 godu* [On the state and protection of the environment of the Novosibirsk region in 2018]. Available at: <https://www.nso.ru/page/2624> (accessed 11 January 2020).
- Devyatova A.Yu. *Tyazhelye metally v deponiruyushchikh sredakh i prognoznaya model perenosa primesei ot stacionarnykh tekhnogennykh istochnikov: na primere g. Novosibirsk*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Heavy metals in depositing environments and a predictive model of transport of pollutants from stationary man-caused sources: the example of Novosibirsk. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2006. 22 p.
- Sostoyaniye okruzhayushchey prirodnoy sredy v Novosibirskoy oblasti v 2000 godu: Doklad departamenta prirodnnykh resursov po Sibirskomu regionu* [The state of the environment in the Novosibirsk region in 2000: report of the Department of Natural Resources for the Siberian region]. Eds. G.V. Seliverstova, V.Yu. Alexandrova. Novosibirsk, 2001. 144 p.
- Zyrin N.G., Malahov S.G. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu polevykh i laboratornykh issledovaniy pochv i rasteniy pri kontrole zagryazneniya okruzhayushchey sredy metallami* [Guidelines for conducting field and laboratory studies of soils and plants in the control of environmental pollution by metals]. Ed. by N.G. Zyrin. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1981. 110 p.
- Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Khantemirov R.M. *Metody dendrokronologii* [Methods of dendrochronology]. Krasnoyarsk, KrasGU Publ., 2000. 80 p.
- Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Robertus Yu.V., Lyapina E.E., Tursunaliyeva E.M., Baranovskaya N.V., Osipova N.A. Mercury in poplar leaves in the urbanized areas of Southern Siberia and the Far East. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2018, vol. 22, no. 12, pp. 56–62. In Rus.
- Dobrovolskiy V.V. *Osnovy biogeochemii* [Basics of biogeochemistry]. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 400 p.
- Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov* [Environmental geochemistry of elements]. Moscow, Ekologiya Publ., 1997. 576 p.
- Ofitsialnyy sayt NZKHK* [Official WEB site of NCCP]. Available at: <http://www.nccp.ru> (accessed 11 January 2020).
- Artamonova S.Yu. Uranium and thorium in aerosol fallout of Novosibirsk and its environs (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 212–223. In Rus.
- Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Sudyko A.F., Baranovskaya N.V., Dorokhova L.A. Radioactive elements (thorium, uranium) in poplar leaves in urbanized areas and their indicator role. *Razvedka i ohrana nedr*, 2019, no. 2, pp. 61–68. In Rus.
- Vse o vegetatsionnom periode rasteniy: sroki, metody vozdeystviya* [Everything about the growing season of plants: timing, methods of exposure]. Available at: <https://ferma.expert/rasteniya/vegetatsionnyj-period-rasteniy> (accessed 24 February 2020).

Received: 23 March 2020.

Information about the authors

Elena M. Tursunaliyeva, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitry V. Yusupov, Cand. Sc., associate professor, Amur State University.

Leonid P. Rikhvanov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena E. Lyapina, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 550.8.053; 550.8.056

ЭВОЛЮЦИЯ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ НИЗКОПРОНИЦАЕМОГО ТРЕЩИНОВАТОГО КОЛЛЕКТОРА

Ахмерова Алина Валерьевна¹,
Akhmerova.AV@gazpromneft-ntc.ru

Галлямова Диля Чулпановна¹,
Gallyamova.DCh@gazpromneft-ntc.ru

Мельников Александр Викторович¹,
Melnikov.AVik@gazpromneft-ntc.ru

Харитонцева Полина Анатольевна²,
Kharitontseva@hw.tpu.ru

¹ Научно-Технический Центр «Газпром нефть»,
Россия, 190000, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 75-79, литер Д.

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения сложных неоднородных трещиноватых карбонатных коллекторов, которые являются одним из источников добычи углеводородов в условиях истощающихся ресурсов терригенных коллекторов.

Цель работы – пересмотр концептуальной модели месторождения, поскольку текущая модель не в полной мере описывает фактическое поведение пласта, затрудняет подбор технологических решений для оптимизации разработки месторождения, а также не позволяет дать оценку потенциальной эффективности принятых решений.

Объекты: залежь пласта М1 газоконденсатно-нефтяная, массивного типа, с газовой шапкой, приуроченная к выступу карбонатного фундамента девонского возраста на Арчинском месторождении.

Методы: интегрированный подход к анализу результатов проведенных исследований, аналитические и численные расчеты, систематизация, обобщение, структуризация исходной информации по месторождению, моделирование нескольких концепций, сопоставление с фактическими данными.

Результаты. Авторы представили альтернативный сценарий геологического строения и основных механизмов добычи рассматриваемой залежи, так как текущая модель не описывала фактическое поведение пласта, а результаты специальных исследований свидетельствуют о сложном геологическом строении комплекса, что затрудняло детальный прогноз распространения фильтрационно-емкостных свойств коллектора. Кроме того, разрешающая частота сейсмических методов ограничивает применение полного спектра современных технологий для прогноза продуктивности, латерального распространения трещиноватости и петрофизических характеристик коллектора. Обновленная концептуальная модель предполагает, что коллектор продуктивного пласта Арчинского месторождения представлен породами двух типов: известняками и бокситоподобными породами, по данным описания керна и геофизических исследований. Трещиноватость известняков, обусловленная тектоническим фактором, характеризуется равномерным распределением по разрезу и площади месторождения, и является наиболее влияющим параметром на технологические показатели разработки. Технологический режим эксплуатации некоторых скважин и высокие депрессии приводят к конусообразованию посредством системы трещин, обеспечивающих гидродинамическую связь продуктивных и водонасыщенных интервалов.

Ключевые слова:

Карбонатные трещиноватые коллекторы, трещиноватость, низкопроницаемые коллекторы, концептуальная модель, смачиваемость, обводненность, капиллярное давление, пластовый электрический микросканер, известняки, бокситы, тектоника.

Введение

Почти половина остаточных запасов Компании «Газпром нефть» приходится на карбонатный тип коллектора, при этом текущая доля добычи из карбонатов в общей структуре добычи Компании невелика, значительная часть карбонатного портфеля находится на стадии геологоразведочных работ и в перспективе планируется увеличение добычи из коллекторов этого типа.

Одним из ярких примеров является Арчинское нефтегазоконденсатное месторождение, расположенное в Томской области Российской Федерации. Разрез рассматриваемой залежи состоит из пачки девонского возраста и представлен низко проницаемыми трещиноватыми коллекторами. Залежь массивная, частично текто-

нически экранированная, с газовой шапкой, подстилается по всей площади подошвенной водой [1]. В соответствии с преобладающим типом проницаемости и пористости Арчинское месторождение может быть отнесено ко второму типу по классификации, предложенной Р. Нельсоном [2]. Результаты специальных исследований свидетельствуют о сложном геологическом строении комплекса, что затрудняет детальный прогноз распространения фильтрационно-емкостных свойств коллектора. Кроме того, разрешающая частота сейсмических исследований ограничивает применение полного спектра современных технологий для прогноза продуктивности, латерального распространения трещиноватости и петрофизических характеристик коллектора.

Месторождение введено в разработку в 1999 г. на естественном режиме. В процессе разработки наблюдаются основные признаки, свойственные объектам со значительным влиянием естественной трещиноватости [2]. Так, в процессе строительства каждой горизонтальной скважины встречаются интервалы высоких поглощений бурового раствора, что зачастую не позволяет достигать запланированных длин горизонтальной секции скважин. Низкий процент выноса керна, высокая латеральная неоднородность фильтрационно-емкостных свойств коллектора, выраженная в значительных различиях коэффициента продуктивности для соседних скважин, также подтверждают наличие вторичной пористости. Более 40 % скважин, пробуренных с 2016 г., характеризуются темпом обводнения продукции выше запланированного.

Постановка задачи и описание объекта исследования

Необходимость пересмотра концептуальной модели месторождения обусловлена тем, что текущее представление о геологическом строении и механизмах работы залежи не в полной мере описывает фактическое поведение пласта, что затрудняет подбор технологических решений для оптимизации разработки месторождения, а также не позволяет дать оценку потенциальной эффективности принятых решений.

В рамках предварительного анализа данных по месторождению был выдвинут ряд гипотез, суть которых состоит в предположении зависимости продуктивности скважин от распределения свойств естественной трещиноватости (трещинная ориентация, пористость, проницаемость и интенсивность массообмена с матрицей) и её связи с фациальной неоднородностью коллектора, а также положением и свойствами разломов. Трещины, как естественные, так и механические, являются основными каналами или наоборот барьерами для течения флюида во многих средах. Наличие трещин, которые влияют на течение флюида, характерно для различных типов пористых сред; протяженность трещин изменяется от миллиметров до сотен километров [3].

В работе представлена эволюция концептуальной модели коллектора продуктивного пласта, основанная на комплексном анализе существующих данных, ее численная реализация и направление для оптимизации программы исследовательских работ для месторождений такого типа.

Объектом настоящих исследований являются залежи углеводородов (УВ) в породах комплекса, относящихся к типу массивных, водоплавающих, залегающих в карбонатных отложениях девона, в зоне древнего гипергенеза. Коллекторами являются трещинно-кавернозные известняки, рыхлые продукты гидрохимического выщелачивания глинистых известняков сидерит-кремнистоглинистого состава, вероятно, представляющих стадию перехода известняков в бокситы, трещинные зоны.

По данным описания и фотографий керна известняки в приповерхностной зоне довольно сильно изменены. Изменения главным образом гипергенного

характера с развитием повышенной трещиноватости за счет расширения их объема в результате гидрохимического воздействия вод, обогащенных кислородом в приповерхностной зоне. Это способствовало формированию карста, кавернозности [4]. Большое значение здесь имеют процессы растворения карбонатных пород. На качество коллекторов в зоне гипергенного изменения пород значительное влияние оказывают процессы бокситообразования. По условиям образования бокситы в пределах площади классифицируются как карстовые, латеритные и элювиальные [5]. Анализ результатов интерпретации геофизических исследований скважин (РИГИС), описания и фотографий керна указывает на то, что каменные разности бокситов являются непроницаемыми для флюидов, рыхлые – проницаемы.

Однако до представленной работы комплексный анализ геологии и данных добычи не был проведен и не было установлено влияние бокситов на разработку. В данной статье были рассмотрены несколько концепций и предложен наиболее оптимальный вариант, описывающий текущую геологическую модель, подтверждаемую данными добычи.

Концепция решения

В процессе разработки месторождения недропользователем успешно выполняется программа исследовательских работ. Однако имеющихся на месторождении исследований оказалось недостаточно для снятия неопределенностей, поэтому была составлена матрица гипотез о возможных факторах, влияющих на динамику работы скважин (таблица).

В идеале происходит сбор и диагностика параметров матрицы и трещин на основе скважинной информации. Для каждой скважины рассматриваемого типа (горизонтальная, вертикальная, добывающая, нагнетательная и т. д.) все доступные показатели из перечисленных ниже собираются, анализируются и нормализуются для целей сравнения:

- отношение проницаемостей по испытаниям скважин с проницаемостями по керну;
- отчет о поглощениях бурового раствора;
- пики добычи по промыслово-геофизическим исследованиям (ПГИ);
- оценка параметров пласта по гидродинамическим исследованиям скважин (ГДИС);
- индексы продуктивности, нормализованные на длину закачивания скважины (при отсутствии интерпретированных данных испытаний скважины);
- время, прошедшее до прорыва воды;
- накопленная добыча нефти и т. д. [6].

В условиях недостаточности данных было решено проверить ряд гипотез на основе многовариантного моделирования [7]. При решении этой задачи основное назначение гидродинамической модели не прогнозный расчет, а комплексирование и оценка соответствия единой концепции различной геологической информации: структурной, литолого-фациальной, петрофизической моделей, результатов ГДИС и ПГИ, динамики работы скважин.

Таблица. Схематичное представление матрицы гипотез
Table. Schematic representation of the hypothesis matrix

Гипотезы Hypothesis		Подтверждающий вид исследований и их наличие Confirming research type and their availability						
		Опробования/Drillstem test	Пластовые Микросканеры/FMI	Г/ДИС/Well test	ППИ/Production logging tool	Фациальный анализ Facies analysis	Керн/Core	Месторождения-аналоги Reservoirs-analogue
Свойства матрицы Matrix properties	Блоковое строение месторождения Block structure of reservoir	1	3	1	2	3	1	3
	Проводимость разломов Fault conductivity	3	1	1	3	1	1	3
Свойства системы трещин Fracture system properties	Проводимость матрица-трещина Matrix-fracture conductivity	3	3	2	3	3	3	3
	Высота блоков матрицы Height of matrix blocks	3	1	2	3	3	3	3
	Распределение вертикальной проницаемости Vertical permeability assignment	3	1	3	2	1	1	3
	Капиллярные эффекты (пропитка/дренирование) Capillary effects (imbibition/drainage)	3	3	3	3	3	2	1

1 – подтверждено/confirmed; 2 – нет данных/no data;
3 – ограничено/limited

Один из результатов проведенного анализа – необходимость детализации существующей модели и пересмотра результатов интерпретации части исследований, не вписывающихся в общую концепцию и противоречащих фактической истории разработки месторождения.

Анализ исходных данных и моделирование

Для определения зависимости динамики работы от геологических и технологических условий произведена кластеризация скважин. Скважины с разным типом заканчивания рассматривались отдельно.

Горизонтальные скважины по характеру обводненности продукции разделены на две основные группы:

- 1) скважины со стартовой обводненностью менее 20 % и плавным ростом обводнения продукции в дальнейшем;
- 2) скважины с начальной обводненностью более 20 % и дальнейшим ростом обводненности.

Зависимостей стартовой обводненности скважин от нефтенасыщенных толщин, изменения структур-

ных отметок или суммарной длины интервалов поглощения не выявлено. Как и предполагалось, для горизонтальных скважин получена прямая зависимость величины начальной обводненности от расстояния до уровня водонефтяного контакта (ВНК) с коэффициентом корреляции 0,7 (рис. 1, а).

Среди вертикальных скважин выделены три группы по характеру динамики обводненности:

- 1) со стартовой обводненностью менее 10 %;
- 2) с начальной обводненностью более 60 %;
- 3) с постоянным уровнем обводненности в течение всего времени работы.

Закономерности в расположении групп по площади месторождения не выявлено. Также не обнаружено зависимости между начальной обводненностью и расстоянием от нижних дыр перфорации до уровня ВНК (рис. 1, б).

В итоге был сделан вывод о том, что обводнение скважин преимущественно происходит по трещинам, обеспечивающим гидродинамическую связь между продуктивными интервалами и подстилающей водой. Горизонтальные скважины пересекают значительно большее число трещин, чем вертикальные, что и объясняет хорошую зависимость динамики обводнения от расстояния до ВНК именно для скважин с горизонтальным типом заканчивания.

Комплексный анализ исходных данных (интерпретация пластовых микроимиджеров FMI, модульного динамического испытателя пластов MDT, VISO, ГДИС, керн) (рис. 2) позволяет сделать предположения о распределении вертикальной проницаемости, свойствах разломов и строении коллектора. Исследования показали наличие большого количества равномерно распределенных по стволу скважины трещин, однако апертуры трещин по разрезу значительно разнятся. Чаще всего апертура определяется по данным микроимиджеров. Теоретическая минимальная апертура, которая может быть обнаружена инструментом (в различных условиях), оценивается на основе комбинации: контраста удельного сопротивления трещины и фона; превышения размера пика проводимости обнаруженного выше уровня шума и изменения размера пика из-за отклонения зонда от стенки скважины. Наиболее значимое влияние на минимальную определяемую апертуру имеет проводимость жидкости, заполняющей трещину [8, 9].

Стоит отметить, что по результатам исследований также выделяются интервалы с отсутствием трещин. При сопоставлении VISO и FMI установлено, что верхняя часть разреза характеризуется более высокими значениями трещинной и кавернозной пористости.

Указанные выше факторы позволяют сделать следующие предположения о характере вертикальной проницаемости:

- 1) чередование проницаемых и непроницаемых слоев;
- 2) рассматриваемый пласт можно представить двумя характерными интервалами, при этом проницаемость прикровельной части значительно выше;
- 3) наблюдается вертикальная анизотропия, обусловленная неоднородным строением системы трещин (различные плотности и апертуры трещин).

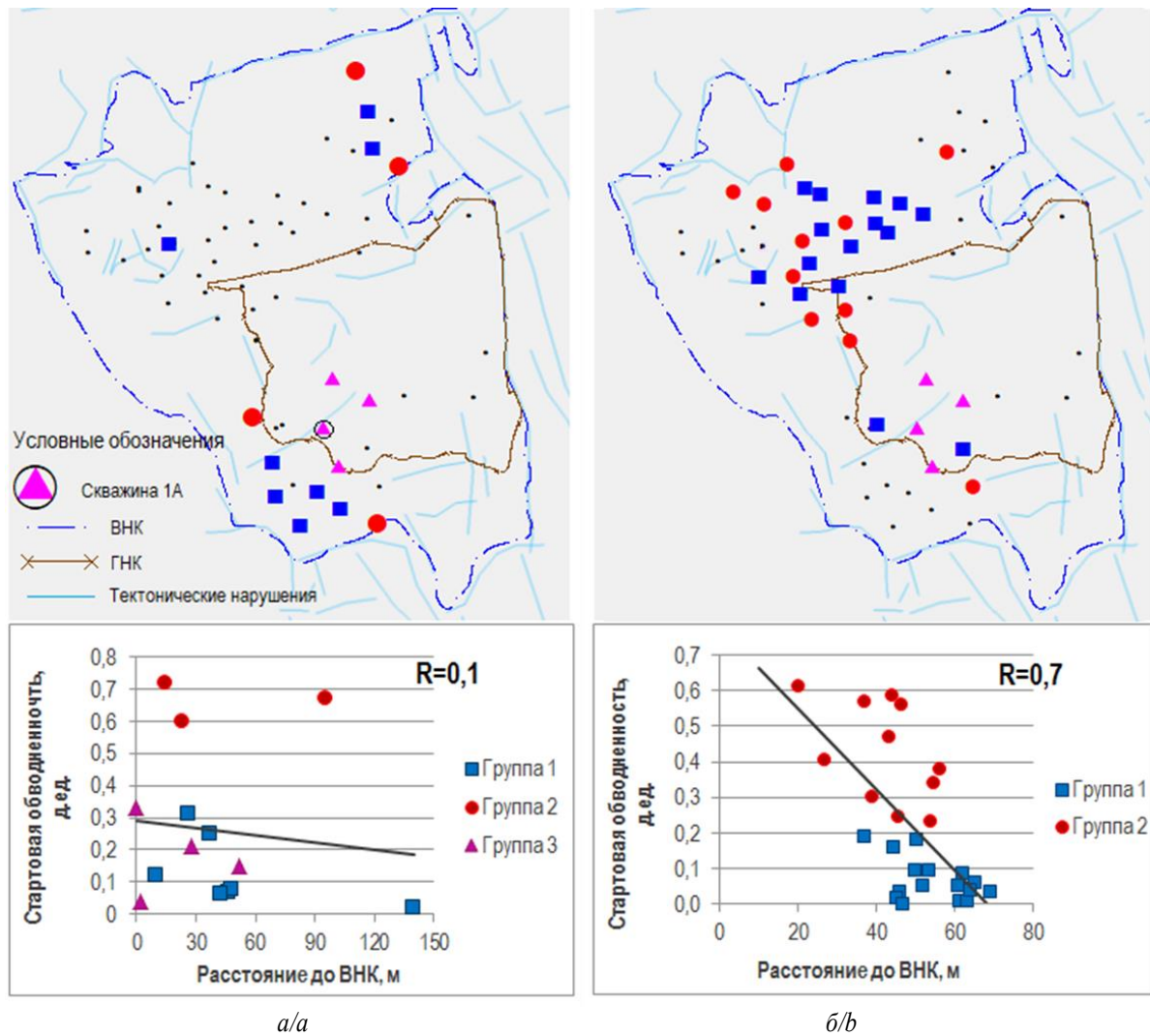


Рис. 1. Кластеризация скважин: а) вертикальные скважины, б) горизонтальные скважины
 Fig. 1. Well clustering: a) vertical wells, b) horizontal wells

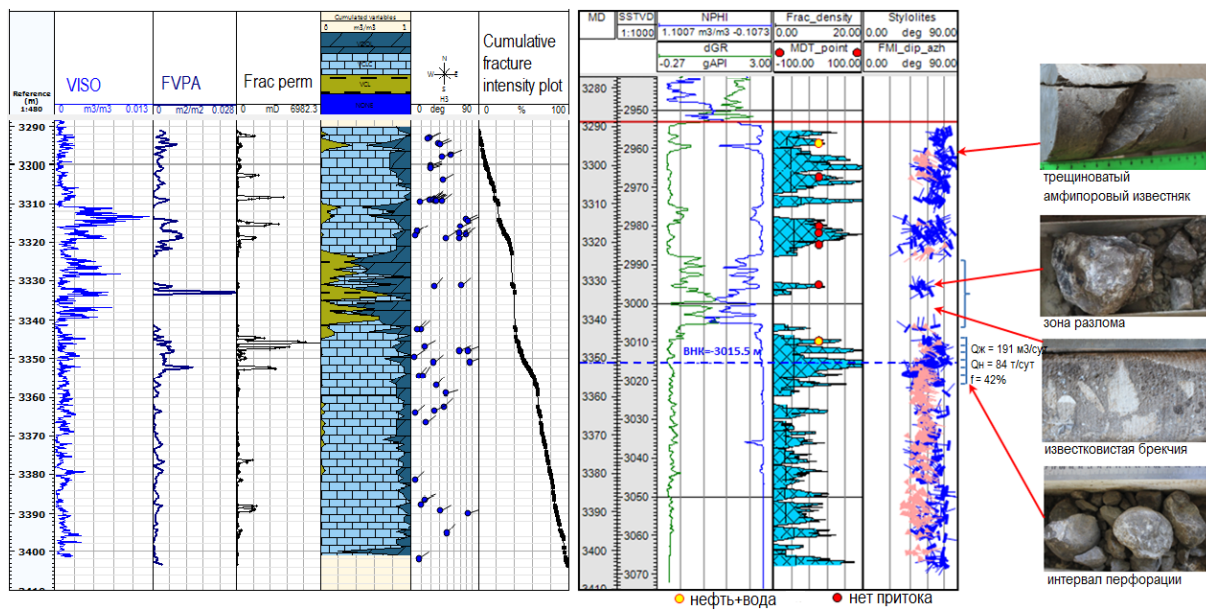


Рис. 2. Комплексный анализ данных на примере скважины 1А
 Fig. 2. Comprehensive data analysis on the example of well 1A

Скважина 1А пересекает субширотный разлом (рис. 1), в котором по данным FMI зафиксировано только две частично проводящие трещины. По описанию керна разломная зона представлена известняковыми брекчиями с матриксом заполнения карстовых полостей (бокситоносный латерит), что соответствует породам коры выветривания. Остальная часть разреза представлена органогенно-обломочным трещиноватым известняком. Принимая во внимание результаты интерпретации ГДИС, которые показывают наличие непроницаемых границ по площади Арчинского месторождения, и данные эксплуатации скважин, можно предположить, что в районе субширотных разломов наблюдается ухудшение коллекторских свойств пласта, а сами разломы являются частично проводящими [10]. Гипотезы о характере вертикальной проницаемости были проверены с помощью гидродинамического моделирования и наилучшее совпадение с фактом получено для гипотезы 3, согласно которой пласт, контролирующий массивную залежь углеводородов, имеет разную степень трещиноватости.

Помимо свойств самой системы трещин, важным параметром, влияющим на разработку трещиноватых коллекторов, является характеристика взаимодействия между матрицей и трещинами. В зависимости от размеров матрицы и проницаемостей системы матрица–трещины, трещинные коллекторы могут разрабатываться несколькими технологиями добычи: разработка без воздействия на пласт, газонапорный режим (режим газовой шапки или растворенного газа с возможным явлением конвекции), заводнение, смешивающееся или несмешивающееся вытеснение при закачке газа и методы увеличения нефтеотдачи [11]. Различные технологии эксплуатации залежи, такие как пропитка, вытеснение водой, гравитационный дренаж, перепропитка или диффузия, также могут влиять на динамику добычу. Важным фактором здесь является смачиваемость коллектора [12]. Рассматриваемые породы Арчинского месторождения в основном являются гидрофобными, либо со смешанной смачиваемостью.

Особенностью для пород смешанного типа является сочетание механизмов «дренирования» и «пропитки» [13]. При высокой водонасыщенности системы трещин, окружающей матрицу, вода не будет проникать в матрицу и будет циркулировать по системе трещин. В диапазоне «принудительной пропитки» проникновение воды в матрицу будет определяться депрессиями, существующими в пласте при разработке. При «самопроизвольной пропитке» обеспечивается выработка гидрофильной части породы. Взаимодействие трещин и матрицы происходит в нефтяной, газовой и водной зоне, которые для трещин имеют резко выраженные границы. В зависимости от характера смачиваемости матрицы определяется степень вытеснения нефти водой («пропитка»). Возможность гравитационного дренирования в системе трещин зависит от высоты блоков матрицы и характерного капиллярного давления в матрице. Блоки матрицы хорошо работают в двух случаях:

- при высоком значении проницаемости и низких капиллярных давлениях;
- при больших геометрических размерах блока (критический размер блоков определяется соотношением капиллярного давления и давления на противоположных гранях блока матрицы).

Если внешний перепад давления не превышает капиллярное давление, то возникает препятствие процессу дренирования и нефть удерживается внутри матрицы [14]. Таким образом, существенную роль при дренировании начинают играть размеры блоков матрицы. В коллекторах с малыми размерами блоков возможны случаи, когда газ или вода обходят нефтенасыщенный блок, при этом нефть не извлекается и полностью остается в матричном блоке. Комбинированные кривые капиллярного давления имеют ветвь, находящуюся в области отрицательных значений капиллярного давления. С физической точки зрения это объясняется тем, что в гидрофильной горной породе всегда существует связанная часть гидрофобизированных пор и для проникновения в нее воды необходимо приложить определенное давление [15].

В связи с отсутствием исследований капиллярного давления для разных режимов на кернах композиционные кривые капиллярного давления строились с использованием данных по месторождениям-аналогам. Критериями применимости месторождения в качестве аналога были приняты степень смачиваемости, а также капиллярное число

$$\sqrt{(k / m)}, \quad (1)$$

где k – проницаемость; m – пористость образца.

Проанализировав форму и точки перегиба капиллярных кривых при остаточной водо- и нефтенасыщенности, из исходной кривой «дренирования» Арчинского месторождения масштабированием построена кривая для «пропитки» и получена комбинированная кривая капиллярного давления. Результаты гидродинамического моделирования показали существенное различие расчетных параметров при использовании композиционной кривой капиллярного давления и учета режимов пропитки и дренирования. Значительно улучшилось совпадение расчетных и фактических данных разработки [16].

Композиционная кривая капиллярного давления позволяет вычислить критическую высоту блока матрицы, необходимую для гравитационного дренирования нефти водой в гидрофобном коллекторе [8]. Из-за отсутствия собственных композиционных кривых капиллярного давления невозможно провести такие вычисления, однако результаты интерпретации микроимиджеров и построение модели трещин позволяют решить так называемую «обратную задачу» и, исходя из размеров блоков матрицы, определить давление, необходимое для полного замещения в них нефти водой. Считается, что для правильного учета большого перепада давления размер ячейки должен быть достаточно маленьким [17]. Среднее значение высоты блоков матрицы по результатам FMI – 0,6 м, минимальное – 0,01 м, максимальное – 5 м. По результатам расчетов получены намного меньшие значения капиллярного

давления, чем по месторождениям-аналогам. Эти результаты показывают высокий приоритет необходимости отбора собственного керна и выполнения дополнительных экспериментов для построения корректной композиционной капиллярной кривой.

На следующем этапе актуализации концептуального представления о строении залежи были пересмотрены значения уровней ВНК и газонефтяного контакта (ГНК), а также проанализированы результаты всех специальных исследований с учетом новой промысловой информации, что привело к обновлению и детализации модели системы трещин. Количество скважин с полным комплексом данных невелико и в основном ими охвачена только южная часть площади месторождения.

По описанию керна выделяются следующие литологические разности:

- известняк серый, буровато-серый, крепкий, с многочисленными разнонаправленными трещинами, залеченными кальцитом и сидеритом, с включениями линз и прослоев аргиллитов, углистого материала;
- кремнисто-глинистые породы; зоны карстовых известняковых брекчий и бокситоносного латерита, которые относятся к породе коры выветривания.

Процент выноса керна изменяется в диапазонах от 10–50 до 90–100 %; керна разрушен в интервалах обеих литологических разностей. Вторичные процессы в виде кавернозности и доломитизации наблюдаются не во всех скважинах – порода пласта была слабо подвержена вторичным-катагенетическим преобразованиям [18].

Таким образом, все скважины можно условно разделить на две группы:

- 1) скважины, где в объеме продуктивного пласта прослой коры выветривания полностью отсутствует либо их количество невелико;
- 2) скважины, в которых наблюдается частое переслаивание известняков и отложений коры выветривания.

Для скважин из каждой группы проведено сопоставление описания керна и результатов интерпретации микроимиджеров. Качество имиджеров оценено как среднее: в интервалах, обозначенных как трещиноватые известняки на кернах, изображение является четким; в брекчиевидных интервалах бокситоносных латеритов изображение часто размыто из-за наличия затежек прибора и обвалов стенок скважины. Выделение трасс трещин в брекчиях затруднено, поэтому на графике интенсивности, накопленной по стволу скважины трещин, данные интервалы нарушают тренд, но в остальных частях вид трасс говорит о равномерном развитии трещин по разрезу. Среднее значение плотности трещин составляет порядка 5–10 трещин/м. Ориентация проводящих трещин хаотична, но преобладает система направления 340–350 градусов СЗ-ЮВ. Для ряда скважин проинтерпретированы трещины, залеченные кальцитом; преобладающее направление – 3-В. Апертура трещин колеблется в диапазоне 100–500 мкм – данный диапазон соответствует значениям макротрещин, характеризующихся

большой протяженностью и системностью. Для прогноза в скважинах интервалов известняка и бокситоносных латеритов использовались результаты интерпретации стандартного комплекса геофизических исследований скважин (ГИС), поскольку конечным продуктом модели фаций является трехмерный объем, представляющий распределение фаций в пласте [19].

Анализ ГИС показал, что литологические типы можно разделить по данным интервального времени пробега продольной волны и динамического модуля Юнга. Эта информация была использована для сопоставления с результатами опробований скважин. Отсутствие ПГИ не позволяет точно определить интервалы притока, но по скважинам с MDT видно, что в интервалах коры выветривания приток отсутствует (рис. 3).

Таким образом, получено следующее концептуальное представление о строении пласта, согласующееся с данными разработки: в процессе денудации и выветривания палеозойского комплекса по зонам разуплотнения породы и проводящей трещиноватости произошло проникновение глинистого материала, породы коры выветривания, формирование карстовых пустот и брекчий, впоследствии образовавших барьеры для потока и ухудшающих вертикальную проницаемость. Концепция была использована при актуализации численной гидродинамической модели (рис. 5). Необходимо отметить, что для расчетов использовалась модель двойной пористости (рис. 4). Модель двойной пористости предполагает, что основные запасы углеводородов сосредоточены в матрице, а приток жидкости к скважинам осуществляется по системе трещин [20], что согласуется с обновленной концептуальной моделью коллектора. Псевдопараметры, особенно псевдоотносительные проницаемости, должны быть присвоены ячейкам матрицы и трещин [21]. Для увеличения прогнозной способности модели необходим поиск технических решений для детального прогноза интервалов ухудшенных фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) в межскважинном пространстве. Что в конечном счете необходимо для расчета коэффициента извлечения нефти (КИН). Максимальный КИН является целью любого проекта разработки месторождения [22].



Рис. 5. Сопоставление адаптации гидродинамической модели до и после уточнения концептуального строения коллектора

Fig. 5. Comparison of model history matching before and after clarification of the conceptual structure of the reservoir

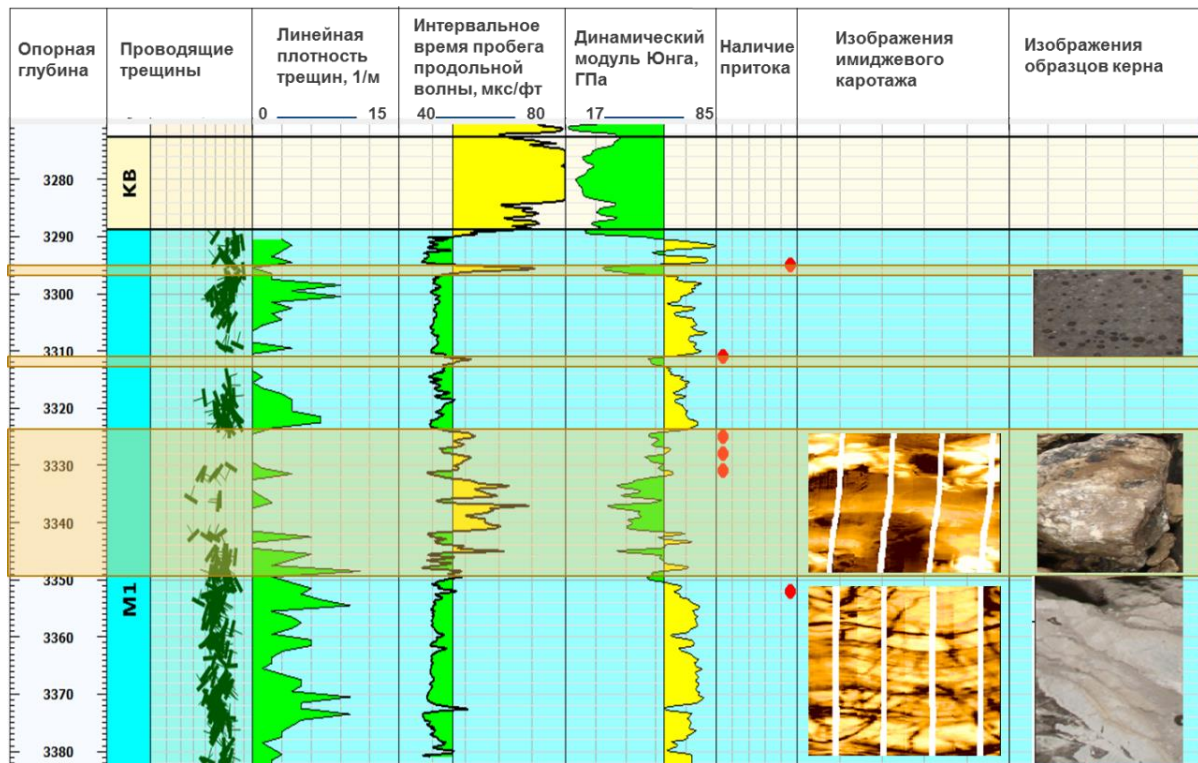


Рис. 3. Сопоставление интервалов притока по модульному динамическому испытателю пластов и литологического состава породы

Fig. 3. Comparison of modular dynamic tester flow intervals and rock lithology

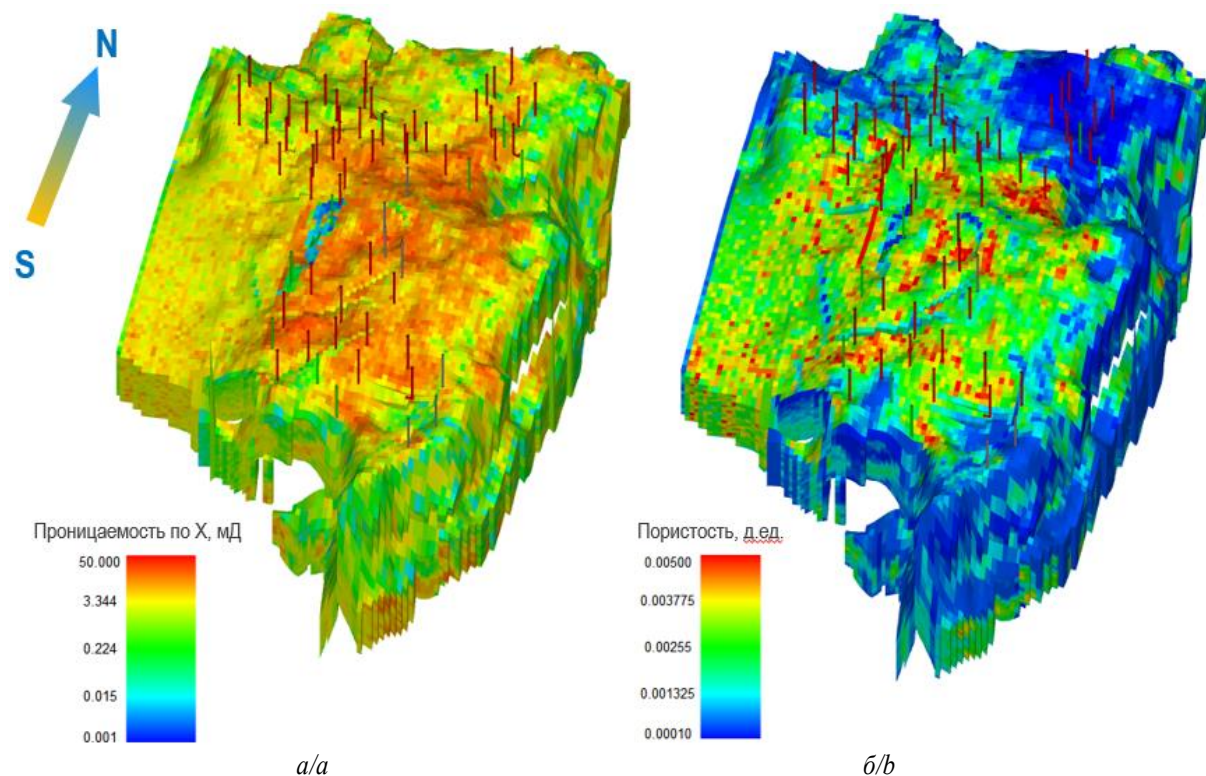


Рис. 4. Параметры системы трещин после адаптации гидродинамической модели: а) проницаемость в направлении X; б) пористость

Fig. 4. Parameters of the fracture system after history matching of the reservoir model: а) permeability in the X direction; б) porosity

Заключение

Интегрированный подход к анализу результатов проведенных исследований, аналитических и численных расчетов, а также информации о работе скважин позволил актуализировать представление о геологическом строении и основных механизмах работы рассматриваемой залежи. Обновленная концептуальная модель предполагает, что коллектор продуктивного пласта Арчинского месторождения представлен породами двух типов: известняками и бокситоподобными породами. Известняки отличаются значительной трещиноватостью, в то время как бокситоподобные породы являются непроницаемыми и выступают барьерами для потока. Трещиноватость, обусловленная тектоническим фактором, характеризуется равномерным распределением по разрезу и площади месторождения и

является параметром, наиболее влияющим на технологические показатели разработки. Технологический режим эксплуатации некоторых скважин и высокие депрессии приводят к конусообразованию по системе трещин, обеспечивающей гидродинамическую связь продуктивных и водонасыщенных интервалов. Расчетные значения высоты блоков матрицы варьируются в интервале от 0,01 до 5 м, что исключает возможность гравитационного дренирования нефти водой. Определены приоритетные направления развития программы исследовательских работ для месторождения. Основные усилия будут направлены на уточнение геометрических характеристик вторичной пустотности, определение взаимодействия между матрицей и системой трещин, уточнение текущих уровней водонефтяного и газонефтяного контактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимова О.О., Белова Е.В. Резервуары углеводородов в эрозивно-тектонических выступах доюрских пород юго-восточной части Западно-Сибирской плиты [Томская область] // Геология нефти и газа. – 2000. – № 3. – С. 17–21.
2. Nelson R.A. Geological analysis of naturally fractured reservoirs. – Houston, TX: Gulf Professional Publishing, 2001. – 332 p.
3. Berre I., Doster F., Keilegavlen E. Flow in fractured porous media: a review of conceptual models and discretization approaches // Transport in Porous Media. – 2018. – № 130. – P. 215–236. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11242-018-1171-6> (дата обращения 08.12.2019).
4. Уилсон Дж.Л. Карбонатные фации в геологической истории / Пер. с англ. – М.: Недра, 1980. – 463 с.
5. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. – М.: Недра, 1976. – 688 с.
6. Bourbiaux B. Fractured reservoir simulation: a challenging and rewarding issue // Oil & Gas Science and Technology – Review French Institute of Petroleum. – 2010. – V. 65. – № 2. – P. 227–238.
7. Косентино Л. Системные подходы к изучению пластов. – М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. – 400 с.
8. Dubourg D., Quesada W.A. ElNour // International Petroleum Technology Conference Paper. – Qatar, 2015. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/IPTC-18355-MS> (дата обращения 08.12.2019).
9. Reiss L.H. The reservoir engineering aspects of fractured formations. – Paris: Editions Technip, 1980. – 108 p.
10. Славкин В.С., Шик Н.С., Сапрыкина А.Ю. К вопросу дизъюнктивно-блокового строения природных резервуаров Западно-Сибирского НГБ // Геология нефти и газа. – 2001. – № 4. – С. 40–46.
11. Lemonnier P., Bourbiaux B. Simulation of naturally fractured reservoirs. State of the art // Oil & Gas Science and Technology – Review French Institute of Petroleum. – 2010. – V. 65. – № 2. – P. 239–262.
12. Leverett M.C. Capillary behavior in porous solids // Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers Journal. – 1941. – V. 142. – P. 152–169.
13. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – М.: Недра, 1986. – 608 с.
14. Ryazanov A.V., Sorbie K.S., van Dijke M.I.J. Structure of residual oil as a function of wettability using pore-network modelling // Advances in Water Resources. – 2014. – № 63. – P. 11–21.
15. Свалов А.М. Анализ проблем построения кривых капиллярного давления при моделировании пластовых процессов // Нефтяное хозяйство – 2015. – № 5. – С. 70–73.
16. Numerical simulation of water–oil flow in naturally fractured reservoirs / H. Kazemi, L.S. Merrill, K.L. Porterfield, P.R. Zeman // SPE Journal. – 1976. – V. 16. – P. 317–326.
17. Ding X.Y. Using unstructured grids for modeling complex discrete fracture network in unconventional reservoir simulation // SPE Conference Paper. – Bahrain, 2019. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-195051-MS> (дата обращения 08.12.2019).
18. Ковешников А.Е., Недолывко Н.М. Вторично-катагенетические преобразования доюрских пород Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 82–86.
19. Gomes J., Parra H., Ghosh D. Quality control of 3D GeoCellular models: examples from UAE carbonate reservoirs // SPE Conference Paper. – Abu Dhabi, 2018. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-193128-MS> (дата обращения 08.12.2019).
20. Korigiv R., Kharitontseva P. Creation of an applicability matrix of modeling methods depending on the complexity of pore space for carbonate fractured reservoirs // EAGE Conference Paper. – Saint Petersburg, 2018. – V. 2018. – P. 1–5. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.201800229> (дата обращения 08.12.2019).
21. An integrated workflow to account for multi-scale fractures in reservoir simulation models: implementation and benefits / B. Bourbiaux, R. Basquet, M. Cacas, J. Daniel // SPE Conference Paper. – Abu Dhabi, 2002. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-78489-MS> (дата обращения 08.12.2019).
22. Benchmarking recovery factors for carbonate reservoirs: key challenges and main findings from middle eastern fields / J. Gomes, R. Narayanan, H. Parra, L. Saputelli, Y. Bansal // SPE Conference Paper. – Abu Dhabi, 2018. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-193094-MS> (дата обращения 08.12.2019).

Поступила: 13.12.2019 г.

Информация об авторах

Ахмерова А.В., главный специалист Научно-Технического Центра «Газпром нефть».

Галлямова Д.Ч., главный специалист Научно-Технического Центра «Газпром нефть».

Мельников А.В., руководитель программ по разработке карбонатных коллекторов Научно-Технического Центра «Газпром нефть».

Харитонцева П.А., эксперт Лаборатории разработки месторождений нефти и газа Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.8.053; 550.8.056

EVOLVING OF A LOW PERMEABILITY FRACTURED RESERVOIR CONCEPTUAL MODEL

Alina V. Akhmerova¹,
Akhmerova.AV@gazpromneft-ntc.ru

Dilia Ch. Gallyamova¹,
Gallyamova.DCh@gazpromneft-ntc.ru

Alexandr V. Melnikov¹,
Melnikov.AVik@gazpromneft-ntc.ru

Polina A. Kharitontseva²,
Kharitontsevapa@hw.tpu.ru

¹ Gazprom Neft Scientific and Technical Center,
75-79 liter D, Moika River embankment, St. Petersburg, 190000, Russia.

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

The relevance of the research is caused by the need to study complex, heterogeneous fractured carbonate reservoirs, which are one of the sources of hydrocarbon production in an age of depleted clastic reservoirs resources.

The main aim of the research is the revision of the conceptual model of the field, since the current model does not fully describe the actual behavior of the formation, complicates the selection of technological solutions for field development and optimizing, and does not allow an assessment of the potential effectiveness of the decisions made.

Object of the research is the M1 reservoir is gas-condensate-oil, massive type, with a gas cap, confined to the ledge of the carbonate basement of the Devonian age at the Archinsky deposit.

Methods: an integrated approach to the analysis of research results, analytical and numerical calculations, systematization, generalization, structuring of initial information on the field, simulation of several concepts, comparison with actual data.

Results. The authors presented an alternative scenario of the geological structure and the main production mechanisms of the reservoir. Since the current model did not describe the actual behavior of the reservoir, the results of special studies indicate a complex geological structure of the complex, which made it difficult to predict the distribution of reservoir properties. Moreover, the resolving frequency of seismic data limits the use of a full range of modern technologies for predicting productivity, lateral propagation of fractures, and petrophysical characteristics of a reservoir. The updated conceptual model assumes that according to the core description and geophysical studies of the Archinsky field, rocks of two types represent it: limestone and bauxite-like rocks. Fracturing of limestones, caused by the tectonic factor, is characterized by a uniform distribution over the section and the area of the field, and is the most influential parameter on the technological indicators of development. The technological mode of some wells and high depressions lead to water conning through a system of fractures that provide a hydrodynamic relation between productive and water-saturated intervals.

Key words:

Fractured carbonate reservoirs, fracturing, low permeable reservoirs, concept model, wettability, water cut, capillary pressure, formation microimager, limestones, bauxites, tectonic.

REFERENCES

1. Abrosimova O.O., Belova E.V. Hydrocarbon reservoirs in erosive-tectonic ledge of pre-Jurassic rocks in south-east part of Western Siberian Plate (Tomsk region). *Geology of oil and gas*, 2000, no. 3, pp. 17–21. In Rus.
2. Nelson R.A. *Geological analysis of naturally fractured reservoirs*. Houston, TX, Gulf Professional Publishing, 2001. 332 p.
3. Berre I., Doster F., Keilegavlen E. Flow in fractured porous media: a review of conceptual models and discretization approaches. *Transport in Porous Media*, 2018, no. 130, pp. 215–236. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11242-018-1171-6> (accessed 08 December 2019).
4. Wilson J.L. *Karbonatnye fatsii v geologicheskoy istorii* [Carbonate facies in geologic history]. Translate from English. Moscow, Nedra Publ., 1980. 463 p.
5. Smirnov V.I. *Geologiya poleznykh iskopaemykh* [Mineral geology]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 688 p.
6. Bourbiaux B. Fractured reservoir simulation: a challenging and rewarding issue. *Oil & Gas Science and Technology – Review French Institute of Petroleum*, 2010, vol. 65, no. 2, pp. 227–238.
7. Cosentino L. *Sistemnye podkhody k izucheniyu plasta* [Integrated reservoir studies]. Moscow, Institute of computer researches, 2007. 400 p.
8. Maeso C., Dubourg I., Quesada D., ElNour W.A. Uncertainties in fracture apertures calculated from electrical borehole images. *International Petroleum Technology Conference Paper*. Qatar, 2015. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/IPTC-18355-MS> (accessed 08 December 2019).
9. Reiss L.H. *The reservoir engineering aspects of fractured formations*. Paris, Editions Technip, 1980. 108 p.
10. Slavkin V.S., Shik N.S., Saprikin A.U. To the question of the disjunctive-block structure of natural reservoirs of the West Siberian NGB. *Geology of oil and gas*, 2001, no. 4, pp. 40–46. In Rus.
11. Lemonnier P., Bourbiaux B. Simulation of naturally fractured reservoirs. State of the art. *Oil & Gas Science and Technology – Review French Institute of Petroleum*, 2010, vol. 65, no. 2, pp. 239–262.
12. Leverett M.C. Capillary behavior in porous solids. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers Journal*, 1941, vol. 142, pp. 152–169.
13. Van Golf-Racht T.D. *Osnovy neftepromislovoy geologii i razrabotki treshchinovatykh kolektorov* [Fundamentals of fractured reservoir engineering]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 608 p.
14. Ryazanov A.V., Sorbie K.S., van Dijke M.I.J. Structure of residual oil as a function of wettability using pore-network modelling. *Advances in Water Resources*, 2014, no. 63, pp. 11–21.

15. Svalov A.M. Analysing problems of capillary curves definition at modelling of formation processes. *Oil industry*, 2015, no. 5, pp. 70–73. In Rus.
16. Kazemi H., Merrill L.S., Porterfield K.L., Zeman P.R., Numerical simulation of water–oil flow in naturally fractured reservoirs. *SPE Journal*, 1976, vol. 16, pp. 317–326.
17. Ding X.Y. Using unstructured grids for modeling complex discrete fracture network in unconventional reservoir simulation. *SPE Conference Paper*. Bahrain, 2019. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-195051-MS> (accessed 08 December 2019).
18. Koveshnikov A.E., Nedolivko N.M. Secondary catagenetic transformations of prejurassic adjournment of the Western-Siberian geosineclise. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 82–86. In Rus.
19. Gomes J., Parra H., Ghosh D. Quality control of 3D GeoCellular models: examples from UAE carbonate reservoirs. *SPE Conference Paper*. Abu Dhabi, 2018. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-193128-MS> (accessed 08 December 2019).
20. Korigiv R., Kharitontseva P. Creation of an applicability matrix of modeling methods depending on the complexity of pore space for carbonate fractured reservoirs. *EAGE Conference Paper*. Saint Petersburg, 2018. Vol. 2018, pp. 1–5. Available at: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.201800229> (accessed 08 December 2019).
21. Bourbiaux B., Basquet R., Cacas M., Daniel J. An integrated workflow to account for multi-scale fractures in reservoir simulation models: implementation and benefits. *SPE Conference Paper*. Abu Dhabi, 2002. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-78489-MS> (accessed 08 December 2019).
22. Gomes J., Narayanan R., Parra H., Saputelli L., Bansal Y. Benchmarking recovery factors for carbonate reservoirs: key challenges and main findings from middle eastern fields. *SPE Conference Paper*. Abu Dhabi, 2018. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-193094-MS> (accessed 08 December 2019).

Received: 13 December 2019.

Information about the authors

Alina V. Akhmerova, chief specialist, Gazprom Neft Scientific and Technical Center.

Dilia Ch. Gallyamova, chief specialist, Gazprom Neft Scientific and Technical Center.

Alexandr V. Melnikov, manager, Gazprom Neft Scientific and Technical Center.

Polina A. Kharitontseva, expert, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.98.042

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЮРСКИХ РАЗРЕЗОВ ОСТАНИНСКОГО И ДВУРЕЧЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ (В СВЯЗИ С НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬЮ ДОЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ)

Алеева Анна Олеговна¹,
rastorguevaAO_90@mail.ru

Исаев Валерий Иванович¹,
isaevvi@tpu.ru

Лобова Галина Анатольевна¹,
lobovaga@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена важностью воспроизводства и расширения ресурсной базы углеводородов Западной Сибири на основе оценки перспектив и освоения горизонта зоны контакта и коренного палеозоя, залежи в которых относятся к трудноизвлекаемым запасам.

Цель: последовательное обоснование критерия прогнозирования и поисков палеозойских залежей углеводородов, основанного на гипотезе аномальности петрофизических характеристик юрских пластов – уникальности «отражения» залежей палеозоя в геофизических параметрах перекрывающего мезозойско-кайнозойского разреза. Эта гипотеза была сформулирована и аргументирована ранее результатами изучения разрезов скважин Герасимовского месторождения с палеозойскими залежами нефти и Крапивинского месторождения с юрскими залежами нефти.

Объекты: геофизические и петрофизические параметры юрских пластов-коллекторов и интервалов баженовской свиты на Останинском нефтегазоконденсатном месторождении, имеющем залежи в доюрском основании, и на Двуреченском нефтяном месторождении только с юрскими залежами нефти.

Методы. Для характеристики юрских пластов-коллекторов выполнены петрофизические расчеты удельного электрического сопротивления, использовались данные индукционного каротажа и каротажа сопротивления по разрезам 28 скважин Останинского и Двуреченского месторождений. Для характеристики петрофизики аргиллитов баженовской свиты сделан качественный и количественный (статистический) анализ показаний методов потенциалов самопроизвольной поляризации, кажущегося сопротивления и гамма-каротажа. Карбонатность пород пластов-коллекторов оценивалась по данным объемного газометрического метода.

Результаты. Установлено, что юрские пласты-коллекторы Останинского месторождения имеют для нефтенасыщенных пластов $УЭС=11...21$ ом*м, для водонасыщенных пластов $УЭС=5...9$ ом*м. Юрские пласты-коллекторы Двуреченского месторождения имеют для нефтенасыщенных пластов $УЭС=6...12$ ом*м, для водонасыщенных пластов $УЭС=2...5$ ом*м. Юрские пласты-коллекторы Останинского месторождения аномально, в 2 раза, более высокоомные, чем юрские пласты Двуреченского месторождения. Общая карбонатность юрских пластов Останинского месторождения составляет 5,4 %, а Двуреченского – 1,1 %. Показано, что на Останинском месторождении вариации показаний метода $ПС= \pm(0,5...2,5)$ мВ, уровень $УЭС=32...42$ ом*м, уровень естественной радиоактивности 36...44 мкР/ч. На Двуреченском месторождении вариации показаний $ПС= \pm(5,0...8,0)$ мВ, уровень $УЭС=95...111$ ом*м, уровень естественной радиоактивности 40...59 мкР/ч. Результаты исследований на Останинском и Двуреченском месторождениях полностью согласуются с ранее высказанной и аргументированной гипотезой аномальности петрофизических характеристик юрского разреза, перекрывающего залежи доюрского НГК.

Ключевые слова:

Палеозойские залежи углеводородов, петрофизическая характеристика юрских пластов-коллекторов и баженовской свиты, уникальное «отражение» залежей палеозоя в геофизических параметрах юрского разреза, критерий прогнозирования и поисков палеозойских залежей углеводородов, Томская область.

Введение

Важным направлением воспроизводства и расширения ресурсной базы углеводородов (УВ) Западной Сибири является оценка перспектив и освоение доюрского нефтегазоносного комплекса [1–4], залежи в котором относятся к трудноизвлекаемой нефти [5, 6].

Критерии «зон разуплотнения» и концепция «главного источника» – основы стратегии и технологии поисков залежей углеводородов в доюрском основании [7]. Атрибутивный анализ сейсмических кубов – наиболее эффективный способ выявления и картирования зон разуплотнения [8].

О концепции «главного источника» высказываются два альтернативных варианта.

По первой концепции палеозойские отложения рассматриваются как самостоятельный нефтеаккумулирующий комплекс с высоким нефтегенерационным потенциалом, приводящий к восходящей миграции УВ-флюидов согласно геодинамическому механизму по каналам, приуроченным к тектоническим разломам, зонам рифтонеиза и коллизии литосферных плит [9]. На самостоятельный очаг нефтеобразования в палеозойских отложениях указывает значительное отличие нафтидов палеозоя и коры выветривания от юрских, являющееся признаком самостоятельного генотипа палеозойской нефти [10]. О восходящей миграции углеводородов судят также и по геохимии

ческим аномалиям ряда элементов, возникающим в отложениях, наиболее индикаторными среди которых являются уран и платиноиды.

Обоснование второй концепции сводится к следующему. Системный анализ геохимических и литолого-петрографических данных, а именно посредством геохимической корреляции состава нефтей и битумоидов нефтематеринских пород, выявляет направленность нисходящей вертикальной межпластовой миграции углеводородов из осадочных пород тюменской свиты в доюрский комплекс. Нисходящая миграция может осуществляться по механизму перетока флюидов по трещинам и кавернам под действием капиллярных сил [11]. Нисходящая миграция УВ может осуществляться по механизму диффузии в свободной парогазовой фазе с опережающим перемещением легких УВ [12]. Нисходящая миграция из более молодых в более древние отложения возможна по ослабленным зонам, образованным геодинамическим режимом растяжения [13].

И далее восходящая и нисходящая миграция углеводородов может быть следствием возникновения локальных диссипативных структур внутри глубинных геофлюидодинамических систем, сформированных повышенной геодинамической напряженностью [14].

Таким образом, многовариантный концептуальный подход к вопросу происхождения («главного источника») залежей нефти и газа в палеозое вызывает

ет существенную неоднозначность рекомендаций относительно стратегии поисков залежей не только в доюрском основании, но и в юрском комплексе.

Вместе с тем, как вследствие возможной восходящей, так и вследствие возможной нисходящей миграции химически агрессивной смеси УВ-флюидов происходят процессы наложенного эпигенеза, в результате которых горные породы испытывают вторичные преобразования, включая карбонатизацию транзитных пластов [15]. Следовательно, интенсивность вторичных процессов, выраженная в аномальности петрофизических характеристик транзитных пластов, может служить индикатором присутствия очагов генерации, путей миграции, терминальных точек (зон нефтесбора), т. е. может служить критерием их обнаружения.

Ранее в [16] в качестве возможного критерия прогнозирования и поисков палеозойских залежей УВ сформулирована гипотеза аномальности петрофизических характеристик транзитных пластов – уникальности «отражения» залежей палеозоя в геофизических параметрах перекрывающего мезозойско-кайнозойского разреза. Эта гипотеза была аргументирована результатами изучения геофизических и петрофизических разрезов 63 поисковых и разведочных скважин, вскрывших палеозойские залежи нефти на Герасимовском месторождении и только юрские залежи нефти на Крапивинском месторождении (рис. 1).

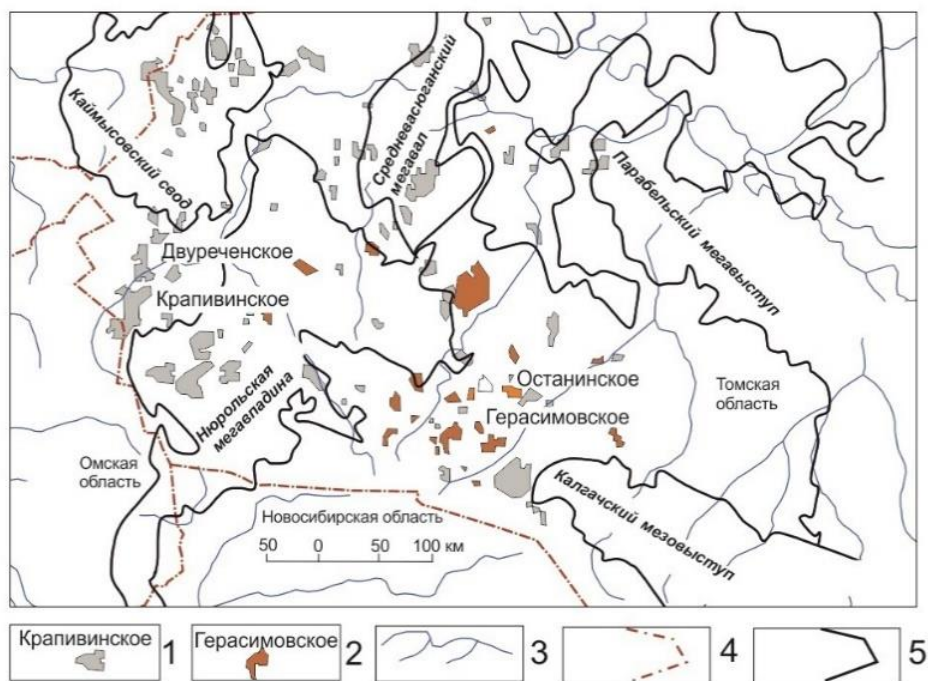


Рис. 1. Схематическая карта размещения месторождений углеводородов юго-запада Томской области: 1 – месторождение углеводородов с залежами в юрско-меловых нефтегазоносных комплексах; 2 – месторождение углеводородов с залежами в доюрском нефтегазоносном комплексе; 3 – гидросеть; 4 – административная граница областей; 5 – граница тектонических элементов I порядка платформенного чехла [16]

Fig. 1. Schematic map of the location of hydrocarbon deposits in the south-west of the Tomsk region: 1 is the hydrocarbon field with deposits in the Jurassic-Cretaceous oil and gas complexes; 2 is the hydrocarbon field with deposits in the pre-Jurassic oil and gas complex; 3 is the hydraulic network; 4 is the administrative border of the areas; 5 is the border of tectonic elements of the first order of the platform cover [16]

Результаты изучения показали, что юрские пласты Герасимовского месторождения, имеющего залежи УВ в доюрском основании, отличаются от юрских пластов Крапивинского месторождения *существенно* более высокими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС). Юрский разрез Герасимовского месторождения характеризуется $УЭС=7...11 \text{ ом*м}$, а юрский разрез Крапивинского месторождения – $УЭС=5...7 \text{ ом*м}$. Расчет интервального времени твердой фазы юрских пластов дал прогноз, что коллекторы Герасимовского месторождения *карбонатизированы*. Кроме того, было отмечено, что в интервале баженовской свиты Герасимовское месторождение отличается от Крапивинского месторождения спокойным характером диаграмм метода потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС).

Здесь важно сослаться на новейшую публикацию томских коллег [17]. На примере Герасимовского месторождения исследована интенсивность *вторичной карбонатизации* юрских песчаных пластов и ее связь с характером насыщения палеозойских образований. Установлено, что интенсивность процессов вторичной карбонатизации является индикатором характера насыщения палеозойских пород. Подчеркнуто, что работа основана на концепции субвертикальной миграции УВ-флюидов, снизу в верх, от глубинного источника с разгрузкой в песчаных коллекторах. Обращено внимание, что для прогнозирования зон расположения залежей в фундаменте можно рационально и эффективно использовать материалы старого фонда скважин.

Для дальнейшего обоснования гипотезы аномального «отражения» залежей палеозоя в геофизических

параметрах перекрывающих юрских отложений, как возможного критерия прогнозирования и поисков палеозойских залежей УВ, проведен анализ геофизических и петрофизических характеристик юрского разреза на Останинском нефтегазоконденсатном месторождении, имеющем залежи в доюрском основании, и на Двуреченском нефтяном месторождении только с юрскими залежами нефти (рис. 1).

Следует отметить, что *по палеозою* [18] Крапивинское и Двуреченское месторождения находятся в Туйско-Барабинской структурно-фациальной зоне (СФЗ), а Герасимовское и Останинское месторождения – в Нюрьской СФЗ. Однако *по келловей и верхней юре* [19] все изучаемые месторождения относятся к одной СФЗ – Пурпейско-Васюганской.

Нефтегеологическая характеристика Останинского нефтегазоконденсатного месторождения

Геология Останинского месторождения представлена образованиями доюрского фундамента и отложениями мезозойско-кайнозойского платформенного чехла. По *тектоническому районированию фундамента* площадь месторождения входит в состав южной части Нижневартовской антиклинорной зоны инверсионного типа, сложенной геосинклинальной карбонатно-глинисто-сланцевой формацией. Особенности тектонического развития территории в позднем палеозое и раннем мезозое обусловили блоковое строение фундамента. По *тектоническому районированию платформенного чехла* Останинская структура IV порядка приурочена к центральной части тектонической структуры II порядка – Пудинскому мезоподнятию (рис. 2, а).

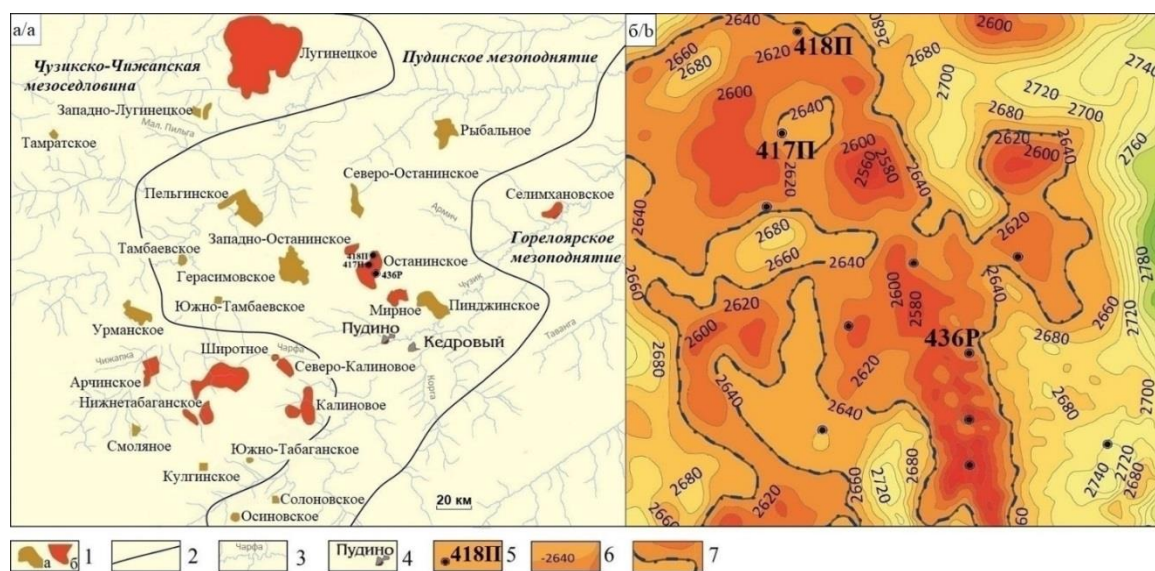


Рис. 2. Обзорная схема территории исследований Останинской группы месторождений углеводородов Томской области (а) и контур Останинского нефтегазоконденсатного месторождения (б). К а: 1 – месторождение УВ (а – нефтяное, б – нефтегазоконденсатное); 2 – контур тектонического элемента II-го порядка платформенного чехла [20]; 3 – речная сеть; 4 – населенный пункт. К б: 5 – скважина и ее номер; 6 – сейсмоизогипс отражающего горизонта F_2 (подошва осадочного чехла); 7 – контур ВНК по пласту М

Fig. 2. Overview of the territory of research of the Ostaninskaya group of hydrocarbon fields of the Tomsk Region (а) and the contour of the Ostaninskoye oil and gas condensate field (b). To а: 1 is the hydrocarbon field (а is the oil, b is the oil and gas condensate); 2 is the contour of a tectonic element of the second order of the platform cover [20]; 3 is the river network; 4 is the settlement. To b: 5 is the well and its number; 6 is the seismic isogypsum of the reflecting horizon F_2 (bottom of the sedimentary cover); 7 is the contour of the oil-water contact through the reservoir M

Нефтегазоносность Останинского месторождения приурочена к известнякам палеозойского фундамента (пласт M_1), отложениям коры выветривания (пласт M), песчаным коллекторам тюменской (пласты $Ю_3$, $Ю_4$) и васюганской (пласты $Ю_1^4$, $Ю_1^3$, $Ю_1^2$, $Ю_1^1$) свит. Нефтеносными являются пласты $Ю_1^1$, M и M_1 , газоносными – $Ю_1^3$, $Ю_1^4$, $Ю_3$, $Ю_4$, M .

Пласты $Ю_1$ – $Ю_4$. Изучаемый разрез пород васюганской и тюменской свит Останинского месторождения сложен породами прибрежно-морских и континентальных фаций. По данным литолого-петрографических исследований коллекторы продуктивных пластов представлены средне-, мелкозернистыми песчаниками, переходящими местами в крупнозернистые алевролиты. Пористость коллекторов меняется от 12,6 до 14,4 %. Проницаемость по пластам меняется в диапазоне – от 1,9 до 9,1 мД.

Продуктивные образования коры выветривания – пласт M . Залежи углеводородов в коре выветривания на Останинском месторождении приурочены в основном к глинисто-кремнистым отложениям, формирование которых происходило за счет разрушения силикатосодержащих пород. К коре выветривания отнесены также брекчии (из базального слоя), образованные при разрушении и местном перемыве нижележащих глинисто-кремнистых пород. Пористость коллекторов меняется от 8,6 до 36,5 %, в среднем составляя 19,5 %. Проницаемость на керне не замерялась.

Продуктивные образования палеозоя – пласт M_1 . По литолого-петрографическому описанию породы фундамента на Останинском месторождении представлены карбонатными породами – известняками. Коллекторы фундамента в основном водонасыщенные. Небольшая залежь УВ выделена по результатам испытаний только в скважине 418П. Пористость меняется от 0,2 до 6,7 %, в среднем составляя 1,7 %.

Геофизическая характеристика юрских пластов Останинского месторождения

Для анализа данных геофизических исследований юрских («транзитных»?) пластов Останинского месторождения были выбраны разрезы скважин с разной продуктивностью (например, скважина 417П с водонасыщенными пластами в юрской и в доюрской частях разреза и скважина 418П, вскрывшая залежи нефти в юрской части разреза и в доюрском основании, рис. 2, б).

Коллекторами в пластах $Ю_1^1$ – $Ю_1^3$ являются песчаники и алевролиты с межзерновой структурой. Объект коры выветривания (пласт M) сложен переслаиванием глинисто-кремнистых пород. Фундамент сложен известняками трещинными и порово-трещинными, чистыми и глинистыми, плотными карбонатными прослоями и глинами. Коллекторами пласта M_1 являются известняки трещинные и порово-трещинные.

Пласт $Ю_1^1$ в разрезах изучаемых скважин выделяется как коллектор: глубокие отрицательные аномалии методов ПС и гамма-каротажа (ГК), повышение показаний нейтронного гамма-каротажа (НГК) и методов каротажа сопротивления (КС), понижение

электропроводности по индукционному каротажу (ИК) (рис. 3). Георгиевская свита характеризуется отрицательной аномалией НГК и положительной ИК. Баженовская свита в изученных разрезах фиксируется классической [21] комплексной геофизической аномалией: высокой радиоактивностью, низкой электропроводностью, отличными от вмещающих пород показателями нейтронного каротажа.

Кривая ПС остается неизменной по выделению пластов-коллекторов – характерными [22] отрицательными аномалиями разной амплитуды.

По геофизическим параметрам кора выветривания значительно отличается от юрского разреза и пласта M_1 . Кора выветривания более радиоактивна в сравнении с юрской частью разреза и пластом M_1 (более 27 мкР/ч против 11...17 мкР/час юрского разреза и 4...9 мкР/ч пласта M_1) и отличается понижением показаний НГК (1,4...1,6 против 1,6...2,0 юрского разреза и 2,4...4,0 пласта M_1).

Пласт M_1 характеризуется пониженной электропроводностью (показания ИК 0...20 мСим/м против 90...120 мСим/м юрского разреза и 30...115 мСим/м коры выветривания) и отличается от вышележащей коры выветривания аномально высокими показателями КС.

Характерной особенностью юрского разреза скважины 418П является карбонатизация пород. Карбонатизация в юрской части разреза проявляется и локально, в виде отдельных слоев (например, интервалы 2487,8...2489,5 и 2520,2...2521,2 м). Карбонатизация развивается преимущественно по коллекторам и уверенно выделяется в показаниях каротажа как типичные [23] плотные песчаники: пониженными значениями ГК и высокими значениями КС и НГК.

Из каротажных диаграмм скважины 418П (рис. 3) видно, что юрский разрез, кора выветривания (M) и пласт M_1 имеют отличительные геофизические свойства, которые указывают на переход от терригенного разреза юрского возраста к карбонатному разрезу палеозоя.

Для характеристики петрофизики юрских пластов на Останинском месторождении использованы данные каротажа 14-ти поисковых и разведочных скважин (рис. 2, б) – материалы Томского филиала ФГУ «ТФГИ по СФО». Судя по результатам стандартного расчета УЭС [24] как нефтенасыщенных пластов, так и водонасыщенных пластов (табл. 1), юрские пласты-коллекторы Останинского месторождения имеют существенно высокие значения: для нефтенасыщенных пластов $УЭС=11...21$ ом*м при среднем значении 14 ом*м, для водонасыщенных пластов $УЭС=5...9$ ом*м при среднем значении 7 ом*м.

Геофизическая характеристика баженовской свиты Останинского месторождения

Для характеристики петрофизики аргиллитов баженовской свиты на Останинском нефтегазоконденсатном месторождении проанализированы разрезы скважин 417П, 418П и скважины 436Р, нефтепродуктивной в доюрской части (рис. 2). Был сделан анализ показаний методов ПС, КС, ГК и НГК (табл. 2).

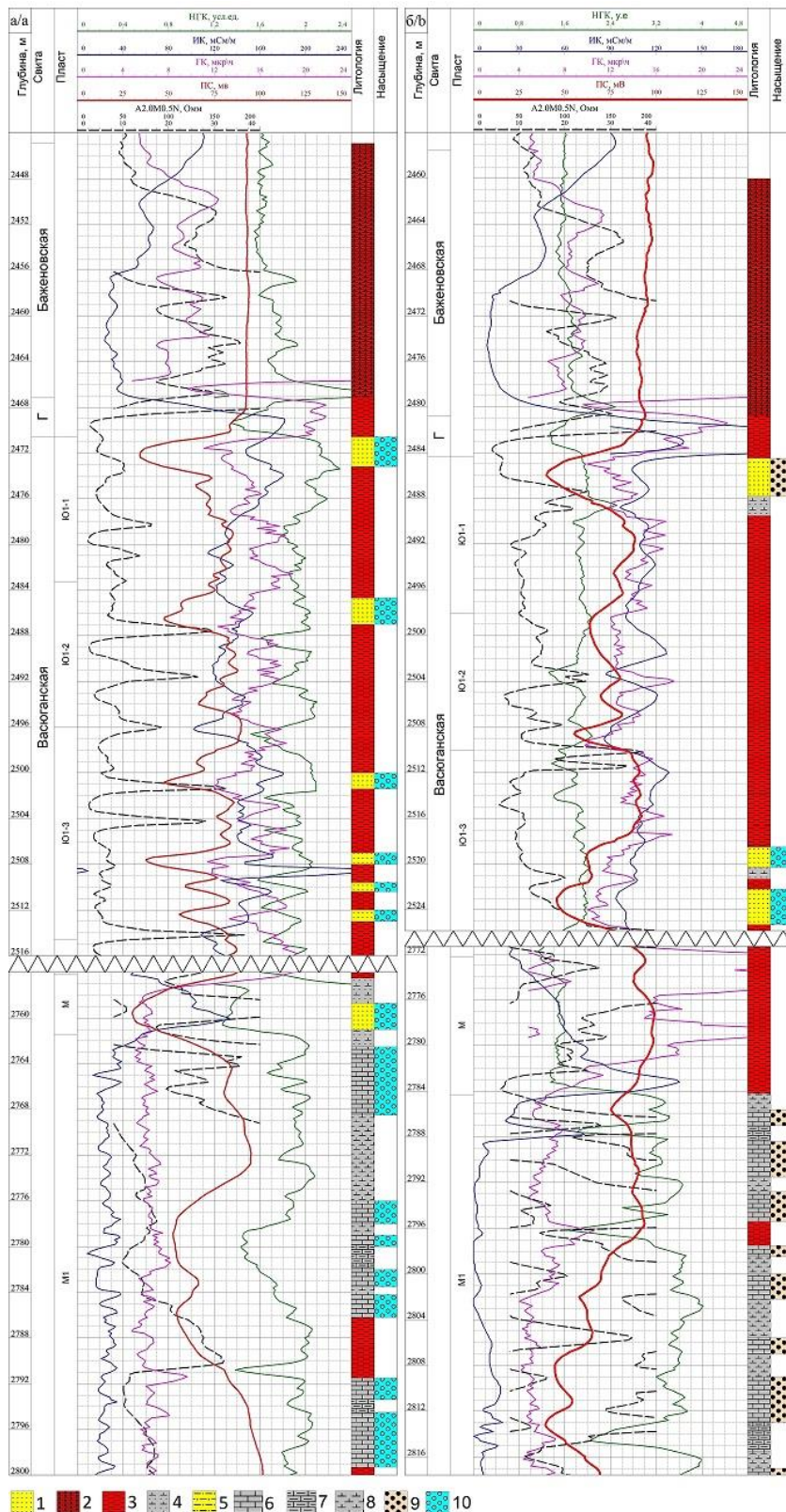


Рис. 3. Останинское месторождение. Геофизическая характеристика разрезов скважин 417П (а) и 418П (б) в интервалах базеновской свиты, георгиевской свиты (Г) и пластов Ю₁¹, Ю₁², Ю₁³, М, М₁; 1 – песчаник; 2 – аргиллит; 3 – глина; 4 – карбонатизированный песчаник; 5 – алевролит; 6 – известняк; 7 – глинистый известняк; 8 – карбонатная порода; 9 – нефтенасыщенный; 10 – водонасыщенный

Fig. 3. Ostaninskoe field. Geophysical characteristics of the sections of wells 417P (a) and 418P (b) in the intervals of the Bazhenov suite, Georgiev suite (G) and formations J₁¹, J₁², J₁³, M, M₁; 1 is the sandstone; 2 is the argillite; 3 is the clay; 4 is the carbonated sandstone; 5 is the siltstone; 6 is the limestone; 7 is the clay limestone; 8 is the carbonate rock; 9 is the oil saturated; 10 is the water-saturated

Таблица 1. Результаты расчета удельного электрического сопротивления ρ_n нефтенасыщенных (ρ_{nn}) и водонасыщенных (ρ_{en}) пластов Останинского месторождения

Table 1. Results of calculation of the electrical resistivity R_t of oil-saturated (R_t) and water-saturated (R_o) layers of the Ostaninskoe field

Пласт Formation	* ρ_{nn} , Ом·м * R_t , om·m	*коэффициент пористости, д. е. * ϕ , d.e.	*коэффициент нефтенасыщенности, д. е. * S_{oil} , d.e.	* ρ_{en} , Ом·м * R_o , om·m
Ю ₁ ¹	21	0,14	0,77	5,4
Ю ₁ ²	12	0,14	0,62	—
Ю ₁ ³	11	0,17	0,70	9,4
Ю ₁ ⁴	12	0,15	0,64	6,3
Ю ₃	15	0,14	0,65	6,3
Ю ₄	14	0,13	0,62	5,9
(диапазон значений), среднее (range of values), average	(11,0–21,0) 14,2	(0,13–0,17) 0,14	(0,62–0,77) 0,67	(5,4–9,4) 6,7

*средневзвешенные значения по 14 скважинам; **для нефтенасыщенных пластов.

*weighted average values for 14 wells; **oil saturated formations.

Таблица 2. Значение геофизических параметров баженовской свиты в разрезах скважин Останинского месторождения

Table 2. Values of geophysical parameters of the Bazhenov suite of well sections of the Ostaninskoe field

Скважина Well	Мощность, м Power, m	Вариации ПС, мВ Variations of SP, mV	КС*, Ом·м KS, om·m	ГК*, мкР/ч GR, mkR/hr	НГК*, усл. ед. NGK, c.u.
417П	19,0	± 0,5	98/40	62/44	2,7/1,7
418П	22,0	± 2,5	99/32	57/40	2,5/1,7
436Р	16,0	± 1,6	138/42	43/36	—

*максимальное значение/средний уровень.

*maximum value/average.

На фоне вмещающих пород баженовская свита выделяется отрицательными аномалиями НГК, положительными аномалиями радиоактивности и электрического сопротивления. Аномальное отображение баженовской свиты на диаграммах КС и ГК связано с высоким содержанием органического вещества – высокоомного адсорбента радиоактивных элементов, с высокой битуминозностью [20], а также с возможной нефтенасыщенностью [25].

Важно отметить практическое *отсутствие вариаций* диаграммы метода ПС в интервале баженовской свиты.

Интересно обратить внимание на изменение УЭС по разрезу баженовской свиты. Как можем наблюдать из диаграмм КС (рис. 3), УЭС в интервале баженовской свиты увеличивается от подошвы к кровле и в основном совпадает с ростом естественной радиоактивности (ГК). Так что верхняя часть свиты является одновременно и более высокоомной, и более радиоактивной, а, следовательно, и более битуминозной, а нижняя часть свиты, соответственно, обеднена органическим веществом.

Нефтегеологическая характеристика Двуреченского нефтяного месторождения

Двуреченское нефтяное месторождение относится к Каймысовскому нефтегазоносному району. Геология месторождения представлена терригенными отложениями мезозойско-кайнозойского платформенного чехла и метаморфизованными, дислоцированными образованиями различного состава доюрского фундамента. По *тектонике платформенного чехла* месторождение приурочено к трем локальным подняти-

ям: Междуреченскому, Лёсмуrowsкому и Западно-Моисеевскому, расположенным в южной части Каймысовского свода – структуры I порядка Западно-Сибирской плиты (рис. 4).

Нефтегазоносность Двуреченского месторождения составляют 4 продуктивных пласта: Ю₁¹, Ю₁², Ю₁^М и Ю₁³. Основным продуктивным пластом и объектом разработки является пласт Ю₁³.

В пласте Ю₁¹ присутствует одна залежь на Двуреченском поднятии, который является верхним трансгрессивным пластом, сложенным прибрежно-морскими фациями мелководного шельфа и представлен серыми мелкозернистыми песчаниками кварц-полевошпатового и полевошпатово-кварцевого состава. Среднее значение пористости составляет 15,8 %, проницаемости – 12 мД.

Пласт Ю₁² представлен песчаниками средне-мелкозернистыми полевошпатово-кварцевыми, иногда граувакковыми с глинистым (каолинит-гидрослюдистым), изредка карбонатным цементом. В целом по пласту пористость составляет 14,9 %, проницаемость – 7 мД.

Пласт Ю₁^М имеет прибрежно-морское происхождение и представлен песчаниками крупно-, средне- и мелкозернистыми, полевошпатово-кварцевыми, граувакковыми с глинисто-карбонатным поровым и пленочно-поровым цементом. По пласту пористость составляет 15,3 %, проницаемость – 8 мД.

Пласт Ю₁³ является основным продуктивным пластом Двуреченского месторождения. Формирование фильтрационно-емкостных свойств коллектора происходило под воздействием седиментационных и постседиментационных процессов. Характерной осо-

бенностью отложений пласта является значительная изменчивость литолого-петрографических и фильтрационно-емкостных свойств, что объясняется различиями в фациальных обстановках формирования данных отложений. Пласт J_1^3 разделен на две пачки: А и Б. Пачка А представляет собой верхнюю высокопроницаемую часть пласта J_1^3 . В литологическом отношении эта часть пласта представлена песчаниками крупно-, средне- и мелкозернистыми полевошпатово-кварцевыми граувакковыми, иногда аркозо-

граувакковыми. Средние значения пористости и проницаемости соответственно составляют 20,6 % и 680 мД. Пачка Б представляет собой нижнюю, менее проницаемую, часть пласта J_1^3 . В литологическом отношении эта часть пласта представлена песчаниками, в основном мелкозернистыми полевошпатово-кварцевыми граувакковыми. Средние значения пористости и проницаемости соответственно составляют 15 % и 7 мД.

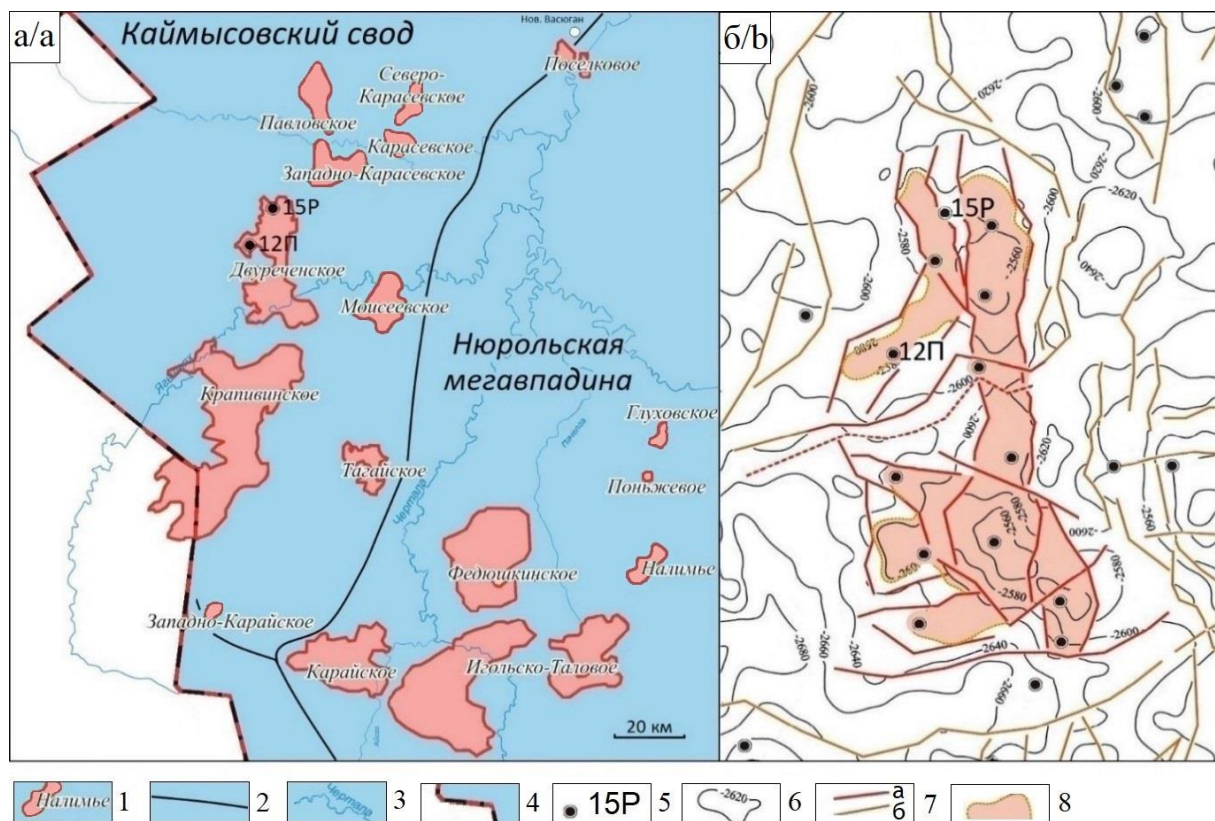


Рис. 4. Обзорная схема территории исследований – группы месторождений Каймысовского нефтегазоносного района Томской области (а) и контур Двуреченского нефтяного месторождения (б). К а: 1 – месторождение; 2 – контур структуры I порядка платформенного чехла [20]; 3 – речная сеть; 4 – административная граница Томской области. К б: 5 – скважина и ее номер; 6 – изогипсы кровли подугольной пачки пласта J_1^3 , м; 7 – разрывное нарушение (а – установленное, б – предполагаемое); 8 – водонефтяной контакт по пласту J_1^3

Fig. 4. Overview of the territory of research – groups of fields of the Kaimysovskoye oil and gas region of the Tomsk Region (a) and the contour of the Dvurechenskoye oil field (b). To a: 1 is the field; 2 is the first-order outline of the platform cover [20]; 3 is the river network; 4 is the administrative border of the Tomsk region. To b: 5 is the well and its number; 6 is the isohypsum of the roof of the subsurface pack of the J_1^3 formation, m; 7 is the discontinuous violation (a is the established, b is the alleged); 8 is the oil-water contact in the J_1^3 reservoir

Геофизическая характеристика юрских пластов Двуреченского месторождения

Для анализа данных геофизических исследований и петрофизики юрских пластов Двуреченского месторождения были выбраны разрезы поисковых и разведочных скважин (рис. 4, б). Исследование заключалось в анализе результатов методов ПС, ГК, КС и плотности тепловых нейтронов (НКТ) по разрезам скважин разной продуктивности (например, скважина 12П с нефтенасыщенными пластами и скважина 15Р с водонасыщенными пластами в юрской части разреза).

Юрский разрез скважин представлен песчаниками, глинами, плотными песчаниками, алевролитами, которые стандартно [24] отражаются в показаниях методов каротажа (рис. 5, а, б). Баженовская свита трансгрессивно, согласно перекрывает аргиллиты георгиевской свиты. При этом георгиевская свита хорошо обособляется большими значениями естественной гамма-активности от залегающей ниже верхневасюганской подсвиты и меньшими значениями – от перекрывающей баженовской свиты.

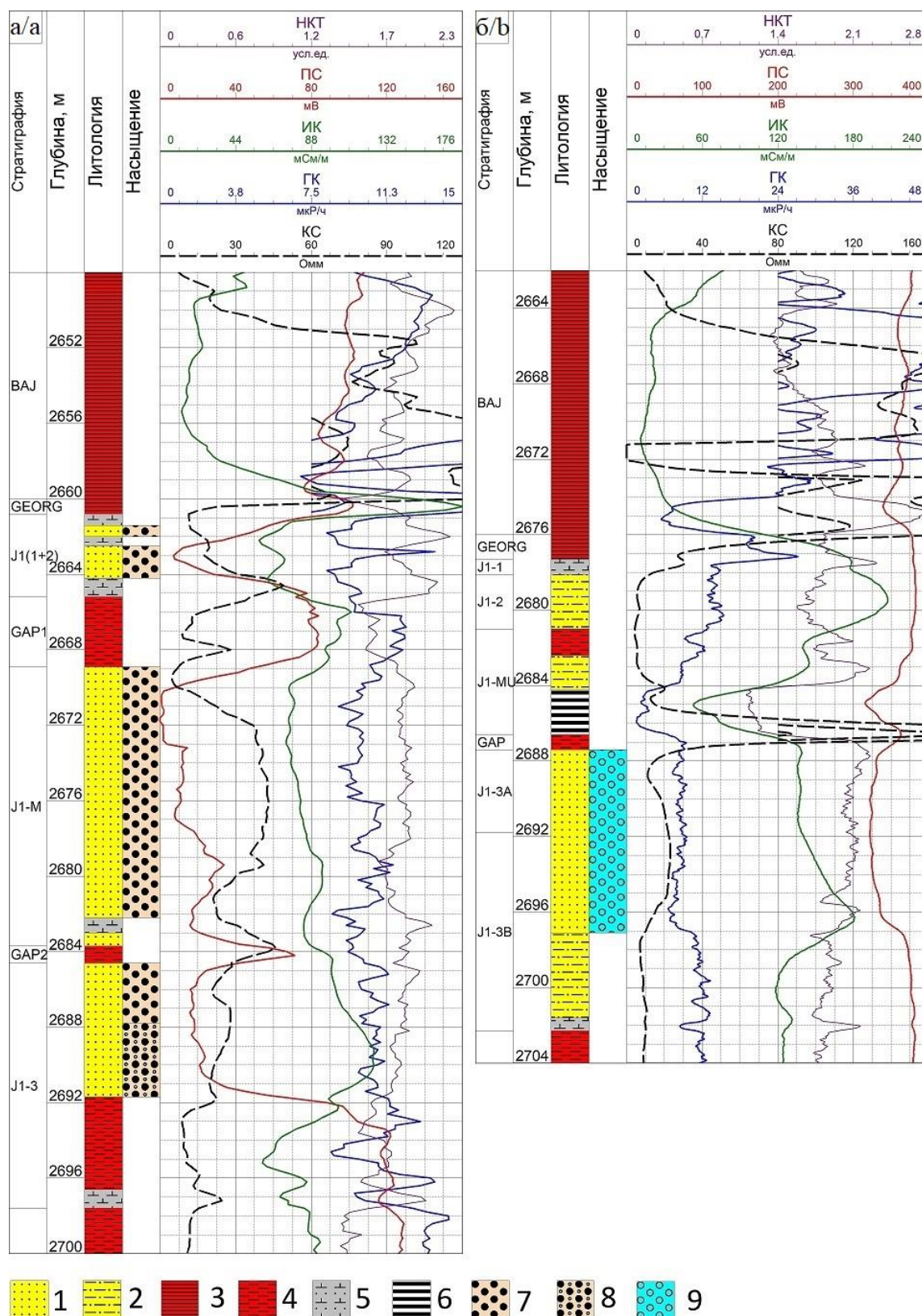


Рис. 5. Двуреченское месторождение. Геофизическая характеристика разрезов скважин 12П (а) и 15П (б) в интервалах базеновской свиты (BAJ) и пластов J_1^1 (J1-1), J_1^2 (J1-2), J_1^M (J1-M), J_1^{MU} (J1-MU), J_1^3 (J1-3), J_1^{3A} (J1-3A), J_1^{3B} (J1-3B): 1 – песчаник; 2 – алеврит; 3 – аргиллит; 4 – глина; 5 – карбонатная порода; 6 – уголь; 7 – нефтенасыщенный; 8 – нефтеводонасыщенный; 9 – водонасыщенный

Fig. 5. Dvurechenskoe field. Geophysical characteristics of the sections of wells 12P (a) and 15P (b) in the intervals of the Bazhenov suite and formations J_1^1 , J_1^2 , J_1^M , J_1^{MU} , J_1^3 , J_1^{3A} , J_1^{3B} : 1 is the sandstone; 2 is the siltstone; 3 is the mudstone; 4 is the clay; 5 is the carbonate rock; 6 is the coal; 7 is the oil saturated; 8 is the oil saturated; 9 is the water saturated

Таблица 3. Результаты расчета удельного электрического сопротивления ρ_n нефтенасыщенных (ρ_{nn}) и водонасыщенных ($\rho_{вн}$) пластов Двуреченского месторождения

Table 3. Results of calculation of the electrical resistivity R_t of oil-saturated (R_t) and water-saturated (R_o) layers of the Dvurechenskoe field

Пласт Formation	* ρ_{nn} , ом·м * R_t , ом·м	*коэффициент пористости, д. е. * ϕ , d. e.	*коэффициент нефтенасыщенности, д. е. * S_{oil} , d. e.	* $\rho_{вн}$, ом·м * R_o , ом·м
Ю ₁ ¹	6	0,16	0,48	1,9
Ю ₁ ²	7	0,15	0,60	3,6
Ю ₁ ^М	7	0,16	0,54	—
Ю ₁ ^{3А}	12	0,20	0,51	4,5
Ю ₁ ^{3Б}	7	0,15	0,45	4,6
(диапазон значений), среднее (range of values), average	(6,0–12,0) 7,8	(0,15–0,20) 0,16	(0,45–0,60) 0,52	(1,9–4,6) 3,6

*средневзвешенные значения по 14 скважинам; **для нефтенасыщенных пластов.

*weighted average values for 14 wells; **oil saturated formations.

Баженовская свита отличается от вмещающих ее пород аномальными показаниями геофизических методов и, в первую очередь, высоким сопротивлением по КС и высокой радиоактивностью по ГК, а также повышенными значениями показаний НКТ.

Для оценки удельного электрического сопротивления юрских пластов-коллекторов Двуреченского месторождения были использованы данные геофизических исследований по разрезу 14 скважин (рис. 4, б) – материалы Томского филиала ФГУ «ТФГИ по СФО». Судя по результатам расчета УЭС как нефтенасыщенных пластов, так и водонасыщенных пластов (табл. 3), юрские пласты-коллекторы Двуреченского месторождения имеют заметно низкие значения: для нефтенасыщенных пластов УЭС=6...12 ом*м при среднем значении 8 ом*м, для водонасыщенных пластов УЭС=2...5 ом*м при среднем значении 3...4 ом*м.

Геофизическая характеристика баженовской свиты Двуреченского месторождения

Для характеристики петрофизики аргиллитов баженовской свиты на Двуреченском нефтяном месторождении проанализированы разрезы скважин 15Р (с водоносными пластами Ю₁^{3А}, Ю₁^{3Б}) и 12П (с нефтеносными пластами Ю₁¹, Ю₁^М). Был сделан качественный и количественный (статистический) анализ показаний методов ПС, КС, ГК и НКТ (табл. 4).

Таблица 4. Значения геофизических параметров баженовской свиты разрезов скважин Двуреченского месторождения

Table 4. Values of geophysical parameters of the Bazenov suite of well sections of the Dvurechenskoe field

Скважина Well	Мощность, м Power, m	Вариации ПС, мВ Variations SP, mV	КС*, ом·м KS, om·m	ГК*, мкР/ч GR, mkR/hr	НКТ*, усл. ед. NKT, c.u.
15Р	13,7	± 5,0	249/111	120/59	2,8/1,8
12П	12,0	± 8,0	149/95	54/40	2,3/1,9

*максимальное значение/средний уровень.

*maximum value/average.

Важно отметить значительные вариации диаграммы метода ПС в интервале баженовской свиты как в продуктивной, так и в непродуктивной скважинах.

Интересно заметить, что баженовская свита в разрезе скважины 12П с нефтепродуктивными юрскими пластами обладает заметно меньшей радиоактивностью и несколько меньшим УЭС, по сравнению с непродуктивной скважиной 15Р, что, возможно, указывает на некоторое обеднение баженовской свиты в районе скважины 12П органическим веществом.

Оценка карбонатности юрских пластов-коллекторов Останинского и Двуреченского месторождений

Определение общей карбонатности пород ($S_{карб.}$) пластов-коллекторов проводилось по поисково-оценочным (417П, 12П) и разведочным (436Р, 15Р) скважинам Останинского и Двуреченского месторождений с помощью объемного газометрического метода. Данный метод основан на определении объема выделившегося углекислого газа при взаимодействии породы с соляной кислотой в приборе Кларка [26].

Из графиков (рис. 6) видно, что юрские разрезы изучаемых скважин 417П и 436Р Останинского месторождения характеризуются более высоким содержанием карбонатных минералов.

Простой расчет общей карбонатности юрских пластов-коллекторов показывает, что среднее значение $S_{карб.}$ юрских пластов Останинского месторождения составляет 5,4 %, а Двуреченского – 1,1 %. Таким образом, в интервалах юрских пластов Останинского месторождения, имеющего залежи в доюрском НГК, средние показания $S_{карб.}$ в 5 раз превышают показания $S_{карб.}$ в интервалах юрских пластов Двуреченского месторождения, не имеющего залежи в доюрском НГК.

Сопоставление и анализ

Напомним, что Останинское нефтегазоконденсатное месторождение представляет тип месторождений юго-востока ЗСП (Томская область), имеющих залежи как в юрском, так и в доюрском НГК. В то время как Двуреченское нефтяное месторождение представляет тип месторождений, имеющих залежи в юрско-меловых НГК, но не имеющих залежи в доюрском НГК.

Проведенные исследования позволили установить и оценить априорно (концептуально) предполагаемые различия петрофизической характеристики юрских пластов Останинского и Двуреченского месторождений, перекрывающих доюрские образования.

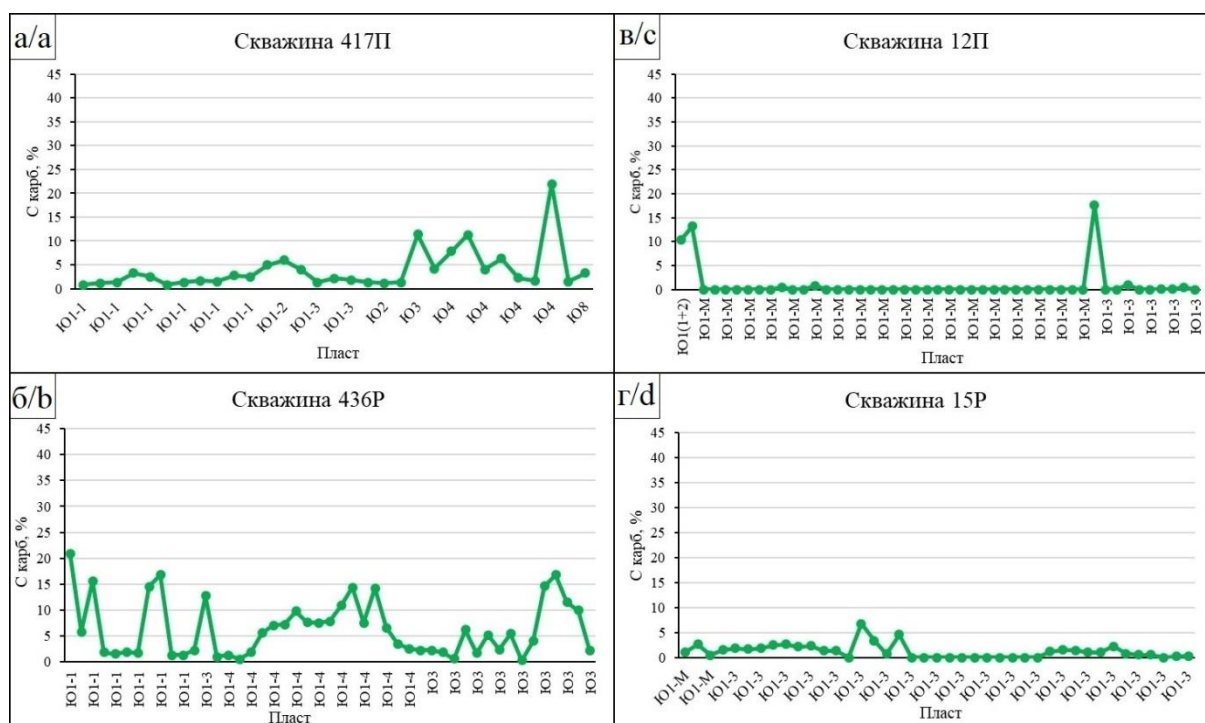


Рис. 6. Карбонатность ($C_{\text{карб}}$) образцов керна скважин 417П (а), 436Р (б) Останинского и 12П (в), 15Р (г) Двуреченского месторождений

Fig. 6. Carbonate (C_{carb}) core samples of wells 417P (a), 436R (b) of Ostaninskoe and 12P (c), 15R (d) of the Dvurechenskoe field

Исследованиями установлено, что юрские пласты-коллекторы Останинского месторождения, по результатам расчета УЭС 14-ти поисково-оценочных и разведочных скважин, имеют для нефтенасыщенных пластов $УЭС=11...21$ ом*м при среднем значении 14 ом*м, для водонасыщенных пластов – $УЭС=5...9$ ом*м при среднем значении 7 ом*м.

По результатам расчета УЭС 14-ти поисково-оценочных и разведочных скважин Двуреченского месторождения установлено, что юрские пласты-коллекторы имеют для нефтенасыщенных пластов $УЭС=6...12$ ом*м при среднем значении 8 ом*м, для водонасыщенных пластов – $УЭС=2...5$ ом*м при среднем значении 3...4 ом*м.

Как видно, юрские пласты-коллекторы Останинского месторождения существенно, аномально, практически в два раза, более высокоомные, чем юрские пласты-коллекторы Двуреченского месторождения.

Вероятно, аномальная высокоомность транзитных юрских пластов Останинского месторождения есть следствие возможной нисходящей(?) / восходящей(?) миграции УВ-флюидов, обеспечивающей или нефтесбор(?) в ловушках доюрского НГК или являющейся элизией(?) углеводородов доюрского НГК, как самостоятельного аккумулирующего-генерирующего комплекса. В результате миграции химически агрессивных УВ флюидов в юрском разрезе происходят процессы наложенного эпигенеза, приводящие к вторичной, наложенной, и, как следствие, аномальной карбонатизации транзитных пластов-коллекторов, а, следовательно, к аномальному увеличению их УЭС.

Аномальность карбонатизации юрских пластов-коллекторов Останинского месторождения ($C_{\text{карб}}$ порядка 5 %) показана выше. Следует заметить, что повышенная карбонатизация юрских пластов Останинского месторождения закономерно приводит к снижению пористости пластов. Так, если обобщенная пористость юрских пластов Двуреченского месторождения составляет 16 % (табл. 3), то пористость юрских пластов Останинского месторождения заметно ниже – 14 % (табл. 1).

Что касается геофизической характеристики баженновской свиты, то она оказывается значимо разной у Останинского и Двуреченского месторождений.

Исследованиями установлено, что на Останинском месторождении геофизические характеристики баженновской свиты следующие: вариации показаний метода $ПС=\pm(0,5...2,5)$ мВ; средний уровень $УЭС=32...42$ ом*м; средний уровень естественной радиоактивности 36...44 мкР/ч. В то время как на Двуреченском месторождении: вариации показаний $ПС=\pm(5,0...8,0)$ мВ; средний уровень $УЭС=95...111$ ом*м; средний уровень естественной радиоактивности 40...59 мкР/ч.

Возможно, что на Останинском месторождении отсутствие вариаций ПС свидетельствует о ее более однородном (выравненном?) составе, а низкий уровень УЭС и естественной радиоактивности говорит о более бедном (обедненном?) содержании органического вещества.

Конечно, замеченные аномальные отличия геофизической характеристики баженновской свиты Останинского нефтегазоконденсатного месторождения, имеющего залежи в доюрском НГК, пока остаются артефактом, не имеющим весомого генетического обоснования.

Есть только предварительные косвенные признаки, допускающие обеднение баженовской свиты органическим веществом по причине того, что, наряду с девонскими доманиками, баженовская свита является источником УВ для палеозойских залежей [27].

Заключение

Результаты проведенных исследований на Останинском и Двуреченском месторождениях дали дополнительные весомые аргументы ранее высказанной и аргументированной [16] гипотезы аномальности петрофизических характеристик юрского разреза, перекрывающего залежи доюрского нефтегазоносного комплекса.

Для дальнейшего обоснования гипотезы уникальности «отражения» залежей палеозоя в геофизических параметрах перекрывающих юрских отложений, как возможного нефтепоискового признака палеозойских залежей, предлагается:

- провести анализ геофизических и петрофизических характеристик юрского разреза на месторож-

дении/площади, принадлежащей Нюрольской структурно-фациальной зоне *по палеозою*, но не имеющей залежей в доюрском нефтегазоносном комплексе;

- детализировать анализ карбонатности транзитных юрских пластов, с выявлением и определением доли *вторичной*, наложенной карбонатизации, с использованием комплекса данных/способов, включая инновационную технологию [17] интерпретации материалов геофизических исследований скважин;
- выполнить *массовый*, представительный анализ геофизических характеристик баженовской свиты, что, возможно, даст дополнительные аргументы той или другой концепции «главного источника» формирования залежей в доюрском нефтегазоносном комплексе.

Благодарим рецензента за предметную и развернутую рецензию, позволяющую лучше понять фундаментальные и прикладные аспекты проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blackburn G. The Palaeozoic of Western Siberia. Tectonic development of Western Siberia during the Palaeozoic // Russian Oil & Gas Technologies. – 2010. – V. 21. – P. 13–23.
2. Liu X., Jin Z., Bai G. Formation and distribution characteristics of Proterozoic–Lower Paleozoic marine giant oil and gas fields worldwide // Petroleum Science. – 2017. – V. 14. – P. 237–260.
3. Белозёров В.Б., Гарсия Бальса А.С. Перспективы поиска залежей нефти в отложениях Девона юго-восточной части Западно-Сибирской плиты // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 128–139.
4. Прогноз нефтегазоносности юрских и палеозойских отложений южных районов Западно-Сибирского бассейна / Я.В. Садыкова, М.А. Фомин, С.В. Рыжкова, Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 114–127.
5. Blackburn G. Petroleum geology of the Pre-Jurassic // Russian Oil & Gas Technologies. – 2012. – V. 28. – P. 58–69.
6. Hard-to-recover reserves of Yugra oil (West Siberia) / V.I. Isaev, S.G. Kuzmenkov, R.Sh. Ayupov, Yu.A. Kuzmin, G.A. Lobova, P.A. Stulov // Геофизический журнал. – 2019. – Т. 41. – № 1. – С. 33–43.
7. 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.
8. Тяпкина А.Н., Тяпкин Ю.К. Синхронная сейсмическая инверсия для выявления перспективных участков в карбонатных породах юго-восточной части Западно-Сибирской платформы // Геофизический журнал. – 2019. – Т. 41. – № 1. – С. 76–94.
9. Гаврилов В.П. Геодинамическая модель нефтегазоносности Западной Сибири // Геология нефти и газа. – 2012. – № 2. – С. 60–64.
10. Peters K., Walters C., Moldowan J. The biomarker guide: biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth history. 2nd ed. – New York: Cambridge University press, 2005. – V. 2. – 698 p.
11. Mechanism of hydrocarbon migration of Paleozoic clastic rocks in Western Section of the Tabei Uplift, Tarim Basin: YM34 silurian accumulations as a case / W. Guan, M. Zha, T. Li, J. Qu, F. Li, L. Deng, Y. Tan, C. Zhang // Proc. of the International Field Exploration and Development Conference. – Singapore, 2018. – P. 782–797.
12. Кузина М.Я., Коржов Ю.В., Исаев В.И. Геохимическое и литологическое обоснование концепции «главного источника» доюрских залежей нефти Краснотеннинского свода // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 32–38.
13. Карпов В.А. Некоторые замечания по проблемам нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции // Недропользование XXI век. – 2017. – № 4. – С. 142–149.
14. Абукова Л.А. Нисходящая миграция подземных вод и углеводородов в осадочных нефтегазоносных бассейнах // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 10. – С. 23–31.
15. Мельник И.А. Выявление вторично преобразованных терригенных коллекторов на основе статистической интерпретации материалов ГИС // Геофизика. – 2013. – № 4. – С. 29–36.
16. Алеева А.О., Исаев В.И. Сравнительная петрофизическая характеристика разрезов Герасимовского и Крапивинского месторождений (в связи с нефтегазоносностью доюрских отложений) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 21–31.
17. Мельник И.А., Недолико Н.М., Зимина С.В. Вторичные карбонаты юрских песчаных отложений как показатели продуктивности палеозоя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 32–38.
18. Исаев Г.Д. Фациальные модели девона Нюрольской зоны и основные критерии районирования палеозоя Западно-Сибирской плиты // Литосфера. – 2011. – № 6. – С. 27–37.
19. Решение 6-го Межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточненных стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири. – Новосибирск, 2003. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2004. – 114 с.
20. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
21. Petersilie V., Komar N., Frenkel S. Methodological approaches to the calculation of reserves of the Bazhenov formation // Conference Proceedings, EAGE/SPE Workshop on Shale Science 2019. – Moscow, Russia, 2019. – V. 2019. – P. 1–5.
22. Hurlimann M.D. Well Logging // Emagres. – 2012. – V. 1. – № 1. – P. 223–232.
23. Yabe S., Fukuchi R., Hamada Y. Simultaneous estimation of in situ porosity and thermal structure from core sample measurements and resistivity log data at Nankai accretionary prism // Earth Planets Space. – 2019. – V. 71. – P. 1–15.
24. Niab D., Dinaldson E.C. Petrophysics. – Oxford: Elsevier, 2004. – 926 p.

25. Jarvie D.M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2 – Shale-oil resource systems // Shale reservoirs – giant resources for the 21st century: AAPG Memoir 97. – Texas, U.S.A., – 2012. – P. 89–119.
26. Digital petrophysics and standard laboratory methods for determining terrigenous container rocks capacitive properties / V.M. Aleksandrov, A.A. Ponomarev, G. Imashev, V.E. Makhatova, A.N. Shakibayeva // Journal of Industrial Pollution Control. – 2017. – V. 33. – № 1. – P. 1048–1051.
27. Галиева М.Ф., Крутенко Д.С. Геолого-геофизические аргументы гипотезы «баженовского источника» доюрских залежей нефти Останинской группы месторождений (Томская область) // Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири: Материалы 2-й Всеросс. науч. конф. молодых ученых и студентов, посв. 85-летию акад. А.Э. Конторовича. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2019. – С. 22–25.

Поступила 17.06.2020 г.

Информация об авторах

Алеева А.О., 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.

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

UDC 553.98.042

COMPARATIVE PETROPHYSICAL CHARACTERISTIC OF THE JURASSIC SECTIONS OF THE OSTANINSKOE AND DVURECHENSKOE FIELDS (IN RELATION TO PETROLEUM POTENTIAL OF PRE-JURASSIC DEPOSITS OF THE TOMSK REGION)

Anna O. Aleeva¹,
rastorguevaAO_90@mail.ru

Valery I. Isaev¹,
isaevvi@tpu.ru

Galina A. Lobova¹,
lobovaga@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the importance of reproduction and expansion of the resource base of hydrocarbons in Western Siberia based on the assessment of prospects and development of the horizon of the contact zone and the Paleozoic, where the deposits belong to hard-to-recover reserves.

The aim of the research is to consistently justify the criteria for forecasting and prospecting Paleozoic hydrocarbon deposits based on the hypothesis of anomalies in the petrophysical characteristics of Jurassic formations – the uniqueness of the «reflection» of Paleozoic deposits in the geophysical parameters of the overlapping Mesozoic-Cenozoic section. This hypothesis was formulated and reasoned earlier by the results of studying the well sections of the Gerasimovskoe field with Paleozoic oil deposits and the Krapivinskoe fields with Jurassic oil deposits.

The objects: geophysical and petrophysical parameters of the Jurassic reservoir layers and intervals of the Bazhenov suite at the Ostaninskoe oil and gas condensate field, which has deposits in the pre-Jurassic base, and at the Dvurechenskoe oil field with only Jurassic oil deposits.

Methods. To characterize the Jurassic reservoirs, petrophysical calculations of electrical resistivity were performed, the data of induction logging and resistivity logging were used along sections of 28 wells of the Ostaninskoe and Dvurechenskoe deposits. To characterize the petrophysics of mudstones of the Bazhenov suite, a qualitative and quantitative (statistical) analysis of the readings of the methods of potentials of spontaneous polarization, apparent resistance, and gamma-ray logging were carried out. The carbonate content of reservoir rocks was estimated using the volumetric gasometric method.

Results. It was established that Jurassic reservoirs of the Ostaninskoe field have resistivity of 11...21 $\Omega \cdot m$ for oil-saturated reservoirs and resistivity of 5...9 $\Omega \cdot m$ for water-saturated reservoirs. Jurassic reservoirs of the Dvurechenskoe field have a resistivity of 6...12 $\Omega \cdot m$ for oil-saturated formations and a resistivity of 2...5 $\Omega \cdot m$ for water-saturated formations. The Jurassic reservoirs of the Ostaninskoe field are abnormally, two times higher, resistive than the Jurassic reservoirs of the Dvurechenskoe field. The total carbonate content of the Jurassic strata of the Ostaninskoe field is 5.4 %, and the Dvurechenskoe field is 1.1 %. It was shown that at the Ostaninskoe field, variations in the readings of the PS method are $\pm(0.5...2.5)$ mV, the resistivity level is 32...42 $\Omega \cdot m$, and the level of natural radioactivity is 36...44 mkr/hr. At the Dvurechenskoe field, variations in the PS readings are $\pm(5.0...8.0)$ mV, the resistivity level is 95...111 $\Omega \cdot m$, the level of natural radioactivity is 40...59 mkr/hr. The results of the research at the Ostaninskoe and Dvurechenskoe fields are fully consistent with the previously expressed and reasoned hypothesis of the anomalous petrophysical characteristics of the Jurassic section, overlapping deposits of the pre-Jurassic oil and gas condensate field.

Key words:

Paleozoic hydrocarbon deposits, petrophysical characteristics of Jurassic reservoirs and the Bazhenov suite, unique «reflection» of the Paleozoic deposits in the geophysical parameters of the Jurassic section, criterion of forecasting and prospecting of hydrocarbon deposits of the Paleozoic, Tomsk region.

The authors express thanks to the reviewer for meaningful and detailed review which allows understanding better the fundamental and applied aspects of the issue.

REFERENCES

- Blackbourn G. The Palaeozoic of Western Siberia. Tectonic development of Western Siberia during the Palaeozoic. *Russian Oil & Gas Technologies*, 2010, vol. 21, pp. 13–23.
- Liu X., Jin Z., Bai G. Formation and distribution characteristics of Proterozoic–Lower Paleozoic marine giant oil and gas fields worldwide. *Petroleum Science*, 2017, vol. 14, pp. 237–260.
- Belozerov V.B., Garcia A.S. Prospects of searching for oil reservoirs in the Devonian deposits of the south-eastern part of the Western-Siberian plate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 128–139. In Rus.
- Sadykova Y.V., Fomin M.A., Ryzhkova S.V., Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Forecast of oil-and-gas content in Jurassic and Paleozoic deposits of West Siberia southern regions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 9, pp. 114–127. In Rus.
- Blackbourn G. Petroleum geology of the Pre-Jurassic. *Russian Oil & Gas Technologies*, 2012, vol. 28, pp. 58–69.
- Isaev V.I., Kuzmenkov S.G., Ayupov R.Sh., Kuzmin Yu.A., Lobova G.A., Stulov P.A. Hard-to-recover reserves of Yugra oil (West Siberia). *Geophysical journal*, 2019, vol. 41, no. 1, pp. 33–43.
- Isaev V.I., Lobova G.A., Korzhov Yu.V., Kuzina M.A., Kudryashova L.K., Sungurova O.G. *Strategiya i osnovy tekhnologii poiskov uglevodorodov v doayurskom osnovanii Zapadnoy Sibiri* [Strategy

- and fundamentals of hydrocarbon search technology in the pre-Jurassic base of Western Siberia]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2014. 112 p.
8. Tiapkina O.M., Tyapkin Yu.K. Simultaneous seismic inversion to identify prospective areas in carbonate rocks of the southeastern part of the West Siberian Platform. *Geophysical journal*, 2019, vol. 41, no. 1, pp. 76–94. In Rus.
9. Gavrilov V.P. The geodynamic model of oil and gas potential in Western Siberia. *Geology of oil and gas*, 2012, no. 2, pp. 60–64. In Rus.
10. Peters K., Walters C., Moldowan J. *The Biomarker Guide: Biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth history*. 2nd ed. New York, Cambridge University press, 2005. Vol. 2, 698 p.
11. Guan W., Zha M., Li T., Qu J., Li F., Deng L., Tan Y., Zhang C. Mechanism of hydrocarbon migration of Paleozoic clastic rocks in Western Section of the Tabei Uplift, Tarim Basin: YM34 silurian accumulations as a case. *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference*. Singapore, 2018. pp. 782–797.
12. Kuzina M.A., Korzhov Yu.V., Isaev V.I. Geochemical and lithological justification of «the main source» concept of pre-Jurassic oil deposits in Krasnoleninsk arch (Tyumen region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2014, vol. 324, no. 1, no. 32–38. In Rus.
13. Karpov V.A. Some comments on the problems of oil and gas production and oil and gas accumulation. *Subsoil XXI Century*, 2017, no. 4, pp. 142–149. In Rus.
14. Abukova L.A. Niskhodyashchaya migratsiya podzemnykh vod i uglevodorodov v osadочnykh neftegazonosnykh basseynakh [Downward migration of groundwater and hydrocarbons in sedimentary oil and gas basins]. *Geology, Geophysics and Development of oil and gas field*, 2008, no. 10, pp. 23–31.
15. Melnik I.A. Identification of secondary converted terrigenous reservoirs based on the statistical interpretation data GIS. *Geofizika*, 2013, no. 4, pp. 29–36. In Rus.
16. Aleeva A.O., Isaev V.I. Comparative petrophysical characteristic of the cuts of the Gerasimovskoe and Krapivinskoe fields (in relation to petroleum potential of pre-Jurassic deposits). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 9, pp. 21–31. In Rus.
17. Melnik I.A., Nedolivko N.M., Zimina S.Z. Secondary carbonates of Jurassic sand deposits as indicators of the Paleozoic productivity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, no. 32–38. In Rus.
18. Isaev G.D. Devonian facial models of Nyurolskaya zone and general criteria of Paleozoic districting of the Western-Siberian plate. *Lithosphere*, 2011, no. 6, pp. 27–37. In Rus.
19. *Reshenie 6-go Mezhdomstvennogo stratigraficheskogo soveshchaniya po rassmotreniyu i prinyatiyu uchnennnykh stratigraficheskikh skhem mezozoyskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri* [Decision of the 6th Interdepartmental Stratigraphic Meeting on the review and adoption of updated stratigraphic schemes of Mesozoic sediments of Western Siberia]. Novosibirsk, 2003. 114 p.
20. Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegazonosnost mezozoysko-kaynozoykskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and oil-and-gas bearing of the Mesozoic-Cenozoic deposits in southeastern of the Western Siberia]. Novosibirsk, SB RAS Publ. house, 2002. 253 p.
21. Petersilie V., Komar N., Frenkel S. Methodological approaches to the calculation of reserves of the Bazhenov formation. *Conference Proceedings, EAGE/SPE Workshop on Shale Science 2019*. Moscow, Russia, 2019. Vol. 2019, pp. 1–5.
22. Hürlimann M.D. Well Logging. *Emagres*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 223–232.
23. Yabe S., Fukuchi R., Hamada Y. Simultaneous estimation of in situ porosity and thermal structure from core sample measurements and resistivity log data at Nankai accretionary prism. *Earth Planets Space*, 2019, vol. 71, pp. 1–15.
24. Niab D., Dinaldson E.C. *Petrophysics*. Oxford, Elsevier, 2004. 926 p.
25. Jarvie D.M. Shale resource systems for oil and gas. P. 2. Shale-oil Resource Systems. *Shale reservoirs – giant resources for the 21st century: AAPG Memoir 97*. Texas, U.S.A, 2012. pp. 89–119.
26. Aleksandrov V.M., Ponomarev A.A., Imashev G., Makhatovala V.E., Shakibayeva A.N. Digital petrophysics and standard laboratory methods for determining terrigenous container rocks capacitive properties. *Journal of Industrial Pollution Control*, 2017, vol. 33, no. 1, pp. 1048–1051.
27. Galieva M.F., Krutenko D.S. *Geologo-geofizicheskie argumenty gipotezy «bazhenovskogo istochnika» doyrskikh zalezhey nefii Ostaninskoy gruppy mestorozhdeniy (Tomskaya oblast)* [Geological and geophysical arguments of the hypothesis of the «Bazhenov suite» of pre-Jurassic oil deposits of the Ostaninsky group of fields (Tomsk region)]. Novosibirsk, IPTS NGU Publ., 2019. pp. 22–25.

Received: 17 June 2020.

Information about the authors

Anna O. Aleeva, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valery I. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Galina A. Lobova, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 504.55.054: 622 (470.6)

РЕЗЕРВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ МАЛОМОЩНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Голик Владимир Иванович^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Дмитрак Юрий Витальевич²,
dmitrak@yandex.ru

Габараев Олег Знаурович²,
gabaraev59@mail.ru

Стадник Денис Анатольевич²,
Sined777@yandex.ru

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет,
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 13.

² Северо-Кавказский государственный технологический университет,
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Космонавта Николаева, 44.

Актуальность исследования. Статья посвящена проблеме совершенствования технологии разработки маломощных рудных тел как резерва увеличения производства металлов. Ее актуальность обусловлена ростом дефицита редких и ценных металлов, большинство из которых локализовано в месторождениях рассматриваемого типа.

Цель эксперимента – установить взаимосвязь между геомеханическими условиями разработки рудных месторождений и параметрами очистных работ.

Методика. Основу исследования составляет долговременный промышленный эксперимент на месторождении Ишимское, осуществляемый с использованием геофизических методов мониторинга.

Результаты. Дана оценка перспектив разработки маломощных месторождений с относительно ограниченными запасами. Приведен результат анализа методов управления напряжениями пород в зависимости от их свойств, и описан механизм перехода пород из ненарушенного состояния в нарушенное. Сформулирована математическая модель феномена самозаклинивания структурных блоков пород, и дана справка о теории разрушения пород как следствия внутреннего деформирования элементарных минеральных частиц в анизотропной среде. Дано условие сохранности массива от разрушения. Описаны преимущества исследования напряженности пород по величинам упругой и остаточной деформаций. Произведена типизация способов управления массивами по критерию сохранности земной поверхности от разрушения. Приведены результаты использования методов мониторинга в ходе полномасштабной разработки месторождения. Определен экономический эффект погашения пустот на основе регулирования напряжений.

Выводы. Скальные месторождения металлических руд обладают свойствами, использование которых при подземной разработке позволяет улучшить технико-экономические показатели за счет рационального управления естественными и наведенными напряжениями в ходе мониторинга горных работ с применением методов рудничной геофизики.

Ключевые слова:

Технология разработки, мощность, рудное тело, эксперимент, геомеханика, условия, параметры, геофизический мониторинг.

Введение

Часть месторождений металлосодержащих руд условно отнесена к группе сложноструктурных. Они отличаются мозаично-глыбовым строением с системами разломов и трещин, что придает рудовмещающим массивам свойства дискретной среды [1–3].

В России запасы таких месторождений преимущественно отработаны на глубину до 1 км. Во всех случаях руды вынимают выборочно, извлекая в благоприятных условиях участки с высоким содержанием металлов.

С середины прошлого века возможности отработки мощных месторождений существенно улучшились за счет заполнения технологических пустот (рис. 1).

Маломощные месторождения с ограниченными запасами отрабатывать по новой технологии в подавляющем большинстве случаев оказывается экономически нецелесообразно. По той же причине ограничены возможности сплошной выемки геометризованных запасов с использованием мощной добычной техники.

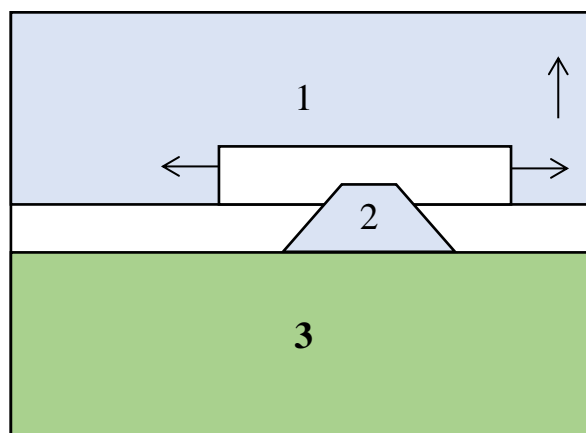


Рис. 1. Система разработки с закладкой: 1 – руда; 2 – горная масса; 3 – искусственный массив

Fig. 1. Stowing development system: 1 – ore; 2 – rock mass; 3 – artificial mass

Актуальность совершенствования технологии разработки маломощных месторождений повышается тем, что в них локализованы редкоземельные, благородные и цветные металлы, потребность в которых неуклонно увеличивается.

Условия устойчивости выработок описаны в работах В. Риттера, А.А. Борисова, С.В. Ветрова, М.М. Протодяконова, В.Д. Слесарева, П.М. Цимбаревича и др.

Скальные массивы состоят из породных блоков, сохраняющих устойчивость при подработке и обнажении при условии естественного самозаклинивания прижатых друг к другу пород блоков.

Поля напряжений и деформаций в массивах пород формируются в результате взаимодействия соответствующих полей под влиянием техногенных и природных факторов. Зоны нагрузки и разгрузки, способствующие концентрации напряжений, формируют механические системы со слабыми звеньями.

Погашение пустот без заполнения закладочным материалом является исторически самым ранним способом добычи руд при разработке рудных тел небольшой величины в крепких и средней крепости породах.

Целью работ рассматриваемого направления является повышение эффективности выемки руд с использованием не в полной мере реализуемых резервов, одним из которых является управление напряжениями при техногенном вмешательстве в недра [4–7].

В процессе разработки месторождения пользуются инструкцией по управлению горным давлением, которые обосновывают ту или иную систему разработки с учетом влияния гидрогеологических, геомеханических и других факторов. Каждое месторождение является уникальным, поэтому инструкции должны быть адаптированы к местным условиям конкретными исследованиями.

Создание в лаборатории физических моделей с учетом всех геолого-структурных факторов является крайне трудозатратным мероприятием, результаты которого сложны в фиксации и обработке. Более доступным является моделирование методом конечных и конечно-дискретных элементов, однако и оно требует специальных возможностей. Для решения частных вопросов горного дела пользуются простыми моделями, условно принимая структурные факторы постоянными.

Такие модели позволяют решать частные горно-технические вопросы, не затрагивая всего многозвенного кластера геомеханического мониторинга процессов сдвижения горных пород.

Методика исследования

Цель достигается использованием комплексного метода исследования, включающего критический анализ существующих концепций, моделирование и эксперимент в промышленном масштабе.

Методической основой исследования является теория самозаклинивания структурных блоков пород, развивающая концепцию свода естественного равновесия М.М. Протодяконова.

Поскольку корректно имитировать нарушенность массива сложно и дорого, применяется модель, в которой строение породных массивов условно принимается одинаковым для сравниваемых вариантов без учета структурных нарушений.

Нагрузка на горные выработки имитируется пресом. Напряжения в элементах модели измеряются датчиками. Такой подход обеспечивает корректность исследования.

Для оценки напряженности пород применен способ Голика–Денисова по соотношению упругой и остаточной деформаций.

Результаты

Образование технологических пустот без закладки способствует росту напряжений и деформаций, что коррелирует с увеличением разубоживания в 1,5–2,0 раза. Методы управления напряжениями пород при отработке маломощных месторождений зависят от свойств вмещающих пород:

- в неустойчивых породах используют крепь;
- при добыче устойчивых руд в недостаточно устойчивых массивах используют магазинированную руду, которая временно стабилизирует напряжения (рис. 2);
- при любых условиях успешно применяют технологии с закладкой твердеющими смесями.

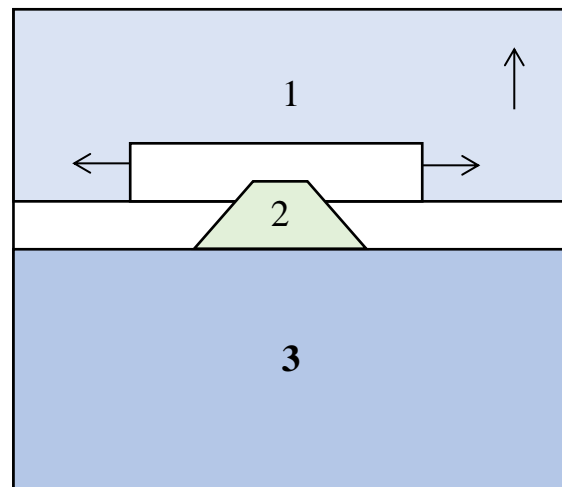


Рис. 2. Система разработки с магазинированием: 1 – руда; 2 – горная масса; 3 – магазинированная горная масса

Fig. 2. Development system with stoping: 1 – ore; 2 – rock mass; 3 – storey rock mass

Оптимальна такая модель управления напряжениями, при которой сохранность массива обеспечивается разделением его на участки, где зона развития напряжений пород не достигает поверхности (рис. 3).

Геодинамикой массива управляют, создавая систему, в которой напряжения не достигают критической величины, а зона разрушения пород не достигает земной поверхности [8–10].

Характер перехода пород из ненарушенного состояния в нарушенное определяется соотношением геометрических параметров выработок, в том числе:

- высот распространения критических напряжений;
- размеров образуемых в массиве выработок;
- объемов создаваемой в пустотах крепи.

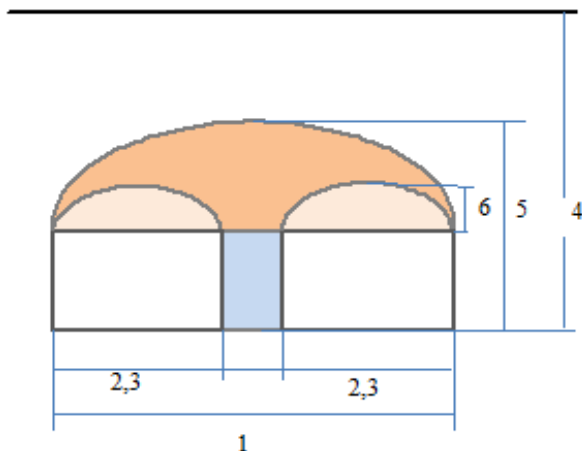


Рис. 3. Схема разделения массива на геомеханически сбалансированные участки: 1 – пролет свода естественного равновесия до разделения; 2 – фактический пролет выработки; 3 – пролет с сохранением плоской кровли; 4 – глубина работ; 5 – высота свода естественного равновесия до разделения; 6 – высота свода после разделения

Fig. 3. Scheme of division of the array into geomechanically balanced sections: 1 – span of the arch of natural equilibrium before separation; 2 – actual span; 3 – span with preservation of a flat roof; 4 – depth of work; 5 – height of the arch of natural equilibrium before separation; 6 – arch height after separation

Параметры предельного свода самозаклинивания структурных блоков пород, предшествующие критическим напряжениям по С.В. Ветрову:

$$\alpha = d_1 \left(\frac{10R'_{сж}}{KHV_c} - 1 \right) \Rightarrow [\sigma]_{крит} < [\sigma]_{р.п}^{ост},$$

где α – полупролет предельного свода самозаклинивания, м; d_1 – вертикальный размер структурного блока, м; $R'_{сж}$ – временное сопротивление горных пород структурного блока сжатию (в направлении веса пород в натуре), МПа; V_c – объемная масса пород, т/м³; H – глубина расположения пят свода, м; K – коэффициент запаса; $[\sigma]_{крит}$ – критические напряжения, МПа; $[\sigma]_{р.п}^{ост}$ – остаточные напряжения руд и пород, МПа.

При прогнозировании влияния пустот на земную поверхность исходят из того, что без учета величины и знака напряжений создаются условия для разрушения массива [11, 12].

Уровень напряжений корректируется изменением характера и скорости высвобождения энергии напряженных пород при опережающей разгрузке напряжений в массиве. При экстремальной нагрузке, согласно кинетической теории прочности, на первой стадии разрушения происходит возбуждение межатомных и межмолекулярных связей и их разрыв под воздействием высвобожденной энергии, а на второй стадии образуются трещины деформации.

Скальные массивы работают в особых условиях. Их несущие элементы работают в режиме непостоянных по величине и знаку деформаций.

При разрушении в запредельной стадии прочность пород уменьшается. На контуре выработки возникает зона нарушенных пород с минимальной прочностью. За ней следует зона ослабленных пород с возрастанием прочности по мере удаления от выработки, переходящая в зону нетронутых пород.

Сохранность массива обеспечивается при минимизации объемов первых двух зон и увеличении доли третьей зоны:

$$\sigma_{сж.м}(t) = k'_t [\sigma_{сж.д} + (\sigma_{сж.м} - \sigma_{сж.д})] e^{-at},$$

где $\sigma_{сж.м}$ – предел мгновенной прочности при одноосном сжатии, МПа; $\sigma_{сж.д}$ – предел длительной прочности при одноосном сжатии, МПа; k'_t – коэффициент тектонической нарушенности; a – параметр аппроксимации; t – время.

При подработке массива по нижнему контакту рудного тела высота разгружаемой от напряжений части массива увеличивается, относительная доля зоны запредельных деформаций сокращается, а релаксационные эффекты характеризуются меньшими деформациями.

Напряженность пород измеряется способом Голика–Денисова по соотношению упругой (ε_y) и остаточной (ε_o) деформаций.

Образцы нагружают ступенями с последующей полной разгрузкой образца на каждой ступени до появления остаточной деформации, и по отношению упругой деформации к остаточной судят о напряженности породы (рис. 4).

$$K_{уд} = (\varepsilon_m - \varepsilon_o) : \varepsilon_o.$$

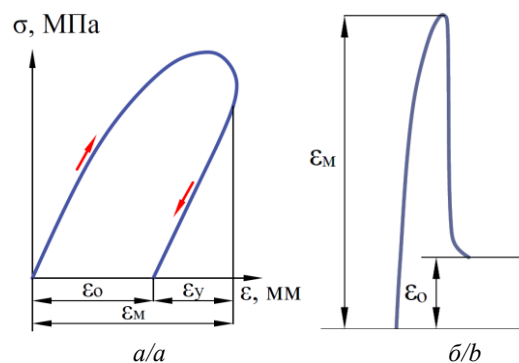


Рис. 4. Параметры деформирования керна: а) график зависимости деформаций от напряжений; б) осциллограмма деформируемости керна при циклическом нагружении

Fig. 4. Parameters of core deformation: а) graph of the strain versus stress; б) oscillogram of core deformability under cyclic loading

Преимущество способа заключается в использовании кернов практически любой длины, в то время как по методике ВНИМИ длина керна больше его диаметра в 2 раза. Коэффициент удароопасности более 70 % свидетельствует о возможности геодинамических явлений [13–15].

Регулирование величины напряжений и несущей способности пород путем разгрузки проходкой выработок в массиве позволяет переводить динамические явления в массиве в статические.

Состояние массивов определяется объемом пустот, объемом выданных на поверхность геоматериалов и

прочностью породной толщи, отделяющей зону повышенных деформаций от земной поверхности.

Критерием эффективности технологии месторождений является сохранность земной поверхности. По этому критерию способы управления массивом типизированы в рамках таблицы.

Таблица. Типизация способов управления массивами

Table. Array management methods type

Состояние массива Array state	Способы управления Control methods	Условия применения Conditions of use
Естественное обрушение Natural collapse	с открытыми пустотами with open voids с изоляцией пустот with isolation of voids с обрушением пород with caving	руды малой и средней ценности ores of small and medium value возможность разрушения земной поверхности possibility of destruction of the earth's surface
Принудительное обрушение Forced collapse	без разгрузки напряжений: without stress relief: с твердеющей закладкой with hardening bookmark; комбинированные/combined; с разгрузкой напряжений: with stress relief: надработка/overwork; подработка/part-time; вертикальными щелями/vertical slots	ценные и весьма ценные руды valuable and very valuable ores необходимость сохранения земной поверхности от разрушения the need to save the earth's surface from destruction

Состояние массивов оценивается как функция эффективности охранных мероприятий. Управляемое состояние массивов обеспечивается индивидуальным или совокупным использованием методов разгрузки от повышенных напряжений [16, 17].

Корректность концепции подтверждается практикой разработки Ишимского месторождения (Северный Казахстан) с погашением технологических пустот способом изоляции без закладки.

Месторождение сложено рудными телами шириной от 2 до 15 м, мощностью до 10 м в трещиноватых породах. Угол падения залежей – до 15–25°, глубина залегания – до 600 м. Коэффициент крепости руд и пород по М.М. Протоdjяконову – 8–14.

Моделированием с масштабом 1:200 исследовали влияние порядка выемки на состояние массива (рис. 5).

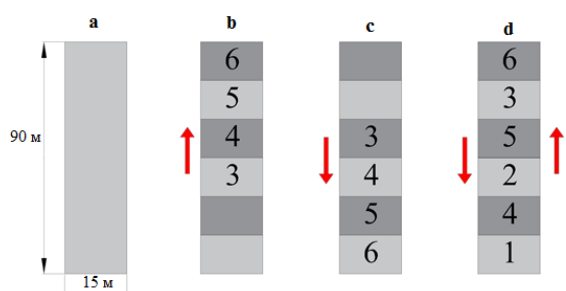


Рис. 5. Моделирование схем отработки: а) размеры модели; б) сплошная наступающая выемка; в) сплошная отступающая выемка; г) двухстадийная выемка

Fig. 5. Modeling of mining schemes: а) model dimensions; б) continuous advancing notch; в) continuous retreating notch; г) two-stage notch

Породы и руды в модели представлены песчано-цементной смесью с соотношением 15:1 при водоце-

ментном отношении 1,7 и расходе: песок – 170 кг, цемент М 400 – 12 кг, вода – 20 л на порцию, имитирующую 1 м³ горной массы.

Величину горного давления оценивали с помощью деформометров в основании модели, а параметры сдвига – по смещению реперов, установленных над камерами.

Исходные данные для моделирования: глубина работ – 390 м; объемный вес пород – 2,8 т/м³; прочность пород на сжатие – 96 МПа; угол падения залежи – 20°; высота выработки – 3 м.

Ненарушенность массива выработками в модели «а» способствует равномерному распределению давления. В модели «б» давление вследствие проходки нарезных выработок увеличивается на 20–30 % по сравнению моделью «а». В модели «в» напряжения увеличиваются до максимальных размеров. Уменьшение размеров целиков до 2 м способствует развитию опасных напряжений. Звукометрическим методом установлено, что с увеличением длины нарезного штрека с 3 до 10 м импульсы увеличиваются до 5 в минуту.

Устойчивость земной поверхности над месторождением после отработки характеризуется возникновением провалов или сдвижений:

$$H > H_p = 55 \ell_{\text{экв}} f^{-1,3} = K \ell_{\text{экв}};$$

$$\ell_{\text{экв}} = \frac{L \cdot \ell'}{\sqrt{L^2 + (\ell')^2}},$$

где H – глубина выработок от поверхности, м; H_p – расчетная глубина безопасных для поверхности деформаций, м; $\ell_{\text{экв}}$ – эквивалентный пролет выработки, м; K – коэффициент крепости пород по Протоdjяконову; L – размер выработки по простиранию; ℓ' – горизонтальная проекция выработки вкост простирания; K – коэффициент запаса надежности.

В ходе промышленного эксперимента месторождение с объемом пустот 2 млн м^3 было погашено без обрушения с воронками и провалами.

Стоимость погашения 1 м^3 пустот без закладки в ценах 1990 г. составила $0,18 \text{ р/м}^3$. При погашении обрушением пород даже без полного учета влияния на окружающую среду стоимость погашения составила бы $0,92 \text{ р/м}^3$, а при закладке пустот твердеющей смесью – $6\text{--}15 \text{ р/м}^3$.

Эффективность разработки месторождений зависит от рационального использования свойств рудовмещающих массивов с приоритетом условия сохранности земной поверхности от разрушения. От успеха управления напряжениями зависят и другие показатели эффективности разработки, например выход машинных классов горной массы [18–20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gattinoni P., Pizzarotti E.M., Scesi L. Engineering geology for underground works. – Moscow: Springer, 2014. – 312 p.
2. Wang G., Li R., Carranza E.J.M., Yang F. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China // Ore Geology Reviews. – 2015. – V. 71. – P. 592–610.
3. Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Reconstructing the kolk surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2014. – V. 50. – № 5. – P. 707–718.
4. Величко Д.В., Тюрин Д.В. Геомеханическое обоснование безопасной и эффективной отработки урановых месторождений Приаргунского производственного горно-химического объединения // Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 98–105.
5. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Реализация концепции устойчивого развития горных территорий – базис расширения минерально-сырьевого комплекса России // Устойчивое развитие горных территорий. – 2015. – № 3. – С. 46–50.
6. Новый подход для оценки эффективности работы горно-обогатительных комбинатов / И.Т. Мельников, С.Е. Гавришев, А.Г. Михайлов, И.А. Пыталев, Н.С. Шевцов, К.П. Васильев // Горная промышленность. – 2012. – № 5 (105). – С. 60–66.
7. Metal deposits combined development experience / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, O. Burdzieva // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – V. 7. – № 6. – P. 591–594.
8. Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологий добычи руд / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, С.Г. Страданченко, З.М. Хашева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 6–14.
9. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Efremkov A.B. Recycling of metal ore mill tailings // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 682. – P. 363–368.
10. Совершенствование технологии разработки жильных золоторудных месторождений с использованием средств селективной механизированной выемки / А.Ю. Чебан, Г.В. Секисов, А.Г. Секисов, Н.П. Хрунина // Горный журнал. – 2018. – № 10. – С. 101–106.
11. Лискова М.Ю., Наумов И.С. Моделирование аварийных ситуаций в шахтах и рудниках // Научные исследования и инновации. – 2013. – Т. 7. – № 1–4. – С. 78–81.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела, Южно-Российский государственный политехнический университет; профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета.

Дмитрак Ю.В., доктор технических наук, профессор, ректор Северо-Кавказского государственного технологического университета.

Габараев О.З., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета.

Стадник Д.А., доктор технических наук, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета.

Заключение

Из полученных результатов исследования следует, что скальные месторождения металлических руд обладают свойствами, использование которых позволяет эксплуатировать их с солидным эколого-экономическим эффектом за счет рационального управления величиной напряжений.

Максимальные напряжения развиваются при стадийной отработке рудных тел, а регулирование напряжений обеспечивается сплошной выемкой залежей и разделением массива на геомеханически сбалансированные участки.

Безопасность отработки обеспечивается мониторингом горных работ с применением методов рудничной геофизики.

12. Strategic mining options optimization: open pit mining, underground mining or both / E. Ben-Awua, O. Richter, T. Elkington, Y. Pourrahimian // International Journal of Mining Science and Technology. – 2016. – V. 26. – Iss. 6. – P. 1065–1071.
13. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling / Y.J. Ping, C.W. Zhong, Y.D. Sen, Y.J. Qiang // Computers and Geotechnics. – 2015. – V. 64. – P. 20–31.
14. Borujeni M.P., Gitinavard H. Evaluating the sustainable mining contractor selection problems: An imprecise last aggregation preference selection index method // Journal of Sustainable Mining. – 2017. – V. 16. – № 4. – P. 207–218.
15. Комащенко В.И. Разработка взрывной технологии, снижающей вредное воздействие на окружающую среду // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 1. – С. 34–43.
16. Ensuring safe operation and assessing the condition underground structures by the method of acoustic resonance flaw detection / B. Meskhi, M. Pleshko, Y. Buligin, L. Alexeenko, M. Molev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – P. 212–217.
17. Масленников С.А. К вопросу о проектировании крепи вертикальных стволов в сложных горно-геологических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 6. – С. 50–55.
18. Повышение полноты использования недр путем глубокой утилизации отходов обогащения угля / В.И. Голик, В.И. Комащенко, С.Г. Страданченко, С.А. Масленников // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 91–95.
19. Выбор средств защиты высоковольтного двигателя экскаватора на руднике открытых работ горно-металлургического комбината / Р.В. Клюев, И.И. Босиков, О.А. Гаврина, В.А. Атрушкевич // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 7. – С. 46–53.
20. Оценка устойчивости и обводненности породного массива геофизическими методами / В.В. Романов, К.С. Мальский, А.И. Посеренин, А.Д. Каринский // Горный журнал. – 2018. – № 11. – С. 65–71.

Поступила 17.06.2020 г.

UDC 504.55.054: 622 (470.6)

RESERVE FOR INCREASING EFFICIENCY OF DEVELOPMENT OF LOW-POWERED ORE DEPOSITS

Vladimir I. Golik^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Yury V. Dmitrak²,
dmitrak@yandex.ru

Oleg Z. Gabaraev²,
gabaraev59@mail.ru

Denis A. Stadnik²,
Sined777@yandex.ru

¹ South-Russian State Polytechnic University,
13, Prosvesheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

² North Caucasian State Technological University,
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

The relevance of the research. The article is devoted to the problem of improving the technology of developing thin ore bodies as a reserve for increasing the production of metals. Its relevance is due to the growing deficit of rare and valuable metals, most of which are localized in deposits of the type under consideration.

The aim of the experiment is to establish the relationship between the geomechanical conditions of the development of ore deposits and the parameters of the treatment works.

Methodology. The research is based on a long-term industrial experiment at the Ishim field, carried out using geophysical monitoring methods.

Results. The prospects of developing low-power deposits with relatively limited reserves are estimated. The article presents the result of the analysis of methods for controlling rock stresses depending on their properties and describes the mechanism of rock transition from an unbroken state to a broken state. A mathematical model for the phenomenon of self-jamming of structural blocks is formulated and a reference is given to the theory of rock destruction as a consequence of the internal deformation of elementary mineral particles in an anisotropic medium. The article explains the condition of the array preservation from destruction. The advantages of studying the stress of rocks by the values of elastic and residual deformations are described. The typification of methods for managing arrays by the criterion of the preservation of the earth's surface from destruction was made. The results of the use of monitoring methods during the full-scale development of the field are presented. The economic effect of the repayment of voids based on the regulation of stresses is determined.

Conclusions. Rock deposits of metal ores have properties the use of which in underground mining can improve technical and economic indicators due to the rational management of natural and induced stresses during monitoring of mining operations using the methods of mining geophysics.

Key words:

Development technology, power, ore body, experiment, geomechanics, conditions, parameters, geophysical monitoring.

REFERENCES

- Gattinoni P., Pizzarotti E.M., Scesi L. *Engineering geology for underground works*. Moscow, Springer, 2014. 312 p.
- Wang G., Li R., Carranza E.J.M., Yang F. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 71, pp. 592–610.
- Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 707–718. In Rus.
- Velichko D.V., Tyurin D.V. Geomechanical substantiation of safe and effective mining of uranium deposits of the Priargunsky industrial mining and chemical association. *Mining Journal*, 2018, no. 7, pp. 98–105. In Rus.
- Kaplunov D.R., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. The implementation of the concept of sustainable development of mountainous territories is the basis for the expansion of the mineral resource complex of Russia. *Sustainable development of mountainous areas*, 2015, no. 3, pp. 46–50. In Rus.
- Melnikov I.T., Gavrishev S.E., Mikhailov A.G., Pytalev I.A., Shevtsov N.S., Vasiliev K.P. A new approach for evaluating the efficiency of mining and processing plants. *Mining*, 2012, no. 5 (105), pp. 60–66. In Rus.
- Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzheva O. Metal deposits combined development experience. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 591–594.
- Golik V.I., Razorenov Yu.I., Stradanchenko S.G., Khasheva Z.M. Principles and cost-effectiveness of combining ore mining technologies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 7, pp. 6–14. In Rus.
- Golik V.I., Razorenov Yu.I., Efremenko A.B. Recycling of metal ore mill tailings. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 363–368.
- Cheban A. Yu., Sekisov G.V., Sekisov A.G., Khrunina N.P. Improving the development of vein gold ore deposits using selective mechanized excavation. *Gorny Zhurnal*, 2018, no. 10, pp. 101–106. In Rus.
- Liskova M.Yu., Naumov I.S. Modeling emergency situations in mines and mines. *Scientific research and innovation*, 2013, vol. 7, no. 1–4, pp. 78–81. In Rus.
- Ben-Awua E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, vol. 26, Iss. 6, pp. 1065–1071.
- Ping Y.J., Zhong C.W., Sen Y.D., Qiang Y.J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 64, pp. 20–31.

14. Borujeni M.P., Gitinavard H. Evaluating the sustainable mining contractor selection problems: An imprecise last aggregation preference selection index method. *Journal of Sustainable Mining*, 2017, vol. 16, no. 4, pp. 207–218.
15. Komashchenko V.I. The development of explosive technology that reduces the harmful effects on the environment. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*, 2016, no. 1, pp. 34–43. In Rus.
16. Meskhi B., Pleshko M., Buligin Y., Alexeenko L., Molev M. Ensuring safe operation and assessing the condition underground structures by the method of acoustic resonance flaw detection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, pp. 212–217.
17. Maslennikov S.A. To the question of designing the support of vertical shafts in difficult mining and geological conditions. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2016, no. 6, pp. 50–55. In Rus.
18. Golik V.I., Komashchenko V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Improving the completeness of the use of mineral resources through the deep utilization of coal enrichment waste. *Mountain Journal*, 2012, no. 9, pp. 91–95. In Rus.
19. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A., Atrushkevich V.A. Selection of protective equipment for the high-voltage motor of an excavator at an open pit mine of a mining and metallurgical plant. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2020, no. 7, pp. 46–53. In Rus.
20. Romanov V.V., Malsky K.S., Posenin A.I., Karinsky A.D. Assessment of stability and watering of the rock mass using geophysical methods. *Gorny Zhurnal*, 2018, no. 11, pp. 65–71. In Rus.

Received: 17 June 2020.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, South-Russian State Polytechnic University; professor, North Caucasian State Technological University.

Yury V. Dmitrak, Dr. Sc., professor, rector, North Caucasian State Technological University.

Oleg Z. Gabaraev, Dr. Sc., professor, head of the Mining Department, North Caucasian State Technological University.

Denis A. Stadnik, Dr. Sc., professor, North Caucasian State Technological University.

УДК 661.879.1:622.258.4:551.49:539.16

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДОТОКЕ ШТОЛЬНИ 504 ПЛОЩАДКИ «ДЕГЕЛЕН»

Шакенов Ербол Зейнелгазинович¹,
shakenov@nnc.kz

Дюсембаева Мадина Талгатовна¹,
koigeldinova@nnc.kz

Лукашенко Сергей Николаевич²,
lukashenko.1962@mail.ru

Темиржанова Арай Ермаковна¹,
temirzhanova@nnc.kz

Есильканов Гани Мухтарович¹,
al-g_007@mail.ru

Мухамедияров Нурлан Жумагазыевич¹,
mukhamediyarov@nnc.kz

¹ Институт радиационной безопасности и экологии,
Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбит атом, 2.

² Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,
Россия, 249032, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км.

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения современных данных о концентрации химических элементов в системе «вода–почва–растения» на припортовом участке штольни 504 площадки «Дегелен» бывшего Семипалатинского испытательного полигона. В период весеннего половодья возможен вынос элементов за пределы площадки штольни 504.

Цель: изучение пространственного распределения химических элементов в системе «вода–почва–растения» в водотоке штольни 504. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: 1) определить уровни концентрации химических элементов в воде; 2) изучить уровни концентрации химических элементов в почве; 3) выявить особенности накопления химических элементов в растениях штольни 504.

Методы. Элементный состав воды определялся методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Elan 9000 «Perkin Elmer SCIEX»), атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой («iCAP 6300 Duo» Thermo Scientific). Анализ таких показателей, как общая минерализация, содержание сульфатов, гидрокарбонатов, хлоридов, кальция, магния и натрия, проводился титриметрическими, колориметрическими, потенциометрическими методами в соответствии с ГОСТ.

Результаты. Анализ данных, полученных по воде, показал высокое содержание таких элементов, как Li, Be, Al, Mn, Zn, Rb, Sr, Cd, Cs, La, Ce, U, среднее содержание которых в несколько раз превышает показатель кларка в подземных водах аридного климата (сульфатные воды). Также для воды замечено превышение предельно допустимых уровней для таких элементов, как Be (2800 ПДК), Mn (260 ПДК), Al (76 ПДК), U (70 ПДК) и Cd (50 ПДК). По последним данным выявлено, что содержание таких элементов, как Li, Be, Al, в воде увеличилось в 2 раза, тогда как Co, Ni и Cu – в десятки раз.

Пространственное распределение исследуемых элементов в почве штольни 504 неоднородно, большая часть элементов концентрируется в грунте севернее русла водотока. На данном участке выявлено повышенное содержание таких элементов, как Be, Mn, Cu, Zn, Mo, Cd, Cs, Pb и U, превышающих показатель кларка литосферы. Индекс превышения значения кларка литосферы составил для концентрации урана 1000 раз. Сравнение полученных данных на загрязненных участках со значением предельно-допустимых концентраций химических элементов для почвы выявило превышение у Pb (26 ПДК), Mn и Cu (9 ПДК).

Химический состав воды и почвы штольни 504 является уникальным по содержанию редкоземельных элементов. Среднее содержание РЗЭ в воде в тысячу раз превышает показатель кларка в подземных водах аридного климата и подземных водах СИП. Замечено превышение предельно допустимого уровня концентрации для самария в воде. Характерным является преобладание группы легких РЗЭ с ярко выраженной церий-лантановой специализацией.

Для большинства видов растений штольни 504 на загрязненном участке выявлено повышенное содержание Be, Cd, Cs, Pb, U и ряда РЗЭ. Концентрация исследуемых элементов в таких видах растений, как тростник и вейник, на сравниваемых участках менялась незначительно, что, видимо, обусловлено наличием физиолого-биохимических механизмов, препятствующих их поступлению.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что пространственное распределение элементов на площадке штольни 504 связано, прежде всего, с выносом химических элементов штольневymi водами. В воде штольни 504 выявлено порядка десяти элементов, превышающих значения кларка и предельно допустимые уровни.

Ключевые слова:

Семипалатинский испытательный полигон, площадка «Дегелен», штольня, химические элементы, предельно допустимые концентрации, кларк, редкоземельные элементы.

Введение

Испытательная площадка «Дегелен» Семипалатинского испытательного полигона (СИП) использовалась для проведения подземных ядерных испытаний средней и малой мощности. В период с 1961 по 1989 гг. было проведено 209 ядерных испытаний в 181 штольне, которые расположены в горном массиве Дегелен. Штольни представляют собой горизонтальную выработку в гранитном массиве горы, их длина варьирует от нескольких сотен метров до 2 км. При этом диаметром ствола выработки штолен составляет около 3 м [1, 2].

На площадке «Дегелен» по данным ранних исследований [3] были выявлены участки с повышенным содержанием радионуклидов в почве, воде и растительности. Возможно, данные участки образовались вследствие систематического выноса водным путем радионуклидов из штолен или вскрытия штолен по завершению испытаний, либо возникновения аварийных ситуаций при проведении ядерных взрывов.

По ранее изученным данным на площадке «Дегелен» наиболее загрязненные участки – припортальные площадки следующих штолен с водотоками – 104, 176, 504, 511, 177. За период работы испытательной площадки водопиток отмечался более чем в 50 штольнях. В донных отложениях штольневых водотоков существуют участки с концентрацией $^{239+240}\text{Pu}$ до $n \cdot 10^4$ Бк/кг, ^{90}Sr – от $n \cdot 10^4$ до $n \cdot 10^5$ Бк/кг, ^{137}Cs – от $n \cdot 10^4$ до $n \cdot 10^6$ Бк/кг [1–4].

В водотоке штольни 504, расположенном в долине ручья Карабулак, помимо техногенных радионуклидов выявлено аномально высокое содержание редкоземельных элементов и тяжелых металлов [5, 6]. Основной целью данной работы являлось изучение пространственного распределения химических элементов в системе «вода–почва–растения» в водотоке штольни 504. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: 1) определить уровни концентрации химических элементов в воде; 2) изучить

уровни концентрации химических элементов в почве; 3) выявить особенности накопления химических элементов в растениях штольни 504.

Методы и объекты исследования

Краткое описание объекта исследования

Горы Дегелен относятся к региональной гидрогеологической системе, примыкающей к левобережной части бассейна реки Иртыш. Основным источником питания водоисточников на территории горного массива Дегелен являются атмосферные осадки. Большинство штолен массива Дегелен расположено в зоне «транзита» атмосферных вод на различном удалении от уровня подземного бассейна трещинных вод. Поэтому при сооружении штолен практически всегда наблюдалось появление воды [2, 3].

Объектом исследования являлся водоток штольни 504, который расположен в долине ручья Карабулак (рис. 1). Всего в штольне 504 было произведено два подземных взрыва мощностью менее 0,001 и до 20 кт.

Среднегодовой дебит воды в штольне 504 составляет около 100 л/мин [4, 7]. Туннель штольни законсервирован, засыпан щебнем и гранитными камнями. В 50 м от штольни наблюдаются локальные участки с водопрооявлениями, а постоянный водоток проявляется в 100 м от штольни. Длина ручья около 400 м. Ручей высыхает по мере удаления от портала штольни.

Припортальный участок штольни отличается наличием густого растительного покрова, где произрастают такие доминирующие виды растений как: тростник южный (*Phragmites australis*), вейник наземный (*Calamagrostis epigeos*), тысячелистник азиатский (*Achillea asiatica*), таволга зверобоелистная (*Spirea hypericifolia*), осока приземистая (*Carex supina*), полынь эстрагон (*Artemisia dracuncululus*), ковыль волосатик (*Stipa capillata*), типчак валлийский (*Festuca valesiaca*), ива остролистная (*Salix acutifolia*), карагана древовидная (*Caragana arborescens*).

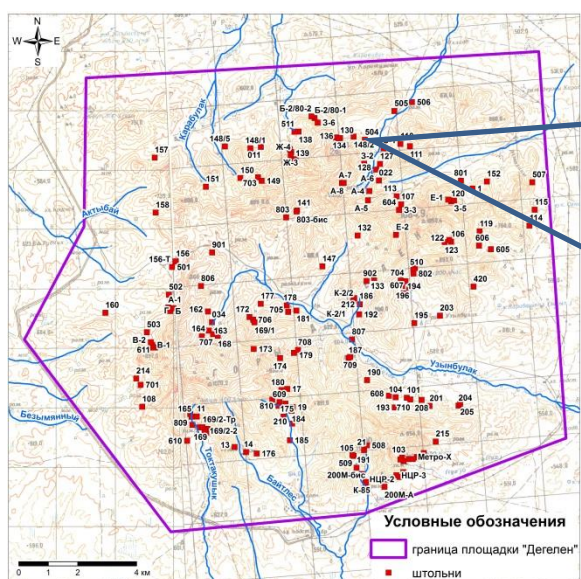
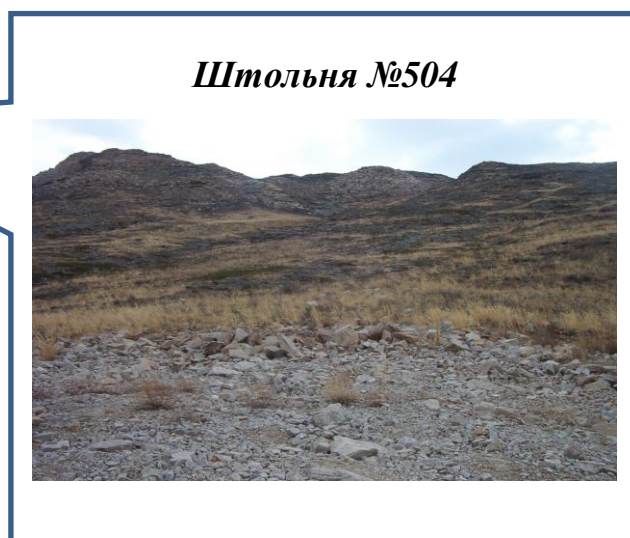


Рис. 1. Расположение штольни № 504 на площадке «Дегелен»

Fig. 1. Location of tunnel 504 at «Degelen» site



Штольня №504

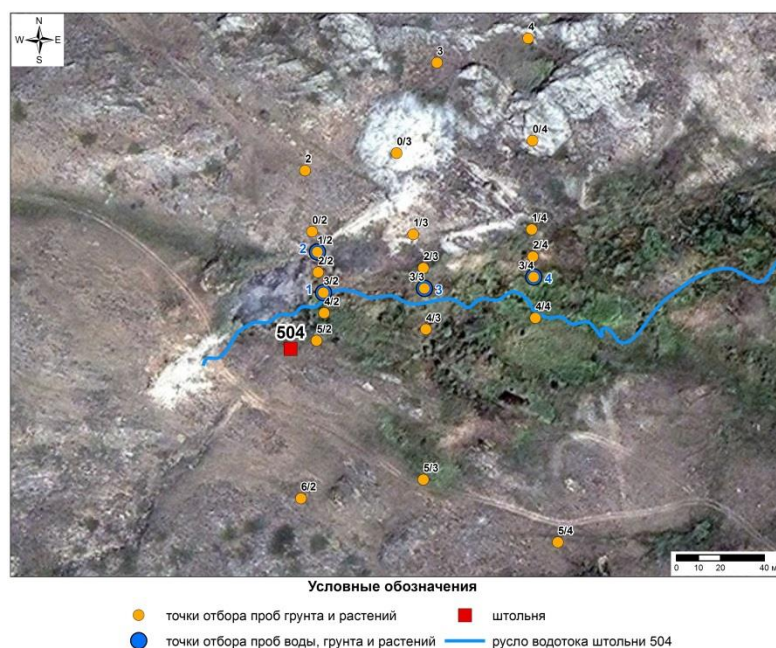


Рис. 2. Точки отбора проб воды, грунта и растений

Fig. 2. Water, soil and plant sampling points

Отбор проб и методы исследования

Вдоль русла водотока штольни 504 (на расстоянии 50–150 м от портала штольни) в сентябре 2012 г. производился отбор проб воды, почвы и растений. Для определения местоположения точек в географической системе координат использовался GPS-приемник Garmin Rino 520, который позволяет определять положение точек с точностью ± 5 м.

Отбор проб на исследуемом участке проводился по трем профилям, расстояние между которыми составляет 50 м. Каждый профиль был предварительно разделен на 6–8 участков, где производился отбор проб. Расстояние между участками отбора проб от русла водотока штольни по каждому профилю составляет 10, 20, 40 и 100 м соответственно. Условно серединой исследуемых профилей взято русло водотока, где проводился отбор проб воды. Точки отбора проб на припортальном участке штольни 504 приведены на рис. 2.

Отбор проб воды

Пробоотбор воды выполнен согласно ГОСТ Р 51592-2000 [8, 9], который распространяется на любые типы вод и предназначен для определения показателей ее химического состава и свойств.

Для удаления крупных включений и механических примесей пробы воды фильтровались бумажным фильтром «синяя лента». Далее отфильтрованные пробы консервировались путем добавления концентрированной азотной кислоты марки «осч» (3 мл HNO_3 на 1 л пробы).

Для проведения общехимического анализа отдельно отобрано 1,5 л воды, которая не подлежит консервированию согласно ГОСТ [8, 9]. Был проведен ряд анализов по определению общей минерализации, содержания сульфатов, гидрокарбонатов, хлори-

дов, кальция, магния и натрия согласно утвержденным стандартным методикам [10].

Отбор и подготовка проб почвы

Процесс отбора проб проводился методом укола из поверхностного слоя 0–5 см донного осадка на площади 100 см^2 согласно ГОСТ 17.1.5.01-80 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность».

Отобранные пробы почвы весом не менее 1 кг просушивались на воздухе до воздушно-сухого веса. Влажные пробы почвы сушили в сушильном шкафу при температуре 105 °C в течение 3–6 часов. Воздушно-сухие пробы почвы просеивались через полиамидное сито с диаметром отверстий 1 мм. Методом квартования отбирался образец массой 200 г и истирали на дисковой мельнице «Pulverisette 9» (гарнитура закаленная сталь) в течение 20 минут со скоростью вращения 1000 об/мин. Повторно отбирали из перемолотого гомогенного образца методом квартования навеску 50 г и дополнительно истирали в течение 20 минут. Далее отбирали из перемолотого гомогенного образца конечную навеску для анализа массой 0,2 г.

Отбор и подготовка проб растений

Сопряженно с пробами почвы осуществлялся отбор надземной части растений. Для анализа были взяты пробы шести видов растений, относящиеся к разным экологическим группам (гидрофиты, мезофиты, ксерофиты). Из них гидрофиты: вейник наземный, тростник южный и осока приземистая; мезофиты: карагана древовидная; ксерофиты: ковыль волосатик и полынь эстраган.

Отбираемую часть срезали на высоте 3–5 см с помощью ножниц из нержавеющей стали и упаковыва-

ли в полиэтиленовый пакет. Производился отбор надземной части растений в первичной сырой массе порядка 500 г. В лаборатории пробы промывались дистиллированной водой с целью удаления частичек почвы и высушивались при комнатной температуре. Обобщенно подготовку можно представить в виде взвешивания, последовательного измельчения воздушно-сухой пробы растения на отрезки 5–8 мм, отбора среднего образца методом квартования (массой 100 г), измельчения на электромельнице «Grindomix GM 200», отбора методом квартования конечной навески для анализа массой 5 г.

Подготовка образцов к анализу

Вода. Отбиралась аликвота пробы воды объемом 1 мл, разбавлялась в соотношении 1:10 и анализировалась на содержание интересующих элементов.

Почва. Разложение проб почвы и растений проводилось согласно методическим указаниям [11] и рабочей инструкции РИ 03-02-03 (А) «Подготовка проб для элементного анализа методом автоклавного разложения» [12, 13].

Навеску образца почвы массой $200,0 \pm 0,1$ мг помещали в тефлоновый вкладыш и добавляли небольшими порциями 10 см^3 7М азотной кислоты. Затем тефлоновый вкладыш вставляли в автоклав, который зажимали в станине. Автоклавное разложение проб проводили в течение 2,5 ч при температуре 160°C . По окончании автоклавирования охлажденную пробу переносили в центрифужную пробирку и центрифугировали в течение 10 мин при частоте вращения 10000 об/мин, затем центрифугат переносили в мерную пробирку объемом 15 см^3 , осадок промывали 5 см^3 7М азотной кислоты и снова центрифугировали. Центрифугат и промывной раствор объединяли и доводили 7М азотной кислотой до объема 15 см^3 . Полученный таким образом исходный раствор разбавляли 1 % раствором HNO_3 в соотношении 1:100 и анализировали на содержание химических элементов [13].

Растения. Навеску сухой пробы растения $0,5000 \pm 0,0001$ г помещали во фторопластовый вкладыш автоклава, смачивали 1 мл H_2O , добавляли 6 мл конц. HNO_3 и 1 мл 30 % H_2O_2 . Через 40 минут фторопластовый вкладыш закрывали крышкой, вставляли во внешний корпус автоклава и помещали в стальную станину с зажимным устройством. Станину с автоклавом помещали в сушильный шкаф, разогретый до $160 \pm 5^\circ\text{C}$, и выдерживали в течение 2,5 ч. По окончании автоклавирования охлажденную пробу количественно переносили в мерную пробирку и доводили 1 % раствором азотной кислоты до объема 15 см^3 . Полученный таким образом раствор разбавлялся 1 % раствором HNO_3 в соотношении 1:10 и анализировался на содержание интересующих элементов.

Проведение аналитических работ

Определение содержания химических элементов проводилось методами масс-спектрометрии (ИСП-МС) и атомно-эмиссионной спектрометрии (ИСП-АЭС) с индуктивно-связанной плазмой. Были использованы приборы Elan 9000 производства США компании

«Perkin Elmer SCIEX» и «iCAP 6300 Duo» производства Великобритании фирмы «Thermo Scientific». Для построения градуировочной кривой применялись многоэлементные стандартные растворы, имеющие код в реестре государственных средств измерений Республики Казахстан под № KZ.03.02.00901-2010, KZ.03.02.00902-2010. Внутренний контроль качества во время испытаний проводился с помощью анализа стандартного раствора через каждые 10 проб. В случае результатов, несоответствующих требованиям внутреннего контроля качества, проводилось дополнительное построение градуировочной кривой и сам процесс анализа проб с учетом новых параметров фона. Измерение исследуемых проб проводилось по методике ISO 17294-2:2003 (E) [14].

Вариационно-статистический и корреляционный, а также регрессионный анализы [15, 16] полученных данных проводились с помощью программ STATISTICA и Microsoft Excel.

Для характеристики химического состава воды использована формула Курлова.

Результаты исследования

Исследование элементного состава водотока штольни 504

Ионный состав рассматриваемого водного объекта весьма разнообразен. Химический состав воды штольни 504 демонстрирует составленная на его основе формула Курлова:

$$\text{М } 1,5 \frac{\text{SO}_4^{2-} 22}{\text{Ca } 9,6 \text{Mg } 8,6} \text{pH } 5,2.$$

Как видно из формулы, вода штольни 504 относится к сульфатно-кальциево-магниевому типу.

Анализ данных показал, что штольневые воды относятся к кислым водам ($\text{pH}=5,0-5,5$). По степени минерализации вода штольни 504 является солоноватой ($1,5 \text{ г/л}$), по значению жесткости относится к группе жестких вод ($>9,0 \text{ ммоль/л}$).

Элементный состав воды штольни 504 представлен в табл. 1.

Как видно из таблицы, среднее содержание большинства элементов в воде штольни 504, отобранных в профилях, характеризуется небольшими пределами колебаний. Однако высокий размах колебаний концентраций отмечен для следующих элементов: Fe, Co, Ni, Cu, Ga, As, Ba, Mo и Pb. По-видимому, это связано с наличием подтоков воды на различных участках русла водотока штольни 504, что объясняет неоднородность содержания вышеперечисленных элементов в пробах воды.

О стабильности содержания элементов в воде 504 штольни можно судить при сравнении их концентрации с ранее полученными данными. Из таблицы видно, что концентрация большинства элементов в воде меняется незначительно. Отмечено, что по последним данным содержание таких элементов, как Li, Be, Al, в воде увеличилось в 2 раза, тогда как Co, Ni и Cu – в десятки раз. Также следует отметить, что в воде штольни 504 выявлены такие элементы, как Fe, Mo и Pb, концентрация которых в ранее полученных данных была меньше предела обнаружения.

Таблица 1. Среднее содержание и пределы колебания химических элементов в воде штольни 504, мкг/л, n=4

Table 1. Average content and variation limits of chemical elements in water of tunnel 504, µg/l, n=4

Элементы Elements	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ (2012 г.)	C_{\max} C_{\min}	Среднее содержание/Average concentration			ПДК МПК [20]
			в воде штольни 504 2010 г. in water of tunnel 504, 2010 [17]	в подземных водах аридного кли- мата (сульфатные воды) in ground water of the arid climate (sulfate water) [18]	в эталонной прес- ной воде in standard fresh water [19]	
Li	330±30	1,2	125±120	29	3	30
Be	560±60	1,2	270±25	0,09	0,1	0,2
Na	3500±510	1,4	27000±3000	275000	5000	200000
Mg	26800±3000	1,3	23000±2000	60300	4000	20000
Al	38000±4500	1,2	17600±1700	280	200	500
K	1700±460	1,7	2500±200	15800	2000	–
Ca	28000±1300	1,1	185000±18000	118000	2000	–
V	<0,2	–	<0,2	2,21	1	100
Mn	130000±14000	1,2	109000±10000	46,2	5	500
Fe	350±78	87	<0,5	0,52	500	1000
Co	140±30	16	12±1	0,52	0,5	100
Ni	92±19	10	6,0±0,5	5,6	0,3	100
Zn	12000±1700	1,4	11000±1000	30,7	5	5000
Cu	230±52	6,8	18±1	8,98	3	1000
Ga	4,6±1	11	<0,1	0,66	0,1	–
As	8±1,9	55	<0,6	2,15	0,5	50
Rb	16±1,6	1,3	11±1	2,06	1	100
Sr	910±78	1,2	760±75	340	50	7000
Mo	7,5±1,7	27	<0,3	5,5	1	250
Cd	50±4	1,2	34±3	0,62	0,2	1
Cs	7,5±1,0	1,3	6,5±0,5	0,65	0,05	–
Ba	160±35	12	8,0±0,6	24,3	10	100
La	370±39	1,2	455±40	0,3	0,3	–
Ce	610±91	1,2	890±85	1	0,4	–
Pr	62±9	1,4	85±8	–	0,06	–
Nd	220±30	1,3	280±25	–	0,2	–
Sm	51±9	1,4	65±6	–	0,03	24
Eu	4,5±0,6	1,2	–	–	0,01	300
Gd	81±10	1,3	100±10	–	0,1	–
Dy	81±9	1,2	95±10	–	0,04	–
Ho	16,0±1,5	1,2	19±2	–	0,01	–
Tm	6,5±0,6	1,2	8,0±0,8	–	0,008	–
Yb	38±3	1,2	53±5	–	0,03	–
Lu	5,5±0,6	1,2	8,0±0,8	–	0,002	–
Re	1,7±0,3	1,4	2,0±0,2	–	–	–
Pb	105±24	9	<0,01	4,43	3	30
U	1050±209	1,4	4500±450	1,76	0,1	15

Примечание: $\bar{x} \pm S\bar{x}$ – среднее арифметическое содержание и СКО элементов; C_{\max}/C_{\min} – размах колебаний концентрации элементов.

Note: $\bar{x} \pm S\bar{x}$ – arithmetic mean for the content and MSD of elements; C_{\max}/C_{\min} – fluctuation amplitude of elements concentrations.

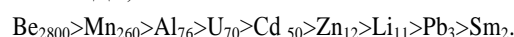
Сравнительные данные содержания химических элементов в воде штольни 504 относительно среднего содержания в подземных водах аридного климата и эталонной воды представлены в следующем убывающем ряду (индекс – кратность превышения среднего содержания):

- $\text{Be}_{6200} > \text{Mn}_{2800} > \text{La}_{1200} > \text{Ce}_{600} > \text{U}_{600} > \text{Zn}_{390} > \text{Al}_{130} > \text{Cu}_{100} > \text{Cd}_{80} > \text{Pb}_{20} > \text{Cs}_{10} > \text{Li}_{10} > \text{Rb}_8 > \text{Ga}_7 > \text{Sr}_3$ (относительно среднего содержания в подземных водах аридного климата);
- $\text{Mn}_{26000} > \text{U}_{10000} > \text{Be}_{5600} > \text{Lu}_{2700} > \text{Zn}_{2400} > \text{Dy}_{2000} > \text{Sm}_{1700} > \text{Ho}_{1600} > \text{Ce}_{1500} > \text{La}_{1200} > \text{Nd}_{1100} > \text{Pr}_{1000} > \text{Tm}_{800} > \text{Eu}_{400} > \text{Ni}_{300} > \text{Co}_{280} > \text{Cd}_{250} > \text{Al}_{190} > \text{Cs}_{150} > \text{Li}_{110} > \text{Cu}_{77} > \text{Ga}_{48} > \text{Pb}_{35} > \text{Sr}_{18} > \text{As}_{16} > \text{Ba}_{16} > \text{Rb}_{16} > \text{Ca}_{14} > \text{Mo}_8 > \text{Mg}_7$ (относительно среднего содержания эталонной пресной воды).

Из убывающего ряда видно, что концентрация большинства исследуемых элементов значительно превышает

показатели кларка в подземных водах аридного климата и эталонной пресной воды. Содержание таких элементов, как Na, Mg, K, Ca, V и Fe, находится на уровне кларка подземных вод аридного климата.

Кратность превышения предельно-допустимых концентраций химических элементов в воде представлена в ряду убывания (индекс – кратность превышения ПДК):

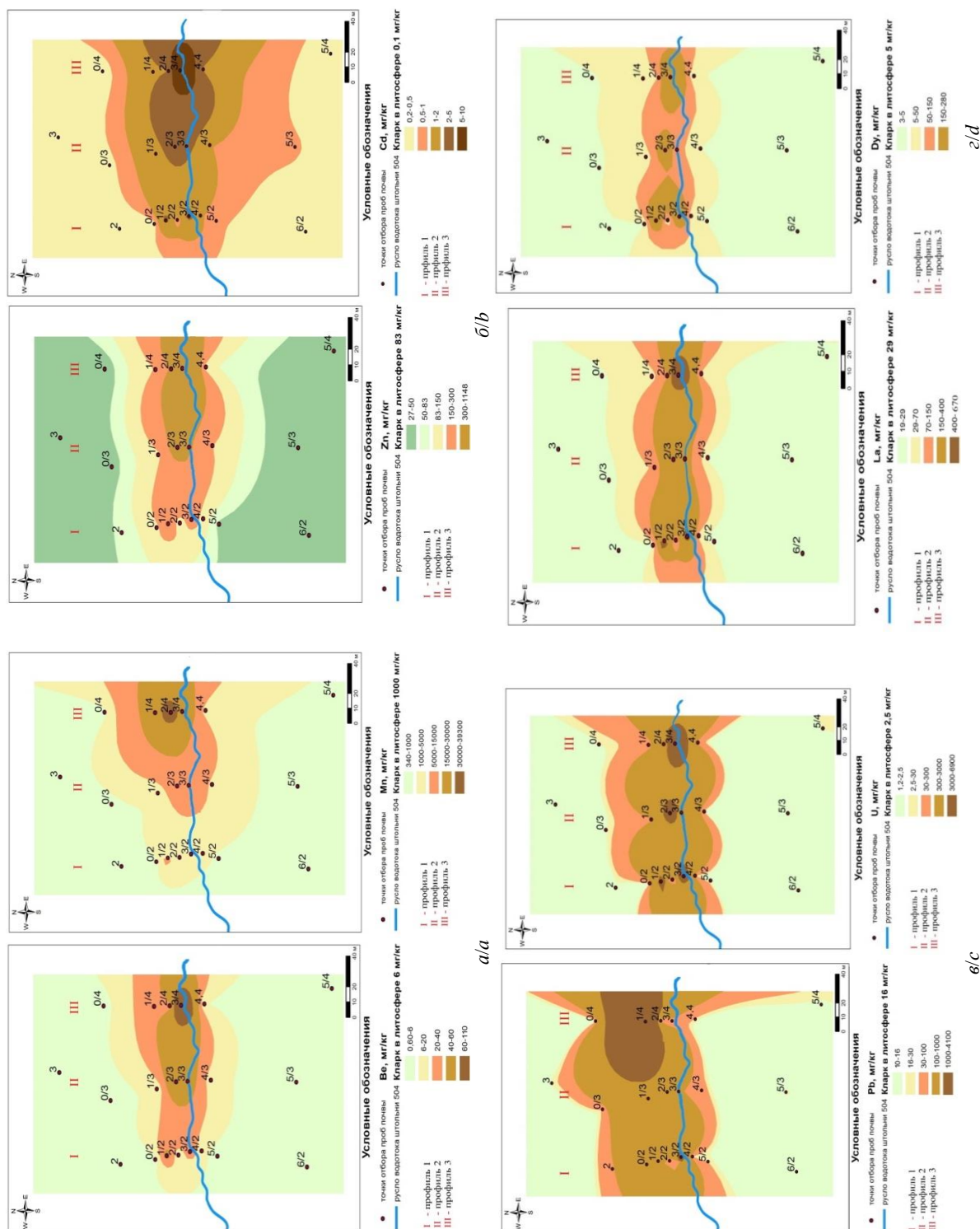


Из данного ряда видно, что максимальный показатель превышения ПДК характерен для Be (в 2800 раз). Следует отметить, что содержание таких элементов, как Mg, Fe, Co, Ni и Ba, в воде находится на уровне 1 ПДК.

В воде штольни 504 выявлено аномально высокое содержание редкоземельных элементов, превышающих показатель кларка от сотни до тысячи раз. Для Sm отмечено превышение ПДК в воде в 2 раза.

Рис. 3. Пространственное распределение в почве штольни 504: а) Be, Mn; б) Zn, Cd; в) Pb, U; д) La, Dy, Er, в сравнении с кларком

Fig. 3. Spatial distribution of a) Be, Mn; б) Zn, Cd; в) Pb, U; д) La, Dy, Er, in soil of tunnel 504 versus the clark



Для воды штольни 504 характерно преобладание группы легких РЗЭ с ярко выраженной церий-лантановой специализацией. Исходя из представленных данных, можно сделать вывод, что породообразующие минералы (полевые шпаты, биотит, глинистые и фосфатные минералы) исследуемого участка накапливают в себе легкие РЗЭ, которые в дальнейшем при естественном вымывании попадают в водную среду [21–26].

Таким образом, можно сделать вывод, что в воде штольни 504 выявлены аномально высокие концентрации большинства химических элементов.

Следует отметить, что для исследуемого объекта выявлены благоприятные геохимические условия для миграции химических элементов, в частности кислые значения pH воды (<5,5).

Исследование пространственного распределения элементов в грунте припортового участка штольни 504

Накопление тяжелых металлов и токсичных элементов в почве является показателем ее загрязненности, при этом она может быть и источником вторичного загрязнения среды. Оценка содержания исследуемых химических элементов в почве на припортовом участке штольни 504 выполнена относительно кларка литосферы и ПДК [27].

Для некоторых элементов, которые присутствуют в аномальном количестве, построены карты-схемы пространственного распределения элементов (рис. 3).

Анализ данных карт показал, что повышенное содержание элементов в почве локализовано непосредственно в местах водотока, т. е. в русле. Все эти данные подтверждают, что источником поступления элементов в почву служит непосредственно водная среда. Пространственное распределение исследуемых элементов в почве штольни 504 неоднородно, большая часть элементов концентрируется севернее русла водотока. По ширине профиля уровень содержания большинства элементов в почве на удалении 20 м от русла уменьшается в десятки раз. По длине (расстояние от 50 до 150 м от портала штольни) профиля большая часть аномальных элементов, обнаруженных в воде, постепенно осаждается в почве. Необходимо отметить, что концентрация Al и Li в почве ниже значения кларка литосферы, осаждение данных элементов в почве возможно за пределами участка исследования.

Полученные данные по пространственному распределению элементов в почве штольни 504 позволяют условно выделить участки с относительным содержанием в них элементов. Первый участок, где содержание элементов в почве незначительно и находится на уровне кларка либо ниже этого значения (условно фоновый участок). Второй участок с повышенным содержанием элементов (условно загрязненный участок), подверженный влиянию штольневых водотоков, где концентрации элементов превышают предельно допустимые уровни (рис. 4).

Среднее содержание элементов на фоновых и загрязненных участках представлено в табл. 2.

Необходимо отметить, что среднее содержание свинца и урана в некоторых фоновых точках превышает показатель кларка в 2 раза. Превышения пре-

дельно допустимых концентрации элементов на исследуемом фоновом участке почвы не обнаружено.

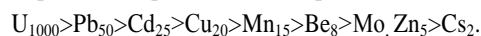
Как видно из таблицы, среднее содержание большинства элементов в почве штольни 504, отобранных на загрязненном участке, характеризуется значительными пределами колебаний, в особенности для Cu, Pb и U.



Рис. 4. Схема пространственного распределения элементов в почве штольни 504

Fig. 4. Scheme of spatial distribution of elements concentrations in soil of tunnel 504

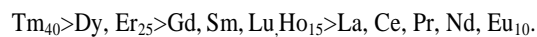
На загрязненном участке штольни 504 проведен сравнительный анализ содержания химических элементов в почве с показателями кларка и ПДК для почв. Зависимость превышения концентрации элементов на загрязненном участке значения кларка представлена в следующем убывающем ряду (индекс – кратность превышения кларка):



Из убывающего ряда видно, что превышение значения кларка для урана на загрязненных участках штольни 504 на порядки выше, чем у остальных элементов. Также незначительное превышение значения кларка на загрязненном участке выявлено у цезия.

Сравнение полученных данных на загрязненных участках со значением предельно-допустимых концентраций химических элементов для почвы выявило превышение у Pb (26 ПДК), Mn и Cu (9 ПДК). Содержание таких элементов, как Be, Zn и Cd, на исследуемом загрязненном участке находится на уровне 1 ПДК в почве.

Данные по содержанию исследуемых РЗЭ в почве на загрязненном участке относительно кларка в почвах мира представлено в следующем убывающем ряду (индекс – кратность превышения кларка):



Из убывающего ряда видно, что превышение показателя кларка в почве штольни 504 наиболее выражено для группы тяжелых РЗЭ.

Исследование содержания элементов в растениях водотока штольни 504

В русле водотока 504 штольни в основном произрастают такие доминантные виды растений, как тростник, осока, вейник, которые относятся к гидрофитам, и караган из группы мезофитов. По мере удаления от русла водотока в основном произрастают ксерофитные растения (менее влаголюбивые) – ко-

выль и полынь. При этом ареал произрастания большинства исследуемых гидро- и мезофитных растений

расположен к середине профиля, в местах повышенного содержания в воде химических элементов.

Таблица 2. Среднее содержание химических элементов в почве штольни 504, мг/кг

Table 2. Average content of chemical elements in acid soil extracts from tunnel 504, mg/kg

Элементы Elements	Фоновый участок Background area (n=13)		Загрязненный участок Contaminated area (n=8)		Кларк в почвах мира Clarke in soil worldwide [26]	ПДК МРС [26]
	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	C_{\max}/C_{\min}	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	C_{\max}/C_{\min}		
Be	3,0±0,1	1,5	46±1	4,0	6	50
Al	10900±70	12	24000±70	5,5	80500	–
Mn	790±6	7,3	14000±60	30	1000	1500
Cu	13,0±0,2	4,0	960±8	100	47	100
Zn	65±1	5,5	380±3	8,5	83	300
Mo	1,6±0,1	3,1	6,0±0,1	3,5	1,1	–
Cd	0,60±0,02	3,0	3,2±0,1	7,8	0,13	3
Cs	1,50±0,01	1,7	6,3±0,1	11	3,7	–
La	26±1	2,6	300±3	12	29	–
Ce	51±1	2,2	800±7	17	70	–
Pr	5,8±0,1	2,1	100±1	18	9	–
Nd	22±1	2,5	420±3	20	37	–
Sm	4,0±0,1	2,3	120±1	26	8	–
Eu	0,50±0,01	2,5	10,0±0,1	24	1,3	–
Gd	4,8±0,1	3,3	130±1	18	8	–
Dy	4,0±0,1	4,0	130±1	20	5	–
Ho	0,80±0,01	4,0	24,0±0,2	19	1,7	–
Er	2,7±0,1	3,7	77±1	20	3,3	–
Tm	0,40±0,01	4,0	11,0±0,1	18	0,27	–
Lu	0,30±0,01	3,7	12,0±0,1	23	0,8	–
Pb	30±2	9	840±2	135	16	32
U	5,0±0,3	29	2700±20	69	2,5	–

Примечание: $\bar{x} \pm S\bar{x}$ – среднее содержание и СКО элементов; C_{\max}/C_{\min} – размах колебаний концентрации элементов.

Note: $\bar{x} \pm S\bar{x}$ – average content and MSD of elements; C_{\max}/C_{\min} – fluctuation amplitude of elements concentrations.

Для сравнения взяты пробы растений, отобранных с условно фоновой и загрязненной участков. В табл. 3 представлено среднее содержание элементов в сухой массе растений относительно их кларка растительности суши.

При сравнении полученных данных со значением кларка растительности суши выявлено превышение содержания в исследуемых видах растений таких элементов, как Be, Mn, Cd, Zn, Pb и U. Повышенное содержание данных элементов отмечено в исследуемых пробах воды и почвы.

Анализ данных таблицы показал, что из гидрофитных растений на загрязненном участке только осока накапливает повышенные концентрации Cs, U и редкоземельных элементов. Среднее содержание Cs и исследуемых РЗЭ в осоке на загрязненном участке превышает их фоновые концентрации в десятки раз, а U – в сотни раз (табл. 3).

Мезофиты (карагана), произрастающие на загрязненном участке, накапливают относительно фоновой участка в повышенных концентрациях такие элементы, как Be, Cd, Pb и U. Так, в карагана среднее содержание Be, Cd, Pb на загрязненном участке превышает значение фона в 40–50 раз, тогда как U – в тысячу раз. Необходимо также отметить, что концентрация Be, Cd и U в карагана на фоновом участке находилась на уровне пределов обнаружения.

В ксерофитных растениях накапливаются те же элементы, что и в мезофитах, – Be, Pb и U. Так, в полыни среднее содержание Be и Pb на загрязненном участке превышает их фоновые концентрации в

30–60 раз, тогда как концентрация урана – в 800 раз. Следует отметить, что в ковыли концентрация Be и Pb на сравниваемых участках меняется незначительно, а содержание урана превышает фон в 350 раз (табл. 3).

Для оценки накопления химических элементов в растениях был использован коэффициент биологического поглощения, который представляет собой отношение концентрации химических элементов в сухой массе растения к его содержанию в почве [29]. По значению коэффициента в вышеуказанных видах растений накопление элементов слабое (0,1–1).

В отобранных пробах растений на загрязненном участке замечено повышенное содержание Be, Cd, Cs, Pb, U и РЗЭ. Для большинства видов растений штольни 504 выявлено максимальное накопление урана, превышающее их фоновые значения в сотни и тысячу раз. Таким образом, химический состав растений штольни 504 отражает элементный состав почвы.

Так, содержание элементов в большинстве видов растений (осока, карагана, ковыль и полынь) зависела от места его произрастания – на загрязненном участке почвы или на фоновом. Однако концентрация исследуемых элементов в таких видах растений, как тростник и вейник, на сравниваемых участках менялась незначительно, что, видимо, обусловлено наличием физиолого-биохимических механизмов, препятствующих их поступлению. Как показали результаты элементного анализа, процесс накопления химических элементов в представленных видах растений зависит от физиологических особенностей растений и их отношения к влажности.

Таблица 3. Содержание элементов в некоторых видах растений припортового участка штольни 504, мг/кг
Table 3. Content of elements in some plant species at the near-entry spot of tunnel 504, mg/kg

Элементы Elements	вейник bluejoint (n=10)	тростник reed (n=8)	осока sedge (n=4)	карагана pea tree (n=2)	ковыль mat-grass (n=11)	полюнь fleabane (n=7)		Кларк в растительности суши Clarke for land vegetation [28]				
	участок/area											
	фоновый background	загрязненный contaminated	фоновый background	загрязненный contaminated	фоновый background	загрязненный contaminated	фоновый background		загрязненный contaminated			
Be	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,8±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 2,0±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,8±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 2,9±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,4±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 4,6±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,20±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,0±0,1	0,1		
Mg	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 440±22	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 470±25	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 580±29	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 600±30	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 810±41	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 620±31	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 650±33	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 770±38	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1030±51	670±33	–	
Al	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 110±6	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 77±4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 87±4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 125±6	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 130±7	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 140±7	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 43±2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 200±10	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 330±17	130±7	–	
K	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 930±47	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 740±39	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1200±60	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1370±69	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1700±85	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1480±74	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 990±49	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 890±45	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 550±28	1100±55	–	
Ca	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 107±5	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 81±4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 90±5	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 85±4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 240±12	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 180±9	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 590±30	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 440±22	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 82±4	100±5	–	
V	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,20±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,10±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,090±0,005	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,080±0,004	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,30±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,20±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,080±0,004	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,40±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,30±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,70±0,03	0,20±0,01	1,5
Cr	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,10±0,05	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,2±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,50±0,03	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,60±0,05	<п.о.	1,8
Mn	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1050±53	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1300±70	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1200±59	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1200±59	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 620±30	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 2900±140	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 100±5	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 330±17	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 30±2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 56±3	580±29	205
Fe	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 74±4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 47±3	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 52±3	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 53±3	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 120±6	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 103±5	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 52±3	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 150±8	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 120±6	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 59±3	97±5	–
Co	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,040±0,001	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,040±0,001	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,050±0,001	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,10±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,060±0,004	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,10±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,030±0,001	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,10±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,050±0,003	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,020±0,001	0,10±0,01	0,5
Ni	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,80±0,06	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,50±0,03	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,40±0,04	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,80±0,05	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,80±0,06	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,3±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,20±	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 3,0±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,30±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	1,6±0,1	–
Cu	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 2,5±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 3,1±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 4,5±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 7,4±0,4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 4,2±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 7,7±0,4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 4,0±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 6,9±0,3	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 2,8±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 2,4±0,1	7,0±0,4	8,0
Zn	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 48±2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 67±4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 106±5	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 140±7	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 61±3	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 210±10	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 40±2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 93±5	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 7,8±0,4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 14±1	100±5	30
Ga	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,3±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,50±0,03	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,6±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,70±0,03	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 3,0±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,4±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 4,4±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 2,0±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 4,2±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 3,2±0,2	2,2±0,1	0,05
Sr	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 15±1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 11±1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 23±1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 18±1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 26±1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 22±1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,3±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,20±0,01	1,0±0,1	0,03
Cd	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,30±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,20±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,60±0,003	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,20±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,040±0,005	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,50±0,03	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 770±38	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 300±15	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 170±9	670±33	0,12
Cs	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,050±0,003	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,40±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,050±0,003	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,60±0,03	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,20±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 650±33	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 770±38	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 120±6	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 58±3	130±7	22,5
Ba	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 7,4±0,4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 3,1±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 9,0±0,5	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 3,6±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 18±1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 7,7±0,4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 43±2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 200±10	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 460±23	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 550±28	1100±55	0,8
La	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,30±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,70±0,04	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,30±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 2,1±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,10±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 7,6±0,4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 990±49	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 890±45	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 82±4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 44±2	100±5	–
Ce	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,40±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,2±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,50±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 3,9±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,20±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 15±1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 590±30	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 440±22	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,30±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,10±0,01	0,20±0,01	–
Pr	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,040±0,002	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,10±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,050±0,003	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,40±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,015±0,001	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,5±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,080±0,004	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,40±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,30±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,10±0,01	0,20±0,01	–
Nd	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,20±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,50±0,03	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,240±0,001	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,6±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,090±0,005	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 6,3±0,3	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,50±0,03	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ <п.о.	<п.о.	–
Sm	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,040±0,002	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,10±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,050±0,003	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,40±0,02	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,020±0,001	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,6±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 100±5	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 330±17	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 30±2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 56±3	580±29	–
Pb	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,90±0,04	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,70±0,04	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,60±0,03	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 3,2±0,2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,60±0,03	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 2,7±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 52±3	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 150±8	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 120±6	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 59±3	97±5	1,25
U	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,50±0,03	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,0±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 1,2±0,1	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 8,0±0,4	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,040±0,002	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 30±2	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,030±0,001	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,10±0,01	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,050±0,003	$\bar{x} \pm S\bar{x}$ 0,020±0,001	0,10±0,01	0,02

Примечание: $\bar{x} \pm S\bar{x}$ – среднее содержание и СКО элементов.

Note: $\bar{x} \pm S\bar{x}$ – average content and MSD of elements.

Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что пространственное распределение элементов на площадке штольни 504 связано, прежде всего, с выносом химических элементов штольневыми водами. В воде штольни 504 выявлено порядка десяти элементов, превышающих значения кларка и предельно допустимые уровни. Концентрация большинства элементов в почве на удалении 20 м от русла водотока уменьшается в десятки раз. В растениях штольни 504 отмечено накопление тех же элементов, что в почве и в воде. Для

большинства видов растений штольни 504 выявлено содержание урана, превышающее его фоновое значение в сотни и тысячи раз. Как было отмечено выше, для исследуемого объекта выявлены благоприятные геохимические условия для миграции химических элементов, в частности кислые значения pH воды (<5,5).

Авторы статьи выражают благодарность всем сотрудникам Института Радиационной Безопасности и Экологии НЯЦ РК за оказанную помощь в организации полевых и лабораторных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акчурин И.А. Семипалатинский ядерный полигон: создание, становление, деятельность. – М.: М-во обороны Российской Федерации, 12 Центральный науч.-исслед. ин-т, 2007. – 225 с.
2. Логачев В.А. Ядерные испытания СССР: современное радиоэкологическое состояние полигона. – М.: ИздАТ, 2002. – 639 с.
3. Subbotin S.B., Dubasov Yu.V. Radioactive contamination of water of the Degelen mountain massif // Radiokhimiya. – 2013. – V. 55. – № 6. – P. 561–567.
4. Aidarkhanova A.K., Lukashenko S.N. Investigation of character of distribution of radioactive contamination in the «water–sediments» system of Semipalatinsk Test Site and adjacent territories // ENVIRA 2015 International Conference proceedings. – Greece, 2015. – P. 295.
5. Геохимический фон СИП. Микроэлементы в почвах участков, прилегающих к горному массиву Дегелен / А.А. Амиров, С.Н. Лукашенко, С.Б. Субботин, В.Д. Кириллов, В.П. Солодунин, Н.М. Бердинова, Д.А. Желтов // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана: Вып. 2 Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007–2009 гг. – Павлодар: Дом печати, 2010. – С. 451–460.
6. Торопов А.С., Рихванов Л.П., Есильканов Г.М. Пространственное распределение форм нахождения радионуклидов в воде ручья Карабулак Семипалатинского испытательного полигона // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 12. – С. 6–15. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1954> (дата обращения 13.09.2019).
7. Отчет «Программа работ по гидрогеологическому обследованию горного массива Дегелен после закрытия штолен (договор HDTRA 0023/2 от 1 марта 1999 года)». – Курчатов: «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», «Институт геофизических исследований», 1999. – 72 с.
8. ГОСТ Р 51592-2000. Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 8 с.
9. Отбор проб объектов окружающей среды и биосубстратов для элементного анализа: РИ 03-02-07 (А). – Курчатов: ИРБЭ НЯЦ РК, 2015. – 18 с.
10. ГОСТ 26449.1–85. Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы анализа соленых вод. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 101 с.
11. Определение содержания токсичных элементов в пищевых продуктах и продовольственном сырье. Методика автоклавной пробоподготовки: методические указания 4.1.985-00. – М.: Минздрав России, 2000. – 19 с.
12. Подготовка проб для элементного анализа методом автоклавного разложения. Рабочая инструкция – РИ 03-02-03 (А). – Курчатов: Центр радиоэкологических исследований, филиал ИРБЭ НЯЦ РК, 2014. – 12 с.
13. Подготовка проб объектов окружающей среды и биологического субстрата для элементного анализа. Рабочая инструкция – РИ 03-02-08 (А). – Курчатов: Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП Национальный ядерный центр, 2015. – 15 с.
14. Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) P. 2: Determination of 62 elements. ISO 17294-2:2003 (E). – Switzerland, 2003. – 30 p. URL: <https://www.iso.org/standard/36127.html> (дата обращения 13.09.2019).
15. Берестнева О.Г., Муратова Е.А., Уразасв А.М. Компьютерный анализ данных. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 204 с.
16. Плохинский Н.А. Биометрия. – М.: МГУ, 1970. – 367 с.
17. Лукашенко С.Н., Амиров А.А. Факторы формирования загрязнения тяжелыми металлами припортовых участков площадки «Дегелен». Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Вып. 3. Сборник трудов национального ядерного центра РК за 2011 / под рук. Лукашенко С. Н. – Павлодар: Дом печати, 2011. – С. 295–314.
18. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 354 с.
19. Bernd Markert. Inorganic chemical fingerprinting of the environment: «reference freshwater» – a useful tool for comparison and harmonization of analytical data in freshwater chemistry // Fresenius' Journal of Analytical Chemistry. – 1994. – V. 349. – Iss. 10–11. – P. 697–702. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00325642> (дата обращения 12.02.2020).
20. Санитарно-эпидемиологические требования к водоемностям, местам водозабора для хозяйственно-питьевых целей, хозяйственно-питьевому водоснабжению и местам культурно-бытового водопользования и безопасности водных объектов: утв. постановлением Правительством Республики Казахстан от 18 января 2012 года № 104.
21. Чудаев О.В., Чудаева В.А. Микроэлементы и элементы редкоземельной группы в минеральных водах Приморья // Геология и горное дело в Приморье прошлом, настоящем и будущем. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – С. 93–96.
22. Seasonal and spatial variations in rare earth elements and yttrium of dissolved load in the middle, lower reaches and estuary of the Minjiang River, southeastern China / Xuxu Zhu, Aiguo Gao, Jianjie Lin, Xing Jian, Yufeng Yang, Yanpo Zhang, Yuting Hou, Songbai Gong // Journal of Oceanology and Limnology. – 2018. – V. 36. – Iss. 3. – P. 700–716. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00343-018-6207-9> (дата обращения 13.09.2019).
23. Geochemical behaviour of rare earth elements (REE) along a river reach receiving inputs of acid mine drainage / M. Olias, C.R. Cánovas, M.D. Basallote, A. Lozano // Chemical Geology. – 2018. – V. 493. – P. 468–477. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009254118303310> (дата обращения 13.09.2019).
24. Rare earth element patterns as process indicators at the water–solid interface of a post-mining area / A. Grawunder, M. Lonschinski, M. Händel, S. Wagner, D. Merten, D. Mirgorodsky, G. Büchel // Applied Geochemistry. – 2018. – V. 96. – P. 138–154. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292718300957> (дата обращения 13.09.2019).
25. Eker Ç.S., Kiliç E.D. Geochemistry of Çoruh River Bed Sediments in NE Turkey: implications in weathering-sedimentary cycle, provenance, and metal pollution // Geochemistry International. – 2018. – V. 56. – Iss. 6. – P. 579–600. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0016702918060095> (дата обращения 13.09.2019).
26. Sojka M., Siepak M., Pietrewicz K. Concentration of Rare Earth Elements in surface water and bottom sediments in Lake Wadąg, Poland // Journal of Elementology. – 2018. – V. 24 (1). – P. 125–140. URL: <http://jsite.uwm.edu.pl/articles/view/1648/> (дата обращения 13.09.2019).

27. Klope A. Richwerte 80, Orientierungsdaten fur tolerier bare Gesamtgehalteinger Elemente in Kulturboden // Metteilunger VDLUFA. – 1980. – Н. 1–3. – S. 9–11.
28. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: ИЦ «Академия», 2003. – 400 с.
29. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. – М.: Астрель, 2000. – 715 с.

Поступила 02.09.2020 г.

Информация об авторах

Шакенов Е.З., магистр биологии, инженер Института радиационной безопасности и экологии.

Дюсембаева М.Т., кандидат биологических наук, начальник лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии.

Лукашенко С.Н., доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиохимии и аналитической химии Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии.

Темиржанова А.Е., инженер Института радиационной безопасности и экологии.

Есильканов Г.М., инженер Института радиационной безопасности и экологии.

Мухамедияров Н.Ж., инженер Института радиационной безопасности и экологии.

UDC 661.879.1:622.258.4:551.49:539.16

SPATIAL DISTRIBUTION OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE STREAMFLOW OF TUNNEL 504 AT «DEGELEN» SITE

Yerbol Z. Shakenov¹,
shakenov@nnc.kz

Madina T. Dyusembayeva¹,
koigeldinova@nnc.kz

Sergey N. Lukashenko²,
lukashenko.1962@mail.ru

Aray Ye. Temirzhanova¹,
temirzhanova@nnc.kz

Gani M. Yesilkanov¹,
al-g_007@mail.ru

Nurlan Zh. Mukhamediyarov¹,
mukhamediyarov@nnc.kz

¹ Institute of Radiation Safety and Ecology,
2, Beibit atom street, Kurchatov, 071100, Kazakhstan.

² Russian Scientific Research Institute of Radiobiology and Agroecology,
109 km, Kiev highway, Obninsk, 249032, Russia.

Relevance of the research is caused by the necessity of obtaining up-to-date data on concentrations of chemical elements in the «water–soil–plant» system on the near-entry spot of tunnel 504 of «Degelen» site at the former Semipalatinsk Test Site. During flooding in spring, elements may be carried out beyond tunnel 504.

The main aim of the research is to study spatial distribution of chemical elements in the «water–soil–plant» system in the streamflow of tunnel 504. To achieve this goal, the following tasks were set: 1) determine concentration levels of chemical elements in water; 2) study concentration levels of chemical elements in soil; 3) identify features of chemical elements accumulation in plants of tunnel 504.

Methods. The ultimate composition of water was determined by inductively-coupled plasma mass-spectrometry (Elan 9000 «Perkin Elmer SCIEX»), inductively-coupled plasma atomic emission spectrometry («iCAP 6300 Duo» Thermo Scientific). The analysis of such indicators as total mineralization, the content of sulfates, hydrocarbonates, chlorides, calcium, magnesium and sodium was carried out using titrimetric, colorimetric, potentiometric techniques in accordance with GOST.

Results. The analysis of the data obtained for water showed a high content of such elements as Li, Be, Al, Mn, Zn, Rb, Sr, Cd, Cs, La, Ce, U the average content of which exceeds the clarke several times for groundwater of the arid climate (sulfate water). The excess of maximum permissible levels of such elements as Be (2800 MPC), Mn (260 MPC), Al (76 MPC), U (70 MPC) and Cd (50 MPC) has been registered for water. According to the latest data, the content of such elements as Li, Be, Al in water was found to increase by 2 times whereas that of Co, Ni and Cu – by dozens of times. Spatial distribution of elements of interest in soil of tunnel 504 is non-uniform. Most of elements are concentrated in soil to the north of the streamflow bed. An elevated content of such elements as Be, Mn, Cu, Zn, Mo, Cd, Cs, Pb and U was detected in this area exceeding the clarke of lithosphere. The high index of lithosphere clarke value excess was found for uranium concentration (1000 times). Comparison of findings for contaminated areas with values of maximum permissible concentrations of chemical elements in soil showed the excess for Pb (26 MPC), Mn and Cu (9 MPC). Chemical composition of water and soil of tunnel 504 is unique by the content of rare-earth elements. The average content of REE in water exceeds the clarke by thousand times in ground water of the arid climate and STS ground water. The excess of the maximum permissible concentration level of samarium was observed in water. Predominance of light REE is characteristic, with a pronounced cerium-lanthanum feature. This fact shows that metals in water originate from natural sources. For most plant species of tunnel 504 an elevated content of Be, Cd, Cs, Pb, U and a number of REE was detected in the contaminated area. Concentrations of elements of interest in such plant species as reed and bluejoint in areas being compared, varied insignificantly which is apparently attributed to some physiological and biochemical mechanisms that impede the intake. Based on the above, one can conclude that spatial distribution of elements at tunnel 504 is first of all related to chemical elements carried out by tunnel water. About ten elements exceeding clarke values and maximum permissible levels were detected in water of tunnel 504.

Key words:

Semipalatinsk Test Site, «Degelen» site, tunnel, chemical elements, maximum permissible concentration, clarke, rare-earth elements.

The authors express thanks to all colleagues of the Institute of Radiation Safety and Ecology SRC RK for assistance in field and laboratory research.

REFERENCES

1. Akchurin I.A. *Semipalatinskiy yaderny poligon: sozдание, stanovlenie, deyatel'nost'* [Semipalatinsk nuclear test site: creation, formation, activity]. Moscow, Defense Ministry of the Russian Federation Publ., 2007. 225 p.
2. Logachev V.A. *Yadernye ispytaniya SSSR: sovremennoe radioekologicheskoe sostoyaniye poligona* [Nuclear tests of the USSR: the current radioecological state of the landfill]. Moscow, Izdat Publ. house, 2002. 639 p.
3. Subbotin S.B., Dubasov Yu.V. Radioactive contamination of water of the Degelen mountain massif. *Radiokhimiya*, 2013, vol. 55, no. 6, pp. 561–567.
4. Aidarkhanova A.K., Lukashenko S.N. Investigation of character of distribution of radioactive contamination in the «water–sediments» system of Semipalatinsk Test Site and adjacent territories. *ENVI-RA 2015 International Conference proceedings*. Greece, 2015. pp. 295.
5. Amirov A.A., Lukashenko S.N., Subbotin S.B., Kirillov V.D., Solodukhin V.P., Berdinova N.M., Zheltov D.A. Geochemical background of STS. Trace elements in soils of sites adjacent to Degelen mountain massif. *Topical Issues in Radioecology of Kazakhstan. Proc. of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan for the 2007–2009*. Ed. by S.N. Lukashenko. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2010. Vol. 2, Iss. 3, pp. 451–460.
6. Toropov A.S., Rikhvanov L.P., Yessilkanov G.M. Spatial distribution of radionuclide speciation in Karabulak stream of the Semipalatinsk Test Site. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 12, pp. 6–15. In Rus. Available at: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1954> (accessed 13 September 2019).
7. *Otchet «Programma rabot po gidrogeologicheskomu obsledovaniyu gornogo massiva Degelen posle zakrytiya shtolen (dogovor HDTRA 0023/2 ot 1 marta 1999 goda)»* [Report «Work program for hydrogeological survey of the Degelen mountain massif after the adits were closed (contract HDTRA 0023/2 of March 1, 1999)»]. Kurchatov, «National Nuclear Centre of the Republic of Kazakhstan», «Institute of Geophysical Research» Publ., 1999. 72 p.
8. *GOST R 51592–2000. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob* [State Standard R 51592–2000. Water. General requirements for sampling.] Moscow, Standard publishing house, 2000. 8 p.
9. *Otbor prob ob'ektov okruzhayushchey sredy i biosubstratov dlya elementnogo analiza: RI 03-02-07 (A)* [Sampling of environmental objects and biosubstrates for elemental analysis: RI 03-02-07 (A)]. Kurchatov, IRSE NNC RK, 2015. 18 p.
10. *GOST 26449.1–85. Ustanovki distillyatsionnye opresnitelnye stacionarnye. Metody analiza solenyykh vod* [State Standard 26449.1–85. Stationary distillatory desalination units. Methods for analysis of salt waters]. Moscow, Standard publishing house, 2003. 101 p.
11. *Opreделение содержания токсичных элементов в пищевых продуктах и продовольственном сырье. Methodika avtoklavnoy probopodgotovki: metodicheskie ukazaniya 4.1.985-00* [Determination of the content of toxic elements in food products and food raw materials. Autoclave sample preparation procedure: Methodological instructions 4.1.985-00]. Moscow, Ministry of Health of Russia Publ., 2000. 19 p.
12. *Podgotovka prob dlya elementnogo analiza metodom avtoklavnoy razlozheniya. Rabochaya instruktsiya – RI 03-02-03 (A)* [Preparation of samples for elemental analysis by autoclave decomposition. Work instruction - RI 03-02-03 (A)]. Kurchatov, Center for Radioecological Research, Branch of IRSE NNC RK Publ., 2014. 12 p.
13. *Podgotovka prob ob'ektov okruzhayushchey sredy i biologicheskogo substrata dlya elementnogo analiza. Rabochaya instruktsiya* [Preparation of samples of environmental objects and biological substrate for elemental analysis. Work instruction – RI 03-02-08 (A)]. Kurchatov, Branch of IRSE NNC RK Publ., 2015. 15 p.
14. *Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) P. 2: Determination of 62 elements. ISO 17294-2:2003 (E)*. Switzerland, 2003. 30 p. Available at: <https://www.iso.org/standard/36127.html> (accessed 13 September 2019).
15. Berestneva O.G., Muratova E.A., Urazaev A.M. *Kompyuterny analiz dannykh* [Computer data analysis]. Tomsk, TPU Publ. House, 2003. 204 p.
16. Plokhinsky N. A. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow, Moscow State University Publ., 1970. 367 p.
17. Lukashenko S.N., Amirov A.A. Factors forming contamination with heavy metals at near-portal areas of Degelen site. *Topical Issues in Radioecology of Kazakhstan. Proceedings of the National Nuclear Center of Kazakhstan for 2010*. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2010. Iss. 3, vol. 2, 390 p.
18. Shvartsev S.L. *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry of the zone of hypergenesis]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 354 p.
19. Bernd Markert. Inorganic chemical fingerprinting of the environment: «reference freshwater» – a useful tool for comparison and harmonization of analytical data in freshwater chemistry. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1994, vol. 349, Iss. 10–11, pp. 697–702. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00325642> (accessed 12 February 2020).
20. *Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k vodoistochnikam, mestam vodozabora dlya khozyaystvenno-pityevykh tseley, khozyaystvenno-pityevomu vodosnabzheniyu i mestam kulturno-bytovogo vopolzovaniya i bezopasnosti vodnykh ob'ektov: utv. postanovleniem Pravitelstva Respubliki Kazakhstan ot 18 yanvarya 2012 goda № 104* Sanitary and epidemiological requirements for water sources, places of water intake for household and drinking purposes, domestic and drinking water supply, and places for cultural and domestic water use and the safety of water bodies: approved. Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan dated January 18, 2012 No. 104.
21. Chudaev O.V., Chudaeva V.A. *Mikroelementy i elementy redkozemel'noy gruppy v mineralnykh vodakh Primorya* [Microelements and elements of the rare-earth group in the mineral waters of Primorye]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2000. pp. 93–96.
22. Xuxu Zhu, Aiguo Gao, Jianjie Lin, Xing Jian, Yufeng Yang, Yanpo Zhang, Yuting Hou, Songbai Gong. Seasonal and spatial variations in rare earth elements and yttrium of dissolved load in the middle, lower reaches and estuary of the Minjiang River, southeastern China. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, vol. 36, Iss. 3, pp. 700–716. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00343-018-6207-9> (accessed 13 September 2019).
23. Olias M., Cánovas C.R., Basallote M.D., Lozano A. Geochemical behaviour of rare earth elements (REE) along a river reach receiving inputs of acid mine drainage. *Chemical Geology*, 2018, vol. 493, pp. 468–477. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009254118303310> (accessed 13 September 2019).
24. Grawunder A., Lonschinski M., Händel M., Wagner S., Merten D., Mirgorodsky D., Büchel G. Rare earth element patterns as process indicators at the water–solid interface of a post–mining area. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 96, pp. 138–154. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292718300957> (accessed 13 September 2019).
25. Eker Ç.S., Kiliç E.D. Geochemistry of Çoruh River Bed Sediments in NE Turkey: Implications in Weathering–Sedimentary Cycle, Provenance, and Metal Pollution. *Geochemistry International*, 2018, vol. 56, Iss. 6, pp. 579–600. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0016702918060095> (accessed 13 September 2019).
26. Sojka M., Siepak M., Pietrewicz K. Concentration of Rare Earth Elements in surface water and bottom sediments in Lake Wadąg, Poland. *Journal of Elementology*, 2018, vol. 24 (1), pp. 125–140. Available at: <http://jsite.uwm.edu.pl/articles/view/1648/> (accessed 13 September 2019).
27. Klope A. Richwerte 80, Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehaltseinger Elemente in Kulturboden, Mitteilung. *VDLUF*, 1980, no. 2, pp. 9–11.
28. Dobrovolsky V.V. *Osnovy biogeokhimi* [Fundamentals of biogeochemistry]. Moscow, Akademiya Publ. Center, 2003. 400 p.
29. Perelman A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, Astreya Publ., 2000. 715 p.

Received: 2 September 2020.

Information about the authors

Yerbol Z. Shakenov, master of Biology, engineer, Institute of Radiation Safety and Ecology.

Madina T. Dyusembayeva, Cand. Sc., head of the ultimate analysis laboratory, Institute of Radiation Safety and Ecology.

Sergey N. Lukashenko, Dr. Sc., chief researcher, Russian Scientific Research Institute of Radiobiology and Agroecology.

Aray Ye. Temirzahnova, engineer, Institute of Radiation Safety and Ecology.

Gani M. Yesilkanov, engineer, Institute of Radiation Safety and Ecology.

Nurlan Zh. Mukhamediyarov, engineer, Institute of Radiation Safety and Ecology.

УДК 621.311.25: 621.311.26

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И СОЛНЕЧНЫХ СТАНЦИЙ

Манусов Вадим Зиновьевич¹,
Manusov36@mail.ru

Лемешко Борис Юрьевич¹,
lemeshko@ami.nstu.ru

Халдаров Шерзод Камалханович¹,
haldaroff@mail.ru

¹ Новосибирский государственный технический университет,
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

Актуальность. Мощность, выдаваемая генерирующими станциями на возобновляемых источниках энергии, ветроэнергетическими и солнечными, зависит от состояния природной среды в конкретной географической точке, доминирующих скоростей ветра и уровня солнечной инсоляции. Закономерности, характеризующие скорости ветра и солнечную инсоляцию, зависят от местности, времени года и носят вероятностный характер. Это значит, что вероятностный характер имеет и мощность, выдаваемая генерирующими станциями на возобновляемых источниках энергии. Риски, связанные с неточным знанием вероятностных закономерностей, описывающих эти источники, а также непредсказуемость (неопределённость) природной среды являются причинами, из-за которых системные операторы не учитывают такие станции в расчетах баланса мощности. Это, в свою очередь, не позволяет рассматривать генерирующие станции на возобновляемой энергии как полноценных участников рынка, прикрывая поток инвестиций в подобные проекты. Уточнение законов распределения вероятностей скорости ветра и солнечной инсоляции на основании статистического анализа соответствующих рядов измерений, а также уточнение на их основе законов распределения вероятностей для мощности соответствующих электростанций может оказать существенную помощь системному оператору при прогнозировании мощности, генерируемой станциями на «зеленой» энергии.

Цель: построение моделей законов распределения, наилучшим образом описывающих результаты наблюдений скорости ветра и солнечной инсоляции, а также моделей законов распределения для вырабатываемой мощности ветроэнергетической и солнечной станций.

Методы: методы оценки параметров законов распределения, методы проверки статистических гипотез.

Результаты. Показано, что в отличие от наиболее часто используемого в этих целях закона Вейбулла, наилучшими моделями законов распределения вероятностей для рядов измерения скорости ветра и солнечной инсоляции на рассматриваемой территории являются законы семейства бета-распределений 3-го рода, а также смеси этих законов. То же самое касается описания распределения вероятностей мощности ветроэнергетической и солнечной станций. Построены модели законов распределения (по месяцам) для скорости ветра, солнечной инсоляции и мощности соответствующих станций. Показано, что на основании закона распределения скорости ветра и математических соотношений, связывающих мощность со скоростью ветра, можно строить хорошие модели для распределений вероятностей мощности ветроэнергетических станций. Построенные модели могут использоваться в качестве вспомогательного инструмента для системных операторов энергосистем для прогнозирования выдаваемой мощности.

Ключевые слова:

Законы распределения вероятностей, возобновляемые источники энергии, распределение вероятностей выдаваемой мощности, бета-распределения III рода.

Введение

Несмотря на существенные плюсы, связанные с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на ветровых и солнечных электрических станциях, одним из основных минусов остается плохая прогнозируемость выработки электроэнергии такими станциями, что связано со стохастическим характером ВИЭ. Этот факт доставляет массу неудобств системному оператору энергосистемы, как основному регулятору на рынке электроэнергии и мощности. Он сдерживает также возможные инвестиции в «зеленые проекты». При проектировании приходится учитывать, что выработка электроэнергии на солнечной и ветровой электростанциях, зависящих от солнечной радиации и скорости ветрового потока, не совпадает по времени, и в совокупности их выработка может не

совпадать по времени с распределением спроса на электроэнергию. Очевидно, что проектирование и использование таких систем независимо друг от друга делает каждый из проектов более дорогостоящим из-за больших затрат на накопители энергии [1], а также приводит к снижению надежности общей системы. Более предпочтительным представляется использование гибридных систем в сочетании с накопителями энергии уже с меньшими габаритами. Это может сделать проекты энергосистем на ВИЭ более привлекательными для инвесторов.

Однако в гибридной системе генерируемая мощность также носит стохастический характер, определяемый вероятностными закономерностями, связанными с ВИЭ. Поэтому и здесь возможности прогнозирования, как правило, ограничиваются отсутствием

информации о вероятностных закономерностях, описывающих генерируемую мощность, или качеством этой информации.

Постановка задачи

Вопросам оптимального проектирования гибридных энергетических систем на возобновляемых источниках энергии в целях повышения их доли в выработке электроэнергии и снижения неопределённости в величине генерируемой мощности к настоящему времени посвящено достаточно много работ. Например, в [2] сделана попытка спрогнозировать выработку мощности ветроэнергетической станции с помощью детерминированных и вероятностных методов с целью сделать режим работы таких станций более предсказуемым и приближенным к традиционным генерациям. В работе [3] рассмотрена разработка алгоритма, рассчитывающего оптимальные параметры и габариты солнечной электростанции. В работах [4, 5] рассматриваются определение габаритов и затрат на строительство автономной гибридной электростанции на солнечной и ветровой энергии с помощью численных методов. В [6] для проектирования оптимальной гибридной энергосистемы на ВИЭ, работающей как автономно, так и параллельно с энергосистемой, используется линейное программирование. В данной работе авторы сделали попытку оптимизировать систему с точки зрения габаритов и затрат на строительство станции. В [7, 8] методами статистического анализа подбираются функции распределения вероятностей для вырабатываемой мощности на солнечной и ветровой электростанциях и делается попытка спроектировать подобную гибридную энергосистему. В [9] рассматриваются функции распределения для индекса ясности и возможные приложения для них.

Во многих работах, как, например, в [10], для описания скорости ветра наиболее подходящим считают закон распределения Вейбулла.

В [11] для вероятностного описания скоростей ветра используется распределение Вейбулла, а для описания солнечной инсоляции – гамма-распределения.

По мнению авторов работы [12], для математического описания ветрового режима юго-востока европейской части территории России целесообразно использовать распределение Вейбулла–Гудвича, что при расчете ветроэнергетических ресурсов территории позволит достичь положительного эффекта.

В [13] при анализе результатов измерений скорости ветра, выполненных за четырехлетний период на четырех географических станциях в Бурунди в процессе построения моделей законов распределения предпочтение было отдано бета-распределению 1-го рода.

В [14] при выборе для описания скоростей ветра законов распределения Вейбулла, Рэлея, логнормального, нормального и гамма-распределения адекватность построенных моделей анализировалась графически и проверялась с использованием критерия χ^2 .

В последнее время в исследованиях энергетического потенциала скорости ветра и солнечной радиации при описании вероятностных свойств источников стали использовать более сложные вероятностные модели и больше внимания уделяют проверке адекватности моделей. При этом заметно возрастает число публикаций в этой области.

В работе [15] множество рассматриваемых законов расширилось применяемыми обобщенным распределением экстремальных значений и распределением Накагами, в [16] – расширенным обобщенным распределением Линдли. В [17] дополнительно рассматриваются обратное гауссовское распределение и обобщенное логистическое, а также говорится о построении моделей в виде смесей известных параметрических законов. В работе [18] при построении моделей рассматривается уже 21 параметрический закон и предусматривается построение моделей в виде смесей этих законов. Здесь же рассматриваются вопросы применения различных критериев согласия для проверки адекватности моделей. В [19] подчеркивается, что от точности построения моделей законов для скорости ветра зависит точность прогнозирования средней мощности, выдаваемой ветряной турбиной. Здесь же в качестве возможных моделей дополнительно рассматриваются обобщенное распределение экстремальных значений, каппа-распределение и распределение Уэйкби.

В работе [20] делается попытка решения уже более сложной задачи, связанной с моделированием трехмерного ветрового ресурса Германии, в которой рассматривается модель скорости ветра – сдвига ветра. В модели опираются на данные о скорости ветра у поверхности и данные о скорости ветра при повторном анализе.

В [21] рассматриваются проблемы, связанные с применением различных критериев для проверки адекватности моделей для скорости ветра.

Исследование распределения вероятностей почасового солнечного облучения для города Кумаси в Гане в [22] проводилось с использованием данных за 14 лет. Анализ проводился для выявления закона распределения, наилучшим образом описывающего измерения для каждого месяца в году. В качестве наилучших моделей использовались законы: экспоненциальный, Вейбулла, логнормальный, гамма-распределения и геометрическое распределение. В работе [23] в качестве вероятностных моделей для инсоляции используются законы распределения Вейбулла, нормальное, логнормальное и гамма-распределение, в [24] упор делается на применение бета-распределения 1-го рода, а в [25] дополнительно рассматривается использование распределений логистического, экстремальных значений, обобщенного распределения экстремальных значений. Авторы работы [25] в результате статистического анализа обширных данных солнечной инсоляции за 2000–2008 гг. в районе города Ибадан в Нигерии пришли к заключению, что из множества рассмотренных ими законов наиболее подходящей моделью оказывается логистический закон распределения вероятностей.

Анализ проводимых исследований и опубликованных результатов позволяет говорить о наличии проблем как при построении вероятностных моделей для скорости и солнечной инсоляции, так и при проверке адекватности этих моделей с использованием статистических критериев. Коротко их можно охарактеризовать следующим образом. Во-первых, построить хорошую модель для описания, например, скорости ветра в определённом месте в рамках некоторых простых параметрических моделей можно лишь в редких случаях. Необходимо использовать более широкий круг параметрических законов с возможностью построения моделей в виде смесей этих законов. Во-вторых, при проверке адекватности построенных моделей законов обычно используют критерии согласия. Как правило, критерии используются в условиях проверки сложных гипотез (проверка осуществляется по той же выборке, по которой оценивались параметры закона). В таких ситуациях распределения статистик критериев чаще всего неизвестны, что является частым источником некорректности выводов. Третья проблема связана с качеством статистических данных. Хорошую модель часто удается построить и по результатам измерений, фиксируемым с существенными ошибками округления, а использование статистического критерия в той же ситуации может привести к неверному выводу, отклоняющему эту модель.

На основании качественных статистических данных (отражающих закономерности) измерений скорости ветра и солнечной инсоляции можно строить более точные модели законов распределения вероятностей для каждого из возобновляемых источников энергии.

Используя эти модели и математические соотношения, связывающие скорость ветра с мощностью ветроэнергетической установки (ВЭУ) и солнечную инсоляцию с мощностью, выдаваемой солнечной панелью, можно, используя статистическое моделирование, строить модели законов распределения для мощностей, генерируемых ВЭУ и солнечной электростанцией, соответственно.

Таким же образом на базе уже этих моделей можно моделировать распределение вероятностей мощности, генерируемой гибридной системой заданной конфигурации, для чего нет принципиальных трудностей. Это, в свою очередь, открывает возможность использовать полученные закономерности при проектировании гибридной системы, например, для оптимального подбора параметров накопителя, как резервирующего источника. А при существующей гибридной системе появляется возможность для прогнозирования и учета этой информации системным оператором энергосистемы в процессе принятия решений.

Построение моделей законов распределения для скорости ветра

В настоящей работе использовались выборки с результатами измерений скорости ветра V по месяцам, зафиксированные на высоте 10 м в районе Кордай, Казахстан, в январе–декабре 2016 г. Объёмы выборок от 696 до 744 измерений скорости ветра в м/с с

округлением до 0,01. И даже при такой точности в выборках оказывается достаточно много повторяющихся значений.

Анализ рядов измерений осуществлялся в рамках программы системы ISW [26].

Эмпирические распределения, соответствующие выборкам скоростей ветра по месяцам, существенно отличаются. Достаточно близкими оказались лишь эмпирические распределения скорости ветра, соответствующие июлю и августу (рис. 1). Не вдаваясь в подробности, лишь в этом случае гипотеза об однородности законов не отклонялась ни по одному из девяти применяемых критериев однородности законов [27].

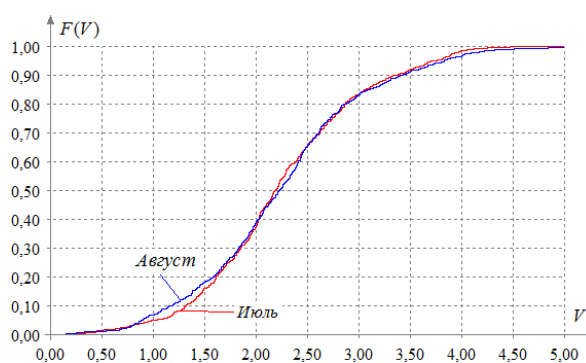


Рис. 1. Эмпирические функции распределения скорости ветра за июль и август

Fig. 1. Empirical distribution functions of wind speed for July and August

Как правило, рассматриваемые выборки представляют собой временные ряды, не свободные от наличия тренда. В частности, для скорости ветра в июле гипотеза об отсутствии тренда в математическом ожидании отклоняется по большинству используемых критериев (есть тренд в математическом ожидании), а гипотеза об отсутствии тренда в дисперсии не отклоняется (нет тренда в дисперсии).

Тем не менее на практике, как правило, закрывают глаза на нарушение предпосылок, дающих основание для рассмотрения таких выборок, как выборки независимых одинаково распределённых случайных величин, считая, что такие нарушения не приведут к существенным ошибкам при проектировании или прогнозировании.

При построении моделей часто ограничиваются достаточно узким перечнем параметрических моделей законов распределений. В настоящем случае сгладить с достаточной точностью эмпирические распределения скоростей ветра, соответствующих рассматриваемым выборкам, параметрическими моделями законов распределения, используемыми различными авторами (Вейбулла [11, 12], бета-распределением I рода [13], Вейбулла, Максвелла или логарифмически нормальным [12]) оказалось невозможно. Более того, как правило, представленные выборки не удавалось сгладить ни одним законом, из включённых в программную систему ISW [26], в рамках которой предусмотрена возможность применения

для описания реальных случайных величин более 30 различных параметрических моделей законов.

Исключение составили только распределения скорости ветра в сентябре и декабре, для которых достаточно хорошей для практического использования моделью оказались бета-распределения III рода с плотностью

$$f(v, \theta) = \frac{\theta_2^{\theta_0}}{\theta_3 B(\theta_0, \theta_1)} \frac{\left(\frac{v - \theta_4}{\theta_3}\right)^{\theta_0 - 1} \left(1 - \frac{v - \theta_4}{\theta_3}\right)^{\theta_1 - 1}}{\left[1 + (\theta_2 - 1) \frac{v - \theta_4}{\theta_3}\right]^{\theta_0 + \theta_1}}. \quad (1)$$

В остальных случаях хорошие модели удалось построить в виде смеси двух параметрических законов с плотностью

$$f_v(v) = \alpha f_1(v, \theta_1) + (1 - \alpha) f_2(v, \theta_2),$$

где $f_1(v, \theta_1)$ и $f_2(v, \theta_2)$ – два бета-распределения III рода вида (1) со своими векторами параметров, а α – параметр смеси. Информация об оценках параметров моделей, построенных по выборкам скоростей ветра методом максимального правдоподобия, представлена в первой части табл. 1.

При наличии статистических данных за несколько лет можно было бы рассмотреть законы распределения в те же месяцы по годам и сравнить их с законом по объединенной выборке для соответствующего месяца, что позволило бы сделать выводы об устойчивости построенных моделей и перспективах их ис-

пользования. Но в нашем случае таких статистических данных не было.

Проверка адекватности построенных моделей

Насколько хорошо полученные модели законов распределения соответствуют эмпирическим распределениям, построенным по соответствующим выборкам, как правило, проверяют с использованием критериев согласия. Для этого применяют непараметрические критерии согласия (Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова, Адерсона–Дарлингга, Купера, Ватсона, Жанга) [28] и критерии типа χ^2 .

В случае проверки простых гипотез вида: $H_0: F(x) = F(x, \theta)$, где $F(x, \theta)$ – функция распределения вероятностей, с которой проверяют согласие наблюдаемой выборки, а θ – известное значение параметра (скалярного или векторного), распределения статистик непараметрических критериев согласия не зависят от вида $F(x, \theta)$.

При сложной проверяемой гипотезе вида: $H_0: F(x) \in \{F(x, \theta), \theta \in \Theta\}$ где Θ – область определения параметра θ , а сам параметр оценивается по этой же выборке, «свобода от распределения» теряется [29] и на распределения статистик при справедливости H_0 влияет целый ряд факторов [28]: вид наблюдаемого закона распределения $F(x, \theta)$, соответствующего проверяемой гипотезе H_0 ; тип оцениваемого параметра и число оцениваемых параметров; в некоторых ситуациях конкретное значение параметра (например, в случае бета-распределений); используемый метод оценивания параметров.

Таблица 1. Параметры моделей законов распределения для скорости ветра и для мощности ветроэнергетической установки (кВт)

Table 1. Parameters of models of distribution laws for wind speed and for wind turbine power (kW)

Месяц/Month	α	Параметры/Parameters $f_1(\cdot, \theta)$					Параметры/Parameters $f_2(\cdot, \theta)$				
		θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
для скорости ветра/for wind speed											
Январь/January	0,7	4,6371	1,7207	4,2316	3,65	0,0	5,7815	4,0476	0,2732	3,65	0,0
Февраль/February	0,7	2,8273	1,7900	1,8594	3,89	0,0	11,8997	11,9717	0,3565	3,89	0,0
Март/March	0,7	3,5153	3,2546	1,9239	4,8	0,0	9,9448	12,2312	0,9346	4,8	0,0
Апрель/ April	0,8	3,0739	3,3694	1,2079	4,8	0,0	1,7631	9,2106	0,2084	4,25	0,0
Май/May	0,7	5,8472	1,4677	9,1134	5,79	0,0	9,6257	12,3347	1,2369	5,2	0,0
Июнь/June	0,75	3,6752	8,7057	0,8795	5,7	0,0	14,9720	16,0427	0,4352	3,4	0,0
Июль/July	0,8	3,1975	8,7547	0,4867	5,6	0,0	13,8362	15,0917	0,5183	3,2	0,0
Август/August	0,8	4,0660	3,1998	1,9021	5,4	0,0	17,9074	9,1522	0,9908	3,4	0,0
Сентябрь/September	1,0	3,5093	7,5721	0,6030	4,3710	0,0	–	–	–	–	–
Октябрь/October	0,6	11,5563	1,8370	14,5462	5,3	0,0	5,5213	2,5501	0,8728	3,25	0,0
Ноябрь/November	0,85	2,9527	12,3730	0,3815	6,32	0,0	21,1167	9,0512	7,2762	4,0941	0,0
Декабрь/December	1,0	1,4690	12,0011	0,0889	5,0461	0,0	–	–	–	–	–
для мощности ветроэнергетической установки (кВт)/for wind turbine power (kW)											
Январь/January	0,71	0,6477	2,0301	2,6545	62,0	0,0	5,3209	4,1363	1,0	62,0	0,0
Февраль/February	0,9	0,6436	3,8184	0,6115	83,2063	0,0	19,9094	37,7045	1,0	83,0	0,0
Март/March	0,919	0,9282	1,9370	5,7423	116,0	0,0	3,2117	3,8638	1,0	26,0	6,0
Апрель/ April	0,91	0,8118	2,7964	2,0837	90,0	0,0	3,4166	3,1851	1,0	90,0	0,0
Май/May	0,95	1,0165	0,9124	24,5866	200,0	0,0	7,9998	41,9298	1,0	80,0	0,0
Июнь/June	0,835	0,9491	1,9417	1,0	31,0	0,0	0,4583	1,8608	1,0	131,95	0,0
Июль/July	1,0	1,2438	2,2193	5,2029	148,26	0,0	–	–	–	–	–
Август/August	0,89	1,0847	1,6845	6,7612	160,0	0,0	2,7943	1,6665	1,0	25,0	0,0
Сентябрь/September	1,0	1,0297	11,1550	0,0	–	–	–	–	–	–	–
Октябрь/October	0,82	1,0168	1,5016	14,2854	206,376	0,0	4,2970	4,0674	1,0	38,0	0,0
Ноябрь/November	0,98	0,6386	10,0786	1,12401	319,103	0,0	1,0	1,0	1,0	320,0	0,0
Декабрь/December	0,91	0,6211	2,0276	1,2010	129,5	0,0	7,0	47,0	–	–	–

В нашем случае должна проверяться сложная гипотеза, причём в самой неблагоприятной ситуации. Проблема усугубляется тем, что неизвестные распределения статистик непараметрических критериев согласия зависят от конкретных значений трех параметров формы каждого из бета-распределений, входящих в смесь, и от значения параметра смеси, то есть от оценок семи параметров. Найти в такой ситуации методами статистического моделирования требуемые распределения статистик критериев, как это обычно делается в более простых случаях, оказывается очень непростой задачей, связанной с рядом вычислительных трудностей.

Пренебрегая фактом оценивания параметров по выборке, будем считать, что проверяется простая гипотеза. Тогда при проверке согласия по критериям Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова, Адерсона–Дарлинга, Купера и Ватсона, например, для января, выборки скорости ветра объёмом $n=744$ с построенной моделью

$$f_v(x) = 0,7f_1(v, \theta_1) + 0,3f_2(v, \theta_2),$$

где параметры для $f_1(v, \theta_1)$ и $f_2(v, \theta_2)$ берутся из первой строки табл. 1, получим результаты, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Результаты проверки простой гипотезы о скорости ветра в январе

Table 2. Results of testing a simple hypothesis about wind speed in January

Критерий/Test	Статистика/Statistics	P_{value}
Колмогорова Kolmogorov	0,51958	0,950
Крамера–Мизеса–Смирнова Cramer–Mises–Smirnov	0,02533	0,989
Адерсона–Дарлинга Aderson–Darling	0,24157	0,975
Купера Kuiper	0,85775	0,952
Ватсона Watson	0,02517	0,965

Приводимые значения достигнутого уровня значимости P_{value} по всем критериям свидетельствуют о близости эмпирического распределения и функции распределения построенной модели (рис. 2). В то же время, так как на самом деле проверяется сложная гипотеза, приведенные значения P_{value} являются завышенными.

Убедимся в качестве построенных моделей ещё одним несколько необычным способом. В соответствии с построенной моделью для закона распределения скорости ветра в январе смоделируем выборку такого же объёма $n=744$ с округлением значений до 0,01 (как и в анализируемых выборках скорости ветра).

Далее проверим гипотезу об однородности законов распределений смоделированной выборки и исходной выборки измерений скорости ветра в январе с использованием совокупности критериев проверки гипотез об однородности пары выборок [27, 30, 31],

реализованных в системе [26] (критериями Лемана–Розенблатта [32, 33], Андерсона–Дарлинга–Петита [34], модифицированным Смирнова [35, 36], Жанга (со статистиками Z_a , Z_c , Z_k) [37, 38]). Результаты такой проверки, сделанные в [26], представлены в табл. 3. Как можно судить по достигнутым уровням значимости, оснований для отклонения гипотезы об однородности нет.

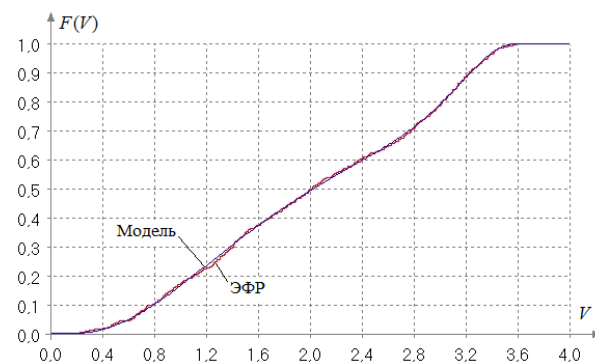


Рис. 2. Эмпирическая функция распределения и модель функции распределения скорости ветра в январе

Fig. 2. Empirical distribution function of wind speed and its distribution function model in January

Таблица 3. Результаты проверки гипотезы об однородности законов исходной и смоделированной выборки скорости ветра в январе

Table 3. Results of testing the hypothesis of homogeneity of laws original and simulated wind speed samples in January

Критерий/Test	Статистика Statistics	P_{value}
Лемана–Розенблатта Lehmann–Rosenblatt	0,6438	0,6076
Андерсона–Дарлинга–Петита Aderson–Darling–Pettitt	0,1020	0,5752
Смирнова модиф. Smirnov modif.	0,7371	0,6488
Z_a Жанга / Z_a Zhang	3,2813	0,1704
Z_c Жанга / Z_c Zhang	3,2704	0,1917
Z_k Жанга / Z_k Zhang	4,5197	0,1104

Построение моделей распределений мощности ветроэнергетической установки

Одновременно с данными измерений скорости ветра в нашем распоряжении оказались выборки с «замерами мощности ВЭУ» P также за январь–декабрь по месяцам 2016 г. Действуя аналогичным образом, по этим выборкам были построены параметрические модели законов распределения, информация о которых сконцентрирована во второй части табл. 1. И в данном случае наиболее предпочтительными моделями законов распределения для этих выборок также оказались смеси бета-распределений III рода за следующими исключениями:

- в июле закон распределения мощности ВЭУ достаточно хорошо описывается бета-распределением III рода (без смеси);
- в сентябре – усеченным обобщенным нормальным законом (или обобщенным полунормальным законом) с плотностью

$$f(p, \theta) = \frac{\theta_0}{\theta_1 \Gamma(1/\theta_0)} \exp \left\{ - \left(\frac{p - \theta_2}{\theta_1} \right)^{\theta_0} \right\};$$

- в декабре – смесью бета-распределения III рода вида (1) и нормального закона с масштабным параметром $\theta_0=7$ и сдвига $\theta_1=47$.

При проверке адекватности моделей, построенных для законов функций распределения мощности, возникают те же самые проблемы, что и при проверке моделей для скоростей ветра, и разрешаются они таким же образом: можно посмотреть на результаты проверки простых гипотез и убедиться, что моделирование выборок в соответствии с построенными моделями дают выборки, однородные исходным.

О связи законов распределения скорости ветра и мощности ветроэнергетической установки

Возможность построения закона распределения мощности ВЭУ на основании знания законов распределения скорости ветра, имеющих место в конкретной местности, вызывает серьёзный практический интерес.

Известно, что зная закон распределения (плотность) системы случайных величин $f_x(x_1, \dots, x_m)$, можно найти закон распределения (плотность) $f_y(y)$ для функции $y=\psi(x_1, \dots, x_m)$. Однако решение такой задачи в аналитическом виде находится в крайне редких ситуациях, лишь для некоторых $f(\cdot)$ и некоторых видов функций $\psi(\cdot)$. В то же время, используя методы статистического моделирования и отталкиваясь от модели $f_x(x_1, \dots, x_m)$, на основании результатов моделирования можно строить модель для $f_y(y)$.

Мощность ВЭУ в ваттах в зависимости от скорости ветра (в метрах) приближенно определяется по следующей формуле [39]:

$$P = C_p \pi R^2 0,5 V^3 \rho \eta_{red} \eta_{gen}, \quad (2)$$

где C_p – коэффициент использования энергии ветра, безразмерная величина (в номинальном режиме для быстротходных ветряков его значение достигает величины 0,4–0,5); R – радиус ротора (м); V – скорость воздушного потока (м/с); ρ – плотность воздуха (кг/м³); η_{red} – КПД редуктора; η_{gen} – КПД генератора.

В формуле мощности все величины, кроме радиуса ротора, носят приближенный характер.

В нашем распоряжении имеются выборки измерений мощности и скорости ветра. Но скорость ветра замерена на высоте 10 м, что значительно ниже ступицы ротора. В данном случае мы не знаем, каким образом (насколько точно в условиях конкретной местности) пересчитывается скорость ветра на высоту ступицы ротора (по существу не знаем диапазон изменения скорости ветра на высоте ступицы).

Нам оказались неизвестными также и все остальные величины, входящие в правую часть формулы (2). И в то же время хотелось бы знать, насколько точно формула (2) позволяет установить связь между законами распределения вероятностей скорости ветра и мощности ВЭУ. И можно ли на основании (2), зная закон распределения мощности, восстановить закон распределения скорости ветра.

Естественно, что основная задача заключается в том, чтобы по закону распределения скорости ветра найти распределение мощности ВЭУ.

Из соотношения (2) для мощности можно выразить скорость ветра:

$$V = \sqrt[3]{P / (0,5 C_p \pi R^2 \rho \eta_{red} \eta_{gen})}.$$

Опираясь на построенные модели распределения мощности в соответствующем месяце, можно смоделировать распределение скорости ветра в этом же месяце, подобрав $k=0,5 C_p \pi R^2 \rho \eta_{red} \eta_{gen}$ таким образом, чтобы область определения случайной величины V совпала с областью определения в соответствующей выборке для скорости ветра.

В качестве примера рассмотрим мощность ВЭУ и скорость ветра в январе. Закон распределения мощности в январе описывается смесью

$$f_p(p) = 0,71 f_1(p, \theta_1) + 0,29 f_2(p, \theta_2),$$

где $f_1(p, \theta_1)$ и $f_2(p, \theta_2)$ – бета-распределения III рода, параметры которых представлены в первой строке второй части табл. 1. В $f_1(p, \theta_1)$ параметры $\theta_1=2,0301$, $\theta_2=2,6545$, $\theta_3=62,0$, $\theta_4=0,0$, в $f_2(p, \theta_2)$ – $\theta_0=5,3209$, $\theta_1=4,1363$, $\theta_2=1,00$, $\theta_3=62,0$, $\theta_4=0,0$.

Далее, моделируя скорость ветра $V = \sqrt[3]{P/k}$ как функцию от случайной величины P и подбирая величину k , будем получать различные эмпирические распределения для скорости ветра. Возможность моделирования законов распределения функций от случайных величин (моделирования выборок значений функции от случайных величин), принадлежащих различным законам, реализована в системе [26] и использована в данном случае. При $k = 1,19$ моделируемое эмпирическое распределение функции $V = \sqrt[3]{P/k}$ практически совпадает с выборкой для скорости ветра в январе, как видно из рис. 2, 3.



Рис. 3. Эмпирическое распределение скорости ветра в январе и эмпирическое распределение скорости ветра, полученное при моделировании функции от мощности

Fig. 3. Empirical distribution of wind speed in January and the wind speed empirical distribution as a function of power

Этот факт свидетельствует о качестве построенных моделей, а значение $k = 1,19$ в некоторой степени характеризует неизвестные нам параметры ВЭУ и

изменение скорости ветра по высоте. По существу, отталкиваясь от построенной модели закона распределения мощности, мы восстановили закон распределения скорости ветра.

Таким же образом и так же хорошо распределения величины $V = \sqrt[3]{P/1,19}$, как функции от случайной величины мощности P , согласуются с соответствующими выборками скорости ветра V в другие месяцы года.

Зная закон распределения скорости ветра V , можно получить распределение мощности, моделируя её как функцию $P=1,19V^3$ от случайной величины V . Например, в январе (табл. 1) скорость ветра описывается смесью двух бета-распределений III рода с плотностью

$$f_v(v) = 0,7f_1(v, \theta_1) + 0,3f_2(v, \theta_2),$$

где в $f_1(v, \theta_1)$ параметры принимают значения $\theta_0=4,6371$, $\theta_1=1,7207$, $\theta_2=4,2316$, $\theta_3=3,65$, $\theta_4=0,0$, а в $f_2(v, \theta_2)$ $-\theta_0=5,7815$, $\theta_1=4,0476$, $\theta_2=0,2732$, $\theta_3=3,65$, $\theta_4=0,0$.

В данном случае смоделированное эмпирическое распределение мощности как функции скорости ветра практически совпадает с эмпирическим распределением мощности в январе (рис. 4).

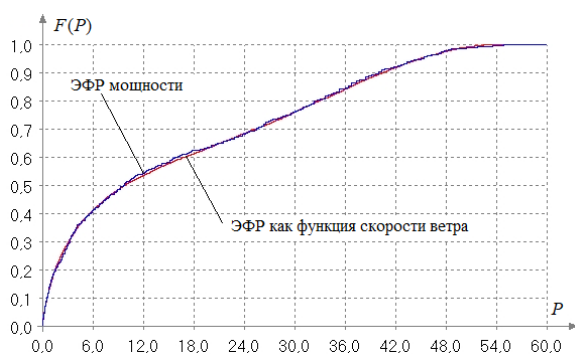


Рис. 4. Эмпирическое распределение мощности в январе и эмпирическое распределение мощности как функции скорости ветра

Fig. 4. Empirical power distribution in January and empirical power distribution as a function of wind speed

Данный вычислительный эксперимент косвенно подтвердил качество построенных моделей для законов распределения ветра и мощности. В то же время его результаты вызвали сомнение, что имеющиеся выборки мощности представляют собой результаты измерений. Источник подтвердил, что выборки с данными по мощности получены на основании измерений скорости ветра по соотношению (2) без учета того, что при малых скоростях ветра ВЭУ могла выдавать нулевую мощность, а при штормовых — отключаться в целях безопасности. Учёт этих факторов при моделировании и более точное знание параметров в формуле (2) позволяет на основании законов распределения ветра строить законы распределения мощности для различных типов ВЭУ.

Если известны все характеристики ВЭУ и плотность воздуха ρ (то есть k известно), то на основании распределения мощности можно получить распределение скорости ветра на высоте ступицы ротора.

Если для ВЭУ известны КПД редуктора η_{red} и генератора η_{gen} , а также плотность воздуха ρ , то на основании выражения для k можно оценить реальный коэффициент использования энергии ветра C_p для данного типа ВЭУ.

В целом же проведенные вычислительные эксперименты демонстрируют реальную возможность того, как с использованием технологии статистического моделирования на основании модели распределения скорости ветра $f_v(v)$ для системы из m ВЭУ с различными техническими характеристиками, используемыми в соотношении (2), можно построить хорошую модель для распределения вероятностей $f_{p_\Sigma}(p_\Sigma)$

$$P_\Sigma = \sum_{i=1}^m P_i(V).$$

мощности этой системы

Модели законов распределения для инсоляции и мощности солнечных элементов

Законы распределения инсоляции и мощности солнечных панелей (СП) и построенные для них модели оказываются очень похожими. Можно считать, что они отличаются практически только параметрами масштаба. Модели законов распределения для инсоляции и мощности СП, в основном в виде смесей бета-распределений III рода, построенные по результатам измерений в том же территориальном районе, представлены в первой и второй частях табл. 4, соответственно.

В частности, моделями в виде бета-распределений III рода (без смеси) описываются распределения инсоляции в апреле, мае, июне, июле и августе, а распределения мощности солнечной панели — в мае, июле и августе.

Подчеркнём, что, зная закон распределения вероятностей (модель) для солнечной инсоляции (в конкретной географической точке) и используя математические модели, связывающие величину инсоляции с мощностью солнечной панели или станции, можно моделировать законы распределения вероятностей для мощности солнечных батарей и солнечных станций, а также строить (хорошие) модели для этих законов.

Более того, реализованные в системе [26] возможности позволяют исследовать распределения функций от системы независимых случайных величин. Следовательно, в предположении о независимости случайных величин скорости ветра и солнечной инсоляции, опираясь на законы распределения скорости ветра и солнечной радиации, можно моделировать распределение вероятностей для мощности гибридной системы, состоящей из ряда ВЭУ и солнечных батарей, и строить модели для этого распределения.

Таблица 5. Параметры моделей законов распределения для инсоляции ($Вт/м^2$) и для мощности солнечной панели ($кВт$)
Table 5. Parameters of models of distribution laws for insolation (W/m^2) and for solar panel power (kW)

Месяц/Month	α	Параметры/Parameters $f_1(\cdot, \theta)$					Параметры/Parameters $f_2(\cdot, \theta)$				
		θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
для инсоляции (Вт/м²)/for insolation (W/m²)											
Январь/January	0,8	2,8317	1,1313	21,3069	840,0	0,0	1,0206	1,5209	0,1707	840,0	0,0
Февраль/February	0,75	2,2348	0,8947	11,6526	960,0	0,0	7,1219	0,6824	3,6042	960,0	0,0
Март/March	0,71	1,2785	0,6734	7,4981	985,0	0,0	5,4617	1,7442	1,00	1050,0	0,0
Апрель/ April	1,0	0,8045	0,6380	2,1939	1050,0	0,0	—	—	—	—	—
Май/May	1,0	0,5302	0,8263	0,9361	1050,0	0,0	—	—	—	—	—
Июнь/June	1,0	0,6157	0,6164	1,4798	1015,0	0,0	—	—	—	—	—
Июль/July	1,0	0,6804	0,5671	2,00	1000,0	0,0	—	—	—	—	—
Август/August	1,0	0,5538	0,7140	0,50	1036,0	0,0	—	—	—	—	—
Сентябрь/September	0,6	0,7758	2,6445	0,0710	1050,0	0,0	1,2185	2,0540	1,6779	1050,0	0,0
Октябрь/October	0,7	1,4650	0,7492	12,0948	985,0	0,0	2,2150	1,7268	0,4695	985,0	0,0
Ноябрь/November	0,7	10,9080	2,2153	71,9885	882,0	0,0	24,5369	0,9226	19,4393	882,0	0,0
Декабрь/December	0,7	1,0157	0,6871	5,8196	778,0	0,0	8,9954	2,2517	34,374	778,0	0,0
для мощности солнечной панели (кВт)/for solar panel power (kW)											
Январь/January	0,8	2,0474	0,8278	21,3674	0,6839	0,0	0,4133	3,8875	0,01736	0,6839	0,0
Февраль/February	0,75	1,3448	0,9935	5,2486	0,764	0,0	8,0274	1,2118	1,5894	0,0,764	0,0
Март/March	0,81	0,7241	1,0253	1,8802	0,82	0,0	6,2835	5,7084	0,2659	0,836	0,0
Апрель/ April	0,8	0,6433	1,6090	0,7194	0,8374	0,0	5,8110	5,1488	0,2262	0,8649	0,0
Май/May	1,0	0,4584	1,4019	0,3024	0,8161	0,0	—	—	—	—	—
Июнь/June	0,7	0,6288	1,3854	1,2226	0,780	0,0	7,7521	1,1981	1,5408	0,756	0,0
Июль/July	1,0	0,5362	0,6606	0,9384	0,741	0,0	—	—	—	—	—
Август/August	1,0	0,4361	1,1241	0,1542	0,773	0,0	—	—	—	—	—
Сентябрь/September	0,6	0,9720	2,6890	0,08296	0,776	0,0	0,9386	1,9253	1,5922	0,776	0,0
Октябрь/October	0,7	1,1585	0,6229	11,8079	0,7715	0,0	2,0068	2,2514	0,2829	0,7715	0,0
Ноябрь/November	0,7	1,8970	3,1671	8,9725	0,743	0,0	3,9328	1,4074	1,6728	0,743	0,0
Декабрь/December	0,7	0,8088	0,6106	5,5542	0,645	0,0	5,4923	1,4970	34,8212	0,645	0,0

Определение числовых характеристик для распределений мощности ветроэнергетической установки

Закон распределения случайной величины содержит полную информацию об этой случайной величине, включая числовые характеристики. Математическое ожидание для мощности энергетической установки определяет среднее значение генерируемой мощности, а дисперсия характеризует её рассеяние. В принципе, это те величины, на которые ориентируются на практике. В частности, на основании математического ожидания мощности вычисляются интегральные показатели для оценки выработки электроэнергии за длительный интервал времени.

Нахождение числовых характеристик для построенных достаточно сложных моделей законов распределения мощности (для ветровых и солнечных установок) в аналитическом виде может представлять собой непростую задачу, так как соответствующие интегралы для математического ожидания и дисперсии находятся только численными методами.

В рамках программной системы [26], имея модель закона распределения мощности P , несложно найти оценки математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения методами статистического моделирования. Для этого достаточно смоделировать выборку значений мощности P_1, P_2, \dots, P_n в соответствии с моделью этого закона при желаемом объёме выборки n и по этой выборке найти соответствующие

$$\text{оценки } \hat{E}[P] = \bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad \hat{D}[P] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \quad \text{и} \\ \hat{\sigma}_p = \sqrt{\hat{D}[P]}.$$

Следует отметить, что законы распределения мощности ВЭУ в разные месяцы существенно отличаются. Иногда вид закона очень наглядно объясняет трудности прогнозирования и особенности погодных условий.

Заключение

Исследование законов распределения скоростей ветра и солнечной инсоляции опиралось на реальные и достаточно точные измерения этих величин в указанном выше районе в течение года.

Результаты показали, что выборки измерений скорости ветра и солнечной инсоляции не удаётся удовлетворительно описать законами распределения, наиболее часто упоминаемыми в различных источниках, как применяемыми в этих целях. Однако они хорошо описываются семейством бета-распределений 3-го рода и их смесями. Такие модели для законов распределения скорости ветра и солнечной инсоляции построены для всех 12 месяцев.

Показано, что на базе построенных моделей законов распределения для скорости ветра и солнечной инсоляции и соотношений, связывающих скорость ветра с мощностью ветроэнергетической установки, а инсоляцию с мощностью, выдаваемой солнечной панелью, можно моделировать распределения для мощности соответствующих устройств и строить модели законов распределения для них.

При моделировании распределения вероятностей для мощности конкретного типа ветроэнергетической установки должен быть задан интервал скоростей ветра, в котором обеспечивается возможность генерации этой установки.

Реализованные в [26] возможности по моделированию законов распределения функций от случайных величин [40] позволяют на основании моделей законов распределения скорости ветра и солнечной инсоляции (на конкретной территории) моделировать законы распределения для мощности гибридных электроэнергетических систем различной конфигурации. Получаемые результаты могут использоваться при выборе и проектировании ветровых и солнечных

электростанций или гибридных электроэнергетических систем, состоящих из различных комбинаций ветровых и солнечных станций. Построенные по результатам такого моделирования модели законов распределения для генерируемых мощностей существующих гибридных систем могут использоваться при прогнозировании и учитываться [41] системным оператором энергосистемы в процессе принятия решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Elhadidy M.A., Shaahid S.M., Parametric study of hybrid (wind+solar+diesel) power generating systems // *Renew Energy*. – 2000. – V. 21. – № 2. – P. 129–139.
2. Karaki S.H., Chedid R.B., Ramadan R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems // *IEEE Trans Energy Conversion*. – 1999. – V. 14. – № 3. – P. 766–772.
3. Borrowys B.S., Salameh Z.M. Optimum photovoltaic array size for a hybrid wind/PV systems // *IEEE Trans Energy Conversion*. – 1994. – V. 9. – № 3. – P. 482–488.
4. Kruangpradit P., Tayati W. Hybrid renewable energy system development in Thailand // *Renewable Energy*. – 1996. – V. 8. – № 1–4. – P. 514–517.
5. Generation unit sizing and cost analysis for standalone wind, photovoltaic and hybrid wind/PV systems / W.D. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramana, V. Gerez // *IEEE Trans Energy Conversion*. – 1998. – V. 13. – № 1. – P. 70–75.
6. Chedid R., Rahman S. Unit sizing and control of hybrid wind-solar power system // *IEEE Trans Energy Conversion*. – 1997. – V. 12. – № 1. – P. 79–86.
7. Optimization of hybrid solar wind power systems / E. Dilettoso, S. Gagliano, N. Salerno, G. Tina // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2007. – V. 26. – № 3–4. – P. 225–231.
8. Tina G., Gagliano S., Raiti S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment // *Solar Energy*. – 2006. – V. 80. – № 5. – P. 578–588.
9. Hollands K.T.G., Huget R.G. A probability density function for the clearness index, with applications // *Solar Energy*. – 1983. – V. 30. – P. 195–209.
10. Ettoumi F.Y., Sauvageot H., Adane A.E.H. Statistical bivariate modelling of wind using first-order Markov chain and Weibull distribution // *Renewable Energy*. – 2003. – V. 28. – № 11. – P. 1787–1802.
11. Tina G., Gagliano S. Probability analysis of weather data for energy assessment of hybrid solar/wind power system // *4th IASME/WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD'08)*. – Algarve, Portugal, June 11–13, 2008. – P. 217–223.
12. Рыхлов А.Б. Анализ применения различных законов распределения для выравнивания скоростей ветра на юго-востоке европейской территории России // *Известия Саратовского университета*. – 2010. – Т. 10. – Сер. Науки о Земле. – № 2. – С. 25–30.
13. Bashahu M., Buseke M. Statistical analysis of hourly wind speed data from some burundian stations using beta probability density functions // *Modern Environmental Science and Engineering*. – 2016. – V. 2. – № 11. – P. 740–746.
14. Safari B. Modeling wind speed and wind power distributions in Rwanda // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – V. 15. – № 2. – P. 925–935.
15. Mohammadi K., Alavi O., McGowan J.G. Use of Birnbaum-Saunders distribution for estimating wind speed and wind power probability distributions: A review // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – V. 143. – P. 109–122.
16. Wind speed analysis using the extended generalized Lindley distribution / Y.M. Kantar, I. Usta, I. Arik, I. Yenilmez // *Renewable Energy*. – 2018. – V. 118. – P. 1024–1030.
17. Aries N., Boudia S.M., Onis H. Deep assessment of wind speed distribution models: a case study of four sites in Algeria // *Energy Conversion and Management*. – 2018. – V. 155. – P. 78–90.
18. Jung C., Schindler D. Global comparison of the goodness-of-fit of wind speed distributions // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – V. 133. – P. 216–234.
19. Introducing a system of wind speed distributions for modeling properties of wind speed regimes around the world / C. Jung, D. Schindler, J. Laible, A. Buchholz // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – V. 144. – P. 181–192.
20. Jung C., Schindler D. 3D statistical mapping of Germany's wind resource using WWS // *Energy Conversion and Management*. – 2018. – V. 159. – P. 96–108.
21. Ouarda T.B.M.J., Charron C., Chebana F. Review of criteria for the selection of probability distributions for wind speed data and introduction of the moment and L-moment ratio diagram methods, with a case study // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – V. 124. – P. 247–265.
22. Arthur Y.D., Gyamfi K.B., Appiah S.K. Probability distributional analysis of hourly solar irradiation in Kumasi-Ghana // *International Journal of Business and Social Research*. – 2013. – V. 3. – № 3. – P. 63–75.
23. Guwaeder A., Ramakumar R. Statistical Analysis of PV Insolation Data // *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. – Washington, DC, 2017. – P. 1122–1126.
24. Solar PV grid power flow analysis / Q. Alsafasfeh, O. Saraereh, I. Khan, S. Kim // *Sustainability*. – 2019. – V. 11. – № 6. – P. 1744. DOI:10.3390/su11061744
25. Ayodele T.R. Determination of probability distribution function for modelling global solar radiation: case study of Ibadan, Nigeria // *International Journal of Applied Science and Engineering*. – 2015. – V. 13. – № 3. – P. 233–245.
26. ISW – Программная система статистического анализа одномерных наблюдений. URL: <https://ami.nstu.ru/~headrd/ISW.htm> (дата обращения 03.02.2020).
27. Лемешко Б.Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 208 с. DOI: 10.12737/22368
28. Лемешко Б.Ю. Непараметрические критерии согласия: Руководство по применению. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 163 с. DOI: 10.12737/11873
29. Кас М., Kiefer J., Wolfowitz J. On tests of normality and other tests of goodness of fit based on distance methods // *The Annals of Mathematical Statistics*. – 1955. – V. 26. – № 2. – P. 189–211.
30. Application of homogeneity tests: problems and solution / B.Y. Lemesko, I.V. Veretelnikova, S.B. Lemesko, A.Y. Novikova // *Lecture Notes in Computer Science*. – Cham: Springer, 2017. – 10684. – P. 461–475. DOI: 10.1007/978-3-319-71504-9_38.
31. Лемешко Б.Ю., Веретельникова И.В. Мощность k-выборочных критериев проверки однородности законов // *Измерительная техника*. – 2018. – № 7. – С. 3–7. DOI: 10.32446/0368-1025it-2018-7-3-7
32. Lehmann E. L. Consistency and unbiasedness of certain nonparametric tests // *The Annals of Mathematical Statistics*. – 1951. – V. 22. – № 1. – P. 165–179.
33. Rosenblatt M. Limit theorems associated with variants of the von Mises statistic // *The Annals of Mathematical Statistics*. – 1952. – V. 23. – P. 617–623.
34. Pettitt A.N. A two-sample Anderson–Darling rank statistic // *Biometrika*. – 1976. – V. 63. – № 1. – P. 161–168.
35. Смирнов Н.В. Оценка расхождения между эмпирическими кривыми распределения в двух независимых выборках // *Бюллетень МГУ, Серия А*. – 1939. – Т. 2. – № 2. – С. 3–14.
36. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б. О сходимости распределений статистик и мощности критериев однородности Смирнова и

- Лемана–Розенблатта // Измерительная техника. – 2005. – № 12. – С. 9–14.
37. Zhang J. Powerful two-sample tests based on the likelihood ratio // Technometrics. – 2006. – V. 48. – № 1. – P. 95–103. DOI 10.1198/004017005000000328
38. Zhang J., Wu Y. k-Sample tests based on the likelihood ratio // Computational Statistics & Data Analysis. – 2007. – V. 51. – № 9. – P. 4682–4691.
39. Безруких П.П. Ветроэнергетика: справочное и методическое пособие. – М.: ИД «Энергия», 2010. – 195 с.
40. Blinov P.Y., Lemesko B.Y. The simulation system and research of functions of random variables // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, 2016. – P. 203–209.
41. Повышение степени интеграции ветроэнергетических станций в энергосистему путем использования у системного оператора математических моделей прогнозирования ветра и электропотребления / В.З. Манусов, А.А. Холдонов, К.Н. Бойко, Ш.К. Халдаров // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – № 3 (35). – С. 45–57.

Поступила 02.09.2020 г.

Информация об авторах

Манусов В.З., доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.

Лемешко Б.Ю., доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета.

Халдаров Ш.К., соискатель ученой степени кандидата наук, стажер кафедры электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.

UDC 621.311.25: 621.311.26

MODELING OF DISTRIBUTION LAWS FOR WIND TURBINE AND SOLAR BATTERY OUTPUT POWER

Vadim Z. Manusov¹,
Manusov36@mail.ru

Boris Yu. Lemeshko¹,
lemeshko@ami.nstu.ru

Sherzod K. Khaldarov¹,
haldaroff@mail.ru

¹ Novosibirsk State Technical University,
20, Karl Marx avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

Relevance. The power provided by generating stations based on wind and solar energy depends on the state of the environment at a particular geographical point, the prevailing wind speeds and the level of solar insolation. The wind speeds and solar insolation characterizing patterns are probabilistic in nature and depend on the terrain and season. This means that the power provided by generating stations based on renewable energy sources is also probabilistic. Risks associated with an inaccurate knowledge of the probabilistic patterns describing renewable energy sources, as well as the unpredictability (uncertainty) of the natural environment affecting renewable energy sources, are the reasons why system operators do not take into account such stations in calculating the power balance. This situation does not allow considering the generating stations as full-fledged market participants, covering the flow of investments in such projects. Accurate determination of the output power distribution laws for solar and wind power stations, based on the wind speed and solar insolation data analysis can significantly help system operators in power predicting of the power stations.

Aim of study is building models of distribution laws that best describe the results of wind speed and solar insolation observations, as well as models of distribution laws for the generated power of wind and solar stations.

Methods: methods for estimating the parameters of distribution laws, methods for testing statistical hypotheses.

Results. It is shown, that the 3rd kind of beta distribution laws and their mixtures describe the series of measured wind speed and solar insolation better in the territory. The same concerning the probability distribution of the wind and solar stations power. Distribution law models for wind speed, solar insolation and power of the corresponding stations are constructed. It is shown that on the basis of the law of the distribution of wind speed and the mathematical relationships that connect power with wind speed, good models can be constructed for the probability distributions of power of wind power stations. The models can be used as an auxiliary tool for power system operators to predict output power.

Key words:

Probability distribution laws, renewable energy sources, probabilistic output power, third kind of beta-distribution.

REFERENCES

- Elhadidy M.A., Shaahid S.M. Parametric study of hybrid (wind+solar+diesel) power generating systems. *Renew Energy*, 2000, vol. 21, no. 2, pp. 129–139.
- Karaki S.H., Chedid R.B., Ramadan R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar–wind energy conversion systems. *IEEE Trans Energy Conversion*, 1999, vol. 14, no. 3, pp. 766–772.
- Borrowy B.S., Salameh Z.M. Optimum photovoltaic array size for a hybrid wind/PV systems. *IEEE Trans Energy Conversion*, 1994, vol. 9, no. 3, pp. 482–488.
- Kruangpradit P., Tayati W. Hybrid renewable energy system development in Thailand. *Renewable Energy*, 1996, vol. 8, no. 1–4, pp. 514–517.
- Kellogg W.D., Nehrir M.H., Venkataramana G., Gerez V. Generation unit sizing and cost analysis for standalone wind, photovoltaic and hybrid wind/PV systems. *IEEE Trans Energy Conversion*, 1998, vol. 13, no. 1, pp. 70–75.
- Chedid R., Rahman S. Unit sizing and control of hybrid wind-solar power system. *IEEE Trans Energy Conversion*, 1997, vol. 12, no. 1, pp. 79–86.
- Dilettoso E., Gagliano S., Salerno N., Tina G. Optimization of hybrid solar wind power systems. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2007, vol. 26, no. 3–4, pp. 225–231.
- Tina G., Gagliano S., Raiti S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment. *Solar Energy*, 2006, vol. 80, no. 5, pp. 578–588.
- Hollands K.T.G., Huget R.G. A probability density function for the clearness index, with applications. *Solar Energy*, 1983, vol. 30, no. 3, pp. 195–209.
- Ettoumi F.Y., Sauvageot H., Adane A.E.H. Statistical bivariate modelling of wind using first-order Markov chain and Weibull distribution. *Renewable Energy*, 2003, vol. 28, no. 11, pp. 1787–1802.
- Tina G., Gagliano S. Probability analysis of weather data for energy assessment of hybrid solar/wind power system. 4th IASME/WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD'08). Algarve, Portugal, June 11–13, 2008. pp. 217–223.
- Rykhlov B.A. Analysis of the various distribution laws application to equalize wind speeds in the southeast of the Russian European territory. *News of Saratov University*, 2010, vol. 10, no. 2, Ser. Earth sciences, pp. 25–30. In Rus.
- Bashahu M., Buseke M. Statistical analysis of hourly wind speed data from some burundian stations using beta probability density functions. *Modern Environmental Science and Engineering*, 2016, vol. 2, no. 11, pp. 740–746.
- Safari B. Modeling wind speed and wind power distributions in Rwanda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 2, pp. 925–935.
- Mohammadi K., Alavi O., McGowan J.G. Use of Birnbaum–Saunders distribution for estimating wind speed and wind power probability distributions: a review. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 143, pp. 109–122.
- Kantar Y.M., Usta I., Arik I., Yenilmez I. Wind speed analysis using the extended generalized Lindley distribution. *Renewable Energy*, 2018, vol. 118, pp. 1024–1030.
- Aries N., Boudia S.M., Ounis H. Deep assessment of wind speed distribution models: a case study of four sites in Algeria. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 155, pp. 78–90.

18. Jung C., Schindler D. Global comparison of the goodness-of-fit of wind speed distributions. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 133, pp. 216–234.
19. Jung C., Schindler D., Laible J., Buchholz A. Introducing a system of wind speed distributions for modeling properties of wind speed regimes around the world. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 144, pp. 181–192.
20. Jung C., Schindler D. 3D statistical mapping of Germany's wind resource using WSWs. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 159, pp. 96–108.
21. Ouarda T.B.M.J., Charron C., Chebana F. Review of criteria for the selection of probability distributions for wind speed data and introduction of the moment and L-moment ratio diagram methods, with a case study. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 124, pp. 247–265.
22. Arthur Y.D., Gyamfi K.B., Appiah S.K. Probability distributional analysis of hourly solar irradiation in Kumasi-Ghana. *International Journal of Business and Social Research*, 2013, vol. 3, no. 3, pp. 63–75.
23. Guwaeder A., Ramakumar R. Statistical analysis of PV insolation data. 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). Washington, DC, 2017. pp. 1122–1126.
24. Alsafasfeh Q., Saraereh O., Khan I., Kim S. Solar PV grid power flow analysis. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 6, 1744. DOI:10.3390/su11061744
25. Ayodele T.R. Determination of probability distribution function for modelling global solar radiation: case study of Ibadan, Nigeria. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 233–245.
26. ISW – *Programmnaya sistema statisticheskogo analiza odnomernykh nablyudeniy* [ISW – Software system for statistical analysis of one-dimensional observations]. Available at: <https://ami.nstu.ru/~headrd/ISW.htm> (accessed 3 February 2020)
27. Lemesko B.Yu. *Kriterii proverki gipotez ob odnorodnosti. Rukovodstvo po primeneniyu* [Tests for homogeneity. Guide on the application]. Moscow, INFRA–M Publ., 2017. 208 p. DOI: 10.12737/22368
28. Lemesko B.Yu. *Neparametricheskie kriterii soglasiya: rukovodstvo po primeneniyu* [Nonparametric goodness-of-fit tests. Guide on the application]. Moscow, INFRA–M Publ., 2014. 163 p. DOI: 10.12737/11873
29. Kac M., Kiefer J., Wolfowitz J. On tests of normality and other tests of goodness of fit based on distance methods. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1955, vol. 26, no. 2, pp. 189–211.
30. Lemesko B.Y., Veretelnikova I.V., Lemesko S.B., Novikova A.Y. Application of homogeneity tests: problems and solution. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham, Springer, 2017. 10684, pp. 461–475. DOI: 10.1007/978-3-319-71504-9_38
31. Lemesko B.Yu., Veretelnikova I.V. Power of k-sample tests aimed at checking the homogeneity of laws. *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 7, pp. 647–654. DOI: 10.1007/s11018-018-1479-1
32. Lehmann E.L. Consistency and unbiasedness of certain nonparametric tests. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1951, vol. 22, no. 1, pp. 165–179.
33. Rosenblatt M. Limit theorems associated with variants of the von Mises statistic. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1952, vol. 23, no. 4, pp. 617–623.
34. Pettitt A.N. A two-sample Anderson–Darling rank statistic. *Biometrika*, 1976, vol. 63, no. 1, pp. 161–168.
35. Smirnov V.N. Otsenka raskhozhdeniya mezhdru impericheskimi krivymi raspredeleniya v dvukh nezavisimyykh vyborkakh [Estimation of the discrepancy between empirical distribution curves in two independent samples]. *Bulletin of Moscow State University*, Series A, 1939, vol. 2, no. 2, pp. 3–14.
36. Lemesko B.Yu., Lemesko S.B. Statistical distribution convergence and homogeneity test power for Smirnov and Lehmann–Rosenblatt tests. *Measurement Techniques*, 2005, vol. 48, no. 12, pp. 1159–1166. In Rus.
37. Zhang J. Powerful two-sample tests based on the likelihood ratio. *Technometrics*, 2006, vol. 48, no. 1, pp. 95–103. DOI 10.1198/004017005000000328
38. Zhang J., Wu Y. k-Sample tests based on the likelihood ratio. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2007, vol. 51, no. 9, pp. 4682–4691.
39. Bezrukikh P.P. *Vetroenergetika: spravochnoe i metodicheskoe posobie* [Wind energy: a reference and methodological manual]. Moscow, Energiya Publ., 2010. 195 p.
40. Blinov P.Y., Lemesko B.Y. The simulation system and research of functions of random variables. 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, 2016. pp. 203–209.
41. Manusov V.Z., Kholdonov A.A., Boyko K.N., Khaldarov S.K. Increasing the degree of integration of wind power stations in the power system by using mathematical models of wind forecasting and power consumption by the system operator. *Problems of regional energy*, 2017, vol. 3, no. 35, pp. 45–57. In Rus.

Received: 2 September 2020.

Information about the authors

Vadim Z. Manusov, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University.

Boris Yu. Lemesko, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University.

Sherzod K. Khaldarov, applicant for Cand. Sc., trainee, Novosibirsk State Technical University.

УДК 620.98: 519.816

ВЫБОР ТОПЛИВА ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В РАЙОНАХ НОВОГО ОСВОЕНИЯ С УЧЕТОМ ФАКТОРА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Шакиров Владислав Альбертович,
mynovember@mail.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Актуальность исследования обусловлена трансформацией методологии обоснования развития энергетики от централизованного государственного планирования к новой парадигме многостороннего процесса принятия решений и создания механизмов их реализации в условиях многокритериальности, множественности несовпадающих интересов, неопределенности исходной информации и условий дальнейшего развития. Новые условия обоснования решений исследуются в разрезе строительства тепловых электростанций в удаленных районах нового освоения, где в качестве топлива рассматриваются местные энергоресурсы. Выбор топлива определяет экономические и технические показатели электростанций, их экологические и социальные воздействия. Для обоснования выбора топлива тепловых электростанций с позиций многочисленных критериев в условиях неопределенности исходной информации и будущих условий развития необходимо создание новых методических подходов.

Цель: предложить методику многокритериального выбора топлива тепловой электростанции в районах нового освоения с учетом фактора неопределенности.

Объекты: месторождения органического топлива в удаленных районах нового освоения.

Методы: мультипликативный метод анализа иерархий, метод многокритериальной теории полезности, методы интервального анализа, методы теории нечетких множеств.

Результаты. Проведен обзор современных методических подходов в задачах обоснования выбора топлива для электростанций. Предложена модификация метода мультипликативного анализа иерархий, которая позволяет учесть неопределенность исходной информации и неоднозначность предпочтений лица, принимающего решения, а также существенно снизить количество запросов информации. На основе модифицированного метода разработана методика многокритериального выбора топлива для тепловых электростанций в районах нового освоения. Ее применение рассмотрено на проблеме выбора угля в трех пунктах перспективного размещения тепловой электростанции в Омсукчанском и Северо-Эвенском районах Магаданской области. В качестве критериев сравнения альтернатив используются: стоимость топлива, ущерб от выброса загрязняющих веществ при сжигании топлива, обеспеченность запасами, условия освоения и добычи, воздействие выбросов при сжигании топлива на здоровье населения, обеспечение занятости местного населения.

Ключевые слова:

Тепловые электростанции, топливо, уголь, многокритериальный выбор, неопределенность исходной информации.

Введение

При выборе пункта размещения тепловой электростанции (ТЭС) на стадии технико-экономического обоснования вариантно рассматривается наиболее эффективный вид топлива, способы его подачи на электростанцию. В период существования жесткой централизованной системы планирования развития энергетических систем такие задачи входили в общую иерархию и решались с использованием оптимизационных моделей в несколько итераций с рассмотрением на уровнях единой энергосистемы, объединенных и районных энергосистем. Так, с учетом результатов прогнозирования нагрузок и электропотребления, в рамках задачи разработки топливно-энергетического баланса, определялись размеры выделяемых топливных ресурсов, проводилась их экономическая оценка, намечались варианты возможной структуры генерирующих мощностей. Далее решение по структуре генерирующих мощностей уточнялось, проводилась оптимизация мощностей электростанций, определялись ориентировочные сроки ввода, пункты и площадки. Основным критерием оценки была народнохозяйственная эффективность с минимумом приведенных затрат при выполнении ряда технических и экологических ограничений [1].

Проводимые с начала 90-х годов прошлого века рыночные реформы изменили условия развития энергетических систем. Функция государства теперь заключается в выработке и проведении общей энергетической политики. Увеличилось число лиц, принимающих решения, большую роль стали играть региональные органы управления и владельцы энергетических объектов, которые оказывают влияние на их функционирование и развитие [1].

В результате реформирования энергетики произошла трансформация методологии обоснования ее развития от централизованного государственного планирования к новой парадигме многостороннего процесса обоснования решений и создания механизмов их реализации в условиях многокритериальности, множественности несовпадающих интересов, неопределенности исходной информации и условий дальнейшего развития [1].

В исследованиях можно выделить три группы задач, связанных с выбором топлива для электростанций. Первая группа задач связана с оценкой в масштабах региона или страны только экологических последствий ввода станций на различных видах топлива за период жизненного цикла, от этапа строительства до этапа ликвидации [2]. Вторая группа за-

дача связана с выбором перспективных для исследуемого района технологий производства энергии по укрупненным показателям стоимости, экологических и социальных воздействий [1, 3–5]. Состав альтернатив определяется имеющимися в районе традиционными органическими и возобновляемыми энергоресурсами.

Наиболее детально проблема выбора топлива рассматривается в третьей группе задач, связанных с выбором месторождения или поставщика определенного вида топлива на этапе проектирования электростанции. Сравнение проводится по стоимости топлива, условиям добычи и транспортировки, характеристикам топлива (теплоте сгорания, влажности, зольности, содержанию азота, серы и т. п.), величине запасов и другим. Для решения задач этой группы используется два основных подхода. Подход на основе оценки экономической эффективности заключается в сравнении вариантов по таким показателям, как чистый дисконтированный доход, приведенные затраты, нормированная стоимость производства энергии [1, 6]. Неэкономические факторы или учитываются в виде ограничений, или приводятся с использованием различных допущений в денежное выражение для возможности учета в экономической оценке.

Ввиду тенденций повышения значимости экологических и социальных факторов расширяется применение многокритериального подхода к выбору топлива для ТЭС. Наиболее часто применяются методы TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE, ANP (Analytic Hierarchy Process) [7–10]. В основе подхода лежит раздельное рассмотрение экономического и неэкономических факторов с позиций их относительной важности для лица или группы лиц, принимающих решения (ЛПР). Многокритериальный подход имеет преимущество, когда альтернативные варианты имеют существенные различия в экологических или социальных воздействиях, а также в случаях, если альтернативные варианты обладают практически равными экономическими показателями. В таких ситуациях появляется необходимость достижения по неэкономическим критериям лучших возможных значений.

Для учета неточности, связанной с субъективным характером оценок экспертов, расхождением оценок нескольких экспертов, неопределенности исходной информации необходимо развитие методов многокритериального выбора. В статье предлагается модификация многокритериального метода АНР для выбора топлива ТЭС с учетом неопределенности исходной информации и предпочтений лиц, принимающих решения.

Постановка проблемы многокритериального выбора топлива

При рассмотрении потенциальных пунктов строительства ТЭС в зависимости от ресурсного потенциала и транспортной инфраструктуры набор альтернатив может включать один или несколько видов топлива разных месторождений.

Выбор альтернативы влечет длительные экономические и социальные последствия, воздействия на

окружающую среду, здоровье и безопасность населения. Поэтому при принятии решений преследуются многочисленные цели, направленные на обеспечение высокой экономической эффективности и минимизацию негативных последствий, связанных с выбором топлива. Для количественного измерения степени достижения целей формулируются критерии. Например, в качестве критериев могут выступать: стоимость топлива с учетом доставки; экспертная оценка условий освоения месторождений, добычи и транспорта энергоресурса; выброс вредных веществ в атмосферу при использовании топлива; изменение продолжительности жизни местного населения из-за вредных выбросов ТЭС при использовании топлива.

Точная количественная оценка многих критериев затруднена вследствие неполноты и неопределенности исходной информации. Предпочтения ЛПР также неоднозначны из-за неопределенности будущих условий.

Задача многокритериального выбора сформулирована следующим образом: пусть имеется m альтернатив $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ топлива для ТЭС. Последствия, связанные с выбором альтернативы, характеризуются в общем случае нечеткими оценками $\{\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_m\}$ по n критериям $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$. Требуется упорядочить альтернативы множества A с учетом нескольких вариантов предпочтений ЛПР, отвечающих возможным сценариям перспективного развития.

Для сформулированной задачи многокритериального выбора топлива целесообразно применение метода, ориентированного на непосредственное сравнение малого числа заданных альтернатив. Наиболее эффективным из таких методов является АНР. Широкой апробации АНР способствовали удобство для ЛПР парных сравнений альтернатив и критериев с использованием специальной шкалы оценок. В связи с критикой метода АНР по ряду положений были разработаны его различные модификации [11]. Одной из наиболее известных является мультипликативная версия метода АНР, предложенная Ф. Лутсмой.

Основные этапы метода мультипликативного АНР

Метод мультипликативного АНР включает следующие основные этапы [12]:

1. Структуризация и выделение базовых элементов проблемы: цели, критерии для оценки степени достижения целей f_1, f_2, \dots, f_n и альтернативы a_1, \dots, a_m .
2. Оценка альтернатив по критериям с использованием формализованных моделей, данных объектов-аналогов или знаний экспертов.
3. Парные сравнения критериев и альтернатив по отдельным критериям с заполнением матриц парных сравнений элементами:

$$d_{ij} = h^{\delta_{ij}}, \quad (1)$$

где h – параметр шкалы, равен 2 при заполнении матриц парных сравнений альтернатив, $2^{0.5}$ – при заполнении матриц парных сравнений критериев [12]; δ_{ij} – числовая оценка сравнительной предпочтительности i -го и j -го элементов от 0 до 8. Оценка сравнительной

предпочтительности 0 соответствует безразличию между сравниваемыми элементами; 2 – слабому превосходству i -го элемента на j -м элементом; 4 – определенному превосходству i -го элемента на j -м элементом; 6 – сильному превосходству i -го элемента на j -м элементом; 8 – очень сильному превосходству i -го элемента на j -м элементом.

Частная ценность s_{iq} альтернативы a_i по q -му критерию определяется [12]:

$$s_{iq} = \left(\prod_{j=1}^m d_{ijq} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (2)$$

Важность q -го критерия рассчитывается по формуле [12]:

$$\omega_q = \left(\prod_{i=1}^n 2^{0,5\delta_{qi}} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (3)$$

4. Определение многокритериальных оценок альтернатив путем мультипликативной свертки частных ценностей [12]:

$$s(a_i) = \prod_{q=1}^n s_{iq}^{\omega_q}. \quad (4)$$

Модификация мультипликативного АНР для учета фактора неопределенности

Для учета неопределенности, связанной с субъективным характером предпочтений ЛПР, Д. Чангом, Дж. Бабли были предложены нечеткие модификации метода АНР [13, 14]. В основе подходов лежит замена оценок парных сравнений δ_{ij} нечеткими числами, что требует многочисленных запросов к ЛПР и является весьма трудоемким. Повышается вероятность ошибочных сравнений и несогласованных ответов.

В этой связи в статье предлагается подход к учету неопределенности исходной информации и предпочтений ЛПР, направленный одновременно на снижение числа запросов к ЛПР. В основе подхода лежит

предложенный Ф. Лутсмой способ определения δ_{ij} без участия ЛПР. Так, диапазон оценок по критерию $[c_{\min}, c_{\max}]$ может быть разбит на несколько интервалов (категорий). Оценка μ по этой шкале может быть определена по выражению [12]:

$$\begin{cases} \mu = \log_2 \left(\frac{c - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}} \cdot 2^k \right), & \text{если } v(c_{\min}) > v(c_{\max}); \\ \mu = \log_2 \left(\frac{c_{\max} - c}{c_{\max} - c_{\min}} \cdot 2^k \right), & \text{если } v(c_{\max}) > v(c_{\min}), \end{cases} \quad (5)$$

где k – число категорий; $v(c_{\min})$, $v(c_{\max})$ – ценность для ЛПР максимальной и минимальной оценок по критерию, c – оценка по критерию.

Оценка шкалы сравнительной предпочтительности альтернатив a_i , a_j определяется:

$$\delta_{ij} = \mu_j - \mu_i. \quad (6)$$

В результате использования (5) и (6) число запросов к ЛПР существенно сокращается.

Для учета особенностей предпочтений ЛПР и их неоднозначности предлагается дополнить мультипликативный АНР процедурой построения однокритериальных функций ценности интервального вида (рис. 1, а).

Худшей оценке по критерию y_q^0 присваивается ценность $v(y_q^0)=0$, лучшей оценке по критерию y_q^1 присваивается ценность $v(y_q^1)=1$. Промежуточные оценки с ценностью 0,25, 0,5 и 0,75 должно назначить ЛПР с возможностью использования интервальных чисел [15]. Функции ценности позволяют получить оценки ценности любых альтернатив в области определения без дополнительных запросов к ЛПР (рис. 1, б).

Подстановка в (1), (5) и (6) значений функций ценности определяет оценку матрицы парных сравнений:

$$d_{ij} = \frac{1 - v_q(y_{qj})}{1 - v_q(y_{qi})}. \quad (7)$$

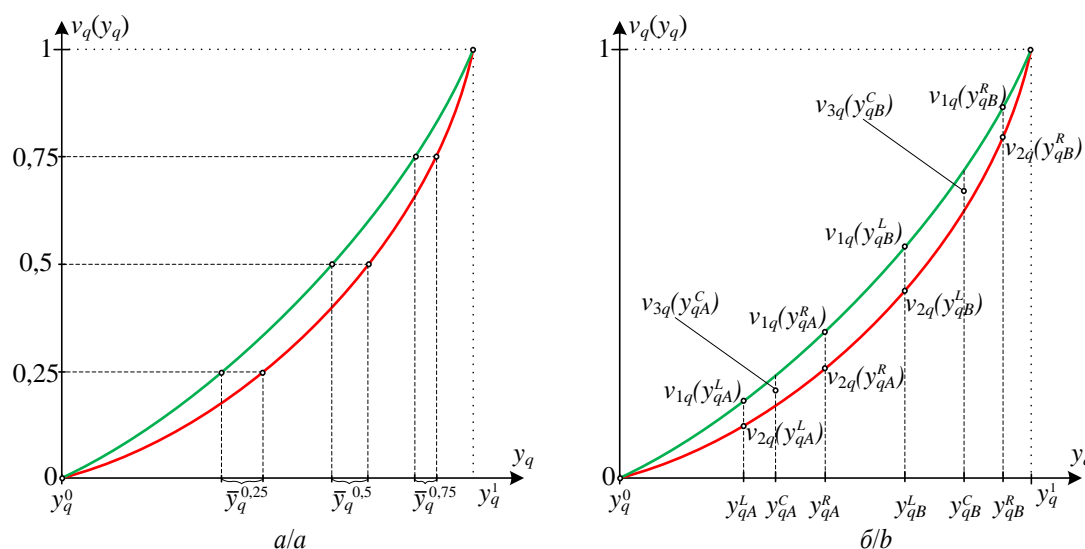


Рис. 1. Однокритериальные функции ценности интервального вида: а) процедура построения; б) определение значений функции

Fig. 1. Single-criterion interval value function: a) construction procedure; b) definition of function values

Так как в основе выражения (7) лежит формула (5) с операций логарифмирования, то необходимо принять $v_q(y_q^L) = 255/256$.

Определение элементов матриц парных сравнений по формуле (7) лежит в основе предлагаемой методики выбора топлива ТЭС с учетом фактора неопределенности. Голубым цветом на рис. 2 отмечены новые этапы, добавленные к методу мультипликативного АНР.

Рассмотрим отдельные этапы методики на примере сравнения трех альтернатив a_A, a_B, a_C .

На первом этапе с помощью ЛПР формируется иерархия, включающая три уровня: цели, n критериев и m альтернатив (видов топлива, месторождений).

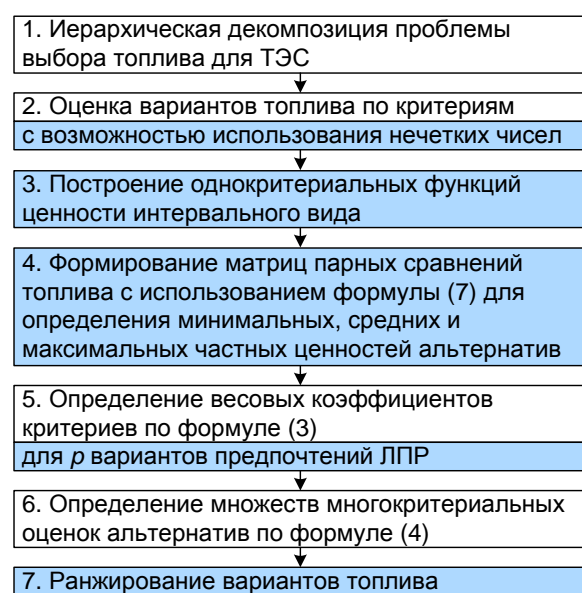


Рис. 2. Методика многокритериального выбора топлива для тепловой электростанции на основе метода мультипликативного анализа иерархий с учетом фактора неопределенности

Fig. 2. Methodology of multi-criteria fuel selection for a thermal power plant based on the multiplicative analytic hierarchy process method taking into account the uncertainty factor

На втором этапе проводится оценка альтернатив по критериям. В условиях неопределенности исходной информации для этого удобно использовать нечеткие числа с треугольной функцией принадлежности $f_{\Delta}(y, y^L, y^C, y^R)$, а также интервалы $[y^L, y^R]$. Значения y^L, y^C, y^R соответствуют худшей, наиболее достоверной (вероятной) и лучшей оценкам. Например, показатели качества угля, такие как теплота сгорания, содержание золы, серы и т. п., характеризуются интервалом возможных значений и средней оценкой для месторождения.

На третьем этапе проводится построение функций ценности интервального вида для каждого критерия. На рис. 1, б показан пример определения ценности альтернатив a_A, a_B . Определяются по два граничных значения ценности каждой оценки: $v_{1q}(y_q^L), v_{2q}(y_q^L)$ и $v_{1q}(y_q^R), v_{2q}(y_q^R)$, а также средняя ценность $v_{3q}(y_q^C)$ альтернативы:

$$v_{3q}(y_q^C) = \frac{1}{2} [v_{1q}(y_q^C) + v_{2q}(y_q^C)].$$

На этапе 4 проводится формирование матриц парных сравнений альтернатив. Для того чтобы определить максимально и минимально возможные частные ценности при нечетких оценках альтернатив и интервальной функции ценности необходимо сформировать матрицы специальным образом. Так, для определения максимальной возможной частной ценности альтернативы в матрицу парных сравнений должны быть внесены наибольшие оценки сравнительной важности этой альтернативы и наименьшие – других альтернатив, и наоборот – для получения минимальной возможной частной ценности. Например, для альтернативы a_A :

$$D_{\max A}^{v_{1q}} = \begin{bmatrix} 1; d_{\max A \min B}^{v_{1q}}; d_{\max A \min C}^{v_{1q}} \\ d_{\min B \max A}^{v_{1q}}; 1; d_{\min B \min C}^{v_{1q}} \\ d_{\min C \max A}^{v_{1q}}; d_{\min C \min B}^{v_{1q}}; 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1; \left(\frac{1 - v_{1q}(y_{qB}^R)}{1 - v_{1q}(y_{qA}^L)} \right); \left(\frac{1 - v_{1q}(y_{qC}^R)}{1 - v_{1q}(y_{qA}^L)} \right) \\ \left(\frac{1 - v_{1q}(y_{qA}^L)}{1 - v_{1q}(y_{qB}^R)} \right); 1; \left(\frac{1 - v_{1q}(y_{qC}^R)}{1 - v_{1q}(y_{qB}^R)} \right) \\ \left(\frac{1 - v_{1q}(y_{qA}^L)}{1 - v_{1q}(y_{qC}^R)} \right); \left(\frac{1 - v_{1q}(y_{qB}^R)}{1 - v_{1q}(y_{qC}^R)} \right); 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $D_{\max A}^{v_{1q}}$ – матрица парных сравнений альтернатив, сформированная с использованием функции ценности v_{1q} таким образом, чтобы определить максимальную возможную частную ценность альтернативы a_A ; $d_{\max A \min B}^{v_{1q}}, d_{\max A \min C}^{v_{1q}}, d_{\min B \min C}^{v_{1q}}$ – элементы матрицы парных сравнений, соответствующие оценкам сравнительной важности трех альтернатив, при которых обеспечивается максимально возможная частная ценность альтернативы a_A .

Далее по формулам, аналогичным (8), формируются матрицы $D_{\min A}^{v_{1q}}, D_{\max A}^{v_{2q}}, D_{\min A}^{v_{2q}}, D_{\max B}^{v_{1q}}, D_{\min B}^{v_{1q}}, D_{\max B}^{v_{2q}}, D_{\min B}^{v_{2q}}, D_{\max C}^{v_{1q}}, D_{\min C}^{v_{1q}}, D_{\max C}^{v_{2q}}, D_{\min C}^{v_{2q}}$, а также матрица $D_{\text{avg}}^{v_{3q}}$ для определения средних частных ценностей альтернатив a_A, a_B, a_C :

$$D_{\text{avg}}^{v_{3q}} = \begin{bmatrix} 1; d_{\text{avgAB}}^{v_{3q}}; d_{\text{avgAC}}^{v_{3q}} \\ d_{\text{avgBA}}^{v_{3q}}; 1; d_{\text{avgBC}}^{v_{3q}} \\ d_{\text{avgCA}}^{v_{3q}}; d_{\text{avgCB}}^{v_{3q}}; 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1; \left(\frac{1 - v_{3q}(y_{qB}^C)}{1 - v_{3q}(y_{qA}^C)} \right); \left(\frac{1 - v_{3q}(y_{qC}^C)}{1 - v_{3q}(y_{qA}^C)} \right) \\ \left(\frac{1 - v_{3q}(y_{qA}^C)}{1 - v_{3q}(y_{qB}^C)} \right); 1; \left(\frac{1 - v_{3q}(y_{qC}^C)}{1 - v_{3q}(y_{qB}^C)} \right) \\ \left(\frac{1 - v_{3q}(y_{qA}^C)}{1 - v_{3q}(y_{qC}^C)} \right); \left(\frac{1 - v_{3q}(y_{qB}^C)}{1 - v_{3q}(y_{qC}^C)} \right); 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Сформированные матрицы парных сравнений позволяют с помощью формулы (2) определить максимальную, минимальную и среднюю оценки частной ценности альтернатив.

Например, расчет частных ценностей альтернатив a_A , a_B , a_C по матрицам парных сравнений $D_{\max A}^{v_{1q}}$ $D_{\max A}^{v_{2q}}$ проводится следующим образом:

$$s_{q \max A} = \left(\max(d_{\max A \min B}^{v_{1q}} \cdot d_{\max A \min C}^{v_{1q}}; d_{\max A \min B}^{v_{2q}} \cdot d_{\max A \min C}^{v_{2q}}) \right)^{\frac{1}{m}};$$

$$s_{qB \max A} = \left(d_{\min B \max A}^{v_{1q}} \cdot d_{\min B \min C}^{v_{1q}} \right)^{\frac{1}{m}};$$

$$s_{qC \max A} = \left(d_{\min C \max A}^{v_{1q}} \cdot d_{\min C \min B}^{v_{1q}} \right)^{\frac{1}{m}},$$

где

- $i=1$, если $d_{\max A \min B}^{v_{1q}} \cdot d_{\max A \min C}^{v_{1q}} \geq d_{\max A \min B}^{v_{2q}} \cdot d_{\max A \min C}^{v_{2q}}$;
- $i=2$, если $d_{\max A \min B}^{v_{1q}} \cdot d_{\max A \min C}^{v_{1q}} < d_{\max A \min B}^{v_{2q}} \cdot d_{\max A \min C}^{v_{2q}}$.

Частные ценности альтернатив a_A , a_B , a_C при оценке по матрице парных сравнений $D_{\text{avg}}^{v_{3q}}$:

$$s_{q \text{avg} A} = \left(d_{\text{avg} AB}^{v_{3q}} \cdot d_{\text{avg} AC}^{v_{3q}} \right)^{\frac{1}{m}},$$

$$s_{q \text{avg} B} = \left(d_{\text{avg} BA}^{v_{3q}} \cdot d_{\text{avg} BC}^{v_{3q}} \right)^{\frac{1}{m}},$$

$$s_{q \text{avg} C} = \left(d_{\text{avg} CA}^{v_{3q}} \cdot d_{\text{avg} CB}^{v_{3q}} \right)^{\frac{1}{m}}.$$

На пятом этапе проводится оценка весовых коэффициентов критериев. ЛПР может сформировать несколько матриц парных сравнений критериев, отражающих различные предпочтения с учетом возможных вариантов развития рассматриваемых районов размещения ТЭС. Таким образом, с помощью формулы (3) проводится оценка p множеств коэффициентов важности:

$$W = \{W_1, W_2, \dots, W_p\} =$$

$$= \left\{ \left\{ \omega_{11}, \omega_{21}, \dots, \omega_{n1} \right\}, \dots, \left\{ \omega_{1p}, \omega_{2p}, \dots, \omega_{np} \right\} \right\}.$$

На шестом этапе проводится многокритериальная оценка альтернатив по формуле (4) с использованием множеств оценок частной ценности и множеств коэффициентов важности. В целом формируется $2mp+p$ множеств многокритериальных оценок. Для удобства сопоставления полученных результатов оценки нормируются.

На рис. 3 представлен пример полученных многокритериальных оценок трех альтернатив.

Максимальные $s_{\max i}(a_i)$, минимальные $s_{\min i}(a_i)$, а также средние $s_{\text{avgmin}}(a_i)$, $s_{\text{avgmax}}(a_i)$ оценки определяются из множеств многокритериальных оценок, полученных с учетом неопределенности исходной информации и p вариантов предпочтений ЛПР.

На седьмом этапе проводится ранжирование альтернатив. Из рис. 3 видно, что сравнение альтернатив может не требовать дополнительного анализа, как в случае с превосходством альтернативы a_C над альтернативами a_A и a_B . Однако может возникать ситуа-

ция, когда потребуется количественная оценка превосходства одной альтернативы по отношению к другой, как, например, в случае с альтернативами a_A и a_B . Для таких ситуаций предлагается использовать две модели сравнения альтернатив.

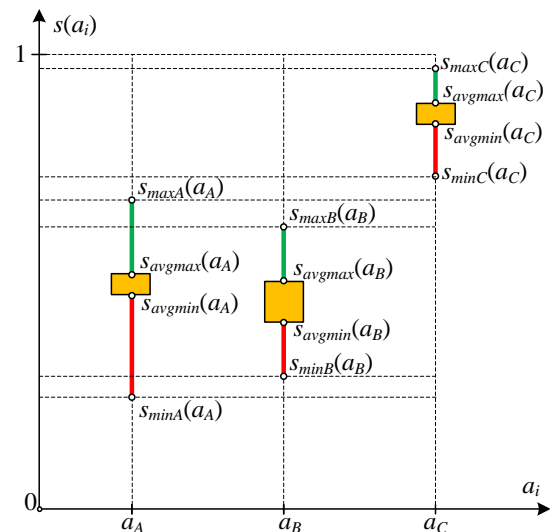


Рис. 3. Пример многокритериальных оценок альтернатив в условиях неопределенности исходной информации и предпочтений лица, принимающего решения

Fig. 3. Example of multi-criteria assessments of alternatives in the face of uncertainty in the initial information and preferences of decision makers

1. Модель сравнения альтернатив по оценке относительного доминирования:

$$F_{\text{dom}ij} = \frac{z_{ij}}{2mp + p}, \quad (10)$$

где z_{ij} – количество сравнений альтернатив a_i и a_j , при которых многокритериальная оценка альтернативы $s_i(a_i) > s_i(a_j)$; $t=1, \dots, 2mp+p$.

Если $F_{\text{dom}ij} > 0,5$, альтернатива a_i предпочтительнее a_j .

2. Модель сравнения альтернатив на основе суммы разностей многокритериальных оценок:

$$F_{sij} = \frac{\sum_{t=1}^{2mp+p} \max[s_t(a_i) - s_t(a_j); 0]}{\sum_{t=1}^{2mp+p} |s_t(a_i) - s_t(a_j)|}. \quad (11)$$

Если $F_{sij} > 0,5$, альтернатива a_i предпочтительнее a_j .

Окончательное решение ЛПР или группа ЛПР принимает исходя из графического представления многокритериальных оценок и полученных количественных показателей.

Применение методики выбора топлива для тепловой электростанции в Магаданской области

Магаданская область является одним из ключевых субъектов Российской Федерации с богатейшей минерально-сырьевой базой. На территории региона имеются разведанные запасы каменных и бурых углей, золота и серебра, олова, вольфрама, свинца, цин-

ка, стройматериалов, пресных подземных и минеральных вод. Значительную перспективу имеют проекты горнодобывающей отрасли Омсукчанского и Северо-Эвенского районов. Сдерживающий фактор освоения новых месторождений связан с их большой удаленностью от объектов энергетической и транспортной инфраструктуры. Реализация крупных проектов потребует создание в непосредственной близости источника электрической и тепловой энергии.

На рис. 4 представлен ситуационный план с намеченными перспективными пунктами П1, П2, П3 строительства ТЭС. Перспектива развития в пунктах определяется следующими проектами:

П1: Омсукчанский угольный кластер; морской порт с угольным терминалом в бухте Пестрая Дресва; Дукатский хаб, включающий месторождения серебра Дукат, Лунное, Гольцовое, Перевальное; Верхнеомолонское месторождение молибдена; оловорудные месторождения.

П2: Олдянинский рудный узел с общим прогнозным ресурсным потенциалом 568 тыс. т молибдена, 379 тыс. т меди, 20,8 т золота, 19 т рения; Южно-Омолонский железорудный узел с общим ресурсным потенциалом железной руды 1990 млн т.

П3: месторождения россыпного золота, рудного золота и серебра, коренные месторождения золота и серебра; запасы яшмы, берилла, пренита, янтаря; рыбоперерабатывающий завод; завод по глубокой переработке продукции оленеводства; мясомолочный комбинат; птицефабрика; морской порт.

Характеристика пунктов и месторождений угля дана в табл. 1. В табл. 2 представлена краткая характеристика угля [16–18].

В соответствии с методикой многокритериального выбора топлива (рис. 2) на первом этапе формируется иерархия целей и критериев для оценки топлива. Сравнение топлива для ТЭС в пунктах П1 и П2 проводится с помощью множества критериев $F_1 = \{f_1, f_2, f_{31}, f_{41}\}$, в пункте П3 – с помощью множества $F_2 = \{f_1, f_2, f_{32}, f_{42}\}$.

Критерий f_1 – «Удельная стоимость угля в условном эквиваленте» служит для оценки достижения цели «Минимизация затрат на топливо».

Критерий f_2 – «Удельный ущерб от выбросов при сжигании топлива на ТЭС» используется для оценки достижения цели «Минимизация воздействия на окружающую среду».

Критерий f_{31} – «Обеспеченность запасами угля в условном эквиваленте» используется для оценки достижения цели «Максимизация запасов угля».

Критерий f_{41} – «Условия освоения месторождения, добычи и транспорта угля» используется для оценки достижения цели «Минимизация сложности добычи угля».

Критерий f_{32} – «Изменение продолжительности жизни местного населения из-за вредных выбросов ТЭС» служит для оценки достижения цели «Минимизация воздействия на здоровье населения».

Критерий f_{42} – «Обеспечение занятости местного населения» используется для учета социального фактора при принятии решений.

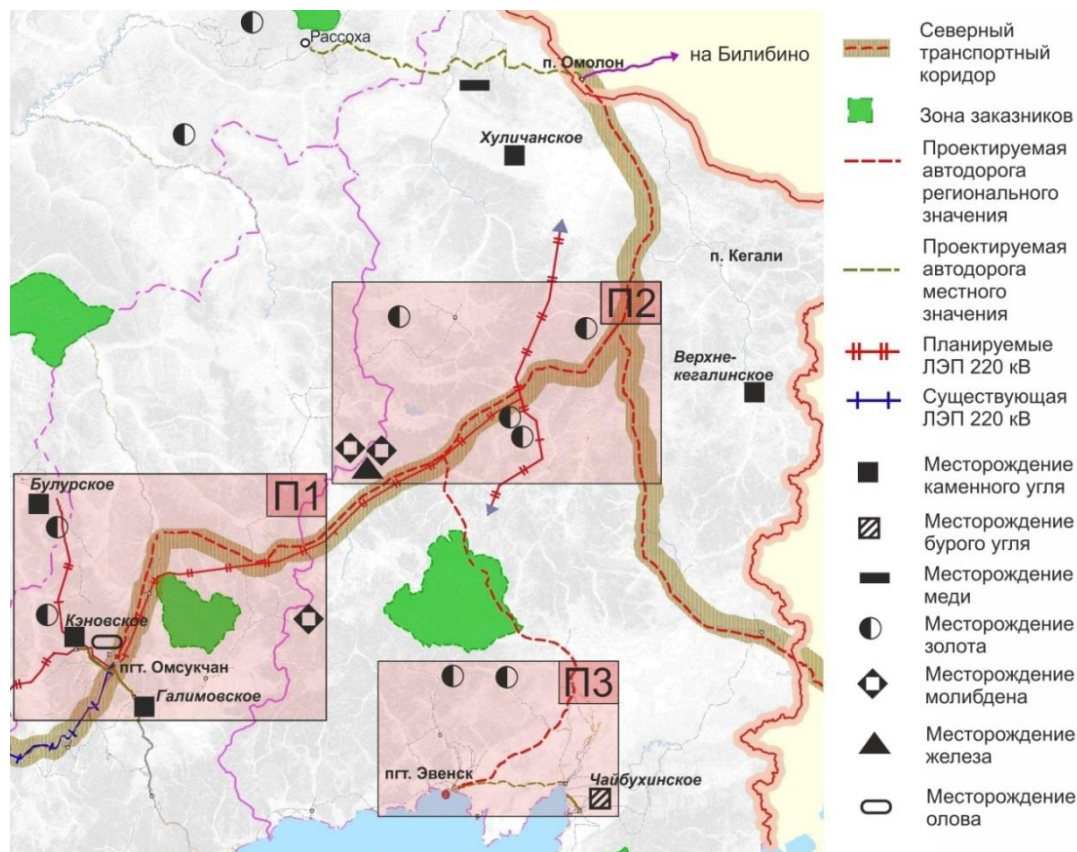


Рис. 4. Ситуационный план рассматриваемой территории
Fig. 4. Situation plan of the territory

Таблица 1. Характеристика месторождений угля для топливообеспечения тепловых электростанций

Table 1. Characteristics of coal deposits for fuel supply of thermal power plants

Пункт Point	Месторождения угля Coal deposits	Способ освоения Coal deposit development method	Характеристика района Characteristic of the area	Мощность пластов, м Coal seam thickness, m
П1 P1	Галимовское месторождение каменного угля Galimovskoe hard coal deposit	Подземный Underground	Район освоен, 22 км до пгт. Омсукчан, имеются дороги The area is developed, 22 km to Omsukchan settlement, transport infrastructure	1,2–13
	Кэновское месторождение каменного угля Kenovskoe hard coal deposit	Открытый Surface	Район относительно освоен, 40 км до п. Омсукчан, имеются дороги The area is relatively developed, 40 km to Omsukchan, roads	1–6
	Булурское месторождение каменного угля Bulurskoe hard coal deposit	Открытый и подземный Surface and underground	Малоосвоенный район, 45 км до п. Аякс временные дороги Poorly developed area, 45 km to Ayax, temporary roads	1–24
П2 P2	Хуличанское месторождение каменного угля Khulichanskoe hard coal deposit	Открытый Surface	Территория не освоена, расстояние по автозимнику до п. Омолон 75 км Undeveloped territory, winter road to the village of Omolon – 75 km	3–4
	Верхнекегалинское месторождение каменного угля Verkhnekegalinskoe hard coal deposit	Открытый Surface	Территория не освоена, 70 км до п. Кегали, дороги отсутствуют Undeveloped territory, 70 km to the village of Kegali, no roads	3–4
П3 P3	Чайбухинское месторождение бурого угля Chaybuhinskoe brown coal deposit	Открытый и подземный Surface and underground	Слабоосвоенный район, 100 км до п. Эвенск, временные дороги Weakly developed area, 100 km to Evensk settlement, temporary roads	0,5–6
	Привозной каменный уголь Hard coal from another region	–	–	–

Таблица 2. Характеристика рассматриваемых вариантов угля

Table 2. Characteristics of coal variants under consideration

Месторождение угля, Coal deposit	Марка Type	Запасы категории, млн т Reserves by category, mln tons		Низшая теплота сгорания на ра- бочее состояние Q_f^r , ккал/кг Net calorific value Q_f^r , kcal/kg	Зольность на сухое состояние A^d , % Ash per dry mass A^d , %	Содержание азота на сухое беззольное состояние N^{daf} , % Nitrogen per dry ash- free mass N^{daf} , %	Содержание серы на сухое беззольное состояние S^{daf} , % Sulfur per dry ash- free mass S^{daf} , %
		A+B+C ₁	P ₁ +P ₂ +P ₃				
Галимовское Galimovskoe	2А 2A	15,7	–	4637–5920 5492	11,6–30,0 22,0	1,1–2,0 1,5	0,3–1,0 0,5
Кэновское Kenovskoe	3А 3A	13	–	5521–6119 5700	2,5–29,4 16,8	0,9–1,3 1,1	0,4–0,6 0,5
Булурское Bulurskoe	2А 2A	–	39,6*	6226–7051 6648	6,6–30,0 13,8	0,5–1,7 1,2	0,1–0,8 0,4
Хуличанское Khulichanskoe	Д D	–	364*	3681–3963 3817	12,3–30,8 23,6	0,6–1,8 1,4	0,2–0,6 0,3
Верхнекегалинское Verkhnekegalinskoe	ДГ DG	–	1540*	4111–5186 4661	16,3–24,5 19,7	0,5–1,9 1,4	0,2–0,8 0,4
Чайбухинское Chaybuhinskoe	Б B	6,3	40,8	2624–3652 3152	6,5–48,9 18,6	1,1–2,1 1,5	0,5–1,4 0,9
Привозной уголь Coal from another region	Д D	–	–	4661–6310 5449	12,1–24,0 15,6	2,1–2,4 2,2	0,4–0,7 0,6

* – пригодные для открытой добычи/suitable for surface mining.

Набор целей и критериев в задачах выбора топлива для ТЭС может варьироваться. Различие в критериях при сравнении угля в пунктах П1–П3 вызвано следующими причинами:

1. В пунктах П1 и П2 проводится сравнение только местных месторождений каменного угля, которые отличаются запасами и условиями освоения.
2. В пункте П3 бурый уголь местного месторождения сопоставляется с привозным каменным углем. Вводятся критерии оценки социального воздействия и воздействия выбросов на здоровье людей.

На втором этапе методики (рис. 2) проводится оценка альтернатив по критериям. При оценке угля по критерию f_1 «Удельная стоимость угля в условном эквиваленте» применяется формула:

$$y_1 = \frac{p_c k + p_l l}{Q_i^r} Q_{ce},$$

где p_c – цена угля, тыс. р/т; k – коэффициент, учитывающий условия добычи угля, о.е.; p_l – удельная стоимость доставки тонны угля, тыс. р/км; l – расстояние

транспортировки угля, км; Q_{ce} – теплотворная способность условного топлива, ккал/кг.

Используются следующие условия и допущения: p_c для каменного угля принята в диапазоне 3,5–4 тыс. р/т; бурого – 2,5–3 тыс. р/т; p_t принята в диапазоне от 0,017 до 0,019 тыс. р/км; $k=1$ при открытой добыче и 1,35 при подземной добыче, в соответствии со средними данными по отрасли. Расчет y_1 проводится для трех значений низшей теплоты сгорания (табл. 2).

Оценка альтернатив по критерию f_2 «Удельный ущерб от выбросов при сжигании топлива на ТЭС» проводится в соответствии с РД 34.02.305-98 «Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС». Применяется выражение:

$$y_2 = M_a p_a + M_{NO_2} p_{NO_2} + M_{SO_2} p_{SO_2} + M_{CO} p_{CO},$$

где M_a , M_{NO_2} , M_{SO_2} , M_{CO} – выбросы золы, оксидов азота, оксидов серы, оксида углерода, соответственно,

т/т у.т.; p_a , p_{NO_2} , p_{SO_2} , p_{CO} – ставка платы за выбросы золы, оксидов азота, оксидов серы, оксида углерода, соответственно, р/т.

При расчете используются граничные и средние приведенные к рабочей массе значения содержания золы, азота и серы, а также три значения низшей теплоты сгорания угля (табл. 2).

Оценка угля по критерию f_{31} проводится:

$$y_{31} = \frac{\sum R_t k_t}{Q_{ce}} Q_i^r,$$

где R_t – запасы угля t категории, млн т; k_t – коэффициент приведения прогнозных ресурсов угля к разведанным запасам [19].

При оценке угля по критерию f_{41} используется шкала с тремя показателями (табл. 3), по которым экспертом назначаются баллы от 1 до 3. Большой балл назначается альтернативе с лучшей оценкой.

Таблица 3. Шкала для оценки месторождений по условиям освоения и добычи, балл

Table 3. Scale for assessing coal deposits according to the conditions of development and mining, score

Месторождение, угленосный район Coal deposit, coal-bearing region	Способ освоения Development method	Близость населенных пунктов и дорог Proximity of settlements and roads	Мощность пластов угля Coal seam thickness	Итого Total
Галимовское/Galimovskoe	1	3	2	6
Кэновское/Kenovskoe	3	3	1	7
Булурское/Bulurskoe	2	2	3	7
Хуличанское/Khulichanskoe	2	2	1	5
Верхнегалинское/Verkhnegalinskoe	1	1	1	3

Критерий f_{32} отличается сложностью получения достоверных значений. Преимуществом метода АНР является возможность сопоставления альтернатив с помощью оценок сравнительной предпочтительности d_{ij} . При этом может использоваться вспомогательная экспертная или статистическая информация. В частности, при сравнении воздействий выбросов бурого и каменного угля используются результаты исследований количества смертей на 1 ТВт·ч производства энергии на ТЭС [20] – 32,7 и 24,6 соответственно.

При оценке по критерию f_{42} используются интервальные оценки шкалы сравнительной предпочтительности d_{ij} в связи со сложностью определения количественных значений занятости местного населения. Во внимание принимается большая ожидаемая занятость местного населения при освоении местного

Чайбухинского месторождения в сравнении с использованием привозного топлива.

В табл. 4 представлены оценки альтернатив по критериям.

На третьем этапе выбора топлива (рис. 2) проводится построение однокритериальных интервальных функций ценности и определение ценности альтернатив по критериальным оценкам табл. 4.

На четвертом этапе проводится формирование матриц парных сравнений видов угля по формулам, аналогичным (8), (9) для определения минимальных, средних и максимальных частных ценностей альтернатив по каждому критерию.

На пятом этапе проводится оценка весовых коэффициентов критериев. В табл. 5 представлены результаты определения по формуле (3) весовых коэффициентов для двух вариантов предпочтений – ЛПР1 и ЛПР2.

Таблица 4. Оценки альтернатив по критериям

Table 4. Assessments of alternatives by criteria

Пункт Point	Месторождение угля, Coal deposit	Критерий/Criterion														
		f_1 , тыс. р/т у.т. thousand rubles/t c.e.			f_2 , р/т у.т. rubles/t c.e.			f_{31} , млн т у.т. million t c.e.			f_{41} , балл score		f_{32} , балл score		f_{42} , балл score	
		y_1^L	y_1^C	y_1^R	y_2^L	y_2^C	y_2^R	y_{31}^L	y_{31}^C	y_{31}^R	y_{41}^C	y_{32}^L	y_{32}^R	y_{42}^L	y_{42}^R	
	Оценки/assessment by criteria															
П1 P1	Галимовское/Galimovskoe	6,0	6,9	8,7	0,9	1,4	2,5	10,4	12,3	13,3	6	–		–		
	Кэновское/Kenovskoe	4,8	5,5	6,0	0,7	0,9	1,2	10,3	10,6	11,4	7	–		–		
	Булурское/Bulurskoe	5,5	6,2	7,0	0,4	0,8	1,5	12,3	13,2	19,9	7	–		–		
П2 P2	Хуличанское/Khulichanskoe	11,0	12,1	13,3	0,8	1,5	2,1	18,1	18,8	26,4	5	–		–		
	Верхнегалинское Verkhnegalinskoe	9,8	11,6	14,0	0,7	1,4	2,3	63,4	71,9	114	3	–		–		
П3 P3	Чайбухинское/Chaybuhinskoe	8,2	10,3	13,3	1,4	2,4	4,4	–	–	–	–	4	6	4	6	
	Привозной уголь Coal from another region	11,1	13,5	16,5	1,3	1,8	2,4	–	–	–	–	–4	–6	–4	–6	

Таблица 5. Оценки весовых коэффициентов критериев

Table 5. Assessments of criteria weights

Пункт/Point	Пункт/Point	f_1	f_2	f_{31}	f_{41}	f_{32}	f_{42}
П1, П2	ЛПР1/DM1	0,400	0,100	0,100	0,400	–	–
Р1, Р2	ЛПР2/DM2	0,250	0,125	0,125	0,500	–	–
П3	ЛПР1/DM1	0,615	0,154	–	–	0,077	0,154
Р3	ЛПР2/DM2	0,500	0,250	–	–	0,125	0,125

В рассматриваемом примере при выборе угля в пунктах П1, П2 большее значение для ЛПР имеют критерии удельной стоимости топлива и условий освоения и добычи, а в пункте П3 большее значение имеет критерий удельной стоимости топлива. Два варианта предпочтений ЛПР отличаются не только значениями весовых коэффициентов, но и их ранжированием.

На шестом этапе проводится многокритериальная оценка вариантов топлива для ТЭС. На рис. 5 вертикальные линии характеризуют диапазон многокритериальных оценок каждой альтернативы, прямоугольники отражают средние многокритериальные оценки для двух вариантов предпочтений ЛПР.

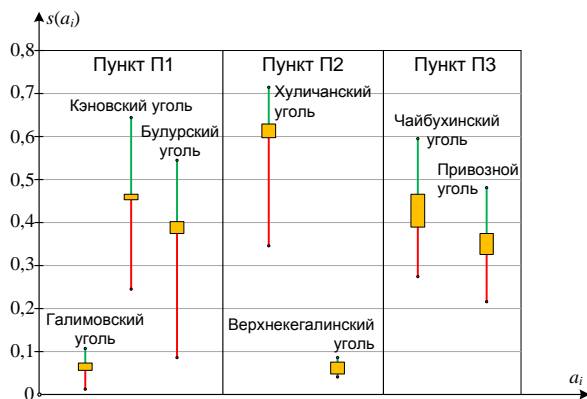


Рис. 5. Многокритериальные оценки угля в пунктах П1, П2, П3

Fig. 5. Multi-criteria coal estimates in points P1, P2, P3

В пункте П1 угли Кэновского и Булурского месторождений имеют более высокие многокритериальные оценки по сравнению с оценками угля Галимовского месторождения. Это соответствует соотношению оценок альтернатив по критериям с наибольшим весом – f_1 и f_{41} (табл. 4, 5).

В пункте П2 многокритериальные оценки угля Хуличанского месторождения существенно превышают оценки угля Верхнекегалинского месторождения из-за большого отличия по критерию f_{41} – условия освоения и добычи.

В пункте П3 альтернативы имеют сопоставимые многокритериальные оценки с небольшим превосходством угля Чайбухинского месторождения.

На седьмом этапе (рис. 3) проводится ранжирование альтернатив. В пункте П2 выбор альтернативы однозначен – уголь Хуличанского угленосного района в большей степени соответствует предпочтениям ЛПР (рис. 5). В пунктах П1 и П3 для ранжирования альтернатив необходимо использовать модели сравнения (10), (11). При сравнении углей Кэновского и Булурского месторождений получены результаты:

$F_{domij}=0,71$; $F_{sij}=0,71$. В результате сопоставления Чайбухинского и привозного угля получены оценки $F_{domij}=0,67$; $F_{sij}=0,74$. Оценки F_{domij} , F_{sij} позволяют сделать вывод, что в пункте П2 при высказанных предпочтениях ЛПР уголь Кэновского месторождения более предпочтителен, в пункте П3 более предпочтителен уголь Чайбухинского месторождения.

Полученные результаты выбора угля согласуются с оценками альтернатив по критериям и структурой предпочтений ЛПР. Ранжирование альтернатив устойчиво к изменениям исходной информации и предпочтений ЛПР в пределах заданных интервалов.

Выводы

1. Реформирование энергетики привело к трансформации методологии обоснования ее развития от централизованного государственного планирования к новой парадигме многостороннего процесса обоснования решений в условиях многокритериальности, множественности несовпадающих интересов, неопределенности исходной информации и условий дальнейшего развития. В результате выбор топлива для тепловых электростанций в районах нового освоения в современных условиях представляет собой многокритериальную проблему с неопределенностью исходной информации и неоднозначностью предпочтений лиц, принимающих решения.
2. Ввиду тенденций повышения значимости экологических и социальных факторов выбор топлива для тепловых электростанций целесообразно проводить с использованием многокритериальных методов рационального выбора. Широко распространенным является метод анализа иерархий, что объясняется такими преимуществами, как удобство применения для лиц, принимающих решения, специальная шкала для сравнения альтернатив по сложно формализуемым критериям. Для использования метода анализа иерархий в условиях неопределенности исходной информации и предпочтений лиц, принимающих решения, предложена модификация метода. Для ранжирования альтернатив в условиях неопределенности предложены две модели оценивания: на основе относительного доминирования, а также на основе суммы разностей многокритериальных оценок.
3. Предложена методика многокритериального выбора топлива на основе модифицированного метода мультипликативного анализа иерархий. Ее применение рассмотрено на проблеме выбора угля для тепловой электростанции в трех пунктах перспективного размещения Северо-Эвенского и Омсукчанского районов Магаданской области.

Для сравнения топлива разработана иерархия целей и критериев, отражающая экономические, технические, экологические и социальные факторы. При принятии решений была учтена неопределенность исходной информации, неоднозначность предпочтений лиц, принимающих решения. Формализация проблемы выбора топлива позволяет получить количественные оценки альтернативных вариантов для принятия окончательного

решения. Предложенная методика может использоваться на стадии предпроектных исследований для выявления наиболее перспективных вариантов топливообеспечения тепловых электростанций в районах нового освоения.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания 17.6.1 (рег. № АААА-А17-117030310445-9) фундаментальных исследований СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных направлений Сибирского энергетического института – Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева / отв. ред. Н.И. Воронин. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.
2. Life cycle assessment of electricity generation: a review of the characteristics of existing literature / M.V. Barros, R. Salvador, C.M. Piekarski, A.C. de Francisco, F.M.C.S. Freire // International Journal of Life Cycle Assessment. – 2020. – V. 25 (1). – P. 36–54.
3. A multi-criteria analysis of coal-based power generation in Bangladesh / R. Zaman, Th. Brudermann, S. Kumar, N. Islam // Energy Policy. – 2018. – V. 116. – P. 182–192.
4. More priorities, more problems? Decision-making with multiple energy, development and climate objectives / A. Bhardwaj, M. Joshi, R. Khosla, N.K. Dubash // Energy Research and Social Science. – 2019. – V. 49. – P. 143–157.
5. Multi-criteria analysis of electricity generation scenarios for sustainable energy planning in Pakistan / M.N. Hussain, M.A. Uqaili, K. Harijan, M.W. Mustafa, M.M. Rahman, M.W.A. Khan // Energies. – 2018. – V. 11. – Iss. 3. – 757 p.
6. Экономико-математические методы и модели принятия решений в энергетике / Артюгина И.М., Вастл Я., Воронкин А.Ф., Габрижинский И., Гусев В.Н., Долгов П.П., Дудоркин И., Ирешова А., И. Клима, Э.М. Косматов, Т.В. Лисочкина, В.Р. Око-роков, Р. Повышел, В. Скуровец, В.А. Таратин / под ред. П.П. Долгова, И. Климы. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1991. – 224 с.
7. Selection ideal coal suppliers of thermal power plants using the matter-element extension model with integrated empowerment method for sustainability / T. Zhongfu, J. Liwei, Y. Xiaobao, Zh. Huijuan, Yu. Chao // Mathematical Problems in Engineering. – 2014. – V. 2014. – 302748.
8. Yucekaya A. Multi-objective fuel supply for coal-fired power plants under emission, transportation and operational constraints // Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy. – 2013. – V. 8:2. – P. 179–189.
9. Durairaj S., Sathiyasekar K., Ilankumaran M. Selection of alternate fuel for electrical power generator using hybrid multi criteria decision making technique // Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest, Series C. – 2016. – V. 78. – Iss. 1. – P. 247–258.
10. Dong F. Coal suppliers evaluation model based on AHP and PROMETHEE // 2nd International Conference on Education Reform and Modern Management (ERMM 2015). – Hong Kong, 2015. – P. 359–362.
11. Triantaphyllou E. Two new cases of rank reversals when the AHP and some of its additive variants are used that do not occur with the multiplicative AHP // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. – 2001. – V. 10. – P. 11–25.
12. Lootsma F.A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. – 1993. – V. 2. – P. 87–110.
13. Buckley J.J. Fuzzy hierarchical analysis // Fuzzy Sets and Systems. – 1985. – V. 17. – P. 233–247.
14. Chang D. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP // European Journal of Operational Research. – 1996. – V. 95. – P. 649–655.
15. Шакиров В.А. Многокритериальная оценка альтернатив на основе теории полезности в условиях неопределенности предпочтений лица, принимающего решения // Нечеткие системы и мягкие вычисления. – 2018. – Т. 13. – № 1. – С. 17–35.
16. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 10. Угольные бассейны и месторождения Северо-Востока СССР и Камчатки. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 403 с.
17. Угольная база России. Т. V. Кн. 2. Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока России (Республика Саха, Северо-Восток, о. Сахалин, п-ов Камчатка). – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. – 638 с.
18. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России. В 2-х т. Т. 2 (регионы и бассейны). – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 1999. – 448 с.
19. Неженский И.А., Павлова И.Г. Методические основы оценки стоимости российских недр // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 1995. – № 4. – С. 13–18.
20. Маремуха Т.П., Петросян А.А. Загрязнение атмосферного воздуха фракциями мелкодисперсной пыли (PM10 и PM2,5) в районе функционирования угольной ТЭС // Здоровье и окружающая среда. – 2016. – № 26. – С. 39–42.

Поступила 02.09.2020 г.

Информация об авторах

Шакиров В.А., кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела комплексных и региональных проблем энергетики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

UDC 620.98:519.816

CHOICE OF FUEL FOR HEAT POWER PLANTS IN AREAS OF NEW DEVELOPMENT TAKING INTO ACCOUNT THE UNCERTAINTY FACTOR

Vladislav A. Shakirov,
mynovember@mail.ru

Melentiev Energy systems institute SB RAS,
130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.

The relevance of the research is caused by the transformation of the methodology for substantiating the development of energy from centralized state planning to a new paradigm for multilateral decision-making and the creation of mechanisms for their implementation in terms of multi-criteria, multiplicity of conflicting interests, uncertainty of initial information and conditions for further development. New conditions for substantiating the decisions are considered in the context of the construction of thermal power plants in remote areas of new development, where local energy resources are considered as fuel. The choice of fuel determines the economic and technical indicators of power plants, their environmental and social impacts. In order to justify the choice of fuel for thermal power plants from the point of view of numerous criteria in the conditions of uncertainty of initial information and future development conditions, it is necessary to create new methodological approaches.

The main aim of the research is to propose a methodology of multi-criteria fuel selection for a thermal power plant in the areas of new development taking into account the uncertainty factor.

Objects: organic fuel deposits in remote areas of new development.

Methods: multiplicative method of the analytic hierarchy process, method of multi-criteria utility theory, methods of interval analysis, methods of fuzzy set theory.

Results. The author has carried out the review of modern methodological approaches in the problems of substantiation of the choice of fuel for power plants and proposed the modification of the method of the analytic hierarchy process. It allows taking into account the uncertainty of the source information and the ambiguity of preferences of decision makers, as well as significantly reducing the number of requests for information. On the basis of the modified method, the author developed the technique of multi-criteria selection of fuel for thermal power plants in the areas of new development. Its application is considered on the problem of coal selection in three points of perspective siting of thermal power plant in Omsukchansky and Severo-Evensky districts of Magadan region. The criteria used to compare the alternatives are: fuel cost, pollutant emissions from fuel combustion, fuel reserves, development and production conditions, the impact of fuel combustion emissions on the health of the population, employment of the local population.

Key words:

Thermal power plants, fuel, coal, multi-criteria choice, uncertainty of the initial information.

The research was carried out under the State Assignment Project 17.6.1 (reg. number AAAA-A17-117030310445-9) of the Fundamental Research of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

1. *Sistemnye issledovaniya v energetike: retrospektiva nauchnykh napravlenii Sibirskogo energeticheskogo instituta—Instituta sistem energetiki im. L.A. Melenteva* [Systems research in the energy sector: retrospective scientific directions of Siberian energy institute – Melentiev energy systems institute]. Ed. by N.I. Voropai. Novosibirsk, Nauka Publ., 2010. 686 p.
2. Barros M.V., Salvador R., Piekarski C.M., de Francisco A.C., Freire F.M.C.S. Life cycle assessment of electricity generation: a review of the characteristics of existing literature. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020, vol. 25 (1), pp. 36–54.
3. Zaman R., Brudermann Th., Kumar S., Islam N. A multi-criteria analysis of coal-based power generation in Bangladesh. *Energy Policy*, 2018, vol. 116, pp. 182–192.
4. Bhardwaj A., Joshi M., Khosla R., Dubash N.K. More priorities, more problems? Decision-making with multiple energy, development and climate objectives. *Energy Research and Social Science*, 2019, vol. 49, pp. 143–157.
5. Hussain Mirjat N., Uqaili M.A., Harijan K., Mustafa M.W., Rahman M.M., Khan M.W.A. Multi-criteria analysis of electricity generation scenarios for sustainable energy planning in Pakistan. *Energies*, 2018, vol. 11, 757.
6. Artyugina I.M., Vastl Ya., Voronkin A.F., Gabrzhinskii I., Gusev V.N., Dolgov P.P., Dudorkin I., Ireshova A., Klima I., Kosmatov E.M., Lisochkina T.V., Okorokov V.R., Povyshe R., Skurovets V., Taratin V.A. *Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli prinyatiya reshenii v energetike* [Economic and mathematical methods and decision-making models in the energy sector]. Eds. P.P. Dolgov, I. Klima. Leningrad, Leningrad University Press, 1991. 224 p.
7. Zhongfu T., Liwei J., Xiaobao Y., Huijuan Zh., Chao Yu. Selection ideal coal suppliers of thermal power plants using the matter-element extension model with integrated empowerment method for sustainability. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, vol. 2014, 302748.
8. Yucekaya A. Multi-objective fuel supply for coal-fired power plants under emission, transportation and operational constraints. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 2013, vol. 8:2, pp. 179–189.
9. Durairaj S., Sathiyasekar K., Ilankumaran M. Selection of alternate fuel for electrical power generator using hybrid multi criteria decision making technique. *Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest, Series C*, 2016, vol. 78, Iss. 1, pp. 247–258.
10. Dong F. Coal suppliers evaluation model based on AHP and PROMETHEE. *2nd International Conference on Education Reform and Modern Management (ERMM 2015)*. Hong Kong, 2015. pp. 359–362.
11. Triantaphyllou E. Two new cases of rank reversals when the AHP and some of its additive variants are used that do not occur with the multiplicative AHP. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2001, vol. 10, pp. 11–25.
12. Lootsma F.A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 1993, vol. 2, pp. 87–110.
13. Buckley J.J. Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 1985, vol. 17, pp. 233–247.

14. Chang D. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 1996, vol. 95, pp. 649–655.
15. Shakirov V.A. Multi-criteria evaluation of alternatives under conditions of uncertainty in the decision maker's preferences based on utility theory. *Nechetkie sistemy i myagkie vychisleniya*, 2018, vol. 13, no. 1, pp. 17–35. In Rus.
16. *Geologiya mestorozhdenii uglya i goryuchikh slantsev SSSR. T. 10. Ugolnye basseiny i mestorozhdeniya Severo-Vostoka SSSR i Kamchatki* [Geology of deposits of coal and oil shale of the USSR. Vol. 10. Coal basins and deposits of the North-East of the USSR and Kamchatka]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1962. 403 p.
17. *Ugolnaya baza Rossii. T. V. Kn. 2. Ugolnye basseiny i mestorozhdeniya Dalnego Vostoka Rossii* (Respublika Sakha, Severo-Vostok, o. Sakhalin, p-ov Kamchatka) [Coal base of Russia. Vol. 5. B. 2. Coal basins and deposits of the Russian Far East (Republic of Sakha, Northeast, Sakhalin Island, Kamchatka Peninsula)]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1999. 638 c.
18. *Mineralno-syrevaya baza ugolnoi promyshlennosti Rossii. T. 2 (regiony i basseiny)* [Mineral resources base of the coal industry of Russia. Vol. 2 (regions and basins)]. Moscow, Moscow State Mining University Publ. House, 1999. 448 p.
19. Nezhenskii I.A., Pavlova I.G. Metodicheskie osnovy otsenki stoimosti rossiiskikh nedr [Methodological basis for assessing the cost of Russian subsoil]. *Mineral resources of Russia. Economics and management*, 1995, no. 4, pp. 13–18.
20. Maremukha T.P., Petrosian A.A. Particulate matter air pollution (PM₁₀ and PM_{2.5}) in the coal HPP area. *Health and environment*, 2016, no. 26, pp. 39–42. In Rus.

Received: 2 September 2020.

Information about the authors

Vladislav A. Shakirov, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev energy systems institute SB RAS.

УДК 528.551.5:551.46:624

КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В РАЙОНЕ СТОРА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА МОСТА «САХАЛИН–МАТЕРИК»

Мелкий Вячеслав Анатольевич¹,
vamelkiy@mail.ru

Верхотуров Алексей Александрович¹,
ussr-91@mail.ru

Пищальник Владимир Михайлович²,
vpishchalnik@rambler.ru

Братков Виталий Викторович³,
vbratkov@mail.ru

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16.

² Сахалинский государственный университет,
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290.

³ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Россия, 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4.

В настоящее время ни у одного нашего современника не вызывает сомнения целесообразность перевозок по Транссибирской магистрали, а ее значение для развития Сибири и Дальнего Востока вполне очевидно. Однако такое отношение к этой транспортной артерии сформировалось не сразу. Вспомним хотя бы тот факт, что томское купечество настояло на том, чтобы дорога проходила через Александровск (ныне Новосибирск). Решение Александра III о строительстве железной дороги сыграло судьбоносную роль. Проложенная дорога способствовала развитию городов, через которые она была проложена. Ситуация с решением вопроса об организации свободного перемещения с материка на Сахалин представляется нам схожей с той, которая была перед прокладкой линии через всю Сибирь. Вопрос придется рассматривать рано или поздно. Прокладка магистрали на остров даст мощный толчок социальному и экономическому развитию территорий, прилегающих к автомобильной и железной дороге, которые пройдут через мостовой переход. В этой статье изучается специфика климатических и гидрологических факторов, определяющих выбор створа гидротехнического сооружения в проливе Невельского.

Актуальность исследования продиктована потребностью во всестороннем рассмотрении условий, определяющих выбор линии пересечения Татарского пролива мостовым переходом. После рассмотрения влияния геологических и геоморфологических факторов следует уделить внимание климатическим, погодным и гидрологическим процессам, которые будут оказывать постоянное воздействие на сооружение в период строительства и эксплуатации.

Цель: свести воедино и проанализировать данные, характеризующие особенности атмосферных и гидросферных процессов в узкой части Татарского пролива, и провести научные исследования, которые послужат дополнением к инженерным изысканиям и помогут на основе моделирования выявить наиболее безопасный створ для возведения гидротехнического сооружения, которое соединит берега.

Материалы и методы. Материалами для исследования послужили картографические материалы, данные дистанционного зондирования Земли, сведения о климатических и погодных условиях, данные гидрологических, метеорологических, океанографических наблюдений, информация, полученная в результате научно-исследовательских работ и инженерных изысканий, в которых принимали участие авторы, а также сведения из литературных источников. Картографирование в геоинформационной среде позволило создать тематические карты, отражающие динамику гидрометеорологических процессов. Полученная информация использовалась при построении моделей циркуляции вод, становления и деградации ледяного покрова в проливе Невельского с применением геоинформационных технологий. Авторы принимали непосредственное участие в исследованиях створа «Новый» в 2001 г.

В результате изучения особенностей гидрометеорологических условий в пределах акватории пролива Невельского и его побережий, основанных на данных спутникового мониторинга, наблюдений на близлежащих метеостанциях, а также подтвержденных информацией, полученной во время изысканий, установлено, что в районе пролива Невельского неблагоприятные явления природы следует учесть при принятии технических проектных решений по выбору типа мостового или тоннельного перехода с материка на Сахалин. Пространственно-временное распределение сияния в районе обусловлено астрономическими причинами, а снижение продолжительности солнечного сияния в Де-Кастри и Погиби по сравнению с Николаевском-на-Амуре связано с частыми туманами, возникающими при атмосферных процессах на границе суши и моря. Экстремальные значения температуры воздуха в Погиби зарегистрированы на метеостанции Погиби – максимум 27,3 °С и минимум – –44,0 °С. Индекс континентальности весьма высокий (амплитуда 71,3 °С), что можно объяснить влиянием выноса воздушных масс с материка в зимний период. Важный для проектирования показатель – продолжительность безморозного периода – колеблется в Погиби от 88 до 186 дней (среднее значение – 137). Суточные суммы осадков теплого периода достигали максимальных значений 88 мм в октябре, 81 – в августе и 78 – в июле. Снежный покров в Погиби держится от 153 до 216 дней. Ветер ≥30 м/с случается весной и осенью ежегодно, иногда превышает 40 м/с. Туманы в описываемом районе наблюдаются в течение всего года. Метели в проливе и на его берегах очень частое явление. Любое усиление ветра зимой сопровождается метелевым переносом снега. Грозы случаются 4–5 раз в году. Пыльные бури бывают редко. Горизонтальная

циркуляция воды в северной части пролива зимой имеет антициклоническую направленность, с мая по сентябрь действует циклоническая циркуляция. В целом весной на поверхности скорости движения вод составляют 2–7 см/с, а летом уменьшаются до 1–4 см/с. Изменения уровня моря в Татарском проливе находятся в диапазоне 3,2–4 м. Продолжительность ледового периода в умеренные типы зим составляет 201 сут. Толщина припая в Погиби в конце марта–начале апреля в среднем составляет 160 см и варьирует от 119 до 190 см в зависимости от типа зимы. Из-за сильных приливных течений сплошной ледяной покров в канале средней части пролива формируется крайне редко и на непродолжительное время. Следствием повышенной динамики ледяного покрова является многократное наложение молодых льдов толщиной до 30 см. Берега в южной части пролива обладают устойчивостью к абразионным процессам и практически не разрушаются. Результаты изучения климатических и гидрологических условий показали, что строительство мостового перехода в проливе Невельского возможно. Наиболее благоприятными условиями для строительства сооружения обладает район, заключенный между линиями створов м. Лазарева – м. Погиби на севере и м. Южный – м. Тык на юге, климатические и гидрологические условия на всем протяжении имеют относительное сходство, что позволило нам выделить его при районировании как самостоятельную единицу. Выполненные исследования позволяют отдать предпочтение створу «Новый» (м. Невельского – м. Лах).

Ключевые слова:

Гидрометеорологические условия, космические снимки, тематическое картографирование, ледовая обстановка, абразия берегов, геодезическое обеспечение, геоинформационные технологии.

Введение

В статье, посвященной анализу геологических и геоморфологических факторов, определяющих выбор створа для строительства транспортного перехода с материка на Сахалин [1], мы обращали внимание на многовековую историю вопроса о необходимости возведения сооружения, к которому специалисты возвращались с завидным постоянством. Основные решения были приняты в 1891, 1952, 1953, 1979, 2001 гг. [2–7]. В 2017 г. президент РФ В.В. Путин заявил на Восточном экономическом форуме о том, что строительство мостового перехода «Сахалин–материк» обсуждается в структурах власти, а 24 июля 2018 г. в беседе с губернатором острова он подтвердил, что хорошо знаком с проблемой и понимает ее важность для закрепления населения в регионе. В 2019 г. полтора десятка проектных институтов ОАО «Российские железные дороги» заняты разработкой документации, необходимой для принятия стратегических и технических решений по строительству объекта. При этом довольно большое количество материалов, полученных во время изысканий, выполняемых как в настоящее время, так и ранее, не публикуется и даже не фигурирует в отчетах. В статье мы уделили особое внимание сведениям о климатических и гидрологических условиях, которые по каким-либо причинам остались «за кадром».

Анализируя сведения из различных источников, мы обнаружили, что разные авторы неоднозначно проводят границы пролива. Поэтому решили дать разъяснение по этому поводу. Проливом Невельского называют южную часть Амурского лимана от его границы, пролегающей по линии, между мысами Южный (51°41' N, 141°06' E) на материковом побережье и Тык (51°45' N, 141°41' E) – на сахалинском берегу, до прохода Лазарева, расположенного между мысами Лазарева (52°14,2' N, 141°31,6' E) и Погиби (52°13,5' N, 141°38,6' E). Самое узкое место в проливе (7,5 км) находится в створе между мысами Средний и Погиби, общая протяженность составляет 56 км [8].

Особенности радиационного баланса, атмосферной циркуляции, климатические и погодные условия

Комплексное изучение гидрометеорологических условий в районе перехода выполнялось неоднократно

но с целью получения данных для принятия обоснованных проектных решений и прогнозирования вероятных изменений в результате взаимодействия с водным объектом.

Исследования климата и климатообразующих факторов и прогноз предстоящих изменений проводятся на основе оценок линейных трендов метеорологических и океанографических характеристик, полученных за время наблюдений на станциях и со спутников [9–17]. Над акваторией дальневосточных морей выявлены разночастотные колебания климата с периодами 2–3 года (квазидвухлетние) [18], 3–7 лет (масштаба ENSO, связанные с Эль-Ниньо и Арктическим колебанием) [19, 20], 8–15 лет (квазидесятилетние или декадные, обусловленные одиннадцатилетними циклами солнечной активности) [21, 22], от 15 до 35 лет интердекадные и квазидвадцатилетние [23, 24], 50–70 лет [25]. Циклические изменения климата находят отражение в аномалиях атмосферной и океанической циркуляции, тихоокеанской муссонной системы и центров действия атмосферы. В результате этих процессов изменяются повторяемость и интенсивность циклонов, штормов местами или во всем регионе.

Климат пролива Невельского формируется под влиянием муссонного типа атмосферной циркуляции.

Солнечная радиация. Энергетической основой большинства процессов на Земле и в ее атмосфере служит лучистая энергия Солнца. Благодаря географическому положению акватория пролива Невельского получает довольно высокое радиационное обеспечение. По данным Сахалинского и Дальневосточного территориальных управлений по гидрометеорологии [26, 27] годовая суммарная солнечная радиация при альбедо деятельной поверхности (29–41 %) и средних условиях облачности, измеренная на ближайших метеостанциях, составляет: в Советской Гавани – 4429, в Большом Шангаре – 4307, в Тымовском (Кировском) – 4285 МДж/м² (т. е. везде немногим более 100 ккал/см²).

Распределение суммарной солнечной радиации в пределах изучаемого района имеет хорошо выраженный сезонный ход: на станции Советская Гавань ее среднее месячное значение в зимний период составляет

183,3 МДж/м² (4,3 ккал/см²), в весенний – 479,3 (11,4), в летний – 544,3 (13,0), в осенний – 269,3 (6,4).

Наименьшие значения суммарной солнечной радиации наблюдаются в декабре: от 69 МДж/м² в Б. Шантаре до 123 в Советской Гавани. В январе поток радиации увеличивается незначительно, он начинает заметно нарастать в марте и достигает максимума в конце июня – июле. Снижается количество суммарной солнечной радиации медленно и равномерно до поздней осени (рис. 1) [26, 27].

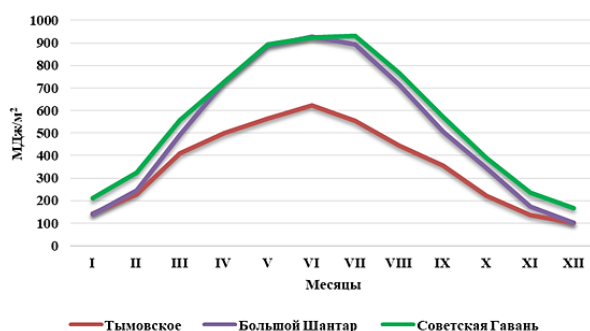


Рис. 1. Годовой ход суммарной солнечной радиации на ближайших к проливу Невельского метеостанциях

Fig. 1. Annual cycle of total solar radiation on the nearest weather stations to the Nevel'skogo strait

Фактические ресурсы лучистой энергии земной поверхности характеризуются не столько суммарной солнечной радиацией, сколько радиационным балансом, который определяет тепловой режим и климатообразующие процессы территории. Годовые значения радиационного баланса в изучаемом районе находится в пределах 1182 МДж/м² в Б. Шантаре – 1600 в Советской Гавани. Радиационный баланс территории также имеет четко выраженный годовой ход (рис. 2) [26, 27].

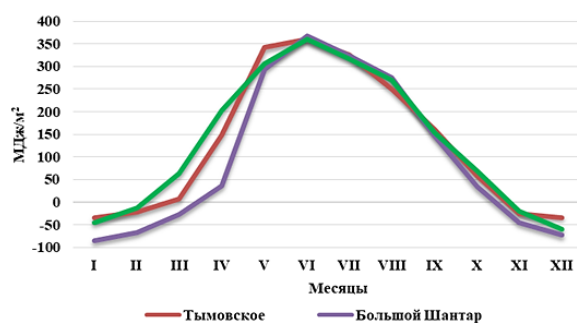


Рис. 2. Годовой ход радиационного баланса на ближайших к проливу Невельского метеостанциях

Fig. 2. Annual cycle of radiation balance on weather stations nearest to the Nevel'skogo strait

Один из важнейших показателей световых ресурсов территории – продолжительность солнечного сияния – обычно возрастает с уменьшением широты местности и в холодный период года. В районе пролива Невельского неблагоприятные явления природы вносят коррективы в пространственно-временное распределение сияния, обусловленного астрономиче-

скими причинами. Снижение продолжительности солнечного сияния в Де-Кастри и Погиби по сравнению с Николаевском-на-Амуре связано главным образом с частыми туманами, возникающими при атмосферных процессах на границе суши и моря (рис. 3) [26, 27].

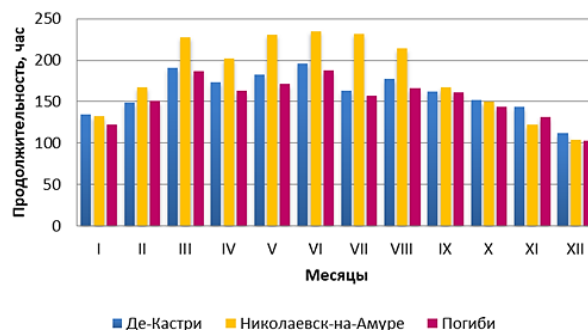


Рис. 3. Продолжительность солнечного сияния на ближайших к проливу Невельского метеостанциях

Fig. 3. Sunshine duration on weather stations nearest to the Nevel'skogo strait

Температурный режим. Одной из основных климатических характеристик в любом регионе является термический режим, численной характеристикой которого является среднее многолетнее значение температуры воздуха: годовой – для общего обзора, а также месячные – для детальных. Для исследуемого района характерно наличие умеренных термических ресурсов. Наиболее высокие значения средней годовой температуры (за период наблюдений с 1936 по 2018 гг.) отмечаются на крайнем юго-востоке акватории и составляют в Александровке-Сахалинском +0,7 °С, в то время как в Погиби она –1,6 °С, в Москальво –1,9 °С, на материке, в Николаевске-на-Амуре –1,9 °С. Средние месячные температуры на территории имеют годовой ход с одним максимумом (рис. 4). Самым холодным месяцем года является январь, самым жарким – август. Средняя температура января на станции Погиби –19,9 °С (от –11,7 °С в 1991 г. до –25,1 °С в 1941 г.). Средняя температура августа равна 15,6 °С (от 13,7 °С в 1971 г. до 18,1 °С в 2006 г.). Термический режим района в целом весьма стабилен: значительных отклонений от средних многолетних характеристик не наблюдалось. Положительный тренд приземной средней месячной температуры, соответствующий ее увеличению на 0,02–0,05 °С в год, особенно значим в период с января по июнь и отмечался ранее другими исследователями [28].

Как с научной точки зрения, так и с практической стороны представляет интерес выявление экстремальных значений температуры воздуха. Абсолютный максимум температуры воздуха в Погиби, зарегистрированный 16 августа 1939 г., равен 27,3 °С. Абсолютный минимум температуры воздуха равен –44,0 °С и зафиксирован 3 января 1936 г. [29]. Таким образом, 71,3 °С – это максимальная амплитуда значений температуры воздуха, отмеченная на метеостанции Погиби, которая соответствует весьма высокому индексу континентальности, что объясняется

влиянием выноса воздушных масс с материка в зимний период. На материковом берегу в Джаоре зарегистрированы абсолютные максимум $+31,5^{\circ}\text{C}$ (26.06.2011 г.) и минимум $-40,9^{\circ}\text{C}$ (27.01.2005 г.). Вполне естественно, что амплитуда температур здесь немного больше, чем на острове.

Средняя суточная зимняя температура в Погиби – $18,0^{\circ}\text{C}$, января $-19,6^{\circ}\text{C}$. Зачастую температура воздуха опускается ниже этого уровня. Холодные зимы наблюдались в 1941–1942, 1952–1953, 1966–1967 гг. Так, в декабре–феврале 1940 г. температура опускалась ниже -25°C в течение 51 дня, ниже -30°C в течение 27 дней. Низкие температуры (ниже -40°C) зарегистрированы в январе 1936, 1939, 1941, 1986, 1996 и 2005 гг., в декабре – 1952 г., феврале 1944 и 1950 гг.

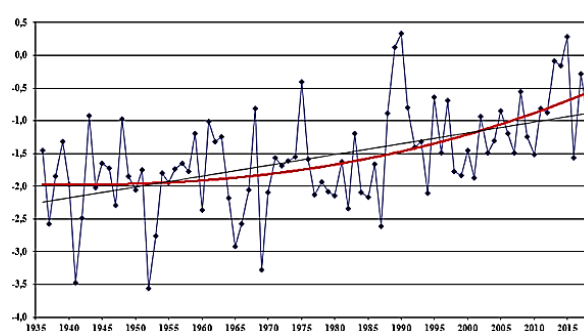


Рис. 4. Значения среднегодовых температур и тренд их изменения на метеостанции Погиби в 1936–2018 гг. (черная линия – линейный тренд, красная – полиномиальный)

Fig. 4. Amount of annual average temperatures and trend of their changes at the weather station Pogibi for 1936–2018 (black line – linear trend, red line – polynomial)

Среди основных гидрометеорологических характеристик, которые используются при проектировании

Таблица 2. Даты (год) первого и последнего заморозка и продолжительность безморозного периода (по среднесуточным измерениям) в воздухе

Table 2. Dates (year) of first and last freeze and duration of frost-free period (according average daily measurements) in air

Пункты наблюдения Observing station	Дата последнего заморозка Date last freeze			Дата первого заморозка Date first freeze			Продолжительность безморозного периода, дни Frost-free period, days		
	средняя average	ранняя early	поздняя late	средняя average	ранняя early	поздняя late	средняя average	наимен. min	наибол. max
Погиби Pogibi	03.06	10.05 2000, 2001	28.06 1937	25.10	15.09 1998	04.11 2011 2018	137	88 1938	186 2018

Атмосферное давление в Погиби варьирует от 916,6 (687 мм ртутного столба) в 1976 г. до 1041,7 гПа (781,3 мм рт. ст.) в 1971 г. (среднегодовое от 1009,0 до 1012). На материке в Джаоре оно изменялось от 904,2 (1972) до 1055,9 гПа (2017).

Годовой ход парциального давления водяного пара в Погиби имеет выраженный характер, среднее годовое значение составляет 6,4 гПа, наиболее низким является среднеянварское – 1,1, наиболее высоким среднее за август – 15,5 гПа. Средняя месячная относительная влажность воздуха (f_{cp}) наиболее хо-

сооружений, важное место занимают даты перехода температуры через определенные значения. Расчет дат перехода средних суточных температур через заданные значения произведен по данным наблюдений на станции Погиби в период с 1936 по 2018 гг. (рис. 5) (табл. 1, 2) [29].

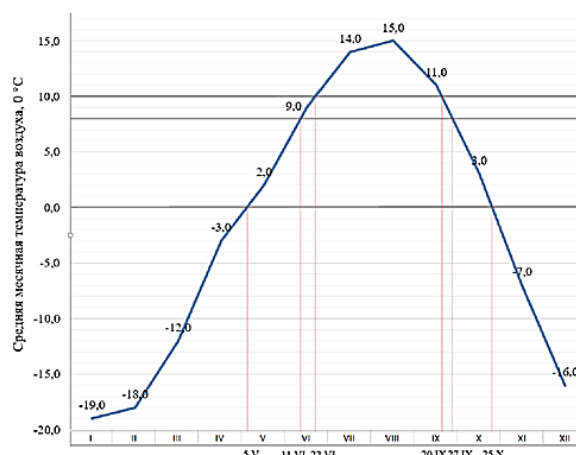


Рис. 5. График годового хода средних месячных температур и определение дат перехода их средних суточных величин через заданные значения 0, 8, 10 $^{\circ}\text{C}$ в Погиби

Fig. 5. Schedule of the annual course of average monthly temperatures and determination of the dates of transition of average daily temperatures through the set values of 0, 8, 10 $^{\circ}\text{C}$ in Pogibi

Таблица 1. Средние даты устойчивого перехода средней суточной температуры через заданные значения

Table 1. Average dates of steady transition of average daily temperature through set values

Пункты наблюдения Observing station	$0^{\circ}\text{C} \uparrow$	$8^{\circ}\text{C} \uparrow$	$10^{\circ}\text{C} \uparrow$	$10^{\circ}\text{C} \downarrow$	$8^{\circ}\text{C} \downarrow$	$0^{\circ}\text{C} \downarrow$
Погиби Pogibi	05.05	11.06	21.06	20.09	27.09	25.10

лодного месяца составляет 82 %, наиболее теплого – 88 %. В Джаоре влажность воздуха несколько ниже: в январе – 75 %, в августе – 80 %.

Осадки. Самыми «мокрыми» в Погиби были годы 1994, 1995 и 2000, когда годовое количество выпавших осадков составило 880, 802 и 765 мм соответственно. Месячная сумма осадков достигала 209 мм в сентябре 1995 г., 192 мм в октябре 1997 г., 223 мм в июле 2019 г. Суточные максимумы в эти годы не превышали нормы, своих наибольших значений они достигали 27 июля 1992 г. (78 мм) и 24 июля 1990 г.

(64 мм). Суточные суммы выпавших осадков достигали максимальных значений 88 мм в октябре 1944 г., 81 – в августе 1957 г. и 78 – в июле 1992 г. По числу дней с дождями рекордсменами стали 1970-е годы (более 100 дождливых дней отмечено в 1971, 1972, 1974, 1975, 1978, 1979, 1981, 1982 гг.), большим количеством дней (более 90) со снегопадами «отметились» 1971, 1974, 1976, 1977, 1987, 1999, 2010, 2013 гг. [29].

На материковом берегу (Джаоре) большое годовое количество осадков выпадало в 2010 г. (1023 мм), 2004 г. (986 мм), 1988 г. (888 мм). В «мокрые» для Погиби годы в Джаоре также выпадало значительное количество осадков (более 700 мм). Суточные максимумы здесь отмечались 18 августа 2006 г. (91 мм) и 9 августа и 1 сентября 2004 г. по 78 мм.

Один из самых разрушительных для Сахалина тайфун Филлис (№ 198112), зародившийся в районе о. Гуам, прошедший начале августа 1981 г. через север Японии, Приморский, Хабаровский край, Амурскую область (время жизни составило 144 часа), в Погиби и Джаоре отметился обычным дождем и ветром с порывами до 15–20 м/сек.

Снежный покров в Погиби держится весьма продолжительное время от 153 в 1973 г. до 216 дней 2006 г. Обычно он устойчив со второй половины сентября по первую декаду мая. Так, в 1976 г. число дней, в которые наблюдались снегопады, составило 116. Наибольшая высота снежного покрова – 250 см – наблюдалась на метеостанции 18 мая 2000 г. Сход снега может затянуться до конца мая – начала июня. Иногда возможны интенсивные снегопады даже во второй половине мая, как в 2000 г. После событий такого рода наблюдается быстрое снеготаяние, приводящее к паводкам на реках. Частые метели отмечены наблюдателями метеостанции в 1969 г. (29), 1980 г. (19), 1991 г. (15), 2001 г. (14) и 2013 г. (21 раз); в 1970-е годы число метелей, наблюдаемых за зиму, превышало 20 (исключение 1975, 1977 гг.) [29].

Ветры. Средняя скорость ветра в Погиби в холодный период со средней суточной температурой воздуха $\leq 8^\circ\text{C}$ составляет 4,5 м/с.

Сильные ветры наблюдались в течение многих лет в среднем 80–110 дней, в отдельные годы их число доходило до 155 дней. Число дней со скоростью ветра свыше 15 м/с в Погиби в среднем за год составляет 15–30 %. В зимний период сильный ветер в Погиби может дуть 15–25 дней в месяц.

Ветры со скоростью ≥ 20 м/с в Погиби случаются в любой месяц года. Скорость ветра от 25 до 30 м/с отмечается в период с сентября по март в течение любого месяца 1–2 раза ежегодно, летом – 1 раз в два года, более 30 м/с – 1–3 раза в месяц в ноябре–апреле. В августе ветер ≥ 30 м/с бывает также ежегодно, в мае и октябре – 3 раза в 10 лет. Максимальные скорости ветра ≥ 40 м/с отмечались по флюгеру лишь иногда: в марте 1971 г., ноябре 1974 г., апреле 2017 г. [31].

В осенне-зимний период в районе преобладают ветры северного, западного и северо-западного направлений, весной – восточного и юго-восточного, летом – юго-западного [29].

Сильные ветры отмечаются на побережье у мысов, где наблюдается их ускорение при обтекании препятствий, а также над открытой водной поверхностью. Юго-восточные ветры летом сопровождаются осадками.

Атмосферные явления. Туманы в проливе бывают в течение всего года. Наиболее часто отмечались в теплое время года, особенно в конце августа. Туманы имеют приуроченность к дождливым годам: более 35 дней за год с туманами наблюдались в те же 1970-е гг., а в 1975 и 1978 гг. туманными были более 50 дней.

Метели в проливе и на его берегах очень частое явление. Любое усиление ветра зимой сопровождается метелевым переносом снега. За зиму случается от 5 до 30 метелей. Больше 10 раз в зимний период метели наблюдались в течение 32 лет за время наблюдений с 1971 г. (66 %).

Грозы – явление для Сахалина и пролива довольно редкое. В среднем гроза случается 4–5 раз в году. Отмечены годы, когда грозы не было вовсе (1981, 1989, 1993, 2017 гг.). Иногда грозы происходят почаще: в 2007 г. – 10, в 1975 г. – 13, а в 1973 г. даже 15 раз.

Пыльные бури в районе пролива тоже наблюдались в течение 11 лет (23 %) за период наблюдений, а изредка более одного раза: в 1989 г. – 2; 1976 г. – 5; 1973 и 1975 гг. по 7; а в 1972 г. – 8 [29].

Результаты исследования гидрологического режима и океанографических особенностей пролива

Гидродинамический режим пролива Невельского крайне сложный [30]. Пролив представляет собой своеобразный канал, соединяющий Охотское и Японское море. Течения в нем испытывают мощное влияние пятой в мире по площади водосбора реки Амур.

Движение вод детально исследовалось нами при моделировании циркуляции водных масс [31]. Перенос морских вод через пролив Невельского тесно связан с гидрологическим режимом устьевой области реки Амур. Средние месячные значения расходов воды рассчитаны в проливе балансовым методом с учетом разности солёности воды между Амурским лиманом и Татарским проливом за 1963–1980 гг. по результатам моделирования на северной границе Татарского пролива [32, 33].

Анализ наблюдений в проливе Невельского позволил определить направления переносов воды в проливе: с севера на юг с октября по май и с юга на север с июня по сентябрь [32]. Модельные расчеты, выполненные нами позднее, показали, что расходы водных масс менялись в декабре–марте в пределах от 0,1 до 12,7, а в мае–сентябре от 27,3 до 128,1 км³/мес. (табл. 3).

Расчеты, выполненные при проведении исследований, позволяют сделать вывод о том, что при значительных расходах воды в вершине устьевой части р. Амур в летнее время вся масса воды не может пройти через пролив Невельского, часть ее уходит через Амурский лиман к северу в Сахалинский залив, тем не менее общая направленность движения вод с севера на юг в проливе в летнее время сохраняется.

Таблица 3. Средние месячные значения расходов воды (км^3) (знак минус означает направление потока с севера на юг) [31]
Table 3. Average monthly values of water consumption (km^3) (minus sign means stream direction from north to south) [31]

Суммарный расход воды/Total water consumption	I	II	III	IV	V	VI	VII
По Л.П. Якунину/By L.P. Yakunin	–7,0	–5,3	–3,7	–2,5	–7,9	15,6	15,6
По А.В. Леонову и др./By A.V. Leonov et al.	–0,7	–0,3	–0,2	–0,1	–46,9	–70,5	–97,3
	VIII	IX	X	XI	XII	Год/Year	–
По Л.П. Якунину/By L.P. Yakunin	3,8	10,8	–0,9	–13,4	–10,4	–5,3	–
По А.В. Леонову и др./By A.V. Leonov et al.	–128,1	–27,3	–13,6	–14,5	–12,7	–412,2	–

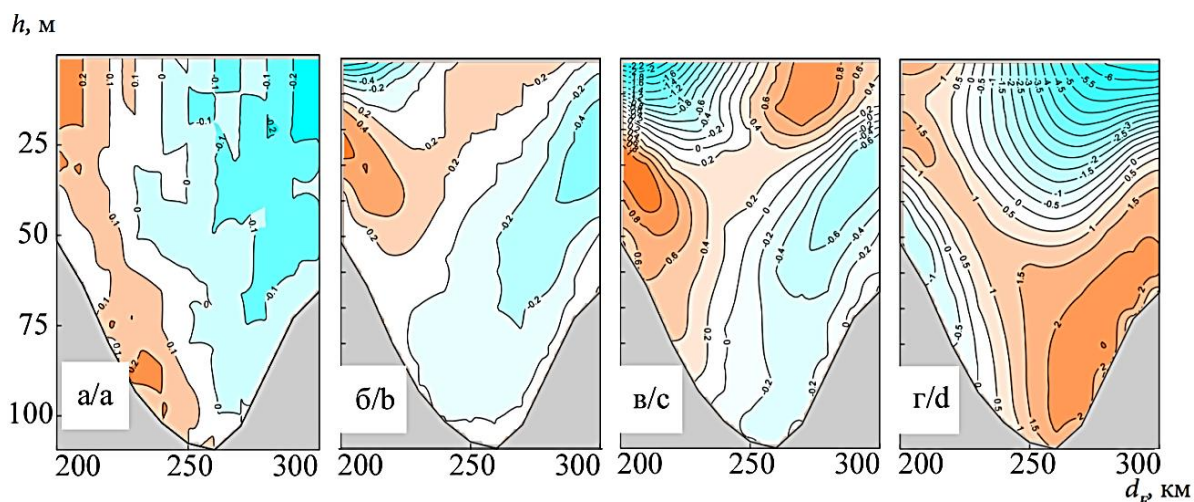


Рис. 6. Распределение меридиональной составляющей скорости течения (см/с) в северной части Татарского пролива по сезонам: а) зимой; б) весной; в) летом; г) осенью
Fig. 6. Distribution of meridional component of flow velocity (cm/s) in northern part of the Tatar Strait seasonable: a) winter; b) spring; c) summer; d) autumn

Движение вод на севере Татарского пролива зимой имеет антициклоническую направленность. Весной под воздействием муссона на поверхности возникает циклонический круговорот водных масс. Летом поток северного направления проходит вдоль берега острова, скорость течений в верхних слоях достигает до 2,2 см/с (рис. 6). Осенью в пролив Невельского поступают большие объемы вод р. Амур, что приводит к смене направления движения вод на циклоническое [34].

Поступление амурского стока завершается с началом ледостава. Зимой в проливе устанавливается слабая антициклоническая циркуляция вод, которая существует до разрушения льда и начала летнего муссона [31].

Обобщенные схемы горизонтальной циркуляции вод для сезонов с учетом образования вихревых структур показывают, что зимой во всей толще вод мелководной части пролива к северу от $49^{\circ}30'$ с. ш. поддерживается слабая антициклоническая циркуляция вод. В апреле в северной части пролива в поверхностном слое воды следуют на юг. В мае по мере развития летнего муссона начинает формироваться циклоническая циркуляция вод, обуславливающая подъем вод до начала осеннего (сентябрь) изменения направления движения воды. В целом весной на поверхности скорости движения вод составляют 2–7 см/с, а летом уменьшаются до 1–4 см/с. Абсолютные значения вертикальных скоростей весьма малы.

В проливе Невельского отсутствуют станции наблюдения за уровнем моря, поэтому на основе данных в ближайших пунктах наблюдения определено, что суммарные экстремальные уровни моря (табл. 4), вызываемые сгонно-нагонными явлениями, не превышают 2 м.

Таблица 4. Отклонения суммарных экстремальных уровней моря на побережье Японского моря [35]
Table 4. Deviations of total extreme sea levels on coast of the Sea of Japan

Пункты наблюдения Observing station	Максимум выше среднего Maximum above average	Максимум ниже среднего Maximum below average	Максимальный размах колебаний Maximum amplitude of oscillations
Де-Кастри De-Kastri	187	–207	394
Александровск-Сахалинский Aleksandrovsk-Sakhalinskiy	161	–163	324

Уровень моря в проливе Невельского меняется в диапазоне 3,2–4 м, что связано с вариациями плотности воды и атмосферного давления. Уменьшение плотности летом вместе со обильным поступлением водных масс с юга приводит к повышению среднего уровня в проливе, зимой наблюдается его понижение, вызываемое процессами обратной направленности. Размах колебаний уровня в течение года оставляет 19–20 см (рис. 7).

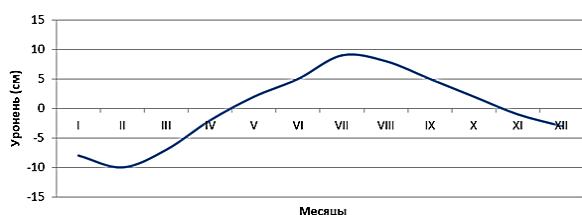


Рис. 7. Средний годовой ход уровня моря в Александровске-Сахалинском

Fig 7. Average annual cycle of sea level in Aleksandrovsk-Sakhalinskiy

В летнее время преобладает волнение южного направления. Преобладающая высота волн 0,5–0,7 м. У берегов высота волне не превышает 1,5 м. В фарватерной части пролива влияние волнения на дно незначительное. Ближе к берегу происходит взмучивание донного грунта мощностью до 20 см. Режим волнения отличается наибольшей интенсивностью в зимнее время: длительность штормов доходит до 6–7 суток при скорости ветра 40–70 м/с. Весной часты волнения силой 2–5 баллов (около 70 %), вызываемые ветрами южных направлений [36].

Интенсивность и продолжительность штормовых нагонов обусловлены направлением подхода волн к берегу, а также рельефом дна и шириной шельфовой полки. Ключевым фактором их возникновения является направление (преобладает южное) и продолжительность действия ветра.

Волны-цунами возникают на побережье пролива вследствие землетрясений. В проливе выделен район

с пороговой магнитудой 6,5. При цунамигенном землетрясении 5 сентября 1971 г. при магнитуде $M=6,9$ образовалась волна высотой 2,05 м на западном побережье Сахалина. Землетрясение, произошедшее 2 августа 2007 г. ($M=6,2$), сопровождалось цунами высотой 3,2 м в районе г. Невельска [37].

Ледостав в районе г. Николаевск-на-Амуре фиксируется в начале второй декады ноября. Первое появление льда на ГМС Погиби зафиксировано 5 ноября, окончательное очищение – 25 мая. Продолжительность ледового периода в умеренные типы зим составляет 201 сут. В зависимости от суровости зимы смещение дат наступления ледовых фаз может происходить со смещением на ± 12 –14 сут.

Припай в Амурском лимане, в мелководных заливах вдоль сахалинского берега от м. Погиби до м. Тык и по линии, соединяющей мысы Лазарева–Средний–Муравьёва–Невельского вдоль берега материка, становится в среднем до начала декабря (т. е. примерно через месяц после начала ледообразования) и сохраняется без изменений границ в течение зимы до момента его разрушения в мае. Толщина припая в Погиби в конце марта – начале апреля в среднем составляет 160 см и варьирует от 119 до 190 см в зависимости от типа зимы.

Одновременно со становлением припая вдоль основного фарватера в ледяном покрове формируется (незамёрзающий) приливной канал. Ширина канала в период максимального развития ледяного покрова составляет 2–3 мили (рис. 8).

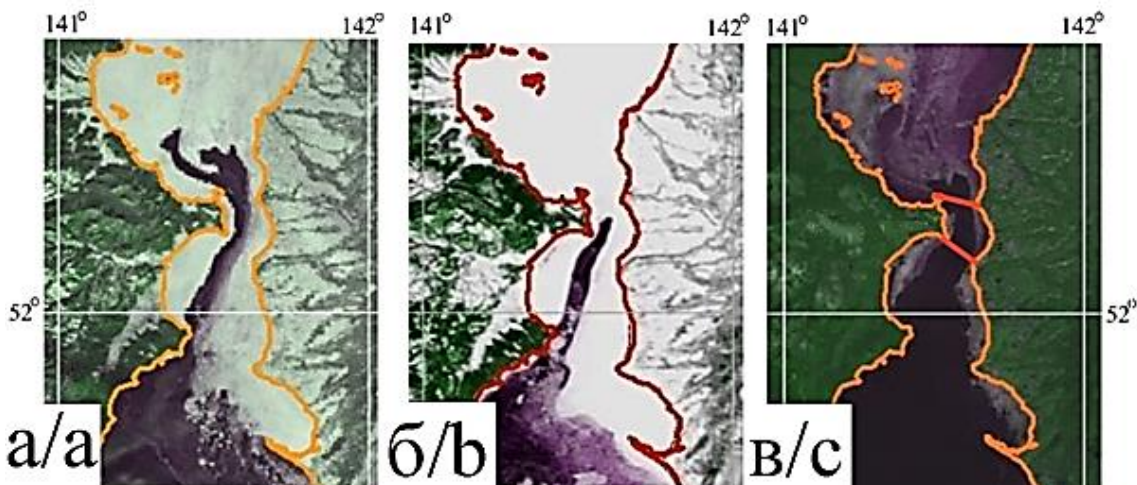


Рис. 8. Приливной канал на разных стадиях развития ледяного покрова в проливе Невельского: а) фаза становления; б) фаза максимального развития; в) фаза разрушения

Fig. 8. Tidal channel at different stages of ice cover development in the Nevelskogo Strait: а) phase of formation; б) phase of extremum; в) phase of destruction

Фазы развития ледяного покрова в Татарском проливе:

- становление – с начала ноября по конец января;
- максимального развития – с начала февраля до середины марта;
- разрушения – с середины марта до начала мая.

На фазе становления приливной канал, как правило, заполнен начальными видами льда толщиной до 10 см, на фазе максимального развития – серым

льдом толщиной до 15 см. Из-за наличия сильных приливных течений сплошной ледяной покров в канале формируется крайне редко и на непродолжительное время. Следствием повышенной динамики ледяного покрова является многократное наложение (в ограниченном пространстве) начальных видов и молодых льдов в результате чего могут формироваться ледяные образования размером до больших полей

(>500 м) и толщиной до 30 см. На фазе разрушения ледообразование в канале происходит преимущественно в ночные часы. Толщина вновь образовавшегося льда составляет 2–3 см. Под воздействием солнечной радиации он полностью разрушается в дневное время.

Очищение происходит в начале второй декады мая, окончательное освобождение ото льда – 25 мая.

Остатки разрушающегося ледяного покрова Татарского пролива в исключительных случаях могут пересекать его северную границу при активной смене направления муссонной циркуляции весной.

Береговой уступ мыса Невельского устойчив к абразионным процессам: разрушение берега не превышает 1 см/год, т. е. в течение 100 лет берег отступит не более чем на 1 м. Образование гротов и волноприбойных ниш в основании берегового уступа усиливается эффектом разрушения абразионного уступа под воздействием волн и льда. В целом скорость отступления береговой линии в районе мыса Невельского не превышает величины 5–10 м за 100 лет.

На основе дешифрирования аэрофотоснимков за 1952–1980 гг. В.В. Афанасьевым сделано заключение об отступании береговой линии на сахалинском берегу со скоростью менее 0,2 м/год. Берег острова находится в настоящее время в стадии геоморфологической или динамической зрелости: уклоны профиля аккумулятивных участков практически соответствуют их аналогам в составе древних абразионных поверхностей с отмершими клифами [36].

При небольших размерах волн зона взмучивания материала сокращается, оседая он выполаживает склон и создает условия для формирования прибрежного подводного вала. Выпадение осадка в нижних частях склона ослабляет волны у берега таким образом, что они могут взмучивать столько материала, сколько его оседает здесь же в момент смены направления волнового течения [38, 39]. При уменьшении волнения взвесь выпадает на дно и одновременно перемещается к берегу, увеличивая крутизну склона [40, 41].

Материал гравийных пляжей относительно мало подвержен транспортирующему действию течений, поэтому формы мезорельефа, свойственные песчаным пляжам, в таких местах не встречаются или имеют малые размеры и иное строение. На гравийных пляжах формируются высокие береговые валы, а подводный склон является относительно приглубым.

Заключение

В результате проведенных исследований выявлено, что в районе исследования, заключенном между линиями створов м. Лазарева – м. Погиби на севере и м. Южный – м. Тык – на юге, климатические и гидрологические условия на всем протяжении имеют относительное сходство, что позволяет выделить его при районировании как самостоятельную единицу, обладающую следующими признаками:

- Метеорологические условия предопределяются астрономическими причинами и муссонной циркуляцией воздушных масс. Наименьшие значения

суммарной солнечной радиации наблюдаются в районе в декабре от 69 до 123 МДж/м². В январе поток радиации увеличивается незначительно, он начинает заметно нарастать в марте и достигает максимума в июле. Экстремальные значения температуры воздуха – максимум 27,3 °С и минимум –44,0 °С (амплитуда 71,3 °С), что можно объяснить влиянием выноса воздушных масс с материка в зимний период. Продолжительность безморозного периода колеблется в Погиби от 88 до 186 дней (среднее значение 137). Суточные суммы осадков теплого периода достигали максимальных значений 88 мм в октябре, 81 – в августе и 78 – в июле. Снежный покров держится от 153 до 216 дней. Ветер ≥ 30 м/с случается весной и осенью ежегодно, иногда превышает 40 м/с. В районе пролива часто наблюдаются туманы, метели, сопровождаемые метелевым переносом снега. Грозы случаются 4–5 раз в году. Пыльные бури бывают редко.

- Гидрологические условия в проливе сложные. Горизонтальная циркуляция воды в северной части пролива зимой имеет антициклоническую направленность, с мая по сентябрь действует циклоническая циркуляция. В целом весной на поверхности скорости движения вод составляют 2–7 см/с, а летом уменьшаются до 1–4 см/с. Изменения уровня моря в Татарском проливе находятся в диапазоне 3,2–4 м. Продолжительность ледового периода в умеренные типы зим составляет 201 сут. Толщина припая в Погиби в конце марта – начале апреля в среднем составляет 160 см и варьирует от 119 до 190 см в зависимости от типа зимы. Из-за сильных приливных течений сплошной ледяной покров в канале средней части пролива формируется крайне редко и на непродолжительное время. Следствием повышенной динамики ледяного покрова является многократное наложение молодых льдов толщиной до 30 см.
- Берега в южной части пролива обладают устойчивостью к абразионным процессам и практически не разрушаются. Береговой уступ мыса Невельского устойчив к абразионным процессам. Разрушение берега не превышает 1 см/год. Скорость отступления береговой линии на сахалинском берегу у мыса Лах составляет менее 0,2 м/год. Берег находится в настоящее время в стадии геоморфологической зрелости.

Результаты изучения климатических и гидрологических условий показали, что строительство мостового перехода в проливе Невельского возможно. Наиболее благоприятными условиями для строительства сооружения обладает район, заключенный между линиями створов м. Лазарева – м. Погиби на севере и м. Южный – м. Тык – на юге, климатические и гидрологические условия на всем протяжении имеют относительное сходство, что позволило нам выделить его при районировании, выполненном с помощью моделирования, как самостоятельную единицу. Проведенные исследования позволяют отдать предпочтение створу «Новый» (м. Невельского – м. Лах).

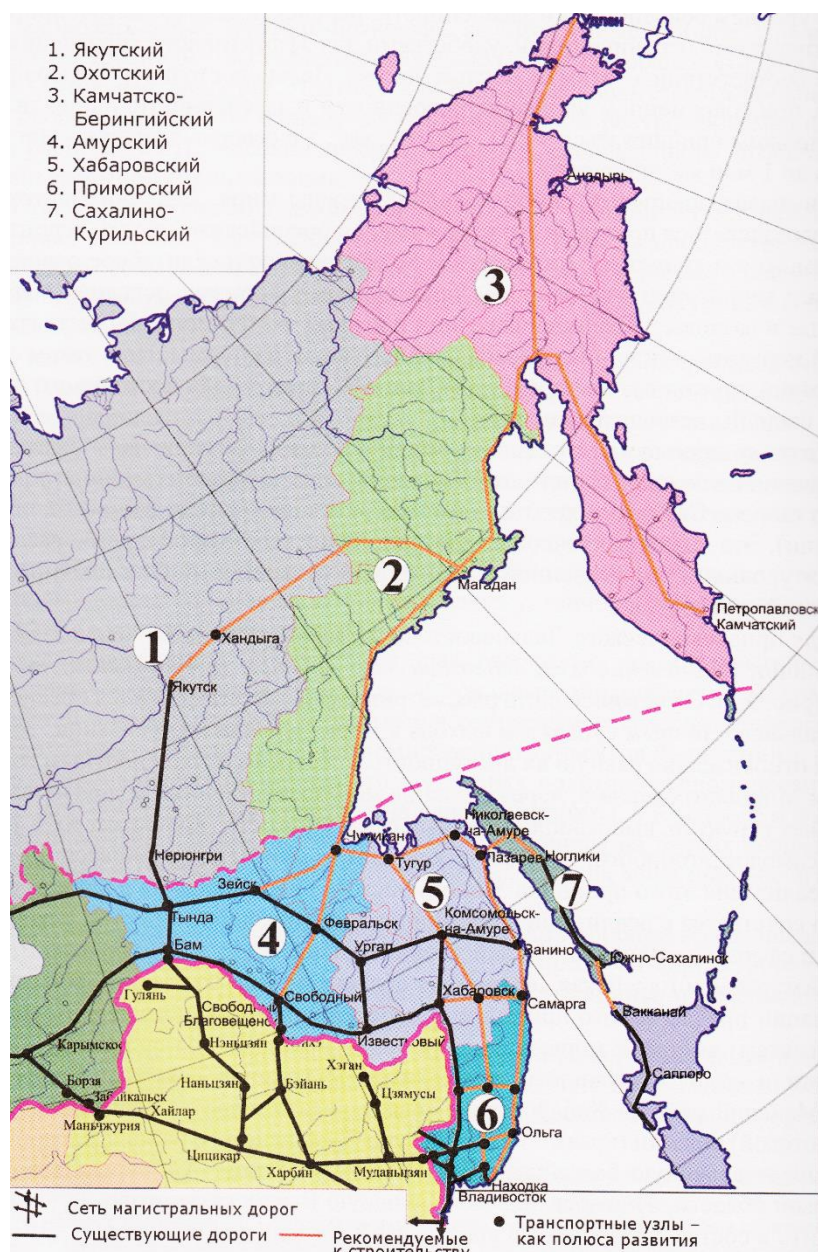


Рис. 9. Предполагаемый вариант экономического районирования и развития магистрального сообщения на Дальнем Востоке России с железнодорожным переходом с Сахалина на материк [43]

Fig. 9. Proposed variant of economic zoning and development of main line in Russian Far East with railway crossing from Sakhalin to mainland [43]

Различные варианты проектов соединения Сахалина с материком железнодорожным сообщением рассматривались в процессе технико-экономического обоснования, которое готовилось научными и проектными организациями на протяжении нескольких лет под эгидой ОАО «Гипростроймост» [42]. Окончательный выбор конструкции мостового перехода, безусловно, должны сделать специалисты, имеющие опыт создания сооружений подобного рода.

Таким образом, еще раз подтверждается наличие всех условий для формирования сети магистральных дорог, задающих направления развития сетки экономических районов мезоуровня, которые рекомендуются создать на Дальнем Востоке на основании результатов крупномасштабных комплексных исследований геосистем региона (рис. 9) [43].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелкий В.А., Братков В.В., Верхотуров А.А. Геологические и геоморфологические предпосылки выбора места транспортного перехода «Материк–Сахалин» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 158–170.
2. Бутков В.В. О возможности улучшения климата нашего побережья Японского моря. Докладная записка // Сайт «Мост на Сахалин. Япония–Сахалин–Европа» URL: <http://mostsakhalin.ru/publications/detail.php?ID=1588> (дата обращения 25.01.2020).
3. Костанов А.И. Самая восточная дорога России: очерки истории Сахалинской железной дороги. – М.: Транспорт, 1997. – 220 с.

4. Недострой века: история о том, как Сталин пытался соединить Сахалин с материком // SakhalinMedia.ru. URL: <https://sakhalinmedia.ru/news/531809> (дата обращения 25.01.2020).
5. Ведерников Г.П. Тайны объекта № 6: как я нашел чертежи тоннеля на Сахалин. URL: <https://habinfo.ru/most-na-sahalin/> (дата обращения 25.01.2020).
6. Заключение Госстроя СССР № 115сс по техническому проекту на строительство тоннельного перехода под Татарским проливом от 22.11.1952. ГА РФ. Ф. Р-5446. Оп. 60. Д. 7891. Л. 2-10. Подлинник // Исторический архив. – 2001. – № 6. – С. 71–77. URL: <https://alexanderyakovlev.org/fond/issues-doc/60574> (дата обращения 25.01.2020).
7. Федеральная целевая программа «Модернизация транспортной системы России (2002–2010 годы)». Утверждена Постановлением Правительства РФ от 5 декабря 2001 г. № 848. Собрание законодательства Российской Федерации. – 2001. – № 51. – ст. 4895. URL: <http://www.szrf.ru/szrf/doc.phtml?nb=100&issid=1002001051000&docid=88> (дата обращения 07.05.2020).
8. Лоции Татарского пролива, Амурского лимана и пролива Лаперуза, описывающие проход от порта Николаевск-на-Амуре на север, в Охотское море. № 1402. Выпуск 1999 большая корректура по ГУНиО вып. 24 от 07.06.2003.
9. Кондратьев К.Я. Неопределенности данных наблюдений и численного моделирования климата // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 4. – С. 93–119.
10. Климатические изменения в северной части Азиатско-Тихоокеанского региона / В.И. Пономарев, Д.Д. Каплуненко, Е.В. Дмитриева, В.В. Крохин, П.В. Новороский // Дальневосточные моря России. – М.: Наука, 2007. – Кн. 1: Океанологические исследования. – С. 17–48.
11. Bradley R.S. Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary, 3rd ed. – San Diego: Academic Press, 2014. – 675 p.
12. Trends and variations in south pacific island and ocean surface temperatures / C.K. Folland, M.J. Salinger, N. Jiang, N.A. Rayner // Journal of Climate. – 2003. – V. 16. – № 17. – P. 2859–2874. URL: <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520-0442%282003%29016%2859%3ATAVISIP%2.0.CO%3B2> (дата обращения 07.05.2020).
13. Observational needs of sea surface temperature / A.G. O'Carroll, E.M. Armstrong, H.M. Beggs, M. Bouali, K.S. Casey, G.K. Corlett, P. Dash, C.J. Donlon, C.L. Gentemann, J.L. Hoyer, A. Ignatov, K. Kabobah, M. Kachi, Y. Kurihara, I. Karagali, E. Maturi, C.J. Merchant, S. Marullo, P.J. Minnett, M. Pennybacker, B. Ramakrishnan, R. Ramsankaran, R. Santoleri, S. Sunder, S. Saux Picart, J. Vázquez-Cuervo, W. Wimmer // Frontiers in Marine Science. – 2019. – V. 6:420. – P. 1–27. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00420/full> (дата обращения 07.05.2020).
14. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century / E.C.J. Oliver, M.G. Donat, M.T. Burrows, P.J. Moore, D.A. Smale, L.V. Alexander, J.A. Benthuyssen, M. Feng, A.S. Gupta, A.J. Hobday, N.J. Holbrook, S.E. Perkins-Kirkpatrick, H.A. Scannell, S.C. Straub, T. Wernberg // Nature Communications. – 2018. – V. 9:1324. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9> (дата обращения 07.05.2020).
15. Theories on formation of an anomalous anticyclone in western North Pacific during El-Niño: A review / T. Li, B. Wang, B. Wu, T. Zhou, C.-P. Chang, R. Zhang // Journal of Meteorological Research. – 2017. – V. 31. – Pp. 987–1006. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13351-017-7147-6.pdf> (дата обращения 07.05.2020).
16. Cloud property datasets retrieved from AVHRR, MODIS, AATSR and MERIS in the framework of the Cloud_cci project / M. Stengel, S. Stapelberg, O. Sus, C. Schlundt, C. Poulsen, G. Thomas, M. Christensen, C. Carbajal Henken, R. Preusker, J. Fischer, A. Devasthale, U. Willén, K.-G. Karlsson, G.R. McGarragh, S. Proud, A.C. Povey, R.G. Grainger, J. Fokke Meirink, A. Feofilov, R. Bennartz, J.S. Bojanowski, R. Hollmann // Earth System Science Data. – 2017. – № 9. – Iss. 2. – P. 881–904. URL: <http://doi.org/10.5194/essd-9-881-2017> (дата обращения 07.05.2020).
17. Hannachi A., Turner A.G. 20th century intraseasonal Asian monsoon dynamics viewed from Isomap // Nonlinear Processes Geophysics. – 2013. – № 20. – Iss. 5. – P. 725–741. URL: <https://doi.org/10.5194/npg-20-725-2013> (дата обращения 07.05.2020).
18. Krokhin V.V., Fil A.Y., Veryatin V.Y. Long-term variations in the frequency of typhoons and their connection with various formation factors // Russian Meteorology and Hydrology. – 2017. – № 42. – P. 766–774. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068373917120044> (дата обращения 07.05.2020).
19. Chongyin L., Shuqing S., Mingquan M. Origin of the TBO-interaction between anomalous East-Asian winter monsoon and ENSO cycle // Advances in Atmospheric Sciences. – 2001. – V. 18. – № 4. – P. 554–566. URL: <https://doi.org/10.1007/s00376-001-0044-y> (дата обращения 07.05.2020).
20. Wang J., Ikeda M. Arctic oscillation and Arctic sea-ice oscillation // Geophysical Research Letters. – 2000. – V. 27. – Iss. 9. – P. 1287–1290. URL: <https://doi.org/10.1029/1999GL002389> (дата обращения 07.05.2020).
21. On the decadal variability of the eddy kinetic energy in the Kuroshio Extension / Y. Yang, X.S. Liang, B. Qiu, S. Chen // Journal of Physical Oceanography. – 2017. – V. 47. – P. 1169–1187. URL: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0201.1> (дата обращения 07.05.2020).
22. Ocean circulation signatures of North Pacific decadal variability / R.C.J. Wills, D.S. Battisti, C. Proistosescu, L.A. Thompson, D.L. Hartmann, K.C. Armour // Geophysical Research Letters. – 2019. – V. 46. – № 3. – P. 1169–1187. URL: <https://doi.org/10.1029/2018GL080716> (дата обращения 07.05.2020).
23. Northern hemisphere extratropical tropospheric planetary waves and their low-frequency variability: their vertical structure and interaction with transient eddies and surface thermal contrasts / H. Nakamura, T. Miyasaka, Y. Kosaka, K. Takaya, M. Honda // Climate dynamics: why does climate vary? Chap. 6. Geophys. Monogr. / Eds. D.-Z. Sun, F. Bryan. – Washington, D.C., American Geophysical Union, 2010. – V. 189. – P. 149–179. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2008GM000789> (дата обращения 07.05.2020).
24. Смирнов Н.П., Воробьев В.Н. Северо-Тихоокеанское колебание и динамика климата в северной части Тихого океана. – СПб.: ПГГМУ, 2002. – 122 с.
25. Minobe S. A 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America // Geophysical Research Letters. – 1997. – V. 24. – Iss. 6. – P. 683–686. URL: <https://doi.org/10.1029/97GL00504> (дата обращения 07.05.2020).
26. Научно-прикладной справочник по климату СССР: Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1-6. Вып. 34. Сахалинская область. – СПб.: Гидрометеиздат, 1990. – 352 с.
27. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1-6. Вып. 25. Хабаровский край, Амурская область. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 582 с.
28. Пономарев В.И., Каплуненко Д.Д., Крохин В.В. Тенденции изменения климата во второй половине XX в. в Северо-Восточной Азии, на Аляске и северо-западе Тихого океана // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 2. – С. 15–26.
29. Погода в Погиби. Температура воздуха и осадки // Справочно-информационный портал «Погода и климат». URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=32027&month=8&year=2018> (дата обращения 28.06.2020).
30. Гидрометеорология и гидрохимия морей: справочное издание. Проект «Моря». Т. VIII. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. А.С. Васильева, Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева. – СПб.: Гидрометеиздат, 2003. – 395 с.
31. Математическое моделирование условий функционирования экосистемы Татарского пролива / В.М. Пищальник, А.В. Леонов, В.С. Архипкин, В.А. Мелкий. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2011. – 104 с.
32. Yakunin L.P. Level and ice jams in the Amur Liman // The 14th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice and International Workshop on Rational Evaluation of Ice Forces on Structures. – Hokkaido: Mombetsu, 1999. – P. 241–242.
33. Леонов А.В., Пищальник В.М., Чичерина О.В. Трансформация биогенных веществ в водах Татарского пролива (Японское море): анализ результатов математического моделирования // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37. – № 1. – С. 33–57.

34. Пищальник В.М., Бобков А.О. Моделирование природных процессов на основе ГИС «Сахалинский шельф». – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2008. – 103 с.
35. Природопользование, состояние и тенденции изменений морской среды прибрежных и сопредельных районов дальневосточных морей России. Единая система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). URL: <http://portal.esimo.ferhri.ru/portal/portal/poi> (дата обращения 21.01.2020).
36. Афанасьев В.В., Игнатов Е.И., Чистов С.В. Морфология и динамика берегов и дна пролива Невельского – района проектирования постоянного железнодорожного перехода. – Смоленск: Маджента, 2008. – 128 с.
37. Золотухин Д.Е., Ивельская Т.Н. Пространственная детализация магнитудно-географического критерия цунамиопасности землетрясений в Японском море // Проблемы анализа риска. – 2014. – Т. 11. – № 5. – С. 60–67.
38. Мониторинг переноса придонного потока осадков в прибрежно-морской зоне шельфа для выявления основных параметров моделей состояния экосистем / В.В. Ильин, В.А. Мелкий, А.А. Верхотуров, А.А. Гальцев, О.М. Зарипов, Д.В. Долгополов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 105–115.
39. Hendricks M.R. Introduction to physical hydrology. – New York: Oxford University Press Inc., 2010. – 331 p.
40. Nelson K.S., Fringer O.B. Sediment dynamics in wind wave-dominated shallow-water environments // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2018. – V. 123. – № 10. – P. 6996–7015. URL: <https://doi.org/10.1029/2018JC013894> (дата обращения 21.01.2020).
41. Sanford L.P. Modeling a dynamically varying mixed sediment bed with erosion, deposition, bioturbation, consolidation, and armoring // Computers & Geosciences. – 2008. – № 34. – Iss. 10. – P. 1263–1283. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.02.011> (дата обращения 21.01.2020).
42. Васильков А.С. Проекты института «Гипростроймост» // Дороги. – 2013. – № 12. – С. 34–38.
43. Геосистемы Дальнего Востока России на рубеже XX–XXI вв.: в 3 т. Т. 3. Территориальные социально-экономические структуры / под ред. акад. П.Я. Бакланова, д.г.н. М.Т. Романова. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 364 с.

Поступила 24.05.2020 г.

Информация об авторах

Мелкий В.А., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Верхотуров А.А., старший научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Пищальник В.М., доктор технических наук, заведующий лабораторией дистанционного зондирования Земли Сахалинского государственного университета.

Братков В.В., доктор географических наук, заведующий кафедрой географии Московского государственного университета геодезии и картографии.

UDC 528:551.5:551.46:624

CLIMATIC AND HYDROLOGICAL FACTORS OPERATING IN THE AREA OF LEADING LINE FOR CONSTRUCTION OF BRIDGE «SAKHALIN–CONTINENT»

Vyacheslav A. Melkiy¹,
vamelkiy@mail.ru

Alexey A. Verkhoturov¹,
ussr-91@mail.ru

Vladimir M. Pishchalnik²,
vpishchalnik@rambler.ru

Vitaliy V. Bratkov³,
vbratkov@mail.ru

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science,
1b, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia.

² Sakhalin State University,
290, Lenin street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia.

³ Moscow State University of Geodesy and Cartography,
4, Gorokhovskiy bystreet, Moscow, 105064, Russia.

The expediency of transportation on the TRANS-Siberian railway is not in doubt for any of our contemporaries now, and its importance for development of Siberia and the Far East is quite obvious. However, this attitude to this transport artery was not formed immediately. Let us recall at least the fact that the Tomsk merchant class insisted that the road passed through Aleksandrovsk (now Novosibirsk). The decision of Tsar Alexander III on construction of the railway played crucial role. The built road contributed to the development of the cities through which it was laid. The situation with the decision on organization of the free movement from the mainland to Sakhalin seems to us similar to the one that was in front of laying of the line across Siberia. The issue will have to be addressed sooner or later. The laying of the highway to the island will give a powerful impetus to the social and economic development of the territories adjacent to the road and railway, which will pass through the bridge. In this article, we research specifics of climatic and hydrological factors that determine choice of type of hydraulic structures in the Nevelskogo Strait.

The relevance of the research is dictated by the need for comprehensive review of the conditions that determine the choice of the Tatar Strait crossing line by the bridge. After taking into account the influence of geological and geomorphological factors, we turn our attention to climatic, weather and hydrological processes that will have a permanent impact on construction and operation.

The aim of the research is to link together and analyze the data that characterize features of atmospheric and hydrosphere processes in narrow part of the Tatar Strait and conduct scientific research that will complement for engineering research and help identify based on simulation safest opening for construction of hydro-technical utilities that will connect opposite banks.

Materials and methods. The materials for the study were cartographic materials, data of remote sensing of the Earth, information on climatic and weather conditions, data of hydrological, meteorological, Oceanographic observations, information obtained as a result of research works and engineering surveys in which the authors participated, as well as information from literary sources. Mapping in the geographic information environment allowed creating thematic maps reflecting the dynamics of hydrometeorological processes. The obtained information was used in construction of models of water circulation, formation and degradation of ice cover in the Nevelskoy Strait with the use of geoinformation technologies. The authors took a direct part in research of the leading line «Novy» in 2001. As result of the research of the features of hydrometeorological conditions within the water area of the Nevelskogo Strait and its coasts, based on satellite monitoring data, observations at nearby weather stations, as well as confirmed by information obtained during engineering surveys, it was found that in area of the Nevelskoy Strait, adverse natural phenomena should be taken into account when choosing technical design solutions for selecting type of bridge or tunnel construction from mainland to Sakhalin. The spatial and temporal distribution of radiance in the area is due to astronomical reasons, decrease in duration of the sunshine in De-Kastri and Pogibi compared to Nikolaevsk-on-Amur is associated with frequent fogs that occur during atmospheric processes on border of land and sea. Extreme values of air temperature in Pogibi were registered at the Pogibi weather station – maximum of 27,3 °C and a minimum of –44,0 °C. Index of continentality is very high (amplitude – 71,3 °C), which can be explained by the influence of air masses removal from mainland in winter period. The important indicator for projecting – duration of frost-free period-ranges in Pogibi from 88 to 186 days (average – 137). Daily precipitation totals during warm period reached maximum values of 88 mm in October, 81 mm in August, and 78 mm in July. Snow cover in Pogibi lasts from 153 to 216 days. Winds of ≥30 m/s occur annually in spring and autumn, sometimes exceeding 40 m/s. Fogs in described area are observed throughout year. Snowstorms in strait and on its coastal are very common. Any increase in wind in winter is accompanied by blizzard transfer of snow. Thunderstorms occur 4–5 times a year. Dust storms are rare. Horizontal water circulation in the Northern part of strait is anticyclonic in winter, and cyclonic circulation is active from May to September. In general, in spring water movement speed on surface is 2–7 cm/s and in summer it decreases to 1–4 cm/s. Changes in sea level in the Tatar Strait are in the range of 3,2–4,0 m. Duration of ice period at time moderate types of winters is 201 days. Collar ice in Pogibi in late March – early April averages 160 cm and varies from 119 to 190 cm depending on type of winter. Due to the strong tidal currents, the solid ice cover in channel of the middle part of strait is formed very rarely and on short time. The result of the increased ice cover dynamics is multiple layers of young ice up to 30 cm thick. Coasts in southern part of Strait are resistant to abrasion processes and practically do not collapse. The area enclosed between liding lines Lazarev cape – cape Pogibi in the North and cape South – cape Tyk – in the South has the most favorable conditions for the construction of bridge.

Climatic and hydrological conditions throughout have relative similarity, which allowed us distinguish it when zoning as independent unit. The performed research allows us give an advantage to leading line «Novy» (cape Nevelskogo – cape Lakh).

Key words:

Hydrometeorological conditions, space images, thematic mapping, ice conditions, coastal abrasion, geodetic support, geoinformation technologies.

REFERENCES

- Melkiy V.A., Bratkov V.V., Verhoturov A.A. Geological and geomorphological determinants for choosing the place of transport crossing «Continent–Sakhalin». *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 158–170. In Rus.
- Butkov V.V. O vozmozhnosti uluchsheniya klimata nashego poberezhya Yaponskogo morya. Dokladnaya zapiska [On the possibility of improving the climate of our coast of the Sea of Japan. Memo]. *Most na Sakhalin. Yaponiya–Sakhalin–Evropa* [Bridge to Sakhalin. Japan–Sakhalin–Europe]. Available at: <http://mostsakhlin.ru/publications/detail.php?ID=1588> (accessed 25 January 2020).
- Kostanov A.I. *Samaya vostochnaya doroga Rossii: ocherki istorii Sakhalinskoy zheleznoy dorogi* [The easternmost road in Russia: essays on the history of the Sakhalin railway]. Moscow, Transport Publ., 1997. 220 p.
- Nedostroy veka: istoriya o tom, kak Stalin pytalsya soedinit Sakhalin s materikom [Incompleteness of century: the story of how Stalin tried to connect Sakhalin with the Mainland]. *SakhalinMedia.ru*. Available at: <https://sakhalinmedia.ru/news/531809> (accessed 25 January 2020).
- Vedernikov G.P. *Tayny obekta No 6: kak ya nashel cherezhi tonnelya na Sakhalin* [Secrets of object No 6: how I found the drawings of the tunnel on Sakhalin]. Available at: <https://habinfo.ru/most-na-sahalin/> (accessed 25 January 2020).
- Zaklyuchenie Gosstroya SSSR № 115ss po tekhnicheskoyu proektu na stroitelstvo tunnelnogo perekhoda pod Tatarskim prolivom ot 22.11.1952. GA RF. F. R-5446. Op. 60. D. 7891. L. 2-10. Podlinnik [The conclusion of Gosstroy of the USSR № 115cc Technical project for the construction of the tunnel crossing under the Tatar Strait from 22.11.1952. GARF. P-5446. Op. 60. D. 7891. L. 2-10. Original]. *Istoricheskiy arkhiv*, 2001, no. 6, pp. 71–77. Available at: <https://alexanderyakovlev.org/fond/issues-doc/60574> (accessed 25 January 2020).
- Federalnaya tselevaya programma «Modernizatsiya transportnoy sistemy Rossii (2002–2010 gody)». Utverzhdena Postanovleniem Pravitelstva RF ot 5 dekabrya 2001 g. no 848. *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii*, 2001, № 51, st. 4895. [Federal target program «Modernization of the Russian transport system (2002–2010)». Approved by the government of the Russian Federation on December 5, 2001, № 848]. Available at: <http://www.szrf.ru/szrf/doc.phtml?nb=100&issid=1002001051000&docid=88> (accessed 7 May 2020).
- Lotsii Tatarskogo proliva, Amurskogo limana i proliva Laperuza, opisyyayushchie prokhod ot porta Nikolaevsk-na-Amure na sever, v Okhotskoe more* [Pilot's sailing direction of the Tatar Strait, Amur estuary and Laperouse Strait describing passage from the port of Nikolaevsk-on-Amur to North, in the sea of Okhotsk]. № 1402. Vypusk 1999 bolshaya korektura po GUNiO vyp. 24 ot 07.06.2003.
- Kondratev K.Ya. Neopredelennosti dannykh nablyudeniy i chislennogo modelirovaniya klimata [Uncertainties of observational data and numerical climate modeling]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2004, no. 4, pp. 93–119.
- Ponomarev V.I., Kaplunenko D.D., Dmitrieva E.V., Krokhin V.V., Novorotskiy P.V. *Klimaticheskie izmeneniya v severnoy chasti Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. Dalnevostochnye morya Rossii. T. 1: Okeanologicheskie issledovaniya* [Climate change in northern part of the Asia-Pacific region. Far Eastern seas of Russia. Vol. 1. Ocean studies]. Moscow, Nauka Publ., 2007. pp. 17–48.
- Bradley R.S. *Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary*. 3rd ed. San Diego, Academic Press, 2014. 675 p.
- Folland C.K., Salinger M.J., Jiang N., Rayner N.A. Trends and variations in south Pacific island and ocean surface temperatures. *Journal of Climate*, 2003, vol. 16, no. 17, pp. 2859–2874. Available at: <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520-0442%282003%29016%2859%3ATAVIS%202.0.CO%3B2> (accessed 7 May 2020).
- O'Carroll A.G., Armstrong E.M., Beggs H.M., Bouali M., Casey K.S., Corlett G.K., Dash P., Donlon C.J., Gentemann C.L., Hoyer J.L., Ignatov A., Kabobah K., Kachi M., Kurihara Y., Karagali I., Maturi E., Merchant C.J., Marullo S., Minnett P.J., Pennybacker M., Ramakrishnan B., Ramsankaran R., Santoleri R., Sander S., Saux Picart S., Vázquez-Cuervo J., Wimmer W. Observational needs of sea surface temperature. *Frontiers in Marine Science*, 2019, vol. 6, Art. 420. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00420/full> (accessed 7 May 2020).
- Oliver E.C.J., Donat M.G., Burrows M.T., Moore P.J., Smale D.A., Alexander L.V., Benthuyzen J.A., Feng M., Gupta A.S., Hobday A.J., Holbrook N.J., Perkins-Kirkpatrick S.E., Scannell H.A., Straub S.C., Wernberg T. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nature Communications*, 2018, no. 9, Art. 1324. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9> (accessed 7 May 2020).
- Li T., Wang B., Wu B., Zhou T., Chang C.-P., Zhang R. Theories on formation of an anomalous anticyclone in western North Pacific during El Niño: A review. *Journal of Meteorological Research*, 2017, vol. 31, Pp. 987–1006. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13351-017-7147-6.pdf> (accessed 7 May 2020).
- Stengel M., Stapelberg S., Sus O., Schlundt C., Poulsen C., Thomas G., Christensen M., Carbajal Henken C., Preusker R., Fischer J., Devasthale A., Willén U., Karlsson K.-G., McGarragh G.R., Proud S., Povey A.C., Grainger R.G., Meirink J.F., Feofilov A., Bennartz R., Bojanowski J.S., Hollmann R. Cloud property datasets retrieved from AVHRR, MODIS, AATSR and MERIS in the framework of the Cloud_cci project. *Earth System Science Data*, 2017, no. 9, Iss. 2, pp. 881–904. Available at: <https://doi.org/10.5194/essd-9-881-2017> (accessed 7 May 2020).
- Hannachi A., Turner A.G. 20th century intraseasonal Asian monsoon dynamics viewed from Isomap. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2013, no. 20, Iss. 5, pp. 725–741. Available at: <https://doi.org/10.5194/npg-20-725-2013> (accessed 7 May 2020).
- Krokhin V.V., Fil A.Y., Veryatin V.Y. Long-term variations in the frequency of typhoons and their connection with various formation factors. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017, no. 42, pp. 766–774. Available at: <https://doi.org/10.3103/S1068373917120044> (accessed 7 May 2020).
- Chongyin L., Shuqing S., Mingquan M. Origin of the TBO-interaction between anomalous East-Asian winter monsoon and ENSO cycle. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, vol. 18, no. 4, pp. 554–566. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00376-001-0044-y>
- Wang J., Ikeda M. Arctic oscillation and Arctic sea-ice oscillation. *Geophysical Research Letters*, 2000, vol. 27, Iss. 9, pp. 1287–1290. Available at: <https://doi.org/10.1029/1999GL002389> (accessed 7 May 2020).
- Yang Y., Liang X.S., Qiu B., Chen S. On the decadal variability of the eddy kinetic energy in the Kuroshio Extension. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, vol. 47, pp. 1169–1187. Available at: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0201.1> (accessed 7 May 2020).
- Wills R.C.J., Battisti D.S., Proistosescu C., Thompson L.A., Hartmann D.L., Armour K.C. Ocean circulation signatures of North Pacific decadal variability. *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46, no. 3, pp. 1690–1701. Available at: <https://doi.org/10.1029/2018GL080716> (accessed 7 May 2020).
- Nakamura H., Miyasaka T., Kosaka Y., Takaya K., Honda M. Northern Hemisphere extratropical tropospheric planetary waves and their low-frequency variability: their vertical structure and interaction with transient eddies and surface thermal contrasts.

- Climate dynamics: why does climate vary? Chap. 6. Geophys. Monogr.* Eds. D. Sun, F. Bryan. Washington, D. C., American Geophysical Union, 2010. Vol. 189, pp. 149–179. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2008GM000789> (accessed 7 May 2020).
24. Smirnov N.P., Vorobev V.N. *Severo-Tikhookeanskoe kolebanie i dinamika klimata v severnoy chasti Tikhogo okeana* [North-Pacific fluctuation and climate dynamics in the North Pacific]. St-Petersburg, RGGMU Publ., 2002. 122 p.
 25. Minobe S. A 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophysical Research Letters*, 1997, vol. 24, Iss. 6, pp. 683–686. Available at: <https://doi.org/10.1029/97GL00504> (accessed 7 May 2020).
 26. *Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR: Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Ch. 1-6, Vyp. 34, Sakhalinskaya oblast* [Scientific and applied guide to the climate of the USSR: Series 3. Multiyear data. P. 1-6, Iss. 34, Sakhalin region]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 352 p.
 27. *Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR: Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Ch. 1-6, Vyp. 25, Khabarovskiy kray, Amurskaya oblast* [Scientific and applied guide to the climate of the USSR: Series 3. Multiyear data. P. 1-6, Iss. 25, Khabarovskiy kray, Amur region]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992. 582 p.
 28. Ponomarev V.I., Kaplunenko D.D., Krokhin V.V. Tendentsii izmeneniya klimata vo vtoroy polovine XX v. v Severo-Vostochnoy Azii, na Alyaske i severo-zapade Tikhogo okeana [Climate change trends in the second half of XX century in northeast Asia, Alaska, and the Pacific Northwest]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2005, no. 2, pp. 15–26.
 29. Pogoda v Pogibi. Temperatura vozdukh i osadki [Weather in Pogibi. Air temperature and precipitation]. *Weather and climate*. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=32027&month=8&year=2018> (accessed 28 June 2020).
 30. Vasileva A.S., Terzieva F.S., Kosareva A.N. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey: spravochnoe izdanie. Proekt «Morya». T. VIII. Yaponskoe more. Gidrometeorologicheskie usloviya* [Hydrometeorology and hydrochemistry of seas: reference publication. The Seas Project. Vol. VIII. Sea of Japan. Ed. 1. Hydrometeorological conditions]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2003. 395 p.
 31. Pishchalnik V.M., Leonov A.V., Arkhipkin V.S., Melkiy V.A. *Matematicheskoe modelirovanie usloviy funktsionirovaniya ekosistemy Tatarskogo proliva* [Mathematical modeling of functioning conditions of the Tatar Strait ecosystem]. Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU, 2011. 104 p.
 32. Yakunin L.P. Level and ice jams in the Amur Liman. *The 14th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice and International Workshop on Rational Evaluation of Ice Forces on Structures*. Hokkaido, Mombetsu, 1999. pp. 241–242.
 33. Leonov A.V., Pishchalnik V.M., Chicherina O.V. Transformations of biogenic substances in Tatar Strait water (the Sea of Japan): analysis of mathematical modeling results. *Water Resources*, 2010, vol. 37, no. 1, pp. 33–57. <https://doi.org/10.1134/S0097807810010033>
 34. Pishchalnik V.M., Bobkov A.O. *Modelirovanie prirodnykh protsessov na osnove GIS «Sakhalinskiy shelf»* [Modeling of natural processes based on the GIS «Sakhalin shelf»]. Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU Publ., 2008. 103 p.
 35. *Prirodopolzovanie, sostoyaniye i tendentsii izmeneniy morskoy sredy pribrezhnykh i sopredelnykh rayonov dalnevostochnykh morey Rossii. Edinaya sistema informatsii ob obstanovke v Mirovom okeane (ESIMO)* [Nature management, State and Trends of changes in the Marine environment of the Coastal and Adjacent areas of the Russian Far Eastern seas]. Available at: <http://portal.esimo.ferhri.ru/portal/portal/poi> (accessed 21 January 2020).
 36. Afanasev V.V., Ignatov E.I., Chistov S.V. *Morfologiya i dinamika beregov i dna proliva Nevel'skogo rayona proektirovaniya postoyannogo zheleznodorozhnogo perekhoda* [Morphology and dynamics of shores and bottom of the Nevel'skogo Strait – district of design of the permanent railway crossing]. Smolensk, Madzhenta Publ., 2008. 128 p.
 37. Zolotukhin D.E., Ivel'skaya T.N. Prostranstvennaya detalizatsiya magnitudno-geograficheskogo kriteriya tsunamipasnosti zemletryaseniy v Yaponskom more [Spatial detail of magnitude-geographical criterion for tsunami hazard of earthquakes in the Sea of Japan]. *Problemy analiza riska*, 2014, vol. 11, no. 5, pp. 60–67.
 38. Ilin V.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Galtsev A.A., Zaripov O.M., Dolgoplov D.V. Monitoring of the near-bottom flow of the sediments in the coastal zone of the shelf to identify the main parameters of the models of the ecosystems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 105–115. In Rus.
 39. Hendricks M.R. *Introduction to physical hydrology*. New York, Oxford University Press Inc., 2010. 331 p.
 40. Nelson K.S., Fringer O.B. Sediment dynamics in wind wave-dominated shallow-water environments. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, vol. 123, no. 10, pp. 6996–7015. Available at: <https://doi.org/10.1029/2018JC013894> (accessed 21 January 2020).
 41. Sanford L.P. Modeling a dynamically varying mixed sediment bed with erosion, deposition, bioturbation, consolidation, and armoring. *Computers & Geosciences*, 2008, no. 34, Iss. 10, pp. 1263–1283. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.02.011> (accessed 21 January 2020).
 42. Vasilkov A.S. Proekty instituta «Giprostroykost» [The projects of the Institute «Giprostroykost»]. *Dorogi*, 2013, no. 12, pp. 34–38.
 43. *Geosistemy Dalnego Vostoka Rossii na rubezhe XX–XXI vv. T. 3. Territorialnye sotsialno-ekonomicheskie truktury* [Geosystems of Far East of Russia on boundary of XX–XXI centuries. Vol. 3. Territorial social-economic structures]. Eds. P.Ya. Baklanov, M.T. Romanov. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2012. 364 p.

Received: 24 May 2020.

Information about the authors

Vyacheslav A. Melkiy, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science.

Alexey A. Verkhoturov, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science.

Vladimir M. Pishchalnik, Dr. Sc., head of the laboratory for remote sensing of the earth of the Sakhalin State University.

Vitaliy V. Bratkov, Dr. Sc., head of Geography department, Moscow State University of Geodesy and Cartography.

УДК 004.932.2+ 665.6/7

АДАПТИВНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРОТЕКАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Цавнин Алексей Владимирович¹,
avc14@tpu.ru

Филипас Александр Александрович¹,
filipas@tpu.ru

Беляев Александр Сергеевич¹,
asb22@tpu.ru

Рожнев Никита Викторович¹,
rozhnevn@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения экономической рентабельности в нефтегазовом секторе за счет автоматизированного управления технологическими процессами разделения нефтесодержащей жидкости на основе математических имитационных моделей, полученных на основе натурных экспериментов, в частности, снижение энергетических затрат на обеспечение данных технологических процессов без потери качества товарной нефти, регламентируемого государственными стандартами.

Цель: создание адаптивной автоматизированной информационно-измерительной системы для экспериментальной оценки динамики сепарации нефтесодержащей жидкости при различной степени устойчивости слоя эмульсии и межфракционной диффузии для формирования данных для построения имитационной математической модели.

Объект: технологический процесс сепарации нефтесодержащей жидкости на примере лабораторного резервуара с гравитационным типом сепарации.

Методы: натурный эксперимент, техническое зрение, сверточные нейронные сети, машинное обучение, сегментация цифрового изображения, расчет объемных соотношений фракций, переходные процессы, автоматизация физико-химического эксперимента.

Результаты. Разработана адаптивная информационно-измерительная система на базе технического зрения и сверточных нейронных сетей, позволяющая производить оценку объемного соотношения разделенных фракций нефтесодержащей жидкости при различных конфигурациях слоя эмульсии и разной степени его стабильности и четкости границы. Основой функционирования представленной информационно-измерительной системы является программное обеспечение, предусматривающее различные качественные и количественные параметры проведения эксперимента. Разработан и представлен алгоритм адаптации периода дискретизации фотофиксации на основе продолжительности физико-химической реакции, определяемой постоянной времени процесса. Для представленной адаптивной информационно-измерительной системы проведена апробация в рамках лабораторного эксперимента с получением объемных соотношений фракций в режиме реального времени и их визуализацией.

Ключевые слова:

Сепаратор, нефтесодержащая жидкость, эмульсия, компьютерное зрение, сверточные нейронные сети, адаптивное измерение.

Введение

На сегодняшний день в нефтедобывающем секторе одним из ключевых элементов первичной обработки нефтесодержащей жидкости является сепаратор – устройство, в котором нефть отделяется от попутного газа, воды и иных примесей. Одним из наиболее распространенных видов сепараторов является сепаратор гравитационного типа, в котором процесс разделения обеспечивается за счет различной плотности жидкостей [1–3]. В свою очередь, среди сепараторов гравитационного принципа действия выделяют двухфазные и трехфазные, в зависимости от количества фракций, которые могут быть зафиксированы и измерены во время процесса сепарации скважной жидкости [4–7]. В трехфазном сепараторе скважная жидкость разделяется на три ключевые фракции – вода, нефть и газ.

Для обеспечения автоматизированного и оптимального в смысле быстродействия, энергозатрат и износа технологического оборудования регулирования необходимо наличие формализованного математического описания процесса разделения скважной жидкости. На сегодняшний день существует целый ряд работ [8–13], посвященных оценке и формализации процесса разделения скважной жидкости. Наиболее простым способом получения математической модели динамики сепарации является проведение эксперимента с получением имитационной модели, т. е. аппроксимация некоторой функцией набора измеренных значений толщины каждого из слоев. Для определения объемного соотношения полученных фракций в промышленности применяются измерители уровня с возможностью детектирования границы раздела сред, однако совокупность фаз уже разделен-

ной скважной жидкости характеризуется неравномерными границами, т. е. слой может иметь клиновидную форму или более сложную. В условиях, максимально приближенным к реальным технологическим процессам, переход между фракциями может не иметь четкой границы.

Для более точной фиксации динамики процессов разделения с помощью измерителей с возможностью детектирования границ раздела фаз на одном объекте требуется несколько датчиков, что существенно увеличивает стоимость эксперимента. Кроме того, есть более сложные системы измерения, позволяющие учитывать нестабильность слоя эмульсии [14].

Качественно другим подходом к решению задачи оценки динамики процесса разделения может являться применение системы технического зрения в рамках предварительного лабораторного эксперимента. Предлагается решение задачи сегментации цифрового изображения на основе данных о значении интенсивности пикселей, получаемых из видеопотока. Однако стоит отметить, что осуществление оценки объемного соотношения фракций в условиях добывающей площадки, в силу того, что сепаратор представляет собой непрозрачный металлический резервуар без непосредственного доступа к прямому оптическому наблюдению за состоянием фаз с применением технического зрения, является отдельной инженерной задачей. Решением для проведения эксперимента с оптическим наблюдением за процессом может являться построение испытательного стенда, который представляет собой модель физического подобию реального промышленного сепаратора, но в конструктивном исполнении, позволяющем вести прямое наблюдение. В данном случае предлагается построение накопителя из прозрачного органического стекла или пластика.

Описание эксперимента

Для оценки динамики процесса сепарации скважной жидкости резервуар, пригодный для непрерывной оптической оценки, наполняется смесью воды и заранее заготовленной сырой нефтью или заменителем. В данной работе в качестве заменителя выступает масло. Далее, непосредственно перед резервуаром, располагается цифровая камера, осуществляющая захват видеопотока. Видеопоток поступает на электронно-вычислительную машину для оценки объемного соотношения каждой из фракций и логирования данных с их дальнейшей визуализацией и математической обработкой. Принципиальная схема эксперимента приведена на рис. 1.

В качестве устройства обработки видеoinформации выбран микрокомпьютер NVIDIA Jetson Nano, обеспечивающий должный уровень производительности в задачах параллельных вычислений, распознавания образов и сегментации.

Представленный алгоритм функционирования системы позволяет осуществлять автоматизированное наблюдение за протеканием эксперимента с фиксацией ключевых показателей, в данном случае – объемные соотношения фракций нефтесодержащей жидко-

сти с их дальнейшим логированием. Кроме того, предусмотрено проведение серии экспериментов в автоматическом режиме, который по истечении выбранного при запуске времени опыта или при получении иной обратной связи, например, при достижении некоторых физико-химических или технико-экономических показателей, осуществляет перезапуск эксперимента и его проведение выбранное число раз.

Разработанное программное обеспечение (ПО) работает согласно алгоритмам, представленным на рис. 2.

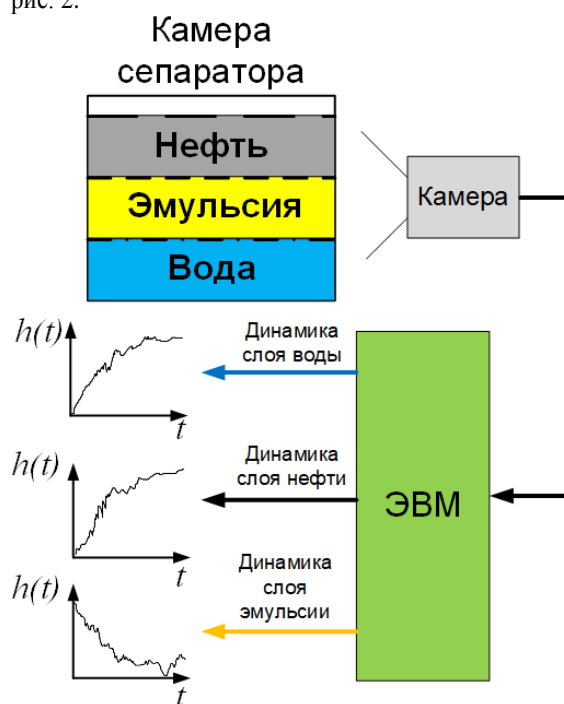


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента

Fig. 1. Experiment flow chart

При запуске программы пользователь выбирает режим работы: одиночный эксперимент или серия экспериментов. В случае выбора пользователем одиночного эксперимента далее задается длительность эксперимента и желаемое значение точности. Исходя из введенных значений входных параметров, осуществляется автоматический расчет частоты фотофиксации. После этого в течение всего времени проведения эксперимента циклически осуществляется захват видеопотока с его дальнейшим кадрированием, сегментированием, выделением границ и расчетом площадей сегментов и, соответственно, объемных соотношений фракций. В случае выбора серии экспериментов пользователь указывает длину серии, а также выбирает будет ли осуществляться автоматическая адаптация по частоте фотофиксации. В режиме без адаптации осуществляется проведение выбранного количества одиночных экспериментов с указанной длительностью и желаемой точностью. В случае если адаптация по периоду фотофиксации активирована, на первом эксперименте в серии осуществляется расчет постоянной времени процесса и дальнейший перерасчет периода фотофиксации для более рационального использования вычислительных мощностей ЭВМ.

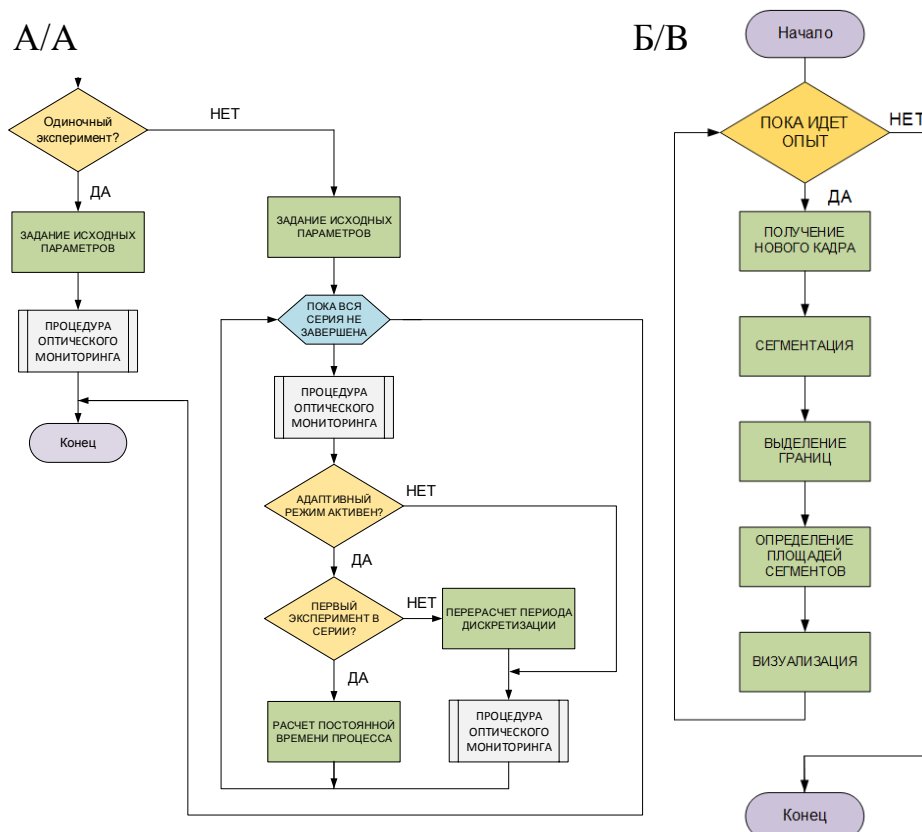


Рис. 2. Блок-схемы алгоритмов (А) основной программы и (Б) процедуры оптического мониторинга
Fig. 2. Block diagram of (A) main program and (B) optical monitoring procedure

Процедура оценки объемного соотношения с помощью компьютерного зрения

Для решения задачи сегментации имеется множество работ, однако наибольшее применение получили сверточные нейронные сети (СНС), которые показывают наибольшую точность в задачах обработки изображения [15, 16]. Основной особенностью СНС является элемент свертки, который уменьшает исходное изображение до определенных размеров.

Для корректного обучения СНС требуется обширная размеченная выборка данных, что в ряде случаев является крайне трудоемкой в плане времени задачей. Одним из подходов к решению данной задачи является трансферное обучение [17–19]. Метод трансферного обучения подразумевает использование уже обученной СНС, у которой меняются и переобучаются только выходные слои, соответственно, для используемой СНС была выбрана U-net архитектура. Выбранная архитектура позволяет осуществить сегментацию области изображения по классу при помощи создания маски каждого из искомым сегментов.

Для обучения СНС была сделана выборка из 100 фотографий, отличающихся по освещению, положению и углу поворота камеры, размытию и с разными конфигурациями эмульсии. В каждом блоке данных для обучения используется по 10 изображений, по которым происходила настройка параметров СНС, значение коэффициента скорости обучения (КСО) в начале было установлено 0,005 и далее значение КСО уменьшалось в 10 раз через каждые 10 блоков данных. Однако через

каждые 10 эпох коэффициент уменьшался в 10 раз. Максимальное количество эпох обучения равно 60.

Таким образом, алгоритмы компьютерного зрения настроены на сегментацию ключевых фракций, каждая из которых является эмульсией с различной концентрацией масла.

На рис. 3 представлено исходное изображение резервуара и соответствующие тепловые карты для каждого из слоев, которые получились в результате сегментации. Фракция № 1 является фракцией с самой высокой концентрацией масла и соответствует нефтяному слою после коалесценции, вызванной гравитационным отстаиванием, фракция № 2 представляет собой переходную эмульсионную зону или «промслои». Фракция № 3 является эмульсией с повышенной степенью обводненности. Тепловые карты показывают принадлежность каждого из пикселей к той или иной из фракций. Затем на основе данных тепловой карты формируется так называемая маска – специальное изображение, которое однозначно выделяет ключевые сегменты.

Полученная нейронная сеть имеет точность сегментации не менее 95 %, а в среднем – 97 % [20, 21].

Для оценки объема каждой из фракций и, соответственно, динамики сепарации осуществляется расчет площади детектированного сегмента и далее, зная габариты и форму экспериментального резервуара, осуществляется вычисление объема. Данный подход позволяет получить значения объемов в условиях нелинейной формы границы раздела фракций и пониженной стабильности слоя эмульсии, вызванной межфракционной диффузией.

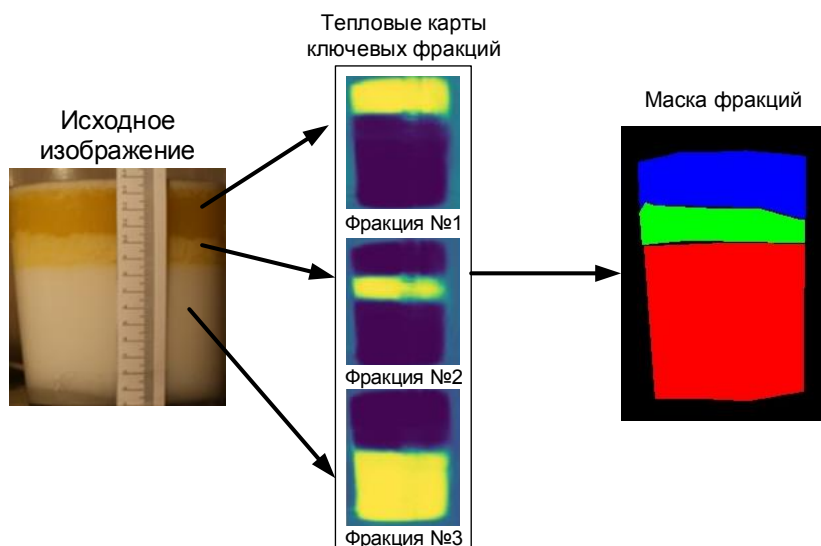


Рис. 3. Выделение фракций скважной жидкости на основе работы сверточной нейронной сети

Fig. 3. Petroleum-containing fluid fractions recognition using convolutional neural network

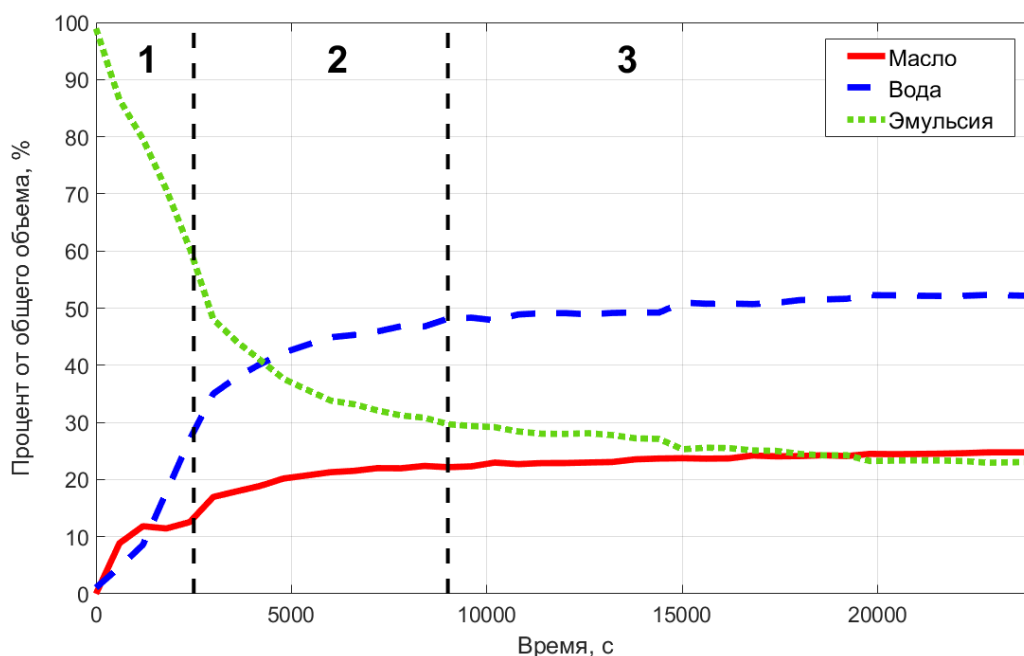


Рис. 4. Графики изменения объемных соотношений каждой из фракций

Fig. 4. Graphics of volume ration of each fraction versus time

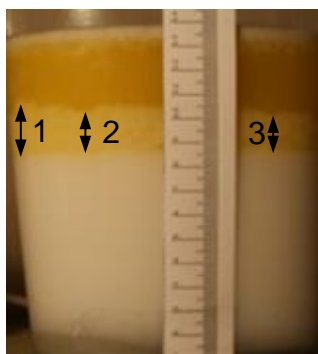


Рис. 5. Сопоставление значений высоты промслоя в зависимости от места измерения

Fig. 5. Comparison of intermediate emulsion layer heights in different locations

Таблица. Высота промслоя при различном расположении измерителя

Table. Intermediate emulsion layer height in different sensor locations

Номер метки измерения Measurement label number	Значение высоты слоя, мм Layer height, mm
1	24
2	17
3	17

Важно отметить, что представленный подход на основе компьютерного зрения позволяет нивелировать клиновидность слоя и, соответственно, снизить погрешность измерения. Рассмотрим процесс прямого измерения в данном эксперименте и на основе шкалы оценим высоту промслоя.

Как видно из рис. 5 и таблицы, в силу клиновидности протекания, в зависимости от расположения измерителя, имеем различные показания с существенным разбросом. Кроме того, в динамическом режиме работы, т. е. при условии нестатической жидкости, подверженной коалесценции, а при постоянной циркуляции, характерным побочным эффектом будет являться волнообразование, которое также будет увеличивать девиации сигнала измерения. При использовании компьютерного зрения оценка происходит по площади сечения слоя, независимо от его геометрической формы в реальном масштабе времени.

Процедура адаптации периода фотофиксации процессов

При получении сырых данных о площади каждой из фракций скважной жидкости и оценке ее динамики система адаптирует частоту фиксации изображения, что позволяет уменьшить вычислительную нагрузку на ЭВМ. В силу того, что время разделения скважной жидкости на фракции, с учетом соотношения фракций, температуры и химических свойств компонентов может составлять от нескольких минут до нескольких часов, минимальный период дискретизации T_{\min} , т. е. фиксирование состояния эмульсии оптическим устройством, был выбран равным 10 секундам. Как видно на рис. 4, на участке 1 динамика расслоения фракций существенна и для повышения точности эксперимента частота снятия данных будет максимальной. На стадии 2 на рис. 4 дифференциация также существенная, однако наблюдается более низкая динамика формирования слоев каждой из фракций, что допускает снижение частоты захвата кадра. Наконец, на участке 3 динамика снизилась почти до нулевого значения и для более рационального использования ЭВМ в плане вычислительной нагрузки период фотофиксации будет снижен. В силу того, что процессы формирования

фракций нефтесодержащей жидкости могут быть описаны как экспоненциальные, формализованная оценка динамики может осуществляться на основе значения постоянного времени процесса T , т. е. времени, за которое амплитуда достигнет значения 63,2 % или снизится от 100 % до значения 36,8 % [22]. В качестве опорного значения для подстройки периода дискретизации будем использовать постоянную времени самого медленного из процессов для отдельно взятого эксперимента. Кроме того, известно, что время достижения 98,2 % своей амплитуды для экспоненциального процесса составляет порядка $5T$. Отсюда период дискретизации T_{Φ} , т. е. в данном случае величина временных интервалов, через которые осуществляется фотофиксация процесса, будет определяться следующим образом

$$T_{\Phi} = \begin{cases} T_{\min}, & 0 \leq t < T; \\ 2T_{\min}, & T \leq t < 3T; \\ 5T_{\min}, & t \geq 3T. \end{cases}$$

Заключение

Разработанная система технического зрения позволяет в режиме реального времени автоматизировать научный эксперимент по разделению нефтесодержащей жидкости в лабораторных условиях. Представленная информационно-измерительная система позволяет сегментировать фракции с различной степенью стабильности слоя эмульсии и, соответственно, предоставлять уточненные данные для дальнейшего построения имитационной или других типов математических моделей. Кроме того, разработанное программное обеспечение может являться универсальным инструментом для построения статических характеристик, мониторинга и оценки динамики различных наблюдаемых физических, химических и биологических процессов и реакций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравцов А.В., Ушева Н.В., Бешагина Е.В. Технологические основы и моделирование процессов промышленной подготовки нефти и газа: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 128 с.
2. Арнольд К.Е., Стюарт М.И. Справочник по оборудованию для комплексной подготовки нефти. – М.: Премииум Инжиниринг, 2011. – 776 с.
3. Щодро А.И. Автоматизация технологического процесса сепарации нефтесодержащей смеси // Актуальные проблемы науки и образования в современном мире: тр. III Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак: СФ БашГУ, 2017. – С. 407–410.
4. Автономный комплекс управления трёхфазным нефтегазосепаратором // ЗАО «Альбатрос». URL: <http://www.albatros.ru/catalog/products/mpc-oil-products/control-system-3-phase.php> (дата обращения 27.03.2020).
5. Верёвкин А.П., Кирюшин О.В., Уразметов Ш.Ф. Управление процессом подготовки нефти по агрегативной устойчивости водонефтяной эмульсии // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2012. – № 4. – С. 33–35.
6. Гаврилов В.П. Концепция продления «нефтяной эры» России // Геология нефти и газа. – 2005. – № 1. – С. 53–59.
7. Varanasi S.K., Tirumalaraju S.V., Jampana P. Comparative study of parsimonious NARX models for three phase separator // 2019 Fifth Indian Control Conference (ICC). – New Delhi, 2019. – P. 430–435.
8. Tuning a three-phase separator level controller via particle swarm optimization algorithm / L. Sathasivam, I. Elamvazuthi, M.K.A.A. Khan, S. Parasuraman // 2018 International Conference on Recent Trends in Electrical, Control and Communication (RTECC). – Malaysia, 2018. – P. 265–268.
9. Janakiraman S., Devanathan R. An analysis of quadratic linearization of three phase horizontal gravity separator // 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). – Thessaloniki, 2018. – P. 1006–1011.
10. Модульный принцип построения математических моделей аппаратов и технологических схем промышленной подготовки нефти / С.Ф. Ким, Н.В. Ушева, М.А. Самборская, О.Е. Мойзес, Е.А. Кузьменко // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2013. – № 10. – С. 41–44.
11. Modelling of dewatering and desalting processes for large-capacity oil treatment technology / S.F. Kim, N.V. Ushva, O.E. Moyzes, E.A. Kuzmenko, M.A. Samborskaya, E.A. Novoseltseva // Procedia Chemistry. – 2014. – V. 10. – P. 448–453.
12. Soo H., Radke C.J. A filtration model for the flow of dilute, stable emulsions in porous media // Chemical Engineering Science. – 1986. – V. 41. – P. 263–272.
13. Sayakhov F.L., Imashev N.Sh., Fatykhov M.A. Interaction of highly stable water-oil emulsion with radio frequency electromagnetic field // Heavy Crude and Tar Sands – Hydrocarbons for the 21st Century: 5th UNITAR International Conference on Heavy Crude and Tar Sands. – Caracas: Petroleos de Venezuela, S.A., 1991. – P. 507–513.

14. Жданов О.П., Шаталов В.И. Система измерения уровня и межфазных границ многокомпонентных продуктов УМФ300 в решении актуальных технологических задач подготовки нефти // Сфера нефтегаз. Приборостроение. – 2011. – № 1. – С. 34–40.
15. Wang R.J., Li X., Ling C.X. Pelee: a real-time object detection system on mobile devices // 32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018). – Montréal, Canada, 2018. – P. 1–10.
16. Mobile nets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications / A.G. Howard, M. Zhu, B. Chen, D. Kalenichenko, W. Wang., T. Weyand, M. Andreetto, H. Adam // arXiv:1704.04861v1 [cs.CV]. URL: <https://arxiv.org/abs/1704.04861> (дата обращения 18.01.2020).
17. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // 3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015. – San Diego, 2015. – P. 1–14.
18. Szegedy C. et al. Going deeper with convolutions // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2015. – Boston, MA, 2015. – P. 1–9.
19. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation // arXiv:1505.04597v1 [cs.CV] URL: <https://arxiv.org/pdf/1505.04597.pdf> (дата обращения 03.03.2020).
20. Shajkofci A., Liebling M. Spatially-variant CNN-based point spread function estimation for blind deconvolution and depth estimation in optical microscopy // IEEE Transactions on Image Processing. – 2020. – V. 29. – P. 5848–5861.
21. Low-precision CNN model quantization based on optimal scaling factor estimation / Y. Zhou, L. Chen, R. Xie, L. Song, W. Zhang // 2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). – Jeju, South Korea, 2019. – P. 1–5.
22. Федоров Ю.Н. Справочник инженера по АСУТП: проектирование и разработка. – М.: Инфра-Инженерия, 2008. – 928 с.

Поступила 04.09.2020 г.

Информация об авторах

Цавнин А.В., аспирант отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Филипас А.А., кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Беляев А.С., аспирант отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рожнев Н.В., студент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 004.932.2+ 665.6/7

ADAPTIVE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR MONITORING PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESS BEHAVIOR

Alexey V. Tsavnin¹,
avc14@tpu.ru

Alexander A. Filipas¹,
filipas@tpu.ru

Alexander S. Belyaev¹,
asb22@tpu.ru

Nikita V. Rozhnev¹,
rozhnevn@gmail.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need of profitability improving in oil and gas sector with automated control of petroleum-containing fluid separation, particularly, energy cost reduction without tank oil quality loss. The automated control can be built on the basis of mathematical models that can be obtained with natural experiment.

The main aim of the research is to develop adaptive automated information and measurement system for experimental petroleum-containing fluid separation dynamics estimation with different water-in-oil emulsion layer stability and interbed diffusion for data collection for mathematical model development.

Object: technological process of petroleum-containing fluid separation in the context of lab bench on the gravity type separation basis.

Methods: natural experiment, computer vision, convolutional neural networks, machine learning, digital image segmentation problem, volume ration calculation, transient processes, physics and chemistry experiment automation.

Results. The authors have developed an adaptive information and measurement system on computer vision and convolutional neural networks basis, which allows estimating petroleum-containing fluid separation dynamics with different water-in-oil emulsion layer stability and sharpness of layers borders. The basis of functioning of adaptive information measurement system is software, that allows performing experiment considering different qualitative and quantitative conditions. The paper considers the algorithm for discretization period with respect to reaction length. The system was tested on lab bench and layers volume ratio was calculated in real-time.

Key words:

Separator, petroleum-containing fluid, emulsion, computer vision, convolutional neural networks, adaptive measurement.

REFERENCES

1. Kravtsova A.V., Usheva N.V., Beshagina E.V. *Tekhnologicheskie osnovy i modelirovanie protsesov promyslovoy podgotovki nefi i gaza* [Technological basics and modeling of trade oil and gas processing]. Tomsk, TPU Publ. house, 2012. 128 p.
2. Arnold K.E., Stuart M.I. *Spravochnik po oborudovaniyu dlya kompleksnoy podgotovki nefi* [Equipment handbook for complex oil processing]. Moscow, Premium Engineering Publ., 2011. 776 p.
3. Schodro A.I. Avtomatizatsia tekhnologicheskogo protsessa separatsii neftesoderzhashchey zhidkosti [Petroleum-containing fluid separation process automation]. *Aktualnye problemy nauki i obrazovaniya v sovremennom mire. Trudy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Relevant problems of science and education in modern world: proc. of III International science and practice conference]. Sterlitamak, SF BashSU Publ., 2017. pp. 407–410.
4. *Avtonomny kompleks upravleniya trekhfaznym separatorom* [Autonomous complex of controlling three-phase separator]. Available at: <http://www.albatros.ru/catalog/products/mpc-oil-products/control-system-3-phase.php> (accessed 27 March 2020).
5. Verevkin A.P., Kiryushkin O.V., Urazmetov S.F. Upravlenie protsessom podgotovki nefi po agregativnoy ustoychivoy vodoneftyanoy emulsii [Control for oil processing with aggregative stable water-oil emulsion]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz v neftyanoi promyslennosti*, 2012, no. 4, pp. 33–35.
6. Gavrilov V.P. Kontseptsiya prodleniya «neftyanoy ery» Rossii [Prolongation of Russia's «petroleum era»]. *Geology of oil and gas*, 2005, no. 1, pp. 53–59.
7. Varanasi S.K., Tirumalaraju S.V., Jampana P. Comparative study of parsimonious NARX models for three phase separator. *2019 Fifth Indian Control Conference (ICC)*. New Delhi, 2019. pp. 430–435.
8. Sathasivam L., Elamvazuthi I., Khan M.K.A.A., Parasuraman S. Tuning a three-phase separator level controller via particle swarm optimization algorithm. *2018 International Conference on Recent Trends in Electrical, Control and Communication (RTECC)*. Malaysia, 2018. pp. 265–268.
9. Janakiraman S., Devanathan R. An analysis of quadratic linearization of three phase horizontal gravity separator. *5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. Thessaloniki, 2018. pp. 1006–1011.
10. Kim S.F., Usheva N.V., Samborskaya M.A., Moyzes O.E., Kuzmenko E.A. Modular principle of construction of mathematical models of apparatuses and flow charts of oil trade preparation. *Oil Processing and Petrochemistry*, 2013, vol. 10, pp. 41–44. In Rus.
11. Kim S.F., Usheva N.V., Moyzes O.E., Kuzmenko E.A., Samborskaya M.A., Novoseltseva E.A. Modelling of dewatering and desalting processes for large-capacity oil treatment technology. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 448–453.
12. Soo H., Radke C.J.A. Filtration model for the flow of dilute, stable emulsions in porous media. *Chemical Engineering Science*, 1986, vol. 41, pp. 263–272.
13. Sayakhov F.L., Imashev N.Sh., Fatykhov M.A. Interaction of highly stable water-oil emulsion with radio frequency electromagnetic field. *Heavy Crude and Tar Sands –Hydrocarbons For the 21-st Century. 5-th UNITAR International Conference on Heavy Crude and Tar Sands*. Caracas, Petroleos de Venezuela, S.A., 1991. pp. 507–513.
14. Zhdanov O.P., Shatalov V.I. Sistema izmereniya urovnya i mezhfaznykh granits mnogokomponentnykh produktov [Level and

- interphase borders measurement system UMF300 for multicomponent products]. *Sfera neftegaz. Priborostroenie*, 2011, no. 1, pp. 34–40.
15. Wang R.J., Li X., Ling C.X. Pelee: a real-time object detection system on mobile devices. *32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018)*. Montréal, Canada, 2018. pp. 1–10.
 16. Howard A.G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H. *MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications*. ArXiv:1704.04861v1 [cs.CV]. Available at: <https://arxiv.org/abs/1704.04861> (accessed 18 January 2020).
 17. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015*. San Diego, 2015. pp. 1–14.
 18. Szegedy C. Going deeper with convolutions. *Proc. of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2015*. Boston, MA, 2015. pp. 1–9.
 19. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. *U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation*. ArXiv:1505.04597v1 [cs.CV]. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1505.04597.pdf> (accessed 3 March 2020).
 20. Shajkofci A., Liebling M. Spatially-variant CNN-based point spread function estimation for blind deconvolution and depth estimation in optical microscopy. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, vol. 29, pp. 5848–5861.
 21. Zhou Y., Chen L., Xie R., Song L., Zhang W. Low-precision CNN Model Quantization based on Optimal Scaling Factor Estimation. *2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*. Jeju, South Korea, 2019. pp. 1–5.
 22. Fedorov Y.N. *Spravochnik inzhenera po ASU TP. Razrabotka i proektirovanie* [Control engineer handbook. Design and development]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2008. 928 p.

Received: 4 September 2020.

Information about the authors

Alexey V. Tsavnin, postgraduate student, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander A. Filipas, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander S. Belyaev, postgraduate student, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikita V. Rozhnev, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 631.46:57.045:911.9

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ В ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АБОРИГЕННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

Франк Юлия Александровна^{1,2,3},
yulia.a.frank@gmail.com

Никитчук Ксения Леонидовна¹,
k.nikitchuk@yandex.ru

Сапега Алексей Александрович^{1,4},
darwin.2014@mail.ru

Лукьянова Евгения Александровна³,
bio.darwin@mail.ru

Ивасенко Денис Александрович^{1,3},
ivasenko.da@mail.ru

Косов Антон Владимирович⁴,
darwin.2014@mail.ru

Герасимчук Анна Леонидовна¹,
gerasimchuk_ann@mail.ru

Евсеева Нина Степановна¹,
geography@ggf.tsu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский Государственный Университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

² АО «ТомскНИПИнефть»,
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

³ ООО «Дарвин»,
Россия, 634040, г. Томск, ул. Высоцкого, 28 стр. 3.

⁴ ООО «Дарвин-Сервис»,
Россия, 634012, ул. Карташова, 22.

Актуальность исследования. Наибольшая антропогенная нагрузка, связанная с эксплуатацией природных ресурсов в Томской области, приходится на нефтегазодобывающую промышленность. Геоэкологический анализ территории показал, что наиболее уязвимыми участками являются северные административные районы, при этом основной фактор нефтяного загрязнения почв – аварии на трубопроводах. Биоремедиация является низкозатратным и экологичным методом восстановления нарушенных территорий. Эффективный подход к биоремедиации нефтезагрязненных почв заключается в выделении аборигенных микроорганизмов-деструкторов углеводородов и создании биопрепаратов на их основе.

Цель: разработать промышленный консорциум на основе аборигенных углеводородоокисляющих бактерий из почв Севера Томской области и оценить его эффективность для биоремедиации нефтезагрязненных почв.

Объекты и методы. Культуры аборигенных углеводородоокисляющих микроорганизмов получены в селективных условиях из образца почвы Советского месторождения нефти Томской области, загрязненной сырой нефтью. Выделенные штаммы идентифицировали с использованием молекулярно-генетических методов на основе анализа последовательностей гена 16S рРНК. Изучение физиологических и биохимических свойств изолятов выполняли стандартными методами, морфологию клеток изучали микроскопически. Для оценки эффективности биопрепарата на основе выделенных штаммов проводили полевые испытания на нефтезагрязненных участках. Количественный химический анализ на суммарное содержание нефтепродуктов в почве выполняли флуориметрическим методом.

Результаты. В ходе исследования из нефтезагрязненных почв в Томской области выделены и охарактеризованы 3 новых штамма углеводородоокисляющих бактерий, принадлежащие к родам *Acinetobacter* и *Oleomonas*. Аборигенные микроорганизмы характеризуются сниженными оптимумами температуры и pH по сравнению с типовыми штаммами. На основе выделенных микроорганизмов разработан коммерческий биопрепарат «Абориген», предназначенный для биоремедиации нефтезагрязненных почв и wetlands. Экспериментальное восстановление нефтезагрязненных почв с помощью препарата аборигенных микроорганизмов-биодеструкторов позволило значительно сократить сроки по сравнению с самостоятельным восстановлением почвенного покрова в ходе естественных процессов. Полевые испытания показали высокую эффективность деструкции нефти под действием биопрепарата – в среднем по восьми опытным участкам суммарное содержание нефтепродуктов в почве было снижено в 12,4 раз за три месяца.

Ключевые слова:

Нефтяное загрязнение почв, биоремедиация, аборигенные микроорганизмы, микробные консорциумы, загрязнение окружающей среды, нефтегазодобывающая промышленность.

Введение

Томская область является одним из стратегически важных регионов мирового масштаба, влияющих на сохранение глобального гомеостаза планеты. Это обусловлено тем, что, во-первых, на данной территории расположена большая часть Васюганского болота, ценность которого заключается в понижении парни-

кового эффекта на всей Земле. Во-вторых, в недрах области сосредоточены богатейшие ресурсы железной руды, торфа, значительные запасы нефти и газа и других полезных ископаемых, важность которых возрастает в связи с истощением ресурсов в регионах РФ и мира. В «Стратегии социально-экономического развития Томской области до 2030 года» отмечается, что

богатые природные ресурсы являются конкурентным её преимуществом, а их рациональное и устойчивое использование – важным фактором экономического развития [1]. Как отмечает Н.И. Лаптев [2], недооценка природных ресурсов может привести к стратегическим и тактическим ошибкам в планировании развития при проведении региональной экологической политики и при принятии управленческих решений в условиях рыночной экономики, появлению негативных тенденций в развитии региона.

Воздействие нефтегазовых объектов на окружающую среду проявляется на всех стадиях освоения, начиная со строительства объектов и скважин и заканчивая переработкой углеводородного сырья. Число аварий на объектах нефтедобычи и транспортировки нефти ежегодно достигает порядка 25 тысяч инцидентов, в результате чего около 1,5 млн т нефти поступает в окружающую среду [3]. В настоящее время эксплуатация природных ресурсов Томской области осуществляется тремя отраслями: нефтегазодобывающей, лесозаготовительной и агропромышленной. Наибольшая антропогенная нагрузка в регионе приходится на нефтегазодобывающую промышленность. По состоянию на начало 2018 г. в области открыто 137 месторождений углеводородов, включая 106 нефтяных, 21 нефтегазоконденсатное, 10 газоконденсатных [4].

Геоэкологический анализ территории Томской области показал, что наиболее уязвимыми участками являются северные административные районы: Александровский, Каргасокский и Парабельский [5], что обусловлено интенсивным развитием нефтегазодобывающей промышленности на Севере области. Здесь же отмечается наибольшая концентрация загрязнения атмосферного воздуха – более 70 % от общего объема поступающих выбросов всей области. Одна из причин негативного воздействия на окружающую природную среду – аварийность на объектах нефтегазодобывающего комплекса, вызванная отказами трубопроводов на нефтепроводах, на водоводах. Порывы трубопроводов и последующие аварийные разливы нефти и нефтепродуктов наряду с обеспечением экологической безопасности ликвидированных и консервированных скважин относят к основным угрозам возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера в сфере недропользования [6]. Аварийные ситуации были отмечены на месторождениях Катыльгинское, Лугинецкое, Ломовое, Первомайское, Игольско-Таловое, Западно-Катыльгинское, Крапивинское, Малореченское, Оленье, Лонтын-Ях, Советское, Чкаловское. Общий показатель аварийных ситуаций за период с 2013 до 2017 гг. составляет порядка 1100 (преимущественно на месторождениях ОАО «Томскнефть» ВНК) [4, 7–9].

Современные методы для ликвидации нефтяного загрязнения ландшафтов включают химические, физико-химические, термические, электрические и электромагнитные, акустические и ультразвуковые, а также биологические методы [10]. Биоремедиация – подход, который использует метаболические возможности микроорганизмов для разложения или превращения органических загрязнителей в безвредные

продукты путем минерализации [11, 12]. Биоремедиация является эффективной, низкочастотной и не оказывает негативного воздействия на экосистемы [13]. Хотя эффективность биоремедиации может снижаться из-за специфических свойств загрязняющих веществ, физико-химических особенностей почвы и экологических факторов, этот процесс является одним из наиболее часто применяемых в практике очистки нефтезагрязненных ландшафтов. Одним из важных факторов, определяющих эффективность биоремедиации, является подбор активных штаммов микроорганизмов-деструкторов углеводородов нефти и разработка консорциумов на их основе. Известно, что в северных районах процессы биодеструкции углеводородов с участием аборигенной углеводородокисляющей микрофлоры замедлены, а универсальные биопрепараты для ремедиации почв при низких температурах недостаточно эффективны. Для сохранения природного потенциала севера, включая арктические и субарктические регионы, предложена разработка новых экологически безопасных способов борьбы с нефтяными загрязнениями, в основу которых может быть положено исследование аборигенной микрофлоры [14].

Объекты и методы

Для выделения чистых культур аборигенных углеводородокисляющих микроорганизмов с целью разработки биопрепарата использовали образец почвы, загрязненной сырой нефтью в концентрации 50...60 г/кг. Почву отбирали в 2014 г. на Советском месторождении нефти (Александровский р-н Томской обл.). Месторождение расположено на севере Томской области, на границе с ХМАО-Югрой.

Образец почвы отбирали в стерильную центрифужную пробирку объемом 50 мл с соблюдением асептических условий и хранили при 4 °С до начала лабораторных исследований. Первоначально была получена накопительная культура углеводородокисляющих микроорганизмов в селективных условиях. Использовали жидкую питательную среду (г/л: KH_2PO_4 – 1,5, K_2HPO_4 – 0,75, NH_4Cl – 1,0, NaCl – 2,5, $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,2, дрожжевой экстракт – 0,5) с сырой нефтью (1 %) в качестве основного источника углерода и электронов. Культивировали при 28 °С в условиях аэрации с использованием шейкера (160 об/мин). Выделение чистых культур проводили на агаризованной (15 г/л) среде того же состава методом изолирования отдельно лежащих колоний на чашках Петри.

Морфологию клеток микроорганизмов исследовали методом фазово-контрастной микроскопии с помощью микроскопа Биомед-6 с фазово-контрастным устройством при увеличении $\times 1000$, микрофотосъемку проводили с помощью светового микроскопа Axioskop 40 (CarlZeiss, Германия). Изучение физиологических и биохимических свойств изолятов выполняли стандартными методами [15].

Для идентификации каждого штамма проводили полимеразную цепную реакцию (ПЦР), амплифицируя фрагменты гена 16S рРНК, близкие к полным, с использованием домен-специфичных праймеров 27F и

1387R [16, 17]. Для этого из отдельных колоний выделяли суммарную ДНК. ПЦР проводили на амплификаторе Dyad DNA Engine «BioRad» (США), с использованием HotStart Taq-полимеразы производства «Сибэнзим» (Россия) и соответствующего буфера. Коммерческое секвенирование выполняли в ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» (г. Кольцово Новосибирской обл.) на секваторе AppliedBiosystems 3130xl («Hitachi») с использованием набора ABI prismBigDyeterminator V3.1 cycle. Для секвенирования использовали продукты амплификации длиной 1360 пар оснований. Нуклеотидные последовательности генов 16S рРНК анализировали с помощью программы BioEdit и инструмента BLAST [18] для поиска ближайших родственников в базе данных GenBankNCBI.

В ходе полевых испытаний в северных районах готовили рабочий раствор биопрепарата «Абориген» из расчёта 5 л на 2 м³ пресной воды, готовили количество рабочего раствора, достаточное для обработки участков. Для обеспечения микроорганизмов питательными веществами биопрепарат применяют совместно с растворёнными комплексными минеральными удобрениями (азофоска). Удобрения растворяются из расчёта 50 кг/м³ воды. Внесение биопрепарата осуществляют с помощью мотопомпы из разборного резервуара или с автоцистерны после проведения работ по фрезерованию. В зависимости от начального уровня загрязнения для достижения максимальной эффективности рекомендуется дробное внесение биопрепарата, с промежутком в 2–3 недели (табл. 1).

Таблица 1. Схемы внесения биопрепарата «Абориген» и минеральных удобрений

Table 1. Application of «Aborigen» biopreparation and mineral fertilizers

Уровень загрязнения, г/кг Contamination level, g/kg	Кратность внесения Number of applications	Норма внесения на 1 гектар Application norm for 1 hectare
<100	1–2	Биопрепарат: 10/10 л Biopreparation: 10/10 L
		Азофоска: 150/100 кг NPK mineral fertilizer 150/100 kg
100–250	2–3	Биопрепарат: 15/10 л Biopreparation: 15/10 L
		Азофоска: 200/100 кг NPK mineral fertilizer: 200/100 kg
>250	3	Биопрепарат: 15/10/5 л Biopreparation: 15/10/5 L
		Азофоска: 200/100/50кг NPK mineral fertilizer: 200/100/50 kg

Таблица 2. Таксономическое положение выделенных штаммов углеводородокисляющих бактерий

Table 2. Taxonomic position of the isolated hydrocarbon-degrading strains

Таксон/Штамм Taxon/Strain	E-1 (B-1316)	E-2 (B-1317)	E-3 (B-1318)
Домен/Domain	Bacteria	Bacteria	Bacteria
Тип/Phylum	Proteobacteria	Proteobacteria	Proteobacteria
Класс/Class	Gammaproteobacteria	Alphaproteobacteria	Gammaproteobacteria
Порядок/Order	Pseudomonadales	Rhodospirillales	Pseudomonadales
Семейство/Family	Moraxellaceae	Acetobacteraceae	Moraxellaceae
Род/Genus	<i>Acinetobacter</i>	<i>Olemonas</i>	<i>Acinetobacter</i>
Вид/Species	<i>Acinetobacter junii</i>	<i>Olemonas sp.</i>	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>

Количественный химический анализ на суммарное содержание нефтепродуктов в почве проводили флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости «Флюорат-02» в соответствии с методикой ПНД Ф 16.1:2.21-98.

Результаты и обсуждение

Из нефтезагрязненных почв Советского месторождения нефти на севере Томской области выделены три штамма углеводородокисляющих бактерий, обозначенные E-1, E-2 и E-3. С помощью молекулярно-биологических методов штаммы идентифицировали как принадлежащие к *Proteobacteria* (табл. 2). Сравнительный анализ нуклеотидных последовательностей гена 16S рРНК штаммов E-1 и E-2 выявил их принадлежность к роду *Acinetobacter*, наиболее близкородственными валидно описанными представителями являются типовые штаммы видов *A. junii* и *A. calcoaceticus*, соответственно. Род *Acinetobacter* объединяет широко распространенных обитателей почвы, водных экосистем, включая сточные воды, они также заселяют продукты питания, отдельные представители могут вызывать оппортунистические инфекции [19]. Например, *A. baumannii* в ряде случаев был причиной внутрибольничных инфекций [20]. В связи с наличием данных об условной патогенности представителей *Acinetobacter* для выделенных штаммов был проведен анализ в ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» для исключения патогенных свойств, который показал отрицательный результат. Установлено, что штаммы E-1 и E-3 относятся к негемолитическим, несакхаролитическим ацинетобактерам, как и другие представители видов *A. junii* и *A. calcoaceticus*.

Сравнительный анализ фенотипических признаков и нуклеотидных последовательностей продуктов ПЦР, соответствующих гену 16S рРНК штамма E-2, выявил 97 % гомологию с *Oleomonas sp.* SJ-1. Род *Oleomonas* был описан в 2002 г., типовой штамм выделен из загрязненных почв нефтяного месторождения в Японии [21]. В настоящее время род представлен единственным видом – *Oleomonas sagaranensis*. Выделенный нами штамм, возможно, относится к новому виду, т. к. степень гомологии последовательности гена 16S рРНК ниже порогового значения, принятого в настоящее время для разделения бактериальных видов в 98,5 % [22].

Штаммы E-1, E-2 и E-3 были депонированы в Коллекцию бактерий, бактериофагов и грибов ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» под номерами B-1316, B-1317 и B-1318, соответственно.

Штаммы Е-1 и Е-3 представлены граммотрицательными неподвижными клетками в виде толстых коротких палочек размерами $0,8...1,0 \times 0,9...2,0$ мкм, по форме приближающимися к коккам (рис. 1). Штамм Е-3 также представлен граммотрицательными неспорообразующими укороченными толстыми палочками, приближающимися к кокковой форме размерами $1,0...1,5 \times 1,0...2,5$ мкм (рис. 2). Расположены клетки одиночно, в парах или в коротких цепочках, неподвижны, капсулированы. Штамм Е-2 представлен граммотрицательными прямыми и слабоизогнутыми, подвижными палочками, расположенными по 1–2 и в коротких цепочках, размером $0,7 \times 2,0...3,5$ мкм (рис. 1).

Были проведены физиологические исследования выделенных штаммов, которые позволили выявить их отношение к кислороду, температурные предпочтения и оптимальные значения pH среды. Показано, что штамм Е-2 демонстрирует рост в аэробных условиях с оптимумом при pH $5,0...7,0$ и температуре $20...30$ °C (рис. 2). Штамм не растет при температуре

10 и 42 °C, слабый, следовый рост наблюдается при 37 °C. Штамм Е-1 является облигатным аэробом с оптимумом роста в диапазоне pH $5,0...7,0$ и температуре $20...30$ °C, хорошим ростом при pH $9,0$ и температуре $20...30$ °C (рис. 2). Ослабленный рост штамма выявлен при 37 °C, pH $9,0$. Штамм не растет при температуре 10 и 42 °C и при температуре 37 °C и pH $5,0$ и $7,0$. Штамм Е-3 также является облигатным аэробом с оптимумом роста в диапазоне pH $5,0...7,0$ при температуре $20...30$ °C (рис. 2). При 37 °C и pH $7,0$ и $9,0$ рост более слабый. Способен к активному росту при pH $9,0$. Штамм не растет при температуре 10 и 42 °C. Микроорганизмы рода *Acinetobacter* обычно характеризуются более высокой оптимальной температурой $30...32$ °C и оптимумом pH около $7,0$ [19]. Аборигенные штаммы *Acinetobacter*, выделенные в данной работе, как и штамм *Oleomonas* sp Е-2, имеют более низкий оптимум температуры и pH, что, наиболее вероятно, связано с региональными климатическими особенностями и особенностями северных почв.

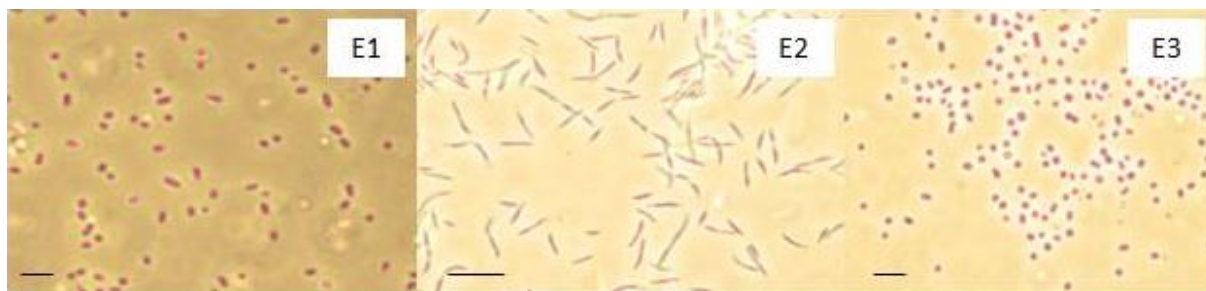


Рис. 1. Морфология клеток выделенных штаммов углеводородокисляющих бактерий, линейка 5 мкм

Fig. 1. Cell morphology of the isolated hydrocarbon-degrading strains, scale bar is 5 μ m

Выделенные штаммы активно росли на питательных средах, содержащих сырую нефть или дизельное топливо с высоким содержанием циклопарафинов в качестве единственного источника углерода и электронов, и были включены в состав коммерческого биопрепарата «Абориген» для биоремедиации нефтезагрязненных почв. Биопрепарат «Абориген» производится Группой компаний «Дарвин» (ООО «Дарвин-Сервис» и ООО «Дарвин», г. Томск) по ТУ 9291-001-28828893-2015. Представляет собой жидкий биопрепарат с плотностью микроорганизмов не менее $2,0 \times 10^8$ кл/мл (200 млн клеток в 1 мл). Рабочий раствор, применяемый для обработки почв и ветландов, содержит не менее $1,0 \times 10^6$ кл/мл. В ходе настоящего исследования были проведены полевые испытания биопрепарата, основанного на консорциуме аборигенных штаммов из загрязненных почв севера Томской области. Испытания проводили на загрязненных территориях в районах нефтегазодобычи, преимущественно в ХМАО-Югре, примыкающей к Томской области с севера, в летне-осенний период 2018 г. Территории отличаются суровыми погодноклиматическими условиями: резкоконтинентальный климат характеризуется суровой, многоснежной и продолжительной зимой, тёплым непродолжительным летом.

В ходе полевых испытаний на нефтезагрязненные участки вносили жидкий биопрепарат по схеме, указанной в табл. 1. Для обеспечения микроорганизмов доступными питательными веществами вместе с биопрепаратом вносили комплексное минеральное удобрение «Азофоска», NPK 16:16:16 (нормы внесения различаются в зависимости от исходного уровня загрязнения, табл. 1). Почву фрезеровали однократно для обеспечения аэрации и равномерного распределения микроорганизмов-деструкторов нефти. Мероприятия по технической рекультивации и фиторемедиации не проводили, чтобы оценить эффект биопрепарата углеводородокисляющих микроорганизмов. Отметим, что полный комплекс работ по рекультивации земель включает технический и биологический этапы. Технический этап рекультивации нарушенных земель является подготовительным для последующего биологического этапа и включает проведение планировочных работ, мероприятия по обеспечению стабильности грунтов, нанесение плодородного слоя почвы и потенциально плодородных пород при их наличии на рекультивируемые земли, при необходимости предусматривает коренную мелиорацию с учетом типов почв [23]. Биологический этап рекультивации нарушенных земель включает комплекс агротехнических, биологических и фитомелиоративных ме-

роприятий по восстановлению качественного состояния земель, направленных на создание условий для восстановления экологических функций почв, их биологической продуктивности и биоразнообразия [23].

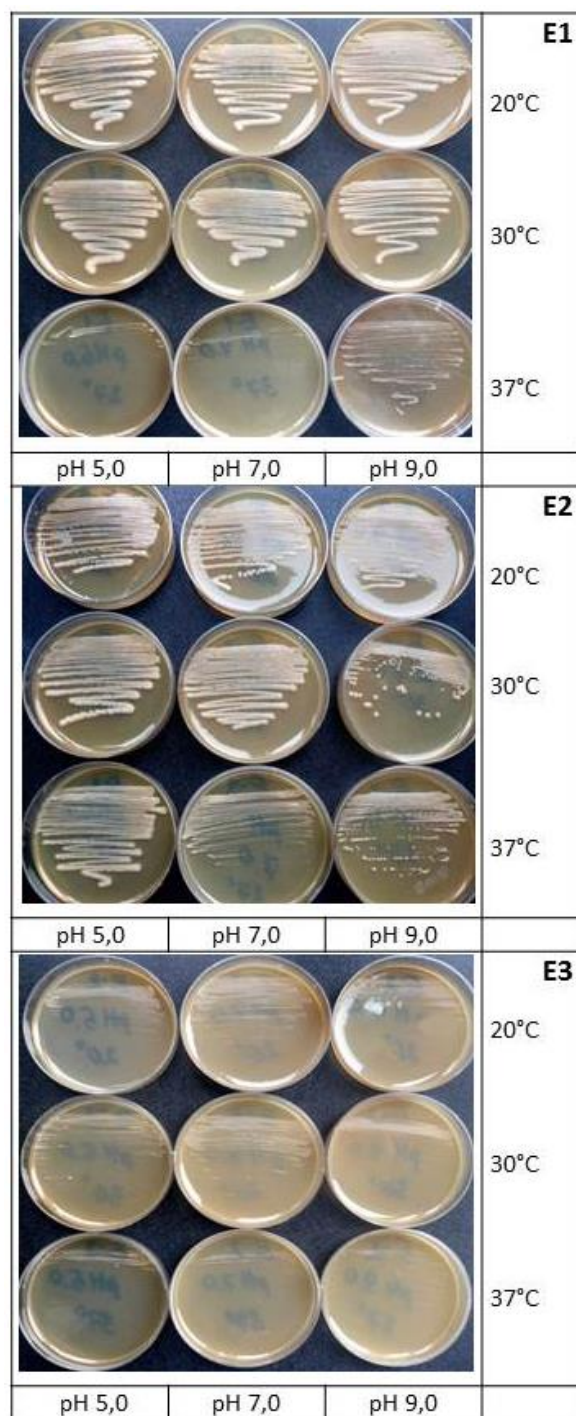


Рис. 2. Рост штаммов E1, E2 и E3 (сверху вниз) при различных температурах и pH среды

Fig. 2. Growth of the strains E1, E2 and E3 (top-down) at different temperatures and pH

Для оценки эффективности сравнивали данные количественного химического анализа на суммарное содержание нефтепродуктов, выполненного до начала

внесения биопрепарата и после завершения биологического этапа рекультивации. Сводные данные, полученные на разных участках рекультивации почв, представлены в табл. 3. Однократное применение биопрепарата с последующей экспозицией в течение трех месяцев позволило снизить концентрацию нефтепродуктов в почве в 3,0...57,8 раз, в среднем в 12,4 раз. Степень деградации компонентов сырой нефти в первую очередь зависит от исходной концентрации в почве. На участках 2–7 начальное содержание нефтепродуктов в почве было выше 60 г/кг, что сопоставимо с концентрациями нефтепродуктов в нефтешламах Вахского и Советского месторождений [24]. Тем не менее в этих сайтах концентрация нефтепродуктов в ходе полевого эксперимента была снижена минимум в 3,0 (участок 2), а максимум в 9,2 раза (участок 4).

На опытных участках, которые характеризовались обводненностью 25 % и более, а также в сайтах, где на протяжении 30 суток и более температура окружающей среды составляла выше 17 °С, концентрации нефтепродуктов в почве снизились наиболее заметно (участки №№ 1, 4, 8). Ранее установлено, что процесс разложения нефти под действием культивируемого консорциума из природного арктического бактериального комплекса запускается при 10 °С и выше, причем максимальная интенсивность биодеструкции наблюдается в первые 15 суток [14].

Таблица 3. Суммарное содержание нефтепродуктов (НП) в почве до внесения биопрепарата «Абориген» и по завершении биологического этапа рекультивации

Table 3. Total oil content in soil before the application of «Aborigen» preparation and after finishing the work

Опыт- ный участок Test site	Содержание НП до вне- сения препарата, мг/кг Oil content before the application of the preparation, mg/kg	Содержание НП по окончании работ, мг/кг Oil content after finishing the work, mg/kg
1	39527 ± 9882	4096 ± 1024
2	60155 ± 15039	>20 000
3	>100000	>20000
4	>100000	10813 ± 2703
5	>100000	>20000
6	84519 ± 21130	>20000
7	>100000	>20000
8	52136 ± 13034	901 ± 225

Визуально в процессе опытной биоремедиации загрязненных участков пятна нефти изменяли цвет от черного до светло-коричневого, а в местах наиболее активных микробиологических процессов наблюдался рыжеватый цвет грунта. Данные изменения характерны для активной деятельности углеводородокисляющих микроорганизмов, которые ускоряют процесс деструкции нефти. Вид одного из загрязненных участков, на котором проводили полевые испытания, до внесения биопрепарата и по завершении работ представлен на рис. 3.



Рис. 3. Опытный участок до внесения биопрепарата и после окончания работ

Fig. 3. Testing site before the application of the biopreparation and after finishing the work

Мы прогнозируем, что применение биоремедиации с использованием препарата, содержащего клетки аборигенных штаммов, в совокупности с технической рекультивацией и фитомелиорацией позволит добиться еще более заметного снижения суммарной концентрации нефтепродуктов в почвах.

Дополнительной мерой по оптимизации природопользования может стать проведение рейдовых осмотров при наделении полномочиями общественных инспекторов представителей коренных малочисленных народов (хантов, эвенков), исконно населяющих данные территории. Комплексные наблюдения и мониторинг состояния окружающей среды в установленные сроки (квартал, месяц, год и др.) позволит оценить степень ее изменений с учётом интеграции традиционных экологических знаний коренных малочисленных народов и научных знаний [25], что будет способствовать сохранению территорий Томской области в первозданном виде, а также национально-культурных традиций коренных малочисленных народов.

Заключение

Таким образом, из нефтезагрязненных почв Советского месторождения нефти в Томской области выделены и охарактеризованы новые штаммы углеводородокисляющих бактерий, принадлежащие к

родам *Acinetobacter* и *Oleomonas*. Аборигенные микроорганизмы характеризуются сниженными оптимумами температуры и pH по сравнению с типовыми штаммами. Выделенные микроорганизмы составили основу коммерческого биопрепарата «Абориген» для биоремедиации нефтезагрязненных почв и ветландов.

Восстановление нефтезагрязненных почв с помощью препарата аборигенных микроорганизмов-биодеструкторов позволило значительно сократить сроки по сравнению с самостоятельным восстановлением почвенного покрова в ходе естественных процессов. Полевые испытания показали высокую эффективность деструкции нефти под действием биопрепарата – в среднем по восьми опытным участкам суммарное содержание нефтепродуктов в почве было снижено в 12,4 раз за три месяца.

Эффективность использования метода на территориях, нарушенных объектами нефтегазовой отрасли, на наш взгляд, позволит стабилизировать геоэкологическую ситуацию на Севере Томской области.

Исследование частично выполнено по заданию Министерства науки и высшего образования (проект № 0721-2020-0019). Авторы благодарят Рыбкина Данилу Сергеевича за помощь в проведении полевых испытаний биопрепарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия социально-экономического развития Томской области до 2030 года. Постановление Законодательной Думы Томской области от 26.03.2015 N 2580. URL: <https://www.tomsk.gov.ru/ctategija-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-tomskoj-oblasti-do-2030-goda> (дата обращения 09.06.2020).
2. Лаптев Н.И. Риски и надежность индикаторов устойчивого развития. URL: <http://tele-conf.ru/problems-ekologii-i-zhiznedeyatelnosti-cheloveka/riski-i-nadezhnost-indikatorov-ustoychivogo-razvitiya.html> (дата обращения 09.06.2020).
3. Кошановская В.С. Разливы нефти в Российской Федерации: причины и пути решения проблемы // Экология: IX Международный форум. – М., 2018. – С. 13–18.
4. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2018 году» / гл. ред. Ю.В. Лунева. – Ижевск: Изд-во ООО «Принт», 2019. – 144 с.
5. Никитчук К.Л., Хазиахметова Ю.А. Оптимизация регионального природопользования с учетом этнокультурной специфики местности (на примере Томской области) // Проблемы региональной экологии. – 2019. – № 4. – С. 68–72.
6. Орлов В.П. Проблемы недропользования (2000–2006). – М.: Геоинформмарк, Геоинформ, 2007. – 464 с.
7. Никитчук К.Л., Чурилова Т.А. Аварийность на объектах нефтегазодобывающего комплекса и техногенные чрезвычайные ситуации // Госдоклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2014 году». – Томск: Дельтаплан, 2015. – С. 73–75.
8. Никитчук К.Л. Аварийность на объектах нефтегазодобывающего комплекса и техногенные чрезвычайные ситуации // Госдоклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2015 году». – Томск: Дельтаплан, 2016. – С. 74–75.
9. Никитчук К.Л. Аварийность на объектах нефтегазодобывающего комплекса и техногенные чрезвычайные ситуации // Госдоклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2016 году». – Ижевск: Изд-во ООО «Принт-2», 2017 – С. 81–82.

10. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: a review / I.C. Ossai, A. Ahmed, A. Hassan, F.S. Hamid // *Environmental Technology & Innovation*. – 2020. – V. 17. – 100526. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100526.
11. Bioremediation of petroleum oil contaminated soil and water / P.K. Jain, V.K. Gupta, R.K. Gaur, M. Lowry, D.P. Jaroli, U.K. Chauhan // *Research Journal of Environmental Toxicology*. – 2011. – V. 5. – P. 1–26.
12. Clean-up of crude oil-contaminated soils: bioremediation option / E. Okoh, Z.R. Yelebe, B. Oruabena, E.S. Nelson, O.P. Indiamawei // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2020. – V. 17. – P. 1185–1198.
13. Yuniati M.D. Bioremediation of petroleum-contaminated soil: a review // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – V. 118. – 012063. DOI: 10.1088/1755-1315/118/1/012063.
14. Наливайко Н.Г., Иванова И.С. Роль природного арктического бактериального комплекса в процессах биодеструкции нефти // Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития: Международная научная конференция. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 170–171.
15. Bergey's manual of systematic bacteriology. V. 2: The Proteobacteria / Ed. By G. Garrity – US: Springer, 2005. – 2816 p.
16. DeLong E.F. Archaea in coastal marine environments // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. – 1992. – V. 89. – P. 5685–5689.
17. Design and evaluation of useful bacterium-specific PCR primers that amplify genes coding for bacterial 16S rRNA / J.R. Marchesi, T. Sato, A.J. Weightman, T.A. Martin, J.C. Fry, S.J. Hiom, W.G. Wade // *Applied and Environmental Microbiology*. – 1998. – V. 64. – P. 795–799.
18. Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs / S. F. Altschul, T. L. Madden, A.A. Schäffer, J. Zhang, Z. Zhang, W. Miller, D.J. Lipman // *Nucleic Acids Research*. – 1997. – V. 25. – P. 389–402.
19. Towner K. The Genus *Acinetobacter* // *The Prokaryotes*. V. 6: Proteobacteria: Gamma Subclass. – Singapore: Springer Science+Business Media, 2006. – P. 746–758.
20. Moubareck C.A., Halat D.H. Insights into *Acinetobacter baumannii*: a review of microbiological, virulence, and resistance traits in a threatening nosocomial pathogen // *Antibiotics*. – 2020. – V. 9. – 119. DOI: 10.3390/antibiotics9030119.
21. *Oleomonas sagaranensis* gen. nov., sp. nov., represents a novel genus in the α -Proteobacteria / T. Kanamori, N. Rashid, M. Morikawa, H. Atomi, T. Imanaka // *FEMS Microbiology Letters*. – 2002. – V. 217. – P. 255–261.
22. Proposed minimal standards for the use of genome data for the taxonomy of prokaryotes / J. Chun, A. Oren, A. Ventosa, H. Christensen, D.R. Arahal, M.S. da Costa, A.P. Rooney, H. Yi, X.-W. Xu, S. de Meyer, M.E. Trujillo // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. – 2018. – V. 68. – P. 461–466.
23. ГОСТ Р 57446-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекultивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. – М.: Стандартинформ, 2017. – 28 с.
24. Алтунина Л.К. и др. Каталитические, сорбционные, микробиологические и интегрированные методы для защиты и ремедиации окружающей среды / под ред. О.П. Таран, В.Н. Пармона. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. – 298 с.
25. Никитчук К.Л. Перспективы внедрения традиционных экологических знаний коренных малочисленных народов в практику охраны окружающей среды и рационального природопользования // *Общество. Среда. Развитие*. – 2016. – № 1 (38). – С. 87–91.

Поступила 01.06.2020 г.

Информация об авторах

Франк Ю.А., кандидат биологических наук, доцент, заведующая лабораторией промышленной микробиологии Биологического института Национального исследовательского Томского Государственного Университета; ведущий инженер отдела комплексных экологических проектов АО «ТомскНИПИнефть»; заместитель директора по научной работе ООО «Дарвин».

Никитчук К.Л., старший преподаватель кафедры экологии, природопользования и экологической инженерии Биологического института Национального исследовательского Томского Государственного Университета.

Сапегина А.А., магистрант Биологического института Национального исследовательского Томского Государственного Университета; технолог ООО «Дарвин-Сервис».

Лукьянова Е.А., кандидат биологических наук, заместитель директора по качеству ООО «Дарвин».

Ивасенко Д.А., старший преподаватель кафедры физиологии растений и биотехнологии Биологического института Национального исследовательского Томского Государственного Университета; директор ООО «Дарвин».

Косов А.В., директор ООО «Дарвин-Сервис».

Герасимчук А.Л., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории биологии и почвоведения Биологического института Национального исследовательского Томского Государственного Университета.

Евсеева Н.С., доктор географических наук, заведующая кафедрой географии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского Государственного Университета.

UDC 631.46:57.045:911.9

IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF OIL-CONTAMINATED SOILS REMEDIATION IN THE NATURAL CONDITIONS OF THE NORTH TOMSK REGION AND THE NEARBY REGIONS BY INDIGENOUS MICROORGANISMS APPLICATION

Yulia A. Frank^{1,2,3},
yulia.a.frank@gmail.com

Ksenia L. Nikitchuk¹,
k.nikitchuk@yandex.ru

Alexey A. Sapega^{1,4},
darwin.2014@mail.ru

Evgenia A. Lukyanova³,
bio.darwin@mail.ru

Denis A. Ivasenko^{1,3},
ivasenko.da@mail.ru

Anton V. Kosov⁴,
darwin.2014@mail.ru

Anna L. Gerasimchuk¹,
gerasimchuk_ann@mail.ru

Nina S. Evseeva¹,
geography@ggf.tsu.ru

¹ National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² «TomskNIPIneft» JSC,
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia.

³ «Darwin» LLC,
28/3, Vysotsky street, Tomsk, 634040, Russia.

⁴ «Darwin-Service» LLC,
22, Kartashov street, Tomsk, 634012, Russia.

The relevance of the study. The largest anthropogenic pressure associated with the exploitation of natural resources in the Tomsk region falls on the oil and gas industry. Geoecological analysis of the territory showed that the northern administrative regions are the most vulnerable areas, while the main factor in oil pollution of the soil is pipeline accidents. Bioremediation is a low-cost and environmentally friendly method of restoring contaminated areas. An effective approach to the bioremediation of oil-contaminated soils is isolation indigenous hydrocarbon-degrading microorganisms and creation biological products based on the strains.

The main aim of the study is developing an industrial consortium based on indigenous hydrocarbon-oxidizing bacteria from soils of the North Tomsk Region and evaluating its effectiveness for bioremediation of oil-contaminated soils.

Objects and methods. Cultures of indigenous hydrocarbon-oxidizing microorganisms were obtained under selective conditions from the crude oil contaminated soil sample, Soviet oil field, Tomsk Region. Isolated strains were identified using molecular genetic methods based on the analysis of 16S rRNA gene sequences. The physiological and biochemical properties of the isolates were studied by standard methods, and the morphology of the cells was studied microscopically. To assess the effectiveness of a biological product based on the selected strain, field tests were carried out in oil-contaminated areas. Quantitative chemical analysis for the total content of petroleum products in the soil was performed by fluorimetric method.

Results. During the study, three novel strains of hydrocarbon-oxidizing bacteria belonging to the genera *Acinetobacter* and *Oleomonas* were isolated from oil-contaminated soils in the Tomsk Region and characterized. Indigenous microorganisms are characterized by reduced optimums of temperature and pH in comparison with type strains. Based on the identified microorganisms, a commercial biological product «Aborigen» was developed for bioremediation of oil-contaminated soils and wetlands. The experimental restoration of oil-contaminated soils with the help of a preparation of indigenous microorganisms-destructors has significantly reduced the time compared to self-restoration of soil cover during natural processes. Field tests showed high efficiency of oil destruction under the influence of a biological product – on average, in eight experimental sites, the total content of oil products in the soil was reduced 12,4 times in three months.

Key words:

Crude oil contamination of soil, bioremediation, indigenous microorganisms, microbial consortia, environmental pollution, oil and gas industry.

The research was partially carried out by the task of the Ministry of Science and Higher Education (project no. 0721-2020-0019). The authors express thanks to Danil S. Rybkin for assistance in biopreparation field study.

REFERENCES

1. *Strategiya sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Tomskoy oblasti do 2030 goda. Postanovlenie Zakonodatelnoy Dumy Tomskoy oblasti ot 26.03.2015 N 2580* [Strategy for the socio-economic development of the Tomsk region until 2030. Decree of the Legislative Duma of the Tomsk Region dated 26.03.2015 N 2580]. Available at: <https://www.tomsk.gov.ru/ctrategiya-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-tomskoj-oblasti-do-2030-goda> (accessed 09 June 2020).
2. Laptev N.I. *Riski i nadezhnost indikatorov ustoychivogo razvitiya* [Risks and reliability of indicators of sustainable development]. Available at: <http://tele-conf.ru/problemyi-ekologii-i-zhiznedeyatelnosti-cheloveka/riski-i-nadezhnost-indikatorov-ustoychivogo-razvitiya.html> (accessed 09 June 2020).
3. Koshanovskaya V.S. Razlivy nefi v Rossiyskoy Federatsii: prichiny i puti resheniya problem [Oil spills in the Russian Federation: causes and solutions]. IX Mezhdunarodny forum. *Ekologiya* [IX International Forum. Ecology]. Moscow, 2018. pp. 13–18.
4. *Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Tomskoy oblasti v 2018 godu»* [State Report «On the State and Protection of the Environment in Tomsk Region in 2018»]. Ed. by Yu.V. Luneva. Izhevsk, Print LLC, 2019. 144 p.
5. Nikitchuk K.L., Khaziakhmetova Yu.A. Optimization of regional nature management due to ethnocultural specificity of the area: a case study of the Tomsk region). *Regional Environmental Issues*, 2019, vol. 4, pp. 68–72.
6. Orlov V.P. *Problemy nedropolzovaniya* [Issues of subsoil use (2000–2006)]. Moscow, Geoinformmark, Geoinform Publ., 2007. 464 p.
7. Nikitchuk K.L., Churilova T.A. Avaryynost na obektakh neftegazodobyvayushchego kompleksa i tehnnogennye chrezvychaynye situatsii [Accidents at the facilities of the oil and gas production complex and man-made emergencies]. *Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Tomskoy oblasti v 2014 godu»* [State Report «On the State and Protection of the Environment in Tomsk Region in 2014»]. Tomsk, Deltaplan Publ., 2015. pp. 73–75.
8. Nikitchuk K.L. Avaryynost na obektakh neftegazodobyvayushchego kompleksa i tehnnogennye chrezvychaynye situatsii [Accidents at the facilities of the oil and gas production complex and man-made emergencies]. *Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Tomskoy oblasti v 2015 godu»* [State Report «On the State and Protection of the Environment in Tomsk Region in 2015»]. Tomsk, Deltaplan Publ., 2016. pp. 74–75.
9. Nikitchuk K.L. Avaryynost na obektakh neftegazodobyvayushchego kompleksa i tehnnogennye chrezvychaynye situatsii [Accidents at the facilities of the oil and gas production complex and man-made emergencies]. *Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Tomskoy oblasti v 2016 godu»* [State Report «On the State and Protection of the Environment in Tomsk Region in 2016»]. Izhevsk, Print LLC, 2017. pp. 81–82.
10. Ossai I.C., Ahmed A., Hassan A., Hamid F.S. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: a review. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, vol. 17, 100526. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100526.
11. Jain P.K., Gupta V.K., Gaur R.K., Lowry M., Jaroli D.P., Chauhan U.K. Bioremediation of petroleum oil contaminated soil and water. *Research Journal of Environmental Toxicology*, 2011, vol. 5, pp. 1–26.
12. Okoh E., Yelebe Z.R., Oruabena B., Nelson E.S., Indiamao-wei O.P. Clean-up of crude oil-contaminated soils: bioremediation option. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2020, vol. 17, pp. 1185–1198.
13. Yuniati M.D. Bioremediation of petroleum-contaminated soil: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 118, 012063. DOI: 10.1088/1755-1315/118/1/012063.
14. Nalivaiko N.G., Ivanova I.S. *Rol prirodnogo arkticheskogo kompleksa v protsessakh biodestruktsii nefi* [The role of the natural Arctic bacterial complex in oil biodegradation processes]. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsia. Energo-resursoeffektivnost v interesakh ustoychivogo razvitiya* [International Scientific Conference. Energy and Resource Efficiency for Sustainable Development]. Tomsk, TPU Publ., 2018. pp. 170–171.
15. *Bergey's manual of systematic bacteriology. Vol. 2: The Proteobacteria*. Ed. by G. Garrity. US, Springer, 2005. 2816 p.
16. DeLong E.F. Archaea in coastal marine environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 1992, vol. 89, pp. 5685–5689.
17. Marchesi J.R., Sato T., Weightman A.J., Martin T.A., Fry J.C., Hiom S.J., Wade W.G. Design and evaluation of useful bacterium-specific PCR primers that amplify genes coding for bacterial 16S rRNA. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, vol. 64, pp. 795–799.
18. Altschul S.F., Madden T.L., Schäffer A.A., Zhang J., Zhang Z., Miller W., Lipman D.J. Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs. *Nucleic Acids Research*, 1997, vol. 25, pp. 389–402.
19. Towner K. The Genus *Acinetobacter*. *The Prokaryotes. Vol. 6: Proteobacteria: Gamma Subclass*. Ed. by M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K.-H. Schleifer, E. Stackebrandt Singapore, Springer Science+Business Media, 2006. pp. 746–758.
20. Moubareck C.A., Halat D.H. Insights into *Acinetobacterbaumannii*: a review of microbiological, virulence, and resistance traits in a threatening nosocomial pathogen. *Antibiotics*, 2020, vol. 9, 119. DOI: 10.3390/antibiotics9030119.
21. Kanamori T., Rashid N., Morikawa M., Atomi H., Imanaka T. *Oleomonassagaranensis* gen. nov., sp. nov., represents a novel genus in the α -Proteobacteria. *FEMS Microbiology Letters*, 2002, vol. 217, pp. 255–261.
22. Chun J., Oren A., Ventosa A., Christensen H., Arahal D. R., da Costa M.S., Rooney A.P., Yi H., Xu X.-W., De Meyer S., Trujillo M.E. Proposed minimal standards for the use of genome data for the taxonomy of prokaryotes. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2018, vol. 68, pp. 461–466.
23. *GOST R 57446-2017. Nailuchshie dostupnye tekhnologii. Rekultivatsiya narushennykh zemel i zemelnykh uchastkov. Vosstanovlenie biologicheskogo raznoobraziya* [State Standard R 57446-2017. Best available techniques. Disturbed lands reclamation. Restoration of biological diversity]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 28 p.
24. Altunina L.K. *Kataliticheskie, sorbtionnyye, mikrobiologicheskie i integrirovannyye metody dlya zashity i remediatsii okruzhayushchey sredy* [Catalytic, sorption, microbiological and integrated methods for environmental protection and remediation]. Ed. by O.P. Taran, V.N. Parmon. Novosibirsk, SO PAN Publ., 2013. 298 p.
25. Nikitchuk K.L. *Perspektivy vnedreniya traditsionnykh ekologicheskikh znaniy korennykh malochislennykh narodov v praktiku okhrany okruzhayushchey sredy i ratsionalnogo prirodnopolzovaniya* [Prospects for the integration of traditional environmental knowledge of small indigenous peoples into environmental protection and management]. *Terra Humana*, 2016, vol. 1 (38), pp. 87–91.

Received: 1 June 2020.

Information about the authors

Yulia A. Frank, Cand. Sc., head of laboratory, National Research Tomsk State University; lead engineer, «TomskNIPIneft» JSC; scientific vice-director «Darwin» LLC.

Ksenia L. Nikitchuk, senior lecturer, National Research Tomsk State University.

Alexey A. Sapega, master student, National Research Tomsk State University; technologist, «Darwin-Service» LLC.

Evgenia A. Lukyanova, Cand. Sc., deputy director for quality, «Darwin» LLC.

Denis A. Ivasenko, senior lecturer, National Research Tomsk State University; director, «Darwin» LLC.

Anton V. Kosov, director, «Darwin-Service» LLC.

Anna L. Gerasimchuk, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk State University.

Nina S. Evseeva, Dr. Sc., head of department, National Research Tomsk State University.

УДК 537.876.23; 550.837.62

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОВАТОСТИ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ОБЛИЦОВОЧНОГО КАМНЯ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Данильев Сергей Михайлович¹,
Danilev_SM@pers.spmi.ru, daniliev@mail.ru

Данильева Наталья Андреевна¹,
Danileva_NA@pers.spmi.ru

Исакова Екатерина Павловна¹,
isakowa.ek@yandex.ru

Ашкар Георгий Хабибович²,
georgiyashkar@gmail.com

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

² Учебный центр Heriot-Watt программы Reservoir Evaluation and Management,
Россия, 634034, г. Томск, ул. Усова, 4а.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью преждевременного определения не только поверхностного распределения трещин, но и степени внутреннего растрескивания горной породы при оценке трещиноватости основной породы применительно к месторождениям облицовочного камня. В современной практике при разработке месторождений облицовочного камня в большинстве случаев исследования трещиноватости ограничиваются лишь визуальным картированием, что не дает возможности получить представление о внутреннем пространственном распределении трещин, которые, в свою очередь, будут определять направление разрушения породы при отработке массива скальных пород. От правильного и рационального решения этой задачи зависит дальнейшая разработка месторождений облицовочного или строительного камня. Решение задачи локализации пространственного распределения трещин может базироваться на привлечении современных технологий, прочно внедрившихся в практику инженерной геофизики и позволяющих без деформирования и вмешательства в поверхность проводить исследования пространственной ориентировки трещин в массиве породы. Аналитические исследования и экспериментальные наблюдения в естественных условиях обеспечивают возможность предварительно дифференцировать исследуемую территорию по степени трещиноватости массива горной породы, а также произвести качественную оценку блочного сырья.

Цель: выбор оптимального комплекса геофизических методов, обеспечивающих изучение распространения и локализации трещиноватости в массиве горных пород.

Методы: георадиолокационные исследования с применением прибора ОКО-2 с антеннами 150 и 1200 МГц.

Результаты. На основе проведенного изыскания предложено использование двух типов антенн с целью проникновения на различные глубины. Получена общая характеристика месторождения блочного камня, произведено выделение исследуемой площади по степени трещиноватости. Представленные методы отображают эффективность исследования трещиноватости на месторождении облицовочного камня методом георадиолокации.

Ключевые слова:

Гранитный массив, трещиноватость, георадиолокационные исследования скальных пород, георадар, трещиноватость облицовочного камня.

Введение

При оценке трещиноватости основной породы крайне важно преждевременно определить не только поверхностное распределение трещин, но и степень внутреннего растрескивания горной породы. В связи с этим изучение трещиноватости на месторождениях облицовочного камня является одной из основных, тяжелых и требующих детальных исследований задач [1–3].

От правильного и целесообразного решения этой задачи зависит последующая разработка месторождений облицовочного или строительного камня. В имеющихся условиях проводится вспомогательные геофизические исследования зон трещиноватости горного массива при поиске и разведке месторождений облицовочного камня [4]. Геофизические методы могут быть успешно применены в качестве одного из

способов улучшения эффективности геологоразведочных исследований на месторождениях данного типа [5, 6]. Причина кроется в том, что тектонические нарушения горного массива имеют высококонтрастное отображения в геофизических полях [7, 8].

В частности, имеется опыт электрофотографических и георадиолокационных работ на месторождениях облицовочного камня, являющихся эффективными методами при изучении рассматриваемой проблемы [9, 10 и др.].

Оба метода успешно проявили себя при исследовании верхней части геологической среды, обладают надлежащей точностью при обнаружении маломощных неоднородностей, способны разрешить обширный диапазон задач, характерными особенностями данных методов являются высокая продуктивность и сравнительно низкая стоимость [10, 11 и др.].

Исследование гранитных массивов

Наиболее значимой структурной чертой массива скальных горных пород является присутствие большого числа поверхностей ослаблений или различных неоднородностей от контактов между единичными минеральными зёрнами, микро- и макротрещиноватости до региональных и планетарных разрывных

структур – разломов. Мера распределения неоднородностей разнообразна, тем не менее применительно к скальным массивам весьма характерна высокая ориентированность в пространстве. По М.В. Рацу имеется классификация основных типов неоднородностей (таблица) [12, 13 и др.].

Таблица. Классификация основных типов неоднородностей

Table. Classification of common heterogeneities types

Структура/Structure	Порядок структуры Structure order	Мощность, м Thickness, m
Региональные неоднородности земной коры Regional inhomogeneities of the Earth's Crust	0	Свыше 10 км Over 10 km
Глубинные, сейсмогенные нарушения, разломы Deep, seismogenic disturbances, faults	I	Десятки и сотни метров Tens and hundreds of meters
Неоднородности в пределах одной пачки, слоя пород, естественная трещиноватость Inhomogeneities within a single member, rock layer, natural fracture	II	Единицы и первые десятки метров Units and first tens of meters
Микротрещиноватость, контакты между отдельными образованиями, зёрнами кристаллами Microcracking, contacts between separate formations, grains, crystals	III	Единицы до десятков сантиметров Units up to tens of centimeters
Нарушения межкристаллических областей Intercrystalline disturbances	IV	Доли миллиметра до нескольких сантиметров Fractions of a millimeter to a few centimeters
	V	До долей миллиметров To fractions of millimeters

Применительно к месторождениям блочного камня действенным типом структурных неоднородностей можно назвать неоднородности III порядка.

Все геофизические методы базируются на корреляции параметров состояния и свойств массива горных пород с параметрами разного рода физических полей [14, 15]. Однако геофизические методы госконтроля неявны или условны, так как при интерпретации необходимо брать в расчет массивный набор действующих факторов, для дифференцирования которых применяются методы относительно контроля во времени или относительно эталонного участка массива [16–19].

По производительности и информативности оценки неоднородности массива пород из геофизических методов выделяются георадиолокационный метод с частотным диапазоном до 1200 Гц.

Трещины III порядка относительно степени раскрытия и «компонента наполнения» могут быть «открытыми», т. е. сплошными для упругой волны определенной частоты, или «закрытыми» [20, 21]. Открытые трещины искажают геометрию проходящих лучей, закрытые трещины привносят свои поправки лишь в снижение интегральных упругих модулей и действительных скоростей упругих волн. Если в трещинах наблюдается отсутствие свободной воды, то такая обусловленность дает возможность с некоторой долей достоверности дать оценку трещиноватости III порядка по скоростям продольных волн [22].

В качестве иллюстрации возможностей ранжирования массива пород по трещиноватости и соответственно выходу кондиционных блоков приведена технология георадиолокационного исследования на Юго-Востоке Республики Карелия. Участок недр примыкает с востока к разведанной части месторождения гранитов.

Измерения проводились по пяти профилям с дневной поверхности в режиме непрерывной записи георадара. Мощность пород исследуемой толщи составляет 22–30 м. Длина измеряемого профиля по поверхности составила 50 м. Расстояние между профилями составляло 10 м.

Георадарное зондирование выполнено на участках с целью прослеживания субгоризонтальной трещиноватости, т. к. в процессе отработки месторождения зафиксированы субгоризонтальные зоны трещиноватости.

Георадарные исследования проводились с помощью георадара «ОКО-2» с антеннами 150 и 1200 МГц. Частота полезного сигнала составила 100–250 МГц. Для получения приемлемого полезного сигнала применялось накопление до 20 раз.

Два типа антенн использовались с целью проникновения на несколько десятков

метров для обнаружения субгоризонтальных трещин, георадар с меньшей частотой – для оконтуривания зоны четвертичных отложений.

Обработка георадиолокационных данных выполнена с помощью специализированной программы «Prism 2.5». Георадиолокационная обработка состояла из двух этапов: решение прямой и обратной задач. Решение обратной задачи проводилось методом фильтрации и преобразованием Гильберта.

Опытное георадарное зондирование проведено на частично вскрытой части месторождения (рис. 1). Из-за неравномерной мощности четвертичных отложений (0,3–3 м) и приповерхностных неоднородности коренных пород (трещиноватости, наличие ксенолитов основных пород) предельная глубина зондирования составила около 30 м. По документации в процессе отработки месторождения зафиксированы субгоризонтальные зоны трещиноватости на 12–13 м,

развитые в массиве гранитоидов. На разрезе наблюдается корреляция с результатами отбора керна в скважине. Наиболее «чистые» участки радарограммы отвечают монолитам.

С использованием программного обеспечения пакета Voxler удалось отобразить наличие трещиноватости горного массива на установленных глубинах, а также визуализировать полученные данные. Благодаря

построению объемной модели можно проследить распространение трещины по участку.

Рис. 2 показывает распространение трещины по изучаемому участку. Отмечается ярко выраженная трещиноватость, соответствующая глубинам 12–13 м. Следовательно, данный интервал глубин представляет повышенную заинтересованность для изучения месторождения облицовочного камня.

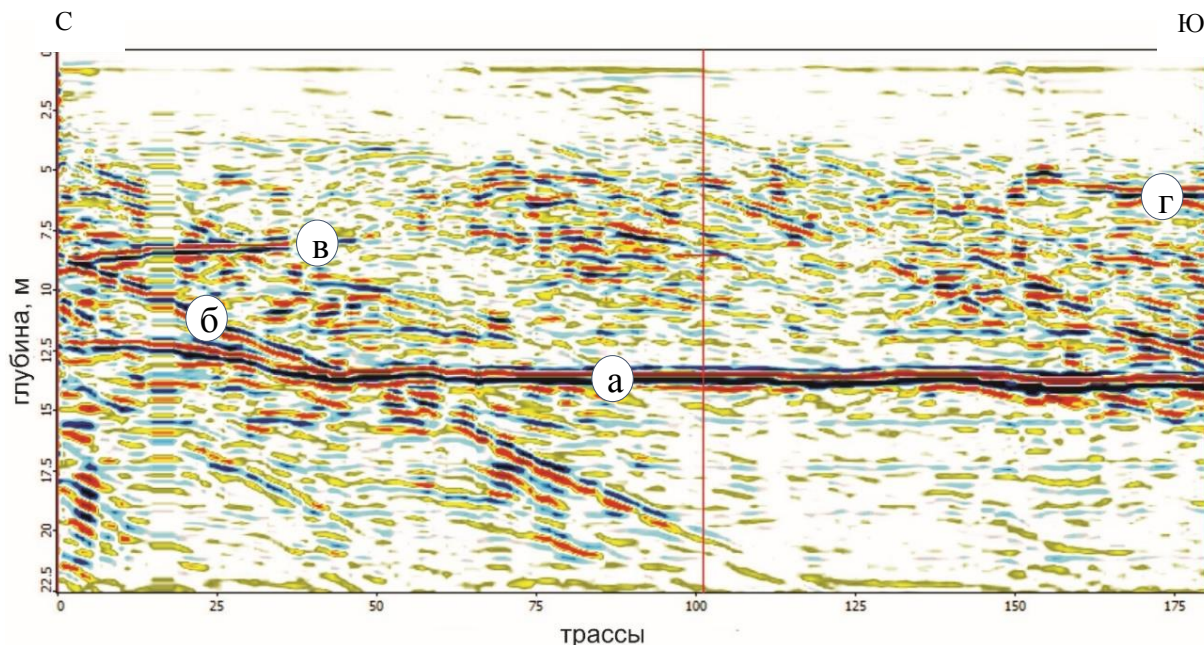


Рис. 1. Георадиолокационный разрез исследуемого массива пород

Fig. 1. Georadiolocational cross section of studied rock mass

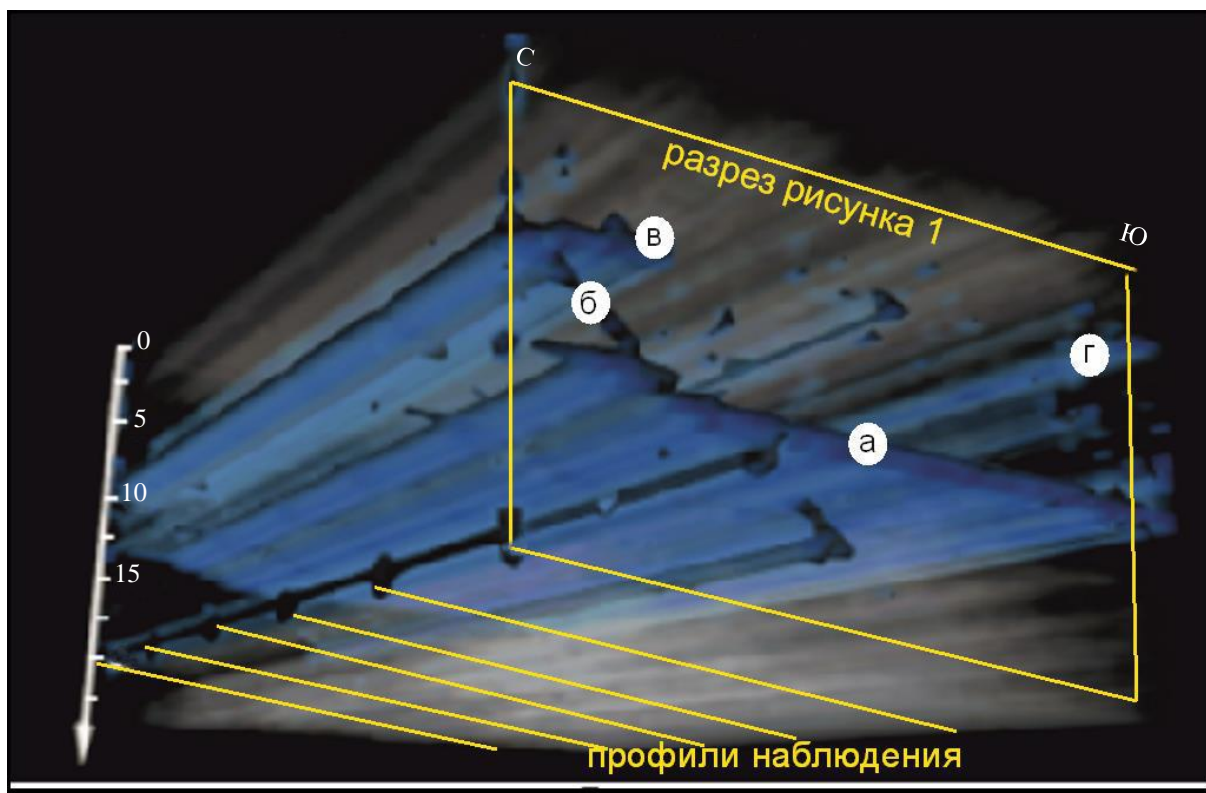


Рис. 2. Объемная модель трещиноватости

Fig. 2. 3-D model of cracking

Закключение

На основе исследования свойств трещиноватости горного массива и практических наблюдений в естественных условиях можно отметить, что георадарная съемка является одной из перспективных методик при поиске и разведки месторождений блочного камня. Несмотря на то, что эффективная глубина исследований составила около 25 м, данные бурения и георадарограммы полностью коррелируют друг друга. На полученных данных тенденция волнового поля резко отличается, при этом наблюдается явное прослеживание субгоризонтальных нарушений. На основе проведенных исследований можно судить о необходимости методически доказанного применения георадара для исследования трещиноватости, а также более детального исследования данной проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данильев С.М., Данильева Н.А. Перспективы электроразведочных исследований дамба гипсонакопителей в рамках геотехнического мониторинга // Инженерная и рудная геофизика 2019: 15-я юбилейная научно-практическая конференция и выставка. Тезисы доклада. – Геленджик, 2019. – С. 278–284.
2. Данильев С.М., Данильева Н.А. Особенности электромагнитного поля георадарограмм при исследовании скрытых полостей в инженерно-технических объектах // Инженерная и рудная геофизика 2018: 14-я научно-практическая конференция и выставка. – Алматы, Казахстан, 2018. – С. 256–260.
3. Комплексирование методов тепловизионного и георадиолокационного сканирования для выявления полостей под железобетонными плитами крепления грунтовых откосов гидротехнических сооружений / С.М. Данильев, В.В. Глазунов, Н.Н. Ефимова, В.С. Недялков, В.Г. Штенгель // Инженерная и рудная геофизика 2018: 14-я научно-практическая конференция и выставка. – Алматы, Казахстан, 2018. – С. 318–324.
4. Данильев С.М., Данильева Н.А. Частотные составляющие динамических атрибутов волнового электромагнитного поля георадарограмм // International Journal of Engineering & Technology (2.13). – 2018. – № 7. – С. 127–132.
5. Жиров Д.В., Мелихова С.Г., Рыбин В.В. Особенности инженерно-геологического изучения массивов скальных пород в целях проектирования глубоких карьеров на примере Ковдорского месторождения магнетитовых и апатитовых руд // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2. – С. 19–29.
6. Трещиноватость породного массива в карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» / И.М. Игнатенко, Е.Б. Яницкий, В.А. Дунаев, С.Г. Кабелко // Горный журнал. – 2019. – № 10. – С. 11–14.
7. Латышев О.Г. Неоднородность трещинной структуры и прочность горных пород // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 6. – С. 152–159.
8. Латышев О.Г., Прищепа Д.В. Прогноз деформационных характеристик трещиноватого породного массива // Известия вузов. Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 80–85.
9. Красновский А.А. О деформировании блоков пород с полостью // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т. 4. – № 2. – С. 76–79.
10. Ольховатенко В.Е., Трофимова Г.И., Ожогина Т.В. Методы изучения трещиноватости горных пород. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 80 с.
11. Рязанцев П.А. Повышение эффективности разведки месторождений облицовочного камня на основе электротомографии: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – СПб, 2015. – 169 с.
12. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1970. – 164 с.
13. Облицовочный камень Ленинградской области. Граниты Карельского перешейка в современной архитектуре Санкт-Петербурга / А.Я. Тутакова, А.З. Романовский, А.Г. Булах, Ю.В. Лип. – СПб.: Русская коллекция, 2011. – 80 с.
14. Ashmole I., Motloun M. Dimension stone: the latest trends in exploration and production technology // Surface Mining. – 2008. – P. 35–70.
15. Bedrock detection beneath river terrace deposits using three-dimensional electrical resistivity tomography / J. Chambers, P. Wilkinson, D. Wardrop, A. Hameed, I. Hill, C. Jeffrey, M.H. Loke, P.I. Meldrum, O. Kuras, M. Cave, D.A. Gunn // Geomorphology. – 2012. – V. 177. – P. 17–25.
16. Clifford J., Binley A. Geophysical characterization of riverbed hydrostratigraphy using electrical resistance tomography // Near Surface Geophysics. – 2010. – V. 8. – P. 563–574.
17. Elmoutie M.K., Poropat G.V. A method to estimate in situ block size distribution // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2012. – V. 45. – P. 401–407.
18. National treasure of global significance. Dimension-stone deposits in larvikite, Oslo igneous province, Norway / T. Haldal, I. Kjolle, G.B. Meyer, S. Dahlgren // Geological Survey of Norway Special Publication. – 2008. – V. 11. – P. 5–18.
19. Mufti I.R. Finite-difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structure // Geophysics. – 1976. – V. 41. – P. 62–78.
20. Case study: a 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste deposit site in Brazil / A. Ustra, V. Elis, G. Mondelli, L. Zuquette, H. Giacheti // Environment Earth Science. – 2012. – V. 66. – P. 763–772.
21. Practical aspects of applied optimized survey design for electrical resistivity tomography / P.B. Wilkinson, M.H. Loke, P.I. Meldrum, J.E. Chambers, O. Kuras, D.A. Gunn, R.D. Ogilvy // Geophysical Journal International. – 2012. – V. 189. – P. 428–440.
22. Zhamaletdinov A.A., Ronning J.S., Vinogradov Y.A. Electrical profiling by the MISC and Slingram methods in the Pechenga-Pasvik area. Norges Geologiske Undersokelse, Special publication. – 1995. – V. 7. – P. 333–338.

Поступила: 20.02.2020 г.

Информация об авторах

Данильев С.М., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизических и геохимических методов поиска и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

Данильева Н.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизических и геохимических методов поиска и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

Исакова Е.П., студентка геологоразведочного факультета, кафедры геофизических и геохимических методов поиска и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

Ашкар Г.Х., слушатель учебного центра Heriot-Watt программы Reservoir Evaluation and Management.

UDC 537.876.23; 550.837.62

RESEARCH OF CRACKING AT FACING STONE DEPOSIT USING THE GEORADAR METHOD

Sergey M. Daniliev¹,

Daniliev_SM@pers.spmi.ru, daniliev@mail.ru

Natalya A. Danilieva¹,

Danileva_NA@pers.spmi.ru

Ekaterina P. Isakova¹,

isakowa.ek@yandex.ru

George K. Ashkar²,

georgiyashkar@gmail.com

¹ St. Petersburg Mining University,

2, 21 line Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

² Heriot-Watt Reservoir Evaluation and Management Training Center,

4a, Usov street, Tomsk, 634034, Russia.

The relevance of the study is specified by the necessity not only to identify the surface distribution of cracks, but also the degree of vegetation of the rock when evaluating the fracture of the main rocks as applied to the facing stone deposits. In modern practice, when developing deposits, the rock with various types of distributed cracks can be detected. The further development of deposits of facing or building stone depends on the correct and rational solution to this problem. The solution to the problems of localization of the distributed propagation of cracks can be based on the attraction of modern technologies and introduction of engineering geophysicists into practice, allowing research based on the study of spatially oriented cracks in the rock mass. Analytical studies and experimental observations in natural conditions make it possible to preliminarily differentiate area of study by degree of demolition geological material mass, as well as to make a qualitative assessment of block raw materials.

The main aim of the research is to select the optimal complex of geophysical methods for studying the propagation and localization of fractures in a rock mass.

Methods: GPR studies using OKO-2 equipment with 150 MHz and 1200 MHz antennas.

Results. Based on the study, the authors have proposed to use two types of antennas for penetrating to different depths. The general characteristic of the block stone deposit is obtained, the study area is allocated according to the degree of fracture. The presented methods reflect the effectiveness of the study of fracturing in a facing stone deposit using georadar.

Key words:

Granite massif, fracturing, GPR studies of rock, GPR, fracturing of a facing stone.

REFERENCES

1. Daniliev S.M., Danilieva N.A. Prospects for electrical exploration studies of gypsum storage dams in the framework of geotechnical monitoring. *15th anniversary scientific-practical conference and exhibition "Engineering and ore geophysics 2019"*. Gelendzhik, EAGE, 2019, pp. 278–284.
2. Daniliev S.M., Daniliev N.A. Osobennosti elektromagnitnogo polya georadarogramm pri issledovanii skrytykh polostey [Features of the electromagnetic field of GPR in the study of hidden cavities in engineering facilities]. *14ya nauchno-prakticheskaya konferentsiya i vystavka. Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2018* [14th Scientific and Practical Conference and Exhibition. Engineering and Ore Geophysics 2018]. Almaty, Kazakhstan, EAGE, 2018, pp. 256–260.
3. Daniliev S.M., Glazunov V.V., Efimova N.N., Nedyalkov V.S., Stengel V.G. Kompleksirovanie metodov teplovizionnogo i georadiolokatsionnogo skanirovaniya dlya vyyavleniya polostey pod zhelezobetonnyimi plitami krepleniya gruntovykh otkosov gidrotehnicheskikh sooruzheniy [Combining the methods of thermal imaging and GPR scanning for revealing cavities under reinforced concrete slabs for attaching soil slopes of hydraulic structures]. *14ya nauchno-prakticheskaya konferentsiya i vystavka. Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2018* [14th Scientific and Practical Conference and Exhibition. Engineering and Ore Geophysics 2018]. Almaty, Kazakhstan, EAGE, 2018, pp. 318–324.
4. Daniliev S.M., Daniliev N.A. Frequency components of dynamic attributes of a wave electromagnetic field of georadarograms. *International Journal of Engineering & Technology (2.13)*, 2018, no. 7, pp. 127–132. In Rus.
5. Zhirov D.V., Melikhova S.G., Rybin V.V. Peculiarities of engineering-geological study of rock massifs for the design of deep quarries using the example of the Kovdor deposit of magnetite and apatite ores. *Bulletin of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 2, pp. 15–25. In Rus.
6. Ignatenko I.M., Yanitsky E.B., Dunaev V.A., Kabelko S.G. Fracturing of the rock mass in the quarry of the Zhelezny mine of Kovdorsky GOK JSC. *Mining Journal*, 2019, no. 10, pp. 11–14. In Rus.
7. Latyshev O.G. Heterogeneity of the fracture structure and rock strength. *Bulletin of universities. Mountain Journal*, 2014, no. 6, pp. 152–159. In Rus.
8. Latyshev O.G., Prishchepa D.V. Forecast of the deformation characteristics of a fractured rock mass. *Proceedings of universities. Mountain Journal*, 2017, no. 1, pp. 80–85. In Rus.
9. Krasnovsky A.A. On the deformation of rock blocks with a cavity. *Fundamental and Applied Questions of Mining Sciences*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 76–79. In Rus.
10. Olkhovatenko V.E., Trofimova G.I., Ozhogina T.V. *Metody izucheniya treshchinovostei gornykh porod* [Methods of studying rock fracturing]. Tomsk, Tomsk State Architect Build University Publ. house, 2015. 80 p.
11. Ryazantsev P.A. *Povyshenie effektivnosti razvedki mestorozhdeniy oblitsovochnogo kamnya na osnove elektrotomografii*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Increasing the efficiency of exploration of facing stone deposits based on electrotomography. Cand. Diss. Abstract]. Saint-Petersburg, 2015. 169 p.
12. Rat M.V., Chernyshev S.N. *Treshchinovost i svoystva treshchinovatykh gornykh porod* [Fracturing and properties of fractured rocks]. Moscow, Nedra Publ, 1970. 164 p.

13. Tutakova A.Ya., Romanovsky A.Z., Bulakh A.G., Lir Yu.V. *Oblitsovochny kamen Leningradskoy oblasti. Granity Karelskogo peresheyka v sovremennoy arhitekture Sankt-Peterburga* [Facing stone of the Leningrad region. Granites of the Karelian Isthmus in the modern architecture of St. Petersburg]. St. Petersburg, Russkaya kolleksiya Publ., 2011. 80 p.
14. Ashmole I., M Motloun. Dimension stone: the latest trends in exploration and production technology. *Surface Mining*, 2008, pp. 35–70.
15. Chambers J., Wilkinson P., D. Wardrop, Hameed A., Hill I., Jeffrey C., Loke M.H., Meldrum P.I., Kuras O., Cave M., Gunn D.A. Bedrock detection beneath river terrace deposits using three-dimensional electrical resistivity tomography. *Geomorphology*, 2012, vol. 177, pp. 17–25.
16. Clifford J., Binley A. Geophysical characterization of riverbed hydrostratigraphy using electrical resistance tomography. *Near Surface Geophysics*, 2010, vol. 8, pp. 563–574.
17. Elmouttie M.K., Poropat G.V. A method to estimate in situ block size distribution. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, vol. 45, pp. 401–407.
18. Heldal T., Kjolle I., Meyer G.B., Dahlgren S. National treasure of global significance. Dimension-stone deposits in larvikite, Oslo igneous province, Norway. *Geological Survey of Norway Special Publication*, 2008, vol. 11, pp. 5–18.
19. Mufti I.R. Finite-difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structure. *Geophysics*, 1976, vol. 41, pp. 62–78.
20. Ustra A., Elis V., Mondelli G., Zuquette L., Giacheti H. Case study: a 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste deposal site in Brazil. *Environment Earth Science*, 2012, vol. 66, pp. 763–772.
21. Wilkinson P.B., Loke M.H., Meldrum P.I., Chambers J.E., Kuras O., Gunn D.A., Ogilvy R.D. Practical aspects of applied optimized survey design for electrical resistivity tomography. *Geophysical Journal International*, 2012, vol. 189, pp. 428–440.
22. Zhamaletdinov A.A., Ronning J.S., Vinogradov Y.A. Electrical profiling by the MISC and Slingram methods in the Pechenga-Pasvik area. *Norges Geologiske Undersokelse, Special publication*, 1995, vol. 7, pp. 333–338.

Received: 20 February 2020.

Information about the authors

Sergey M. Daniliev, Cand. Sc., associate professor, St. Petersburg Mining University.

Natalya A. Danilieva, Cand. Sc., associate professor, St. Petersburg Mining University.

Ekaterina P. Isakova, student, St. Petersburg Mining University.

George K. Ashkar, student, Heriot-Watt Reservoir Evaluation and Management Training Center.

УДК 622.24.051.64

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ИСКРИВЛЕНИЕ СКВАЖИН ПРИ БУРЕНИИ В АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,
sovair@bk.ru

Пушмин Павел Сергеевич²,
dog-eat-dog-79@mail.ru

Попова Марина Сергеевна¹,
alleniram83@mail.ru

¹ Сибирский федеральный университет,
Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность. Отклонение от проектной траектории скважин приводит к ошибочным результатам и как следствие к невыполнению поставленной задачи бурения. К важным геологическим условиям, которые влияют на искривление скважины, относятся сланцеватость, трещиноватость, слоистость, перемежаемость слоев пород различной твердости, флюидальность, пористость, зоны дробления пород, разломы, пустоты, твердые включения и т. п. Как показывает опыт проведения буровых работ, значительная часть перебуриваемых горных пород являются анизотропными. Показатель анизотропии горных пород характеризует степень совокупного влияния нескольких факторов на процесс естественного искривления скважин. Тип инструмента и параметры режима бурения являются основными факторами такого рода. Борьба с естественным искривлением зачастую вызывает технические затруднения и связано с большими затратами времени и материальных ресурсов. В связи с этим актуальным является изучение особенностей бурения в условиях анизотропии горных пород и рассмотрение возможностей влияния на искривление скважин при повышенной флюидальности.

Цель: определение возможностей влияния на естественное искривление скважин при бурении в анизотропных горных породах.

Объект: механизм разрушения анизотропной горной породы.

Методы: экспериментальные, аналитические исследования, анализ.

Результаты. Применение в процессе бурения скважин жидкостей с добавлением поверхностно-активного вещества и гидродинамическое воздействие на забой способствуют снижению естественного искривления скважин. Активное воздействие очистного агента, содержащего поверхностно-активные вещества, на зону предразрушения породы устраняет неравномерность поражения забоя при движении резцов инструмента в направлении навстречу и вслед плоскостям флюидальности. Промывочный агент с добавками поверхностно-активного вещества снижает значение отношения скорости фрезерования породы в стенке скважины к углублению забоя, при этом особый эффект наблюдается при высокой механической скорости бурения скважины. Данное обстоятельство связано с возможностью проникновения промывочного агента в трещины, образовавшиеся в зоне предразрушения горной породы.

Ключевые слова:

Анизотропия, искривление скважин, поверхностно-активные вещества, фрезерующая способность, буровой инструмент, флюидальность, механизм разрушения, зона предразрушения.

Введение

Одной из главных целей в процессе бурения скважины любого назначения является сохранение проектной траектории. Отклонение от проектной траектории скважин является частой и основной причиной недостоверности полученных результатов. Соблюдение заданной траектории при бурении в анизотропных горных породах непростая задача. Анизотропность – явление, затрудняющее бурение скважин. С целью эффективного разрушения анизотропных пород необходимо доскональное изучение механизма их разрушения. Неравномерность напряжений и деформаций, возникающих при бурении в таких породах, приводит к неизбежному естественному искривлению скважин [1–23].

Использование поверхностно-активного вещества (ПАВ) в составе промывочной жидкости всегда давало положительные результаты при бурении даже в

самых сложных геологических условиях. ПАВ имеет массу преимуществ: позволяет повысить смазочные свойства и термостойкость промывочных жидкостей, способствует диспергированию шлама и дегазации промывочных жидкостей при вскрытии продуктивных нефтегазовых пластов, а также уменьшает влияние буровых растворов на их проницаемость и т. д. [1–10, 19]. Основным положительным свойством ПАВ является его способность снижать поверхностное натяжение на жидкой или твердой поверхности раздела сред. Действие ПАВ на горную породу характеризуется ее разупрочнением и снижением твердости, что способствует повышению эффективности разрушения породы при бурении скважин [5–20]. Использование ПАВ и его положительные свойства при бурении в анизотропных породах мало изучено и, учитывая перечисленные возможности, вызывает научный интерес.

Постановка проблемы

Основной параметр, который необходимо контролировать в ходе соблюдения траектории направления оси скважины, – интенсивность искривления. Опыт ранее проведенных работ [1–22] показывает, что этот показатель зависит от многих факторов бурения. Например, образованная на локальном участке скважины интенсивность искривления (i) во многом зависит от показателя углубления за оборот породоразрушающего инструмента (ПРИ) ($h_{об}$), что подтверждается выражением (1) [3, 11]:

$$i = \frac{\alpha}{h_{об}}, \quad (1)$$

где α – угол отклонения забоя.

К тому же, согласно формуле (2), параметр интенсивности искривления участка скважины зависит от фрезерующей способности бурового инструмента (f) [3, 11]:

$$i = \frac{\arcsin f}{h_{об}}, \quad (2)$$

где f – коэффициент боковой фрезерующей способности.

При этом, говоря о коэффициенте боковой фрезерующей способности инструмента, необходимо помнить, что он в свою очередь зависит от неодинаковой эффективности разрушения горной породы в поперечном (v_{ϕ}) и осевом (v_6) направлениях:

$$f = \frac{v_{\phi}}{v_6}. \quad (3)$$

Из полученных зависимостей (1)–(3) следует, что интенсивность искривления может контролироваться путем регулирования углубления за оборот и фрезерующей способности инструмента. Причем сдерживаться этот показатель будет в случае, если углубление за оборот растет, а коэффициент фрезерующей способности при этом неизменен, т. е. увеличение углубления за оборот должно быть вызвано определенными методами, не связанными с изменением режимов бурения.

С целью экспериментальных и аналитических исследований возможности повышения углубления за оборот при неизменной фрезерующей способности породоразрушающего инструмента (ПРИ) проведено опытное бурение. В качестве экспериментальной породы использовались туфодациты Забайкалья как наилучший представитель анизотропной горной породы. Туфодациты являются эффузивными породами, имеют ярко выраженную флюидальную текстуру и характеризуются различной степенью анизотропии. Такие характеристики породы позволяют осуществить детальное исследование особенностей бурения в условиях естественного искривления скважин [4–7].

Методика

С целью приблизить опытное бурение к производственным условиям разбуривание туфодацита производилось буровым станком СКБ-4, зафиксированным на эстакаде, в качестве породоразрушающего ин-

струмента принята коронка О1А3 диаметром 59 мм. Данные работы проведены по плану полного факторного эксперимента типа 2^2 . Варьировались показатели двух основных влияющих факторов, а именно осевой нагрузки $P_{ос}$ и частоты вращения ω . Фактор частоты вращения изменялся от 280 до 710 мин^{-1} , а осевой нагрузки – от 750 до 1350 даН. Эксперимент включал четыре опыта с трехкратным повторением замеров механической скорости бурения (v). В ходе работы удалось направить бурение относительно плоскостей флюидальности под следующими углами: 12, 27, 50 и 72°. Замеры показателя v осуществлялись для каждого направления бурения относительно плоскостей флюидальности. Углы встречи с прослойками перебуриваемой породы замерены по факту получения керна и рассчитаны как средние в пределах интервала бурения. Средняя глубина скважин составляла 40–50 см [5].

По полученным результативным данным для каждого из выбранных направлений бурения относительно плоскостей флюидальности породы построены математические модели, отражающие влияние факторов на отклик v . Построение моделей осуществлялось в соответствии со спланированной методикой эксперимента. Позволим себе утверждать, что построенные модели имели достоверность 90 %, т. к. ошибка определения механической скорости бурения по ходу эксперимента не превышала 9 % от среднего значения откликов.

В ходе эксперимента показатель анизотропности буримой горной породы определялся как изменение механических скоростей бурения в зависимости от угла встречи с плоскостями флюидальности туфодацита. Значения механических скоростей бурения для модели брались как полученные при бурении под различными углами.

Используя результаты опытного бурения, для каждого из направлений относительно сланцеватости ($\gamma=12^\circ$ (v_{12}), 27° (v_{27}), 50° (v_{50}) и 72° (v_{72})) получены математические модели влияния осевой нагрузки и частоты вращения на механическую скорость бурения. После тщательной проверки на значимость факторов и адекватность модели приобрели вид, представленный в выражении (4):

$$\left. \begin{aligned} v_{12} &= 8,3 + 2,18P + 3,6\omega + 1,2P\omega \\ v_{27} &= 10,1 + 2,1P + 5,4\omega + 1,4P\omega \\ v_{50} &= 10,8 + 2,3P + 6,1\omega + 1,6P\omega \\ v_{72} &= 12,6 + 3,45P + 7,6\omega + 2,35P\omega \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где P и ω – параметры режима бурения с пределами значений в закодированном выражении от 1 до –1.

Опираясь на полученные аналитические зависимости (4), построены наглядные графики, демонстрирующие изменение механической скорости бурения в зависимости от смены значений параметров режима бурения, а именно частоты вращения и осевой нагрузки. На рис. 1, а, б приведены отдельные графики для моделей v_{12} (бурение под углом 12° к флюидальности пласта) и v_{72} (тоже под углом 72°). Выбрав соотношение механических скоростей в одноименных точках поля эксперимента, можно получить

характеристику анизотропии по буримости в пределах, ограниченных значениями варьирования предложенных параметров режима бурения. Наибольший показатель анизотропии по буримости представлен на

рис. 1, в. Здесь коэффициент K_v равен отношению v_{72}/v_{12} . Другие соотношения скоростей показывают практически аналогичную картину, но с значениями показателя K_v немного меньшими.

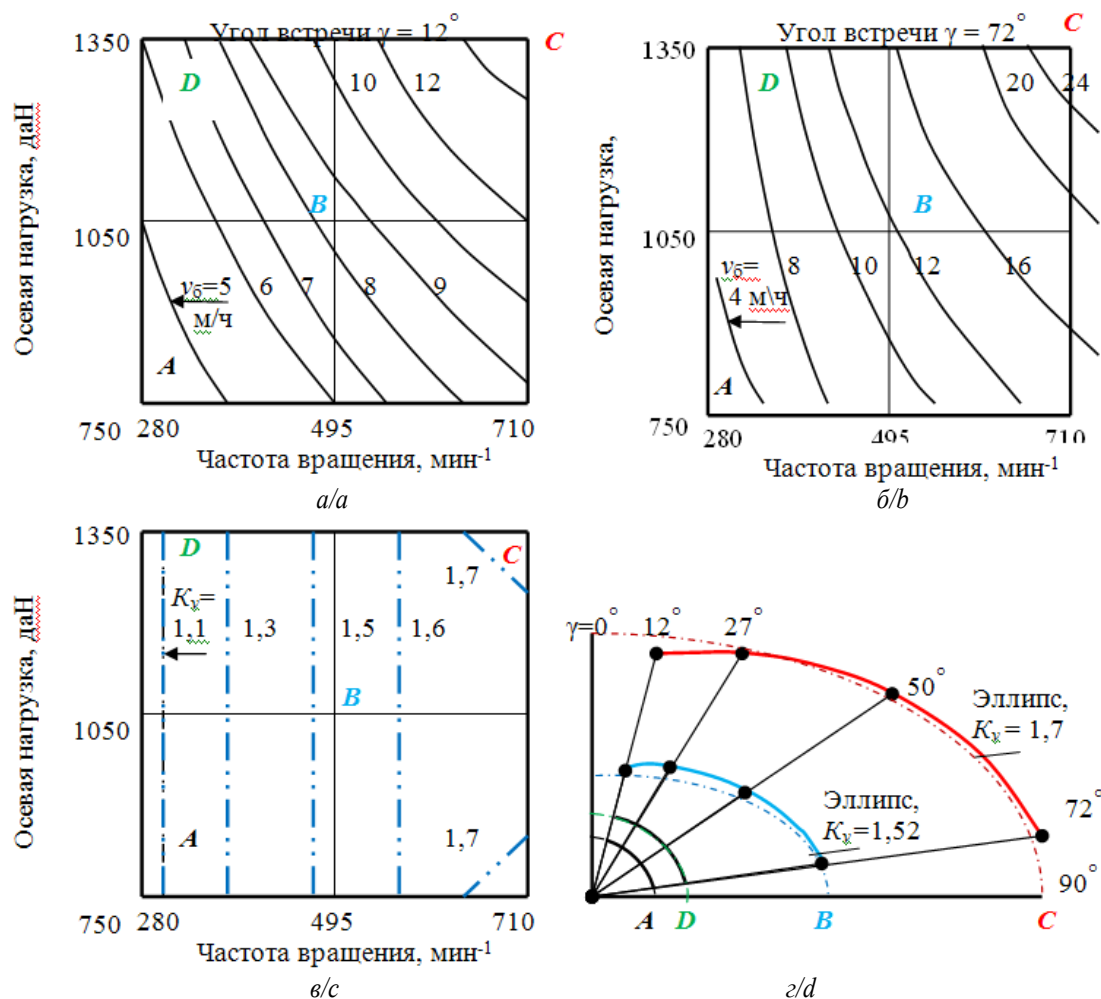


Рис. 1. Результаты экспериментального бурения туфодолимита: а, б) графики зависимости механической скорости бурения от осевого усилия и частоты вращения (угол встречи со слоями породы 12° и 72°); в) графики зависимости показателя анизотропии по буримости K_v от осевого усилия и частоты вращения инструмента; г) распределение механической скорости бурения в зависимости от угла встречи инструмента со слоистостью породы в точках А, В, С и D

Fig. 1. Anisotropic tuffodolomite drilling results: а, б) graphs of mechanical drilling speed depending on the axial force and the frequency of rotation of the tool at an angle of encounter with rock layers 12° and 72° ; в) graphs of the anisotropy index for the drillability of K_v tuff depending on the axial force and tool rotation speed; г) polar diagrams of the distribution of the drilling speed depending on the angle of the tool with the rock layers obtained at points А, В, С and D

Для выбранных одноименных точек на графиках, приведенных на рис. 1, а, б, построена диаграмма механических скоростей, полученных в результате замеров при опытном бурении в различных направлениях относительно сланцеватости пласта породы (рис. 1, г). В результате получены кривые А, В, С, D. Кривые А и D демонстрируют результаты при минимальной частоте вращения и при минимальной и максимальной осевых нагрузках. Как видно на рис. 1, г, эти кривые геометрически отражают четверти окружностей. При этом коэффициенты анизотропии равны значениям 1,1 (А) и 1,3 (D) (рис. 1, в).

А вот полученные линии зависимостей механической скорости бурения от угла встречи со сланцеватостью в точках В и С отображаются кривыми, близкими к четвертям эллипсов. Такие формы кривых указывают на возможность образования овальности поперечного сечения ствола скважины, что связано с повышением анизотропии по буримости (соответственно при коэффициентах $K_v = 1,52$ и $K_v = 1,7$).

На рис. 2 представлены графические зависимости углубления за один оборот h_o от осевой нагрузки при максимальной (710 мин^{-1}), средней (495 мин^{-1}) и минимальной (280 мин^{-1}) частотах вращения инстру-

мента, а также при углах встречи 12° (рис. 2, а), 27° (рис. 2, б) и 72° (рис. 2, в). По полученным графическим зависимостям видно, что при одних и тех же режимах бурения, изменяя лишь угол встречи инструмента со слоистостью породы, можно добиться изменения углубления за оборот. Причем эта зависи-

мость неоднозначна. Например, при угле встречи равном 12° увеличение частоты вращения влечет снижение углубления за оборот. А наилучших результатов, обосновано затрачивая большую мощность на бурение, можно добиться при $\gamma=72^\circ$ (повышение частоты вращения повышает углубку за оборот).

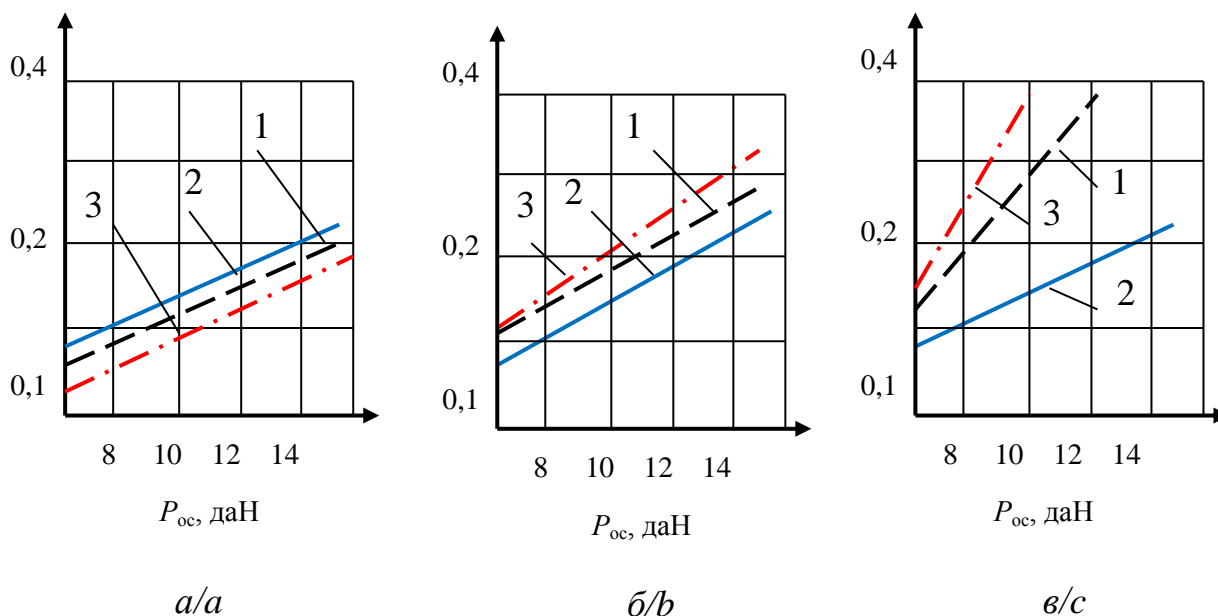


Рис. 2. Опытные зависимости углубления за оборот алмазной коронки от параметров бурения и угла встречи инструмента со сланцеватостью туфодацита: а) угол встречи 12° ; б) угол встречи 27° ; в) угол встречи 72° ; частота вращения коронки: 1 – 280 мин^{-1} ; 2 – 495 мин^{-1} ; 3 – 710 мин^{-1}

Fig. 2. Experimental dependences of the recess for the diamond core rotation on the drilling parameters and the angle of the tool with the tuffodacite schistosity: а) angle of meeting 12° ; б) angle of meeting 27° ; в) angle of meeting 72° ; bit rotation frequency: 1 – 280 мин^{-1} ; 2 – 495 мин^{-1} ; 3 – 710 мин^{-1}

Что касается проявления анизотропности породы туфодацита в процессе бурения, учитывая результаты описанных опытных буровых работ и их аналитическую обработку, выяснилось, что показатель анизотропности породы в процессе бурения непостоянен и зависит от частоты вращения. Такое явление связано с тем, что разрушаемая порода не является твердой и при минимальной (по данному эксперименту) осевой нагрузке ($P_{ос}$) наступало объемное разрушение горной породы. Именно поэтому рост скорости бурения определялся повышением частоты вращения, а не осевой нагрузки.

В связи с этим можно сделать вывод о необходимости внимания к регулированию частоты вращения при бурении в анизотропных породах.

Графики изменения углубления за один оборот от параметров бурения (рис. 2) показывают, что меньшие значения показателя анизотропии соответствуют условиям объемного разрушения горной породы (рис. 2, а). С приближением к состоянию усталостно-поверхностного разрушения породы происходит рост показателя анизотропии (рис. 2, б, в).

С ростом коэффициента K_v повышается вероятность образования формы поперечного сечения близкой к овалу.

Таким образом, получены предварительные выводы о том, что степень влияния анизотропии на траекторию бурения меняется прежде всего в зависимости от изменения показателя частоты вращения и режима разрушения горной породы на забое скважины.

Для уточнения полученных результатов была проведена еще одна серия экспериментов. Экспериментальное бурение осуществлялось в монолитных блоках спекшегося туфодацита буровым станком БСК-2М2-100. В качестве породоразрушающего инструмента была выбрана алмазная однослойная коронка диаметром 36 мм. Очистной агент принят в виде водного раствора, содержащего ПАВ. В процессе экспериментальных буровых работ количество ПАВ в растворе воды изменялось в пределах от 0 до 0,3 %. При проведении эксперимента частота вращения выбранной коронки варьировалась в пределах $150\text{--}560 \text{ мин}^{-1}$, осевая нагрузка изменялась в пределах $250\text{--}600 \text{ даН}$, а угол встречи $\gamma - 25^\circ\text{--}80^\circ$ [5].

По зафиксированным результатам построены математические модели влияния осевой нагрузки ($P_{ос}$), частоты вращения (ω), содержания ПАВ в промывочной жидкости (S) и угла встречи оси инструмента с плоскостями флюиальности разбуриваемой породы (γ) на:

- механическую скорость бурения (v) (5);
- показатель углубления за один оборот (h_o) (6).
- Согласно плану многофакторного эксперимента, при построении моделей использовались четыре фактора. В этом случае P_{oc} – фактор x_1 ; ω – фактор x_2 ; S – фактор x_3 ; γ – x_4 .

Для наглядности и прозрачности из полученных моделей исключили малозначимые, незначительные сочетания факторов. В результате проведенных аналитических манипуляций получены зависимости (5) и (6).

$$v = 3,1 + 2,01P_{oc} + 1,79\omega + 0,8S + 0,59\gamma + 1,18P_{oc}\omega + 0,49P_{oc}S + 0,23P_{oc}\omega S + 0,56\omega S + 0,19\omega\gamma - 0,11S\gamma + 0,4P_{oc}\omega S; \quad (5)$$

$$h_o = 1,37 \cdot 10^{-4} + 1,53 \cdot 10^{-5}P_{oc} + 7,76 \cdot 10^{-5}\omega + 3,65 \cdot 10^{-5}S + 3,28 \cdot 10^{-5}\gamma + 1,08 \cdot 10^{-5}P_{oc}\omega + 2,33 \cdot 10^{-5}\omega S + 1,18 \cdot 10^{-5}\omega\gamma - 8,28 \cdot 10^{-6}P_{oc}\gamma. \quad (6)$$

Эмпирические модели (5) и (6) наглядно демонстрируют степень и значимость влияния исследуемых параметров на механическую скорость бурения и углубление инструмента за оборот. Такой подход позволяет произвести детальную оценку взаимного влияния перечисленных параметров на технико-экономические показатели бурения.

Анализ

Проанализировав математическую модель (5), видно, что наиболее значимое влияние на механическую скорость в процессе бурения туфодацита практически в равной степени оказывают осевая нагрузка и частота вращения породоразрушающего инструмента.

Влияние концентрации ПАВ и угла встречи оказалось положительным, причем отмечено большее влияние поверхностно-активного вещества на интенсивность механической скорости. Рост угла встречи тоже приводит к повышению механической скорости бурения. Однако при этом, как оказалось, одновременное увеличение и количество ПАВ и угла встречи отрицательно влияет на увеличение механической скорости.

Анализ полученной математической модели (6) позволяет отметить существенное влияние частоты вращения на углубление инструмента за один оборот. Следующими по важности факторами можно отметить содержание поверхностно-активного вещества в составе промывочной жидкости и угол встречи с плоскостями флюидальности.

Значение осевой нагрузки оказалось незначительным, что нехарактерно для алмазного бурения. Данное обстоятельство наверняка связано с тем, что при выбранных значениях осевой нагрузки был полностью исчерпан ресурс выпуска резцов из матрицы коронки и последующий рост осевой нагрузки не привел к их заглоблению в туфодацит. Сочетание таких факторов, как осевая нагрузка и угол встречи, привело к отрицательному воздействию на рост

углубления породоразрушающего инструмента, и это несмотря на то, что рост угла встречи приводит к снижению твердости горной породы.

По модели (5) произведены математические расчеты. Для сравнительной оценки бурения с различными параметрами промывочной жидкости построены графические зависимости изменения механической скорости от углов встречи с плоскостями флюидальности породы и параметров режима бурения. Графики приведены отдельно для условий при бурении с технической водой (рис. 3) и при бурении с эмульсионным раствором, состоящим из воды с содержанием ПАВ в концентрации 0,3 % (рис. 4).

Полученные графики (рис. 3, 4) позволяют сделать вывод о том, что механическая скорость бурения (v) зависит от угла встречи бурового породоразрушающего инструмента со слоистостью разбуриваемого пласта (γ). При одних и тех же режимах бурения чем больше угол γ , тем больше v . Самое интересное, что данное явление имеет более ярко выраженный характер в случае применения в качестве очистного агента технической воды с ПАВ.

Для более детального анализа влияния промывочного раствора, содержащего в своем составе ПАВ, на механическую скорость бурения построены графические зависимости, представленные на рис. 5. Графики показывают прирост механической скорости за счет использования промывочного агента с ПАВ в зависимости от величины осевой нагрузки и угла встречи оси инструмента с плоскостями флюидальности.

Основываясь на анализе полученных зависимостей, представленных на рис. 5, можно утверждать, что прирост механической скорости бурения наибольший при углах встречи в пределах от 25° до 30° . Этот факт указывает на более значимое воздействие ПАВ на породу в условиях ориентирования плоскостей флюидальности породы вдоль оси скважины. Такое активное влияние связано с развитием трещин в зоне предразрушения. Так трещины распространяются в направлении слоистости, которая совпадает с направлением пористости горной породы (рис. 6). Отсюда выходит, что при небольших углах встречи γ забой открыт для проникновения жидкости, а наличие в ней ПАВ улучшает этот процесс.

Однако при этом замечено, что повышение осевой нагрузки приводит к росту механической скорости бурения лишь до определенного предела (рис. 5, интервал P_n). Дальнейшее увеличение осевого усилия (выше интервала P_n , рис. 5) ведет к замедлению, а со временем и прекращению роста механической скорости. Это говорит о том, что напряжения в горной породе достигли предельных значений, при которых прекращается развитие зоны предразрушения. И именно поэтому, в виду отсутствия трещин для проникновения, снижается активное влияние промывочной жидкости на эту зону.

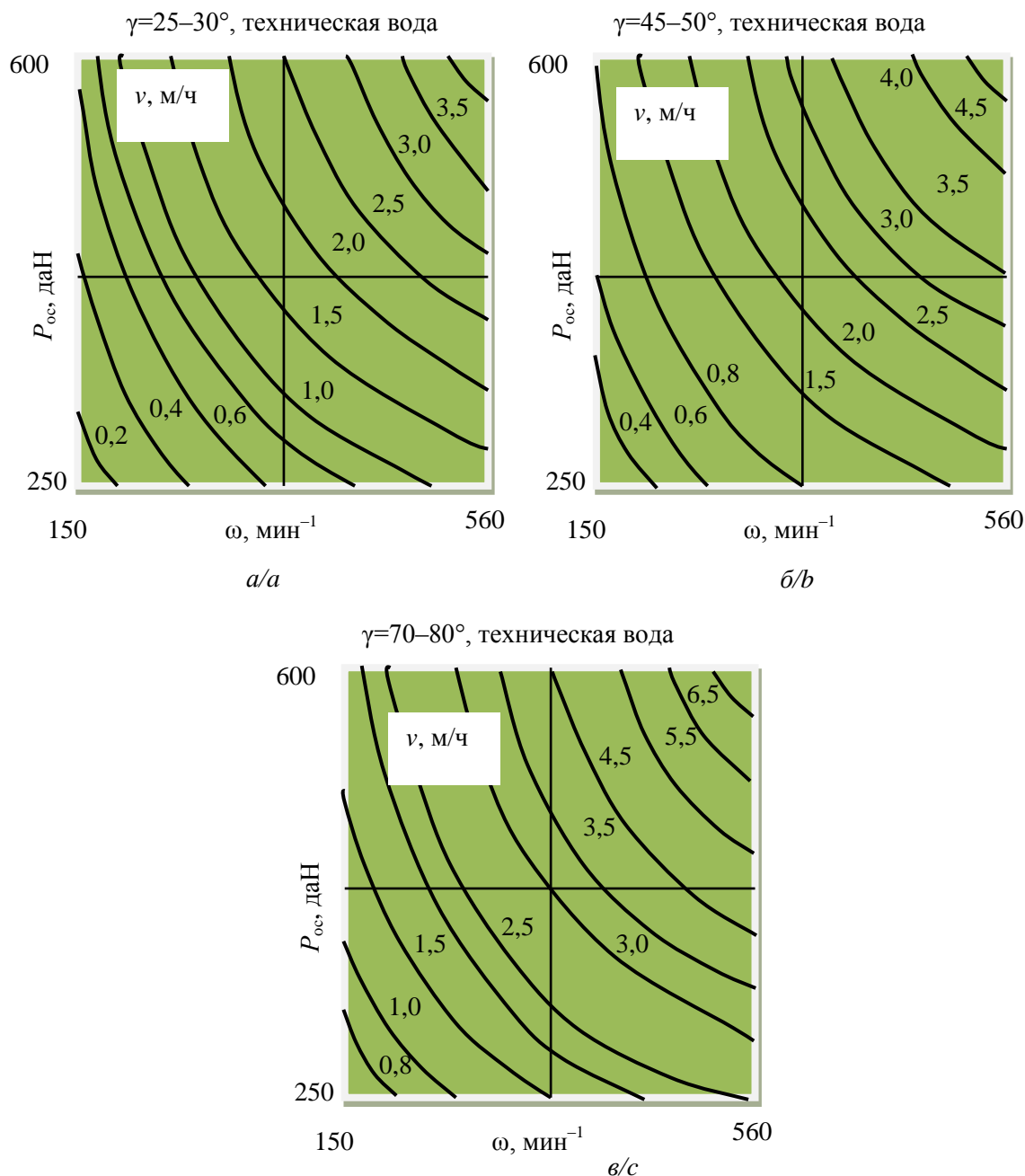


Рис. 3. Результаты стендового бурения спекшегося туфа: зависимости v от параметров режима бурения и от углов встречи с плоскостями флюидальности при бурении с технической водой: а) угол встречи $25\text{--}30^\circ$; б) угол встречи $45\text{--}50^\circ$; в) угол встречи $70\text{--}80^\circ$

Fig. 3. Results of bench drilling of caked tuff: v dependencies on the parameters of the drilling mode and on the meeting angles with the fluidity planes when drilling with process water: а) angle of meeting $25\text{--}30^\circ$; б) angle of meeting $45\text{--}50^\circ$; в) angle of meeting $70\text{--}80^\circ$

При больших значениях частоты вращения породоразрушающего инструмента наблюдался немного более интенсивный рост механической скорости бурения. Это явление можно обосновать понижением размеров области деформирования и напряжений в породе при росте частоты вращения, что способствует существенному влиянию промывочной жидкости на разрушение горной породы. При опытно бурении туфодацита объемный режим разрушения наблюдался при углах встречи со слоистостью и сланцевато-

стью породы в пределах $70\text{--}80^\circ$: с технической водой – в условиях осевых нагрузок в пределах $430\text{--}600$ даН, а с эмульсионным раствором – $250\text{--}430$ даН.

Выделив одноименные точки эксперимента, открывается возможность определения показателя анизотропии по буримости из соотношения механических скоростей в пределах изменения параметров режима бурения. Величина показателя K_v при различных значениях осевой нагрузки и частоты вращения показана на рис. 7. В результате исследования изме-

нения величины этого показателя выяснилось, что показатель анизотропии меньше при бурении с использованием промывочной жидкости с добавлением поверхностно-активного вещества. Данное заключение еще раз подтверждает, что меньшее значение по-

казателя анизотропии по буримости присуще моменту объемного разрушения горной породы в момент, когда и реализуются основные возможности бурового инструмента.

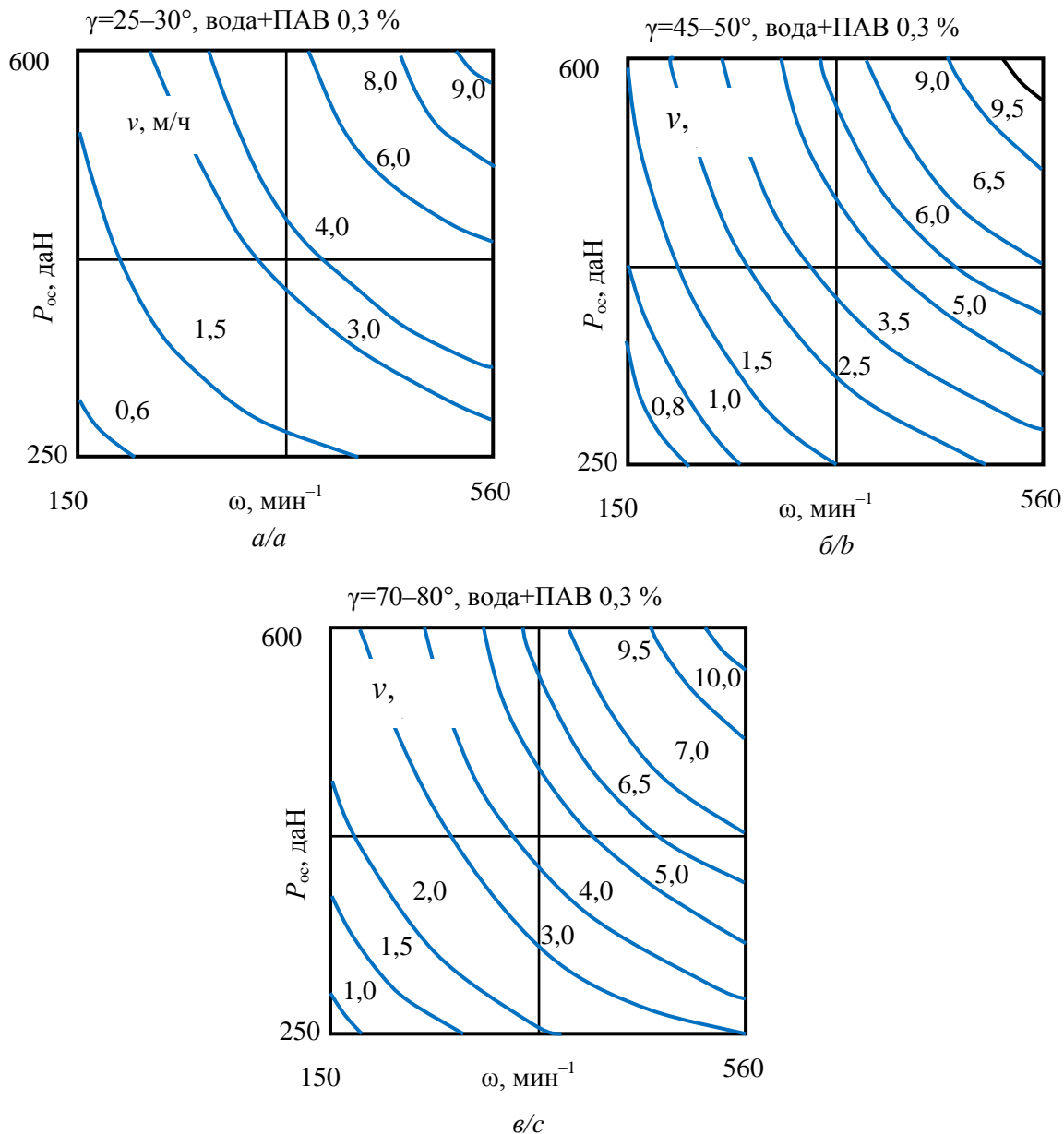


Рис. 4. Результаты стендового бурения спекшегося туфа: зависимости ν от параметров режима бурения и от углов встречи с плоскостями флюидальности при бурении с технической водой с добавлением сульфанола (ПАВ) 0,3 %: а) угол встречи $25-30^\circ$; б) угол встречи $45-50^\circ$; в) угол встречи $70-80^\circ$

Fig. 4. Results of bench drilling of caked tuff: dependences of ν on the parameters of the drilling mode and on the meeting angles with the fluidity planes when drilling with industrial water with the addition of sulfonol (surfactant) 0,3 %: а) angle of meeting $25-30^\circ$; б) angle of meeting $45-50^\circ$; в) angle of meeting $70-80^\circ$

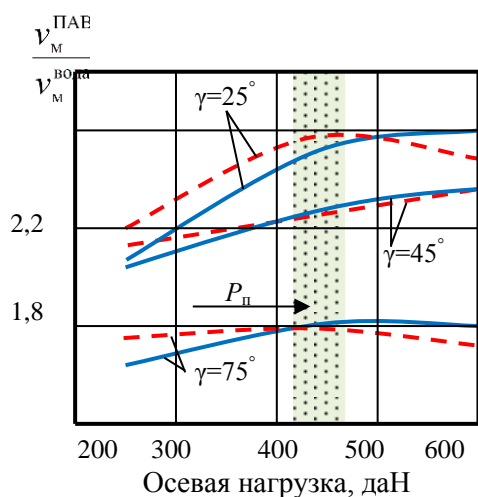


Рис. 5. Экспериментальные зависимости прироста механической скорости бурения от осевого усилия и угла встречи γ с плоскостями флюидальности туфодацита: при частоте вращения 560 мин^{-1} (сплошные линии); 355 мин^{-1} (пунктирные линии)

Fig. 5. Experimental dependences of the increase in the mechanical drilling speed on the axial force and the angle of encounter γ with the tuffodacite fluidity planes: at a rotation frequency of 560 мин^{-1} (solid lines); 355 мин^{-1} (dashed lines)

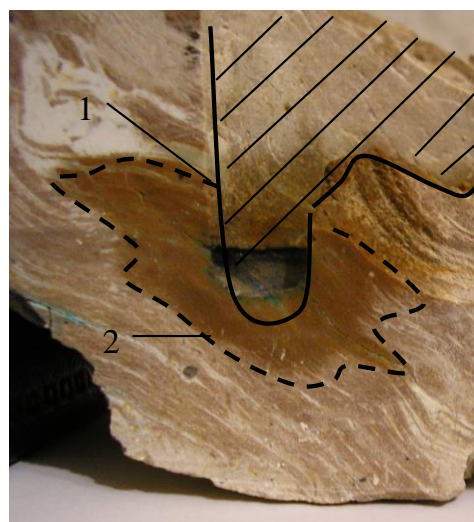


Рис. 6. Фото скважины в разрезе, пробуренной в анизотропном туфодаците: 1 – контур забоя; 2 – зона распространения в породе керосина, которым пропитан забой

Fig. 6. Photo of the longitudinal section of well, drilled in anisotropic tuffodacite: 1 – bottom hole contour; 2 – distribution zone of kerosene in rock

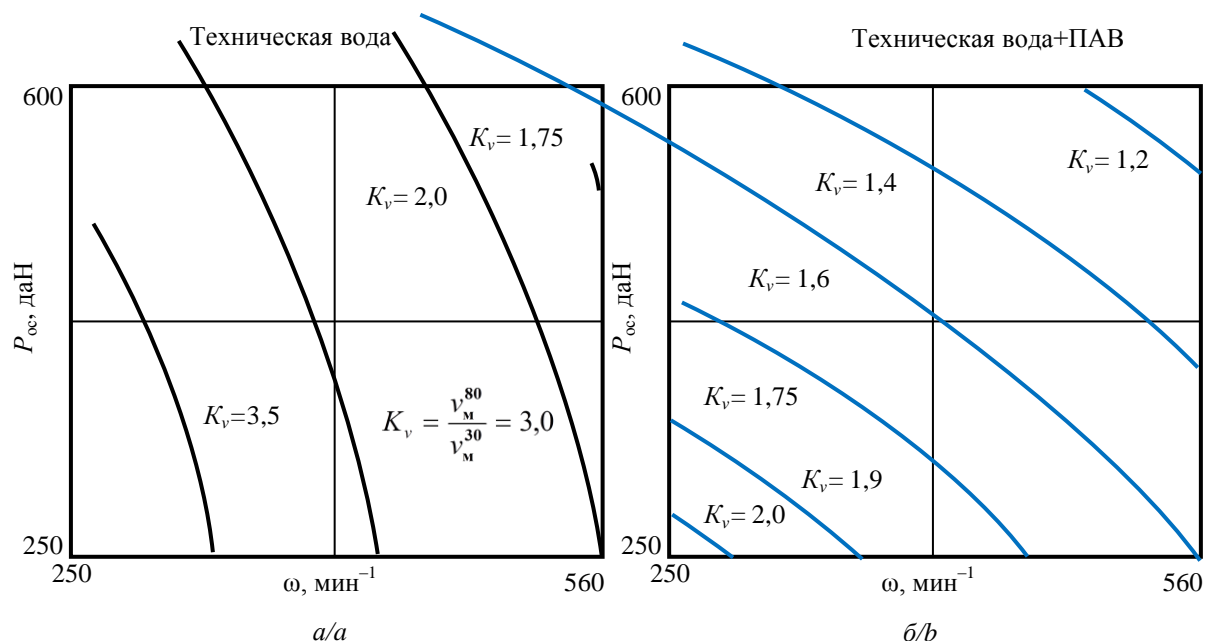


Рис. 7. Зависимость показателя анизотропии по буримости K_v от параметров режима бурения: а) при бурении технической водой; б) при бурении технической водой с добавлением 0,3 % ПАВ

Fig. 7. Dependence of anisotropy index K_v on the parameters of the drilling mode: а) drilling with water; б) water with the addition of 0,3 % surfactant

Режим усталостно-поверхностного разрушения и бурения с зашламованием забоя скважины будет характеризоваться высокими показателями анизотропии по буримости. В таких условиях бурение в анизотропных горных породах будет сопровождаться интенсивным искривлением скважин.

Диаграмма изменения механической скорости в зависимости от состава промывочного агента при бурении под различными углами к плоскости флюидальности (для спекшегося туфа) представлена на рис. 8.

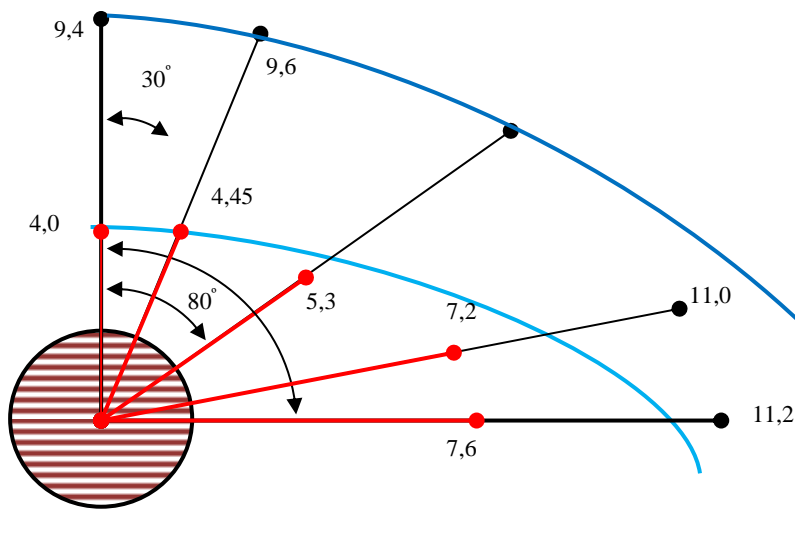


Рис. 8. Распределение механической скорости бурения $v_{\text{м}}$, м/ч, при различных углах встречи оси инструмента с плоскостями флюидальности анизотропной породы в зависимости от состава промывочного агента при следующих режимных параметрах: частота вращения – 560 мин^{-1} ; осевая нагрузка – 600 даН ; подача промывочного агента – $16,7 \text{ л/мин}$.

Fig. 8. Distribution of the mechanical drilling speed v_{sp} , m/h at different angles of meeting the tool axis with the fluidity planes of anisotropic rock depending on the composition of the flushing agent with the following operating parameters: rotation speed – 560 min^{-1} ; axial load – 600 daN ; flushing agent supply – $16,7 \text{ l/min}$.

В этом случае возможные показатели анизотропии по буримости $K_v = \frac{v_m^{80}}{v_m^{30}}$ составили: при бурении с использованием технической воды $K_v=1,9$; при бурении с использованием раствора с ПАВ $K_v=1,19$.

Как видно из рис. 8, кривые, отражающие зависимость механической скорости бурения от угла встречи γ , геометрически близки к четвертям эллипсов.

При бурении анизотропных горных пород поперечное сечение ствола скважин отличается овальной формой [1, 3, 12]. Длинная ось такого овала ориентирована в направлении действия результирующей величины отклоняющих усилий. Овальность поперечного сечения ствола скважины однозначно указывает на процесс искривления скважины. При этом показатель интенсивности искривления скважины напрямую связан с увеличенной длиной сечения ствола скважины в направлении действия отклоняющих сил [3, 11, 12].

Еще одна особенность образования формы ствола скважины при бурении в анизотропных породах указывает на зависимость её диаметра от угла встречи бурового инструмента со сланцеватостью или другими подобными текстурными признаками горной породы.

На рис. 9 приведены показатели замеров диаметра скважин, пробуренных экспериментально в блоках туфодациита породоразрушающим инструментом диаметром 36 мм. Результативные замеры показали, что при постепенном увеличении угла встречи γ инструмента со слоями породы диаметр скважины снижается. В то же время диаметр скважин, пробуренных с применением технической воды, меньше, чем тех скважин, которые были пробурены с использованием

поверхностно-активного вещества в определенной концентрации разведенного в воде.

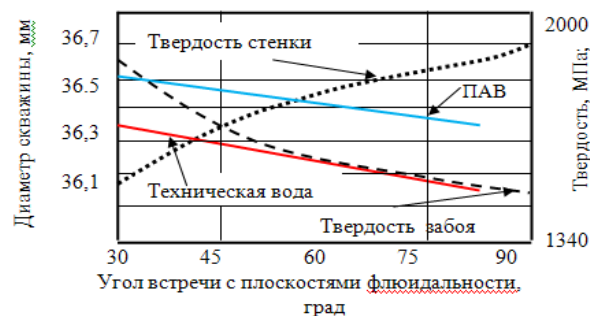


Рис. 9. Зависимость диаметров скважины от угла встречи с плоскостями флюидальности туфодацита при бурении водой с ПАВ и технической водой

Fig. 9. *Dependence of borehole diameters on the angle of meeting with the fluidity planes of tuffodacite when drilling with water with a surfactant and process water*

Причины представленной особенности формирования ствола буримой скважины в анизотропной породе состоят в следующем. При малых углах встречи инструмента со слоистостью (γ) боковые резцы инструмента взаимодействуют со стенками скважины под углом, который определяется как $\gamma_6 = (90^\circ - \gamma)$. В данном случае угол встречи γ будет меньше угла γ_6 . Таким образом, в направлении фрезерования боковыми резцами инструмента под действием возникающей дестабилизирующей силы твердость породы окажется существенно меньше, чем твердость породы на забое. Именно поэтому процессы разрушения стенки ствола скважины будут более интенсивными.

Другая картина прослеживается, когда угол встречи инструмента со слоистостью или сланцеватостью растет. В этом случае угол встречи боковых резцов ПРИ со стенками скважины уменьшается, а твердость породы стенок скважины становится выше. В таких условиях работы породоразрушающего инструмента на забое разработанность ствола скважины будет значительно меньше.

Для подтверждения указанного приведем данные, полученные в ходе описанного эксперимента. Твердость туфодацита при $\gamma=90^\circ$ составляет 1340 МПа, а при $\gamma=0^\circ$ – 2000 МПа. При $\gamma=30^\circ$ твердость забоя равна 1800 МПа, а твердость стенки при этом – 1540 МПа. Когда угол встречи γ равен 70° твердость забоя – 1400 МПа, а стенки уже выше – 1900 МПа. Если угол встречи дойдет до 90° , твердость забоя составит 1340 МПа, а стенок – 2000 МПа.

Проведенный выше анализ показал, что при бурении в условиях анизотропных пород рационально использование породоразрушающего инструмента, конструкция которого позволяет обеспечивать высокие значения механической скорости бурения при небольших значениях осевой нагрузки.

Для снижения осевой нагрузки без снижения механической скорости бурения можно предложить применение технологических мер интенсификации процесса разрушения, например, использование промывочных жидкостей с добавлением ПАВ или применение инструментов, обеспечивающих гидродинамическую интенсификацию процесса удаления шлама и активного воздействия на зону предразрушения.

Снижение естественного искривления скважин осуществляется не только за счет повышения механической скорости бурения без изменения осевой нагрузки, но и в значительной степени за счет активного воздействия жидкости на зону предразрушения. Трещины, образовавшиеся в зоне предразрушения, обычно развиваются в направлении сланцеватости или другого проявления флюидоидальности в сторону наибольшей твердости и упругости разрушаемой породы (рис. 10). Как правило, в этом же направлении ориентированы трещиноватость и пористость породы. Поэтому возможное проникновение промывочной жидкости либо за счет содержания ПАВ, либо под напором в образовавшиеся в зоне предразрушения трещины гарантирует понижение коэффициента анизотропии породы. Это осуществляется за счет значительного снижения твердости и упругости забоя в направлении именно флюидоидальности.

Проникновение промывочной жидкости в разрушаемую породу по трещинам приводит к выравниванию асимметрии ядра сжатия породы. А данное явление характеризуется снижением опрокидывающего момента и дестабилизирующего усилия, что способствует снижению естественного искривления траектории движения скважины.

В результате исследования фильтрационных свойств экспериментального туфодацита установлено, что промывочная жидкость с содержанием ПАВ имеет большую проникающую способность. Эта величина в 1,27 раз больше, чем при бурении с технической

водой. При этом в направлении, близком к направлению вдоль плоскостей флюидальности горной породы, фильтрация жидкости, содержащей ПАВ, происходит интенсивнее в 1,4 раза.

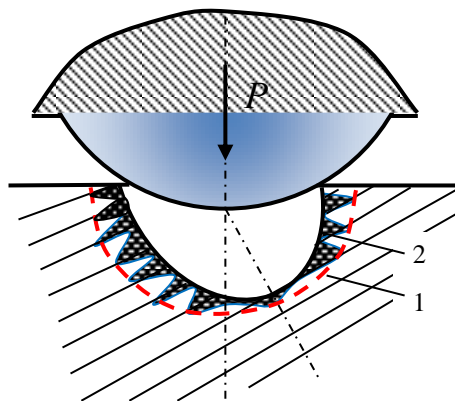


Рис. 10. Схема формирования зоны предразрушения в анизотропной породе: 1 – границы ядра сжатия в породе; 2 – зона предразрушения

Fig. 10. Scheme of formation of the pre-fracture zone in anisotropic rock: 1 – the boundaries of the compression core in the rock; 2 – pre-fracture zone

Таким образом, можно отметить, казалось бы, неожиданный положительный фактор встречи в процессе бурения скважин с породами, отличающимися явно выраженной анизотропностью. Анализируя анизотропные свойства таких горных пород, появляется возможность осуществить корректировку интенсивности естественного искривления и направления траектории движения скважины. Добиться необходимого результата можно путем изменения концентрации ПАВ в промывочной жидкости или за счет активного гидравлического воздействия очистного агента на разрушаемый пласт.

Выводы

1. Бурение анизотропных горных пород характеризуется неодинаковостью механической скорости бурения в различных направлениях относительно плоскостей слоистости.
2. Режим усталостно-поверхностного разрушения и зашламования забоя характеризуются высокими значениями показателя анизотропии и сопровождаются высокими показателями искривления.
3. Понижения показателя анизотропии породы можно добиться путем применения промывочных жидкостей с содержанием ПАВ.
4. Скорость фрезерования v_f стенки скважины увеличивается при росте угла встречи γ с породой в области стенки скважины и по мере уменьшения угла встречи γ на забое.
5. Использование при бурении скважин промывочного агента с добавлением ПАВ в совокупности с высокой механической скоростью бурения снижает величину соотношения скорости фрезерования стенок скважины и углубления забоя.

6. Активное воздействие промывочной жидкости с добавками ПАВ на зону предразрушения горной породы стремится устранить неравномерность по-

ражения забоя, что объясняется уменьшением прочностных характеристик анизотропной породы вдоль плоскостей слоистости или сланцеватости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривошеев В.В., Ларин А.А., Нейштегер И.А. Некоторые закономерности искривления скважин при различных углах встречи плоскости сланцеватости. Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые // Выпуск 22: Межвузовский научный тематический сборник. – Екатеринбург: Изд-во Уральской государственной горно-геологической академии, 1999. – С. 174–183.
2. Ларин А.А. Исследование процесса взаимодействия алмазного породоразрушающего инструмента с анизотропной горной породой с целью выявления закономерностей естественного искривления скважин: дис. ... канд. наук. – Томск, 2000. – 192 с.
3. Нескоромных В.В. Искривление скважин в анизотропных горных породах. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. – 199 с.
4. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных горных породах / В.В. Нескоромных, П.Г. Петенёв, А.Л. Неверов, П.С. Пушмин, Г.Р. Романов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 326. – № 4. – С. 30–40.
5. Пушмин П.С. Обоснование модели алмазной коронки на основе исследования механики разрушения твердых анизотропных пород: дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2006. – 131 с.
6. Кривошеев В.В. Закономерности искривления и управление траекторией трасс скважин в анизотропных породах // Обзор ВИЭМС. – 1991. – Вып. 9. – 44 с.
7. Borehole stability analysis: a new model considering the effects of anisotropic permeability in bedding formation based on poroelastic theory / L. Ding, Z. Wang, B. Liu, J. Lv // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2019. – V. 69. – P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102932> (дата обращения 03.03.2020).
8. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – V. 37 (13). – P. 1913–1929.
9. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – V. 39 (1). – P. 41–58.
10. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
11. Нескоромных В.В. Направленное бурение и основы кернометрии. 2-е изд. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 327 с.
12. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks / D.-P. Do, N.-H. Tran, H.-L. Dang, D. Hoxha // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 113. – P. 11–23.
13. Bobet A. Lined circular tunnels in elastic transversely anisotropic rock at depth // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2011. – V. 44 (2). – P. 149–167.
14. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2002. – V. 35 (3). – P. 141–160.
15. Алиев М.М., Исмаилова З.Ф., Ульшина К.Ф. Определение прочностных характеристик анизотропных пород при сдвиге по результатам трехосного сжатия // Нефтепромышленное дело. – 2016. – № 9. – С. 25–28. URL: <https://rucont.ru/efd/472642> (дата обращения 28.02.2020).
16. Кривошеев В.В. Искривление скважин в анизотропных породах. – Томск: НТЛ, 1999. – 240 с.
17. Евсеев В.Д., Мавлютов М.Р. Пути повышения эффективности разрушения горных пород // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск, 2000. – Т. I. – С. 463–468.
18. Механико-математическое и экспериментальное моделирование устойчивости скважин в анизотропных геосредах / Д.М. Климов, В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко, К.Б. Устинов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2013. – № 4. – С. 4–12.
19. Fracture pressure model for inclined wells in layered formations with anisotropic rock strengths / T. Ma, Q.B. Zhang, P. Chen, C. Yang, J. Zhao // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 149. – P. 393–408.
20. Houali A., Tiab D. Analysis of interference testing of horizontal wells in an anisotropic medium // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, APOGCE SPE 88537. – Perth, Australia, 2004. – P. 725–734.
21. Лесин В.С., Рычков Е.И. Исследование трения в анизотропных горных породах // Проблемы геологии и освоения недр: Сборник конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 346–347.
22. Зиненко В.П. Направленное бурение. – М.: Недра, 1990. – 152 с.
23. Seismic anisotropy in mid to lower orogenic crust: Insights from laboratory measurements of Vp and Vs in drill core from central Scandinavian Caledonides / Q.C. Wenning, B.S.G. Almqvist, P. Hedin, A. Zappone // Tectonophysics 692. – 2016. – V. 12/5 – P. 14–28.

Поступила 04.09.2020 г.

Информация об авторах

Нескоромных В.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Пушмин П.С., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета.

Попова М.С., кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

UDC 622.24.051.64

INFLUENCE OF SURFACES ON BORING OF WELLS WHILE DRILLING IN ANISOTROPIC ROCKS

Vyacheslav V. Neskoromnykh¹,
sovair@bk.ru

Pavel S. Pushmin²,
dog-eat-dog-79@mail.ru

Marina S. Popova¹,
alleniram83@mail.ru

¹ Siberian Federal University,
95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

² Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov avenue, Irkutsk, 664074, Russia.

Relevance. Deviation from the design trajectory of wells leads to failure to fulfill the drilling task. The main geological conditions affecting the curvature of the well include stratification, shale, fluidity, fracturing, porosity, intermittency of rock layers of different hardness, crushing zones, faults, voids, and solid inclusions. A significant part of the rocks drilled are anisotropic. The rock anisotropy index for drillability characterizes the degree of influence of the sum of factors on the natural curvature of wells. These factors primarily include the type of tool and the parameters of the drilling mode. The struggle with natural curvature often causes technical difficulties and is associated with a large investment of time. In this regard, it is relevant to study the features of drilling under conditions of rock anisotropy and to consider the possibilities of influencing the curvature of wells with increased fluidity.

The aim of the research is to determine the possible effect on the natural curvature of wells when drilling in anisotropic rocks.

Object: anisotropic rock destruction mechanism.

Methods: experiment, analytical studies, analysis.

Results. The decrease in anisotropy during drilling is actively influenced by flushing fluid with a surfactant on the rock prefraction zone. Such an effect tends to eliminate the unevenness of the face damage when the tool cutters move towards and after the fluidity planes, which is explained by a more intensive decrease in the strength characteristics of anisotropic rock precisely in the direction along the fluidity planes. The use of a flushing agent with the addition of a surfactant makes it possible to reduce the ratio of the rate of milling the rock in the wall of the well and the deepening of the bottom in combination with a high mechanical drilling speed under certain conditions. This circumstance is associated with the possibility of active penetration into the cracks of the prefraction zone of the washing agent with a surfactant.

Key words:

Anisotropy, curvature of wells, surfactants, milling ability, drilling tool, fluidity, fracture mechanism, prefraction zone.

REFERENCES

1. Krivosheev V.V., Larin A.A., Neishteger I.A. Nekotorye zakonomernosti iskrivleniya skvazhin pri razlichnykh uglakh vstrechi ploskosti slantsevatosti. Sovershenstvovanie tekhniki i tekhnologii bureniia skvazhin na tverdye poleznye iskopaemye [Some patterns of well curvature at various angles of confrontation of the shale plane. Improving the technique and technology of drilling wells for solid minerals]. *Mezhvuzovskiy nauchnyy tematicheskiy Sbornik* [Interuniversity Scientific Technical and Mathematical Collection]. Yekaterinburg, Ural State Mining and Geological Academy Publ., 1999. Vol. 22, pp. 174–183.
2. Larin A.A. Issledovanie protsessov vzaimodeystviyaalmaznogo porodorazrushayushchego instrumenta s anizotropnoy gornoy porodoys tseluyu vyyavleniya zakonomernostey estestvennogo iskrivleniya skvazhin. Diss. Kand. nauk [Investigation of interaction of diamond rock cutting tools with anisotropic rock in order to identify patterns of natural curvature of wells. Cand. Diss.]. Tomsk, 2000. 192 p.
3. Neskoromnykh V.V. Iskrivlenie skvazhin v anizotropnykh gornykh porodakh [Well curvature in anisotropic rocks]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2017. 199 p.
4. Neskoromnykh V.V., Petenev P.G., Neverov A.L., Pushmin P.S., Romanov G.R. Development and experimental studies of the features of the diamond core for drilling in solid anisotropic rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 326, no. 4, pp. 30–40. In Rus.
5. Pushmin P.S. Obosnovaniye modeli almaznoy koronki na osnove issledovaniya mekhaniki razrusheniya tverdykh anizotropnykh porod. Diss. Kand. nauk [Justification of the model of a diamond crown based on a study of the mechanics of fracture of solid anisotropic rocks. Cand. Diss.]. Irkutsk, 2006. 131 p.
6. Krivosheev V.V. Zakonomernosti iskrivleniya i upravlenie traektoriy trass skvazhin v anizotropnykh porodakh [Patterns of curvature and control of the trajectory of well paths in anisotropic rocks]. *VIEMS Review*, 1991, vol. 9, 44 p.
7. Ding L., Wang Z., Liu B., Lv J. Borehole stability analysis: a new model considering the effects of anisotropic permeability in bedding formation based on poroelastic theory. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, vol. 69, pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102932> (accessed 3 March 2020).
8. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, vol. 37 (13), pp. 1913–1929.
9. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
10. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
11. Neskoromniy V.V. *Napravlennoe bureniya i osnovy kernometrii* [Directional Drilling and Core Measurement]. Moscow, INFRA-M Publ.; Krasnoyarsk, SFU Publ., 2015. 327 p.
12. Do D.-P., Tran N.-H., Dang H.-L., Hoxha D. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 113, pp. 11–23.

13. Bobet A. Lined circular tunnels in elastic transversely anisotropic rock at depth. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, vol. 44, no. 2, pp. 149–167.
14. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, vol. 35, no. 3, pp. 141–160.
15. Aliev M.M., Ismagilova Z.F., Ulshina K.F. Determination of the strength characteristics of anisotropic rocks during shear according to the results of triaxial compression. *Oilfield Engineering*, 2016, no. 9, pp. 25–28. In Rus. Available at: <https://rucont.ru/efd/472642> (accessed 28 February 2020).
16. Krivosheev V.V. *Iskrivlenie skvazhin v anizotropnykh porodakh* [Well curvature in anisotropic rocks]. Tomsk, NTL Publ., 1999. 240 p.
17. Evseev V.D., Mavlyutov M.R. Puti povysheniya effektivnosti razrusheniya gornykh porod [Ways to increase the efficiency of rock destruction]. *Materialy regionalnoy konferentsii geologov Sibiri, Dalnego Vostoka i Severo-Vostoka Rossii* [Materials of the regional conference of geologists of Siberia, the Far East and North-East of Russia]. Tomsk, 2000, Vol. I, pp. 463–468.
18. Klimov D.M., Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B. Mechano-mathematical and experimental modeling of well stability in anisotropic geomed. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of solid*, 2013, no. 4, pp. 4–12. In Rus.
19. Ma T., Zhang Q.B., Chen P., Yang C., Zhao J. Fracture pressure model for inclined wells in layered formations with anisotropic rock strengths. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 149, pp. 393–408.
20. Houali A., Tiab D. Analysis of interference testing of horizontal wells in an anisotropic medium. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, APOGCE SPE 88537*. Perth, Australia, 2004. pp. 725–734.
21. Lesin V.S., Rychkov E.I. *Issledovanie treniya v anizotropnykh gornykh porodakh* [The study of friction in anisotropic rocks]. *Sbornik konferentsii. Problemy geologii i osvoeniya nedr* [Conference Collection. Problems of Geology and Subsurface Development]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2014. pp. 346–347.
22. Zinenko V.P. *Napravlennoe burenie* [Directional drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 152 p.
23. Wenning Q.C., Almquist B.S.G., Hedin P., Zappone A. Seismic anisotropy in mid to lower orogenic crust: Insights from laboratory measurements of V_p and V_s in drill core from central Scandinavian Caledonides. *Tectonophysics* 692, 2016, vol. 12/5 pp. 14–28.

Received: 4 September 2020.

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskoromnykh, Dr. Sc., professor, head of the department of technology and equipment of investigation, Siberian Federal University.

Pavel S. Pushmin, Cand. Sc., associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

Marina S. Popova, Cand. Sc., senior teacher, Siberian Federal University.

УДК 552 (571.5)

ЛИТОЛОГИЯ И КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА ДОКЕМБРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЛЕНО-АНАБАРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ОБЛАСТИ

Вараксина Ирина Валерьевна¹,
varaksinaIV@ipgg.sbras.ru

Шаваров Роман Дмитриевич²,
shavarov_rd@irkutskoil.ru

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

² ООО «Иркутская нефтяная компания», Россия, 664007, г. Иркутск, пр. Большой Литейный, 4.

Актуальность исследования. В настоящее время одним из приоритетных направлений в расширении углеводородной базы России стало исследование и освоение её северных окраин. Лено-Анабарская нефтегазоносная область располагается на севере Сибирской платформы и характеризуется очень неравномерной геолого-геофизической изученностью. Наиболее слабо изучены докембрийские отложения, несмотря на их достаточно высокий коллекторский потенциал, а также прямые и косвенные признаки нефтегазоносности. Для более эффективного проведения дальнейших геологоразведочных работ в этом регионе необходимо детальное изучение пробуренных ранее разрезов с выявлением литологических особенностей пород-коллекторов, условий их формирования и распространения.

Объект: отложения докембрия, вскрытые глубоким бурением на территории Лено-Анабарской нефтегазоносной области.

Цель: на основе анализа состава, строения, обстановок осадконакопления и коллекторских свойств докембрийских отложений Лено-Анабарской нефтегазоносной области выделить перспективные резервуары углеводородов.

Методы: построение разрезов докембрийских отложений на основе детального макро- и микроскопического изучения кернового материала и данных ГИС; корреляция разрезов с учетом литологических, палеонтологических и геофизических данных; генетический анализ основных литологических типов пород и расшифровка условий их седиментации; оценка влияния седиментационных и постседиментационных факторов на формирование коллекторских свойств; выделение уровней потенциальных коллекторов.

Результаты. Установлено, что докембрийский разрез представлен чередованием пачек карбонатных и терригенных пород, накопление которых происходило в широком спектре обстановок: от дельтовых до сублиторальных при существенном преобладании мелководно-морской седиментации. Выявлено, что в отложениях докембрия присутствуют потенциальные породы-коллекторы, причем наиболее перспективные уровни приурочены к вендской части разреза.

Ключевые слова:

Лено-Анабарская нефтегазоносная область, литология, коллекторы, верхний рифей, венд.

Введение

Начало интенсивного исследования Лено-Анабарской нефтегазоносной области (НГО) приходится на 50–70-е гг. XX в. В этот период был выполнен большой объем геолого-геофизических работ и пробурено несколько неглубоких скважин. В результате чего стало возможным обоснование высоких перспектив нефтегазоносности района [1, 2]. С 80–90-х гг. была отработана сеть сейсмических профилей и пробурена серия параметрических скважин, вскрывших глубокие горизонты осадочного чехла, в которых были отмечены многочисленные битумо-, нефте- и газопоявления, а также получены интенсивные притоки пластовых вод с растворенным углеводородным газом. Несмотря на отсутствие выявленных залежей, многие исследователи считают, что исследуемый район обладает хорошим нефтегазовым потенциалом [3–8 и др.]. В пользу этого свидетельствуют промышленные притоки нефти в расположенной западнее Хатангской седловине, а также наличие Оленекского битумного поля в юго-восточном обрамлении Лено-Анабарской НГО [9, 10]. Однако в виду низкой изученности рассматриваемой территории глубоким бу-

рением (всего шесть скважин) возникает необходимость более детального литологического изучения этих разрезов, направленного на выявление потенциальных резервуаров углеводородов. Результаты этих исследований приведены ниже и основаны на анализе кернового материала, отобранного сотрудниками Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Геологическая позиция и стратиграфия района исследования

Лено-Анабарская нефтегазоносная область занимает территорию Лено-Анабарского регионального прогиба, располагающегося в северной части Сибирской платформы, и входит в состав Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции (рис. 1) [4, 5, 8]. Осадочный чехол Лено-Анабарской НГО сложен верхнепротерозойскими, палеозойскими и мезозойскими отложениями, мощностью до 2–9 км, среди которых рифей-вендские породы занимают значительный объем. Объектом исследования стали отложения докембрия, вскрытые глубокими скважинами Чарчикская-1 и Хазахская-930 в центральной части НГО, а также скважиной Бурская-3410, расположенной на её юж-

ной окраине (рис. 1). Для Анабаро-Ленского прогиба характерно несовпадение рифейского и венд-палеозойского структурных планов, что обусловлено байкальским тектоногенезом [4, 7, 8]. Состав и толщина верхнерифейского комплекса в рассматриваемых разрезах достаточно выдержанные. Это свиде-

тельствует о тектонически-спокойных условиях и слабой дислоцированности территории во время его формирования. Вендские отложения отличаются более изменчивым составом и строением, что предполагает более расчлененный рельеф области седиментации.



Рис. 1. Обзорная карта расположения Лено-Анабарской НГО на основе нефтегазогеологического районирования [5].
Условные обозначения: 1 – границы нефтегазоносных провинций; 2 – границы нефтегазоносных областей; 3 – нефтегазоносные провинции (НГО): I – Лено-Тунгусская, II – Лено-Вилуйская, III – Лаптевская; 4 – скважины

Fig. 1. Overview map of the location of the Leno-Anabar oil-and-gas region based on petroleum geological zonation [5].
Legend: 1 – borders of petroleum provinces; 2 – borders of oil-and-gas regions; 3 – petroleum provinces (NGP): I – Leno-Tunguska, II – Leno-Vilyui, III – Laptev; 4 – wells

Относительно стратиграфического расчленения верхнепротерозойских отложений, вскрытых рассматриваемыми скважинами, существуют разные точки зрения. На первоначальном этапе изучения за основу была взята стратиграфическая схема Оленекского поднятия, согласно которой в этих разрезах были выделены все литостратиграфические подразделения с нижнего рифея до венда [11–13]. Эта схема достаточно популярна среди исследователей и в настоящее время [4, 7, 14]. Однако последние палеонтологические и сейсмостратиграфические данные достаточно убедительно свидетельствуют об отсутствии нижне-среднерифейских отложений в скважинах Лено-Анабарского прогиба [8, 15]. Поэтому в данной работе авторы опирались на новый вариант расчленения и корреляции [15], согласно которому наиболее полный разрез, вскрытый скважиной Бурская-3410, сложен тукуланской, куладинской, хазахской, таймыльской свитами верхнего рифея и двумя сериями венда: хорбусуонской и кессюсинской (рис. 2).

Литологическая характеристика рифейского разреза

В основании верхнерифейского разреза залегает тукуланская свита, подразделяющаяся на две под-свиты: нижнюю терригенную и верхнюю карбонатную (рис. 3). В скважине Бурская-3410 она представлена практически в полном объеме (вскрытая мощность 348 м). В нижней подсвите доминируют зеле-

новато-серые аргиллиты, субгоризонтально-слоистые, реже косослоистые за счет тонких (от 5 до 20 мм) слоев алевролитов и мелкозернистых песчаников. Периодически фиксируются очень тонкие (5–10 мм) прослои глинистых доломитов. Верхняя подсвита, вскрытая также скв. Хазахская-930, полностью сложена доломитами светло-серыми с зеленоватым или коричневым оттенками, сильно перекристаллизованными до полной утраты первичной структуры, трещиноватыми, кавернозными. В кровле появляются прослои серых аргиллитов.

Вышележащая куладинская свита, несмотря на меньшую мощность (172–270 м), характеризуется аналогичным двучленным строением. Нижняя подсвита представлена переслаиванием аргиллитов тонкослоистых алевролитистых, глинистых доломитов, известняков и песчаников. В южном разрезе (скв. Бурская-3410) преобладают песчаные породы. Песчаники буровато-серые мелко- и мелко-среднезернистые с однородно-массивной текстурой, изредка с тонкой горизонтальной и косой слоистостью за счет микрослоев темных аргиллитов. По составу в основном полевошпатово-литокластово-кварцевые с глинисто-кварцевым, железисто-карбонатным, реже регенерационным кварцевым цементом. В центральной части НГО (скв. Хазахская-930) доминируют глинистые породы. Аргиллиты темно-зеленовато-серые тонкогоризонтально-слои-

стые, часто алевролитистые, в разной степени карбонатизированные. Наблюдается повсеместное возрастание содержания карбонатной составляющей в верх по разрезу. *Верхняя подсвита* почти полностью состоит из карбонатных пород с редкими прослоями в нижней и верхних частях известковых аргиллитов. Карбонат-

ная часть представлена доломитами светло-серыми, иногда известковистыми, кремнистыми и слабо глинистыми, с реликтами зернистой и строматолитовой структур. Породы часто трещиновато-кавернозные, участками сильно кавернозные с примазками битуминозного вещества на стенках каверн.

Система	Серия	Лено-Анабарский бассейн			Оленекское поднятие
		Хастахская-930	Чарчкская-1	Бурская-3410	р.Хорбусуонка
Кембрий	Кессюсинская	Чускунская свита			Чускунская свита
		?			
		Маттайская свита	Маттайская свита	Маттайская свита	Маттайская свита
		?	?	?	
Венд	Хорбусуонская	Оппокунская свита	Оппокунская свита	Сыаргалахская свита	Сыаргалахская свита
					Тас-Юрхский вулканический комплекс
		?	?		Сыаргалахская свита
		Туркутская свита	Туркутская свита	Туркутская свита	Туркутская свита
Рифей			Карбонатно-глинистая толща	Карбонатно-глинистая толща	Хатыспытская свита
				Маастахская свита	Маастахская свита
				Таймыльрская свита	
		Хастахская свита		?	
		?		Хастахская свита	
		Куладинская свита		Куладинская свита	
		?		?	
		Тукуланская свита		Тукуланская свита	
				?	
					Хайпахская свита

Рис. 2. Стратиграфическая схема неопротерозойских отложений Лено-Анабарского бассейна и прилегающего северо-западного склона Оленекского поднятия [15]

Fig. 2. Stratigraphic scheme of the Neoproterozoic deposits of Lena-Anabar Basin and the adjacent north-western slope of Olenek uplift [15]

Хастахская свита в отличие от нижележащих имеет относительно выдержанный состав. Кровля свиты в скв. Хастахская-930 размыта, но, учитывая сходство с южным разрезом, можно предположить, что её мощность не превышала 400 м. Свита выделяется более пестроцветной окраской и сложена пере-слаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов. В центральной части НГО в целом преобладают песчаные породы, причем разномзернистые, плохо сортированные, часто с примесью гравийного материала. На юге (скв. Бурская-3410) наблюдается уменьшение количества и мощности песчаных прослоев, а также доминирование более мелкозернистых разновидностей. По составу песчаники кварцевые, полевошпатово-кварцевые и полевошпатово-литокластово-кварцевые с глинистым, железисто-глинистым, карбонатно-глинистым и реже регенерационным кварцевым цементом. Характерно развитие различных ти-

пов слоистости: субгоризонтальной, косой, линзовидной, волнистой и флазерной. Алевролиты часто глинистые, нередко с тонкими горизонтальными и косыми слоями мелкозернистых песчаников. В нижней части свиты алевролиты линзовидно- и волнистослоистые, иногда со знаками ряби волнения. Аргиллиты в основном алевролитистые, иногда доломитистые, с тонкой горизонтальной, реже линзовидной слоистостью, с редкими слоями мелкозернистых песчаников. В обоих разрезах присутствуют редкие прослои зеленовато-серых доломитов.

Завершает рифейский разрез *таймыльрская свита*, сохранившаяся на юго-западе рассматриваемой территории (скв. Бурская-3410), вскрытая мощность которой 370 м. Прикровельная часть разреза пройдена без выноса керна, однако, судя по каротажу, верхняя граница свиты несогласная, что предполагает её частичный размыв в предвендское время. Вскрытые

отложения представлены серыми доломитами, прослоями с многочисленными волнистыми слоями зеленовато-серых аргиллитов. Наблюдается переслаивание строматолитовых и зернистых (сгустково-

комковатых, оолито-пизолитовых и интракластических) разновидностей. Участками породы окремненные, битуминозные, местами трещиноватые и кавернозные.

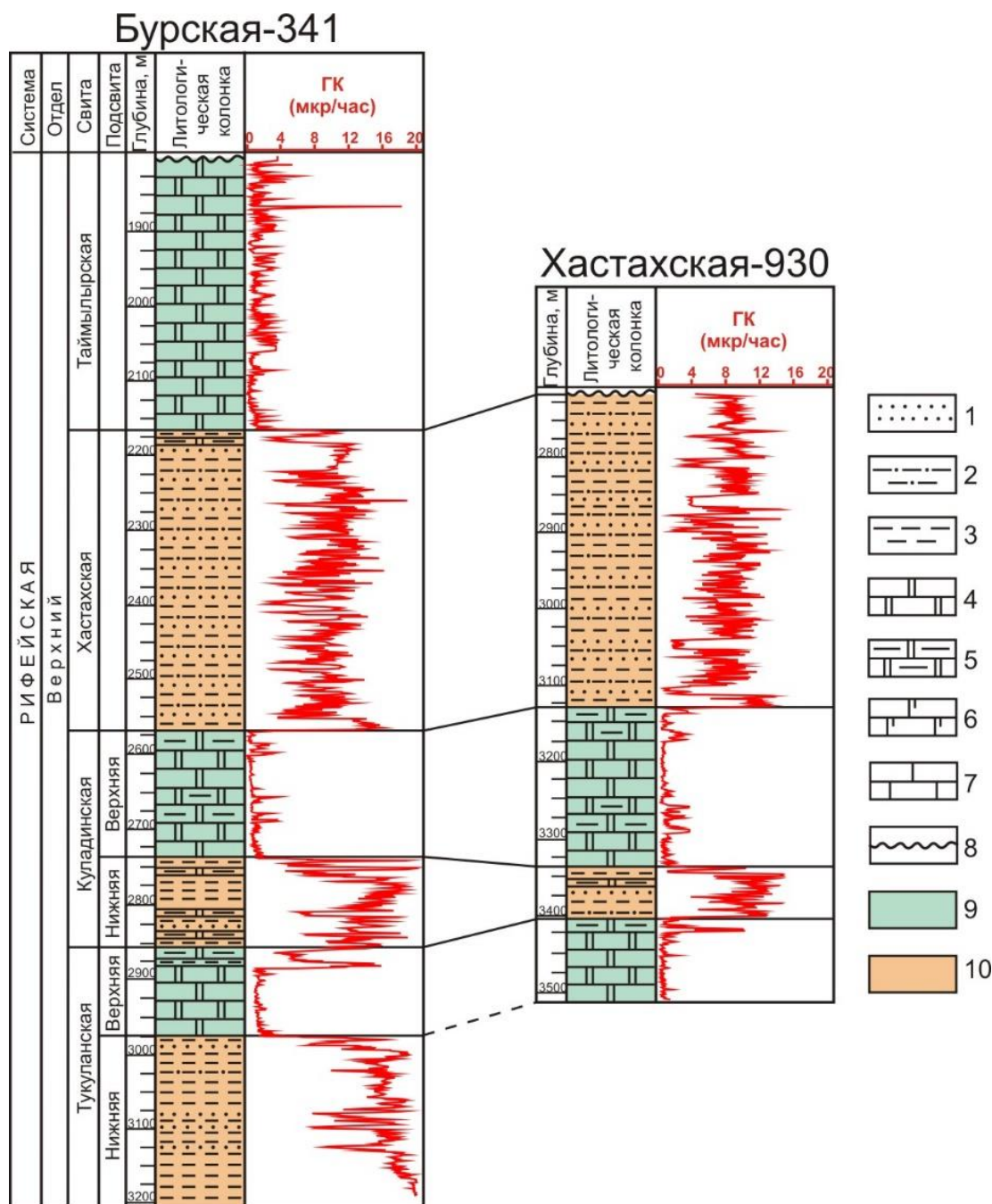


Рис. 3. Литолого-стратиграфическое расчленение и корреляция рифейских отложений. Условные обозначения: 1–7 – породы: 1 – песчаники, 2 – алевролиты, 3 – аргиллиты, 4 – доломиты, 5 – доломиты глинистые, 6 – доломиты известковые и известняки доломитовые, 7 – известняки; 8 – стратиграфический перерыв; 9, 10 – литологические комплексы: 9 – карбонатные, 10 – терригенные

Fig. 3. Lithologic-stratigraphic division and correlation of Riphean deposits. Legend: 1–7 – rocks: 1 – sandstone, 2 – siltstone, 3 – argillite, 4 – dolostone, 5 – shaly dolostone, 6 – calcareous dolostone and dolomite limestones, 7 – limestone; 8 – stratigraphic interruption; 9, 10 – lithologic complexes: 9 – carbonate, 10 – terrigenous

Литологическая характеристика вендского разреза

Венд представлен двумя сериями (рис. 4). Нижняя хорбузонская серия подразделяется на три свиты. В основании залегает маастакская свита, выделен-

ная в скв. Бурская-3410, мощностью 60 м, сложенная бурыми и зеленовато-серыми алевролитами, алевропесчаниками и песчаниками. Песчаники средне-мелкозернистые плохо сортированные, полевошпато-

во-литокластово-кварцевые с карбонатно-железистым цементом. Породы горизонтально- и косослоистые. В разрезах центральной части НГО свита отсутствует вследствие размыва, который также частично уничтожил её отложения на юге.

Выше с перерывом залегает *карбонатно-глинистая толща*, вскрытая в скважинах Бурская-3410 (220 м) и Чарчикская-1 (110 м), являющаяся стратиграфическим аналогом хатыспытской свиты (рис. 2), выделенной на северо-западном склоне Оленекского поднятия в бассейне р. Хорбусуонка [15, 16]. В составе толщи наблюдается переслаивание темно-серых доломитов, доломитизированных известняков и зеленовато-серых доломитово-известковых аргиллитов. Карбонатная часть в южном разрезе представлена преимущественно доломитами, а севернее (скв. Чарчикская-1) преобладают известняки.

Верхняя *туркутская свита* представлена во всех разрезах и характеризуется изменчивой мощностью, но относительно выдержанным составом. Наблюдается сокращение мощности в западном и южном направлениях от 207 м (скв. Чарчикская-1) до 118 м (скв. Хастахская-930) и 160 м (скв. Бурская-3410).

Свита сложена серыми доломитами в разной степени известковистыми и известняками доломитизированными. Наблюдается переслаивание строматолитовых, микрофолитовых, микритовых и зернистых (с комками и интракластами) литотипов. В породах фиксируются многочисленные стилолиты, по которым развивается битуминозное вещество, а также трещины и каверны выщелачивания. В наиболее мощном разрезе (скв. Чарчикская-1) в подошве залегают чёрные битуминозные, кавернозные известняки. Отдельные каверны достигают 25 см. На свежем сколе в керне фиксируется характерный запах УВ.

Кессюсинская серия имеет двучленное строение. В центральной части НГО в её основании залегает существенно глинистая *оппокунская свита* (мощностью 190–290 м), в составе которой доминируют пестроцветные аргиллиты. Породы горизонтально, волнисто и косослоистые, часто известковистые, с прослоями известняков, находятся в тонком переслаивании с алевролитами и песчаниками. В южном разрезе оппокунской свиты стратиграфически соответствует преимущественно песчаная *сыаргалахская свита*, мощность которой значительно меньше (30 м).

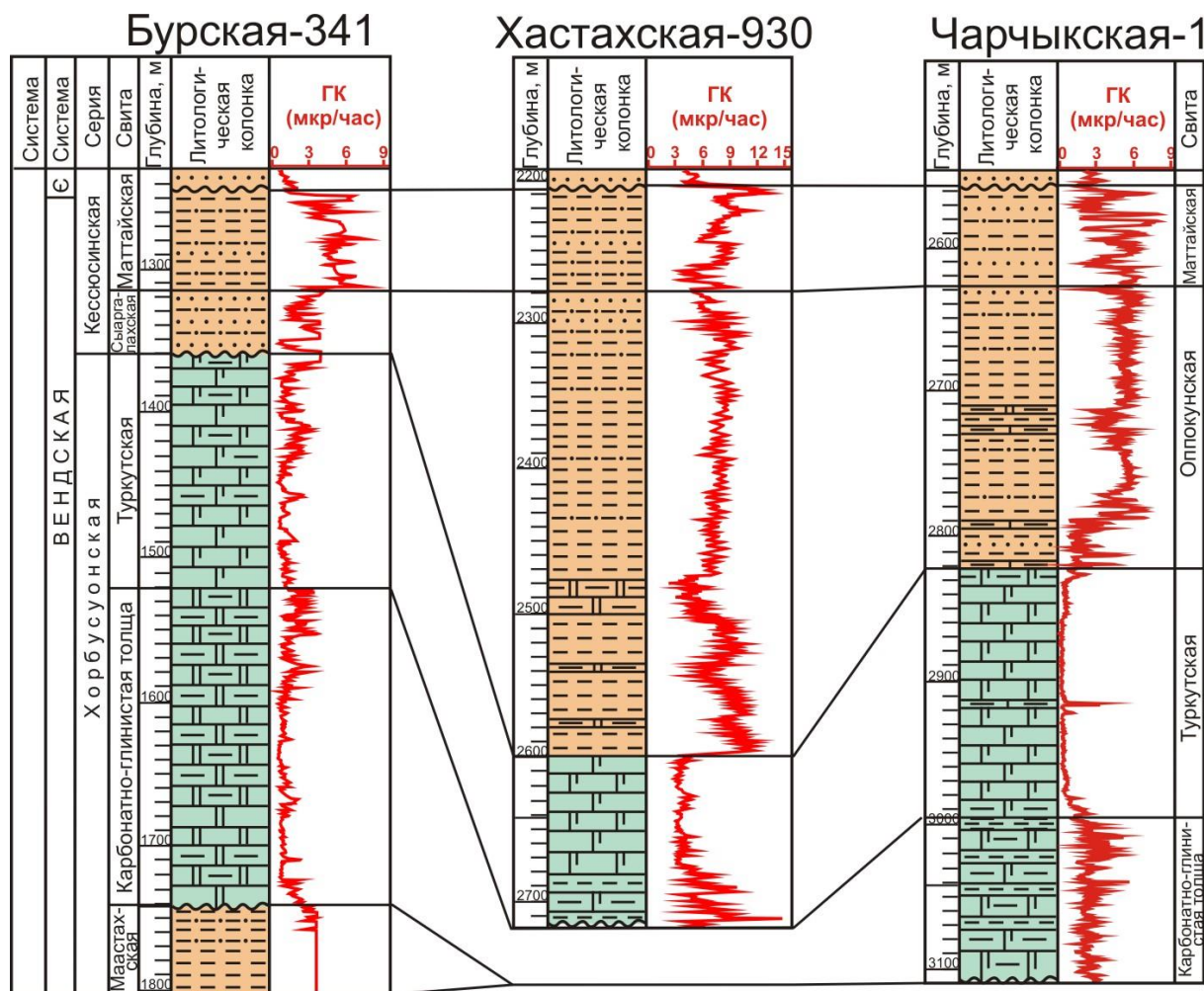


Рис. 4. Литолого-стратиграфическое расчленение и корреляция вендских отложений. Условные обозначения – на рис. 3

Fig. 4. Lithologic-stratigraphic division and correlation of the Vendian deposits. Symbols see in Fig. 3

Завершается серия *маттайской свитой* (мощностью 70–75 м), возраст которой оценивается как венд-нижнекембрийский. Свита сложена переслаиванием зеленовато-серых и бурых алевролитов и аргиллитов, зеленовато-серых мелкозернистых и средне-крупнозернистых плохо сортированных песчаников. Породы часто известковистые, горизонтально и косо-слоистые, участками биотурбированные. Песчаники плохо сортированные, прослоями гравелитистые, нередко с интракластами аргиллитов, по составу литокластово-кварцевые с карбонатно-кварцевым и железисто-карбонатным цементами.

Обстановки седиментации

Анализ состава пород и их структурно-текстурных характеристик позволил реконструировать обстановки осадконакопления, существовавшие на территории исследования в позднерифейское и вендское время.

На протяжении всего позднего рифея седиментация происходила главным образом в относительно мелководных обстановках, но её характер неоднократно менялся, что отразилось в чередовании комплексов с доминированием терригенных или карбонатных пород. Формирование тукуланской свиты, имеющей двучленное строение, на раннем этапе происходило в относительной глубоководной части сублиторали открытого шельфа, где накапливались глинистые отложения. На позднем этапе привнос глинистого материала в бассейн значительно уменьшился, и на открытом низкоэнергетическом шельфе стали отлагаться преимущественно карбонатные осадки. В начале накопления куландинской свиты на фоне усиления терригенного стока и постепенного углубления шельфа произошел переход к карбонатно-глинистой седиментации. Последующее понижение уровня моря привело к восстановлению карбонатного режима осадконакопления. Верхнекуландинская подсвита характеризуется развитием оолитово-интракластических баровых комплексов и строматолитовых покровов литоральной зоны карбонатного шельфа. Во время формирования хаастахской свиты в результате очередной активизации сноса кластического материала стали доминировать терригенные фации распределительных каналов дельт, приливно-отливных баровых протоков и песчаных баров. В таймыльское время режим карбонатной седиментации возобновляется, и на шельфе накапливаются строматолитовые ламиниты и оолитопизолито-интракластические отложения, соответствующие приливно-отливной обстановке. В конце рифея территория подверглась осушению и эрозии, глубина которой в центральной части Лено-Анабарской НГО (скв. Хаастахская-930) была больше, чем на юге (скв. Бурская-3410).

В раннем венде в результате наступления моря в районе исследования устанавливаются прибрежно-морские обстановки, в которых накапливаются алевро-песчаные отложения маастахской свиты. Отсутствие свиты в центральных разрезах НГО объясняется наличием крупного регионального внутривендского перерыва, после которого сформировалась карбонатно-глинистая толща. Преобладание в её составе

пород глинистых известняков и характерные осадочные текстуры указывают на формирование отложений в обстановках, относительно удаленных от береговой линии и приближенных к области глубокого шельфа, наличие которой предполагается на северо-востоке [7, 17]. В туркутское время наблюдается обмеление карбонатного шельфа, о чем свидетельствует накопление биоморфных и микритово-зернистых доломитов, характерных для литоральной зоны [18]. Дальнейшее понижение уровня моря привело к кратковременному осушению южной окраины бассейна. Подъем уровня моря в раннекексюсинское время привёл к восстановлению относительно глубоководных обстановок дистального шельфа, в пределах которого сформировалась существенно известково-глинистая оппокунская свита. Периодически происходила активизация терригенного сноса, представленного разнозернистым песчаным материалом, содержание которого в южном разрезе существенно выше (сыргалахская свита), поскольку он более приближен к суше. Последующее обмеление бассейна в позднекексюсинское время привело к накоплению терригенной маттайской свиты, состав и текстурно-структурные особенности которой указывают на формирование в условиях прибрежного мелководья при активном влиянии приливно-отливных течений.

Таким образом, территория Лено-Анабарской НГО в позднерифейское и вендское время представляла собой открытый мелководный карбонатный шельф, на котором отложения приливно-отливных равнин, прибрежных отмелей и баров в периоды углубления сменялись карбонатно-глинистыми осадками дистальной части. Эпизодически происходила активизация сноса терригенного обломочного материала, который останавливал карбонатную седиментацию.

Коллекторские свойства

Периодическая смена обстановок осадконакопления обусловила неоднородное строение докембрийского разреза, что отразилось на распределении значений пористости и проницаемости. Анализ литологических особенностей и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) рассматриваемых отложений позволил выделить уровни, которые являются потенциальными коллекторами.

В первую очередь в качестве коллекторов можно рассматривать карбонатные отложения, сформированные в пределах мелководного шельфа, которые слагают значительные по мощности интервалы (120–160 м) в тукуланской и куландинской свитах рифейской части разреза, а также доминируют в туркутской свите венда. Фильтрационно-емкостные характеристики матрицы карбонатных пород, полученные при измерениях в лабораторных условиях, низкие. Пористость изменяется от 2 до 7 %, причем в рифейских отложениях преобладают значения около 2–3 %, а в туркутской свите около 5–7 %. Проницаемость не превышает $0,22 \times 10^{-3}$ мкм², но в туркутской свите в некоторых образцах проницаемость варьирует от 136 до 8000×10^{-3} мкм². В пустотном пространстве матрицы в целом доминируют субкапиллярные поры

радиусом менее 0,2 мкм, в доломитизированных известняках и доломитах размер пустот немного больше: 1–5 мкм, редко до 100 мкм. Однако изучение пород в керне показало, что они разбиты разнонаправленными открытыми трещинами, участками достаточно интенсивно (рис. 5, а). Кроме того, наблюдается широкое развитие микростилолитов, особенно в строматолитовых прослоях. Нередко фиксируются частично или полностью открытые вторичные пустоты, с расширениями до 25 мм, образованные за счет процессов растворения и приуроченные к трещинам и стилолитовым швам (рис. 5, б). Периодически отмечается битумонасыщение пустотного пространства (каверн, стилолитов и трещин), особенно в венде, что косвенно доказывает хорошие резервуарные качества этих пород (рис. 5, в). Вышеизложенное позволяет предположить наличие на этих уровнях каверново-трещинного типа коллектора.

Также к коллекторам с некоторой степенью условности можно отнести песчаные породы, которые занимают достаточно значительный объем в куладинской, хастахской, маастахской и маттайской

свитах. Они редко формируют самостоятельные комплексы мощностью до 5–7 м, а обычно присутствуют в виде прослоев, толщиной от нескольких сантиметров до первых метров. Гранулометрический состав песчаников весьма разнообразен. Среди них отмечаются мелкозернистые, крупнозернистые и смешанные разновидности, нередко с примесью гравийного материала. Сортировка обломков обычно средняя или плохая, редко хорошая. Но коллекторские свойства песчаников контролируются не только гранулометрией, а в значительной степени типом цемента. Наиболее существенное сокращение пустотного пространства зафиксировано в песчаниках с глинисто-карбонатным, железисто-карбонатным и карбонатным типами цемента (рис. 5, г, д). Таким образом, недостаточно хорошая сортировка, пёстрый гранулометрический состав и широкое развитие существенно карбонатных цемента определили относительно невысокие ФЕС песчаных горизонтов. Пористость в этих породах варьирует от 1,0 до 10 %, в большинстве образцов составляет 5–9 %, проницаемость обычно не превышает 1×10^{-3} мкм².

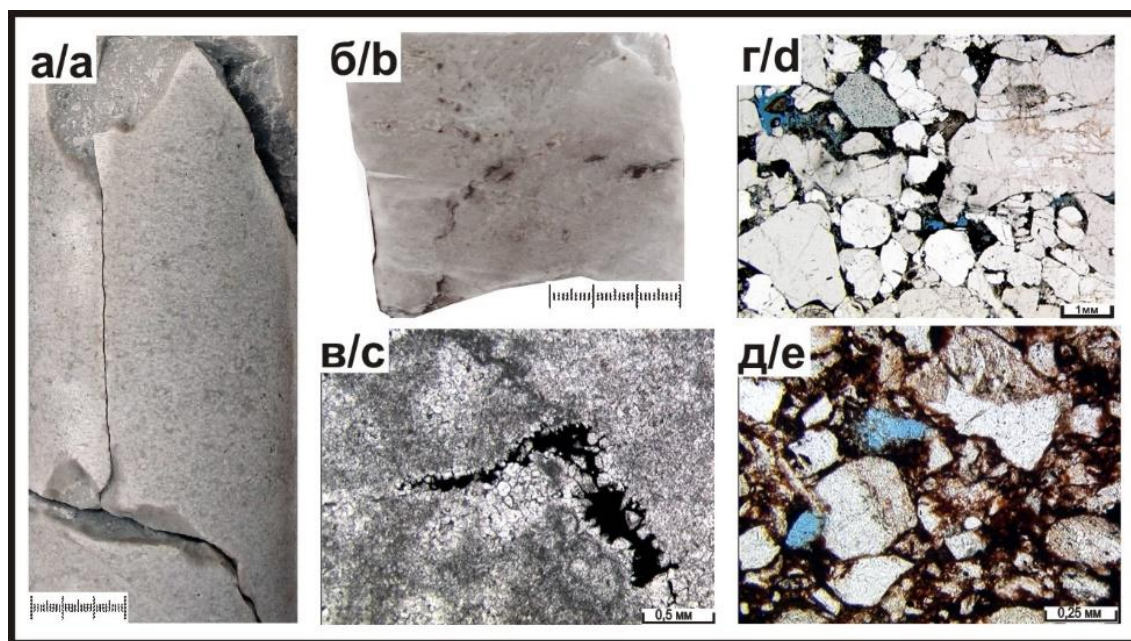


Рис. 5. Пустотное пространство потенциальных коллекторов: а) разнонаправленные трещины в зернистом доломите (таймыльская свита); б) поры и каверны выщелачивания в доломитизированном известняке (туркутская свита); в) каверна выщелачивания в доломите известковистом микрофитолитовом, выполненная битумом (туркутская свита); г) поры (синие) в кварцевом гравелитистом песчанике глинисто-карбонатным цементом (хастахская свита); д) поры (синие) в литокласто-кварцевом песчанике с карбонатно-железистым цементом (маастахская свита)

Fig. 5. Void space of potential collectors: a) multidirectional cracks in the dolomite grainstone (Taimylyr Formation); b) pores and leaching caverns in dolomitized limestone (Turkut Formation); c) leaching cavity in microphytolithic calcareous dolomite, filled by bitumen (Turkut Formation); d) pores (blue) in quartz gravelitic sandstone with clay-carbonate cement (Khastakh Formation); e) pores (blue) in lithoclast-quartz sandstone with carbonate-ferruginous cement (Maastakh Formation)

Заключение

Проведенные исследования позволили установить следующее:

1. В районе Лено-Анабарской НГО докембрийский разрез представлен чередованием комплексов с

доминированием терригенных или карбонатных пород, накопление которых происходило в широком спектре обстановок: от дельтовых до сублиторальных при существенном преобладании карбонатной мелководно-морской седиментации с

эпизодами активного поступления силикокластического материала.

2. С точки зрения коллекторских свойств наибольший интерес представляют отложения мелководного шельфа. В первую очередь перспективные уровни связаны с карбонатными породами, которые хоть и имеют невысокие значения пористости и проницаемости матрицы, но осложнены многочисленными трещинами, стилолитами и кавернами, увеличивающими их фильтрационно-емкостные параметры. Наилучшими коллекторскими свойствами обладает туркутская свита венда, породы которой интенсивно насыщены битумом. Песчаные горизонты к перспективным объектам можно отнести условно в виду их относительно небольших мощностей и средних фильтрационно-емкостных характеристик.
3. Флоидуопорами для докембрийских резервуаров могут служить низкопористые и низкопроницаемые толщи аргиллитов и карбонатно-глинистых пород венд-палеозойского возраста. В качестве

нефтегазоматеринских отложений многие исследователи рассматривают хатыспытскую свиту венда Оленёкского поднятия, которая содержит повышенные концентрации органического вещества, генетически сходного с битумами туркутской свиты [19–21]. Перспективность верхнепротерозойских резервуаров на территории исследования косвенно подтверждается многочисленными скоплениями битумов на Оленекской, Восточно-Анабарской и других площадях севера Сибирской платформы [9, 10, 16, 19, 22].

4. Таким образом, полученные результаты позволяют предположить на территории Лено-Анабарской НГО наличие нескольких природных резервуаров в верхнепротерозойских отложениях, при этом наибольшим потенциалом обладает вендская часть разреза.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грамберг И.С. Перспективы нефтегазоносности севера Восточной Сибири и Северо-Востока СССР // Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности восточной части Советской Арктики. – Л.: НИИГА, 1973. – С. 5–15.
2. Анциферов А.С., Бакин В.Е., Варламов И.П. Геология нефти и газа Сибирской платформы. – М.: Недра, 1981. – 552 с.
3. Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А., Шабалин Н.А. Углеводородный потенциал арктической зоны Сибирской платформы // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2018. – № 1. – С. 4–10.
4. Структурно-тектоническая характеристика и модель геологического строения неопротерозойско-фанерозойских отложений Анабаро-Ленской зоны / В.А. Конторович, А.Э. Конторович, И.А. Губин, А.М. Зотеев, В.В. Лапковский, Н.В. Малышев, М.В. Соловьев, Г.С. Фрадкин // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 1253–1274.
5. Нефтегазogeологическое районирование Сибирской платформы (уточненная версия) / А.Э. Конторович, Л.М. Бурштейн, В.И. Вальчак, И.А. Губин, А.О. Гордеева, Е.Н. Кузнецова, В.А. Конторович, С.А. Моисеев, М.Ю. Скузатов, А.М. Фомин // XIII Международный научный конгресс Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – Новосибирск, 2017. – Т. 1. – С. 57–64.
6. Геохимические критерии нефтегазоносности рифей-палеозойских отложений Лено-Анабарского регионального прогиба и сопредельных территорий / П.Н. Соболев, Д.С. Лежнин, И.А. Панарин, Е.Н. Гаврилова, А.М. Пименова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – № 8 (332). – С. 62–74.
7. Углеводородные системы и перспективы нефтегазоносности Анабаро-Ленского прогиба / С.В. Фролов, Н.И. Коробова, Е.А. Бакай, Н.С. Курдина // Георесурсы. – 2017. – Спецвыпуск. Ч. 2. – С. 173–185. URL: <http://doi.org/10.18599/grs.19.18> (дата обращения: 18.10.2019).
8. Сейсмогеологические модели и нефтегазоносность осадочных комплексов в арктических регионах Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции (Анабаро-Хатангская, Лено-Анабарская нефтегазоносные области) / В.А. Конторович, А.Ю. Калинин, Л.М. Калинина, М.В. Соловьев // Геология нефти и газа. – 2019. – № 5. – С. 15–26.
9. Каширцев В.А. Органическая геохимия нафтидов востока Сибирской платформы. – Якутск: Изд-во СО РАН, 2003. – 160 с.
10. Kashirtsev V.A., Hein F.J. Overview of natural bitumen fields of the Siberian platform, Olenek uplift, Eastern Siberia, Russia // Heavy-oil and Oil-sand Petroleum Systems in Alberta and Beyond. – 2013. – С. 509–529.
11. Граусман В.В., Рудавская В.А., Васильева Н.И. Стратиграфия верхнего докембрия и нижнего кембрия Оленекского поднятия // Отечественная геология. – 1996. – № 8. – С. 30–35.
12. Шишкин Б.Б., Исаев А.В. Особенности строения докембрийских и кембрийских отложений северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 12. – С. 1795–1807.
13. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления / Н.В. Мельников, Б.Б. Якшин, Б.Б. Шишкин, А.О. Ефимов, Г.А. Карлова, Л.И. Килина, Л.Н. Константинова, Б.Б. Кочнев, Б.Г. Краевский, П.Н. Мельников, К.Е. Наговицин, А.А. Постников, Л.В. Рябкова, А.А. Терлеев, Е.М. Хабаров. – Новосибирск: Гео, 2005. – 428 с.
14. Старосельцев В.С., Шишкин Б.Б., Берилко Г.А. Актуальные проблемы геологии кембрийских и протерозойских отложений северо-востока Анабарской антеклизы в связи с нефтегазоносностью // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2016. – № 1 (25). – С. 44–56.
15. Revised Neoproterozoic and Terreneuvian stratigraphy of the Lena-Anabar Basin and north-western slope of the Olenek Uplift, Siberian Platform / K.E. Nagovitsyn, V.I. Rogov, V.V. Marusin, G.A. Karlova, A.V. Kolesnikov, N.V. Bykova, D.V. Grazhdankin // Precambrian Research. – 2015. – V. 270. – P. 226–245.
16. Carbonaceous rocks of the Neoproterozoic (Vendian) Khatyspyt Formation as a possible source of oils in the northeastern Siberian Platform / T. Parfenova, V. Kashirtsev, L. Borisova, E. Ivanova, B. Kochnev, K. Nagovitsyn, V. Melenevsky // The 25th International meeting on organic geochemistry. Book of abstracts. – Interlaken, Switzerland, 18–23 September 2011. – P. 435.
17. Meso-Neoproterozoic petroleum systems of the Eastern Siberian sedimentary basins / S.V. Frolov, G.G. Akhmanov, E.A. Bakay, N.V. Lubnina, N.I. Korobova, E.E. Karnyushina, E.V. Kozlova // Precambrian Research. – 2015. – V. 259. – P. 95–113.
18. Davis R.A., Dalrymple R.W. Principles of Tidal Sedimentology. – London: Springer Dordrecht Heidelberg London, 2012. – 609 p.
19. Chemostratigraphic constraints on Vendian–Cambrian basin dynamics, Northeast Siberian Craton / S.M. Pelechaty, J.P. Grotzinger, V.A. Kashirtsev, V.P. Zhernovskiy // The Journal of Geology. – 1996. – V. 104. – P. 543–563.
20. Organic geochemistry of the Vendian Khatyspyt Formation (northeast of the Siberian Platform) / A. Kontorovich, T. Parfenova, V. Kashirtsev, N. Aksanova, E. Zubova, E. Ivanova, N. Yudin // 24th International Meeting on Organic Geochemistry. – Bremen, Germany, 6–11 September, 2009. – P. 174.
21. Redox-dependent distribution of early macro-organisms: evidence from the terminal Ediacaran Khatyspyt Formation in Arctic Siberia / H. Cui, D.V. Grazhdankin, S. Xiao, S. Peek, V.I. Rogov, N.V. Bykova, N.E. Sievers, X.-M. Liu, A.J. Kaufman //

- Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2016. – V. 461. – P. 122–139.
22. Kim N., Kashirtsev V., Dzuba O. Organic geochemistry of naphthides of the Anabar-Khatanga saddle // The 25th International Meeting on Organic Geochemistry. – Interlaken, Switzerland, 18–23 September 2011. – P. 249.

Поступила 04.09.2020 г.

Информация об авторах

Вараксина И.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Шаваров Р.Д., геолог департамента проектирования разработки месторождений, ООО «Иркутская нефтяная компания».

UDC 552 (571.5)

LITHOLOGY AND RESERVOIR PROPERTIES OF PRECAMBRIAN DEPOSITS OF THE LENA-ANABAR OIL-AND-GAS REGION

Irina V. Varaksina¹,
varaksinaI@ipgg.sbras.ru

Roman D. Shavarov²,
shavarov_rd@irkutskoil.ru

¹ Trofimuk Institute of petroleum geology and geophysics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences,
3, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Irkutsk Oil Company,
4, Bolshoy Liteiny avenue, Irkutsk, 664007, Russia.

The relevance. Nowadays, one of the priority directions in expanding the hydrocarbon base of Russia has become the research and development of its northern regions. The Lena-Anabar oil-and-gas region is located in the North part of the Siberian platform and is characterized by a very irregular geological and geophysical exploration. Precambrian deposits are the most poorly studied, despite their quite high reservoir potential, as well as direct and indirect signs of oil and gas potential. For more effective further geological exploration work in this region, a detailed study of previously drilled well sections is necessary, with the identification of lithological features of reservoir rocks, conditions for their formation and distribution.

The object: Precambrian deposits discovered by deep drilling on the territory of the Lena-Anabar oil-and-gas region.

The aim of the research is to identify perspective hydrocarbon reservoirs based on the analysis of the composition, structure, sedimentary environments and reservoir properties of Precambrian sediments of the Lena-Anabar oil-and-gas region.

Methods: creating sections of Precambrian deposits based on detailed macro- and microscopic analysis of core material and well logs data; correlation of sections in view of lithological, paleontological and geophysical data; genetic analysis of the main lithological types of rocks and clarification of their sedimentation conditions; estimation of the influence of sedimentation and post-sedimentation factors on formation of reservoir properties; identification of levels of potential reservoirs

Results. It was established that the Precambrian section is represented by the alternation of packs of carbonate and terrigenous rocks and its accumulation took place in a large range of environments: from delta to sublittoral, with a significant prevalence of shallow-water sedimentation. It was discovered that there are potential reservoir rocks in Precambrian sediments, and the most perspective levels are related to the Vendian part of the section.

Key words:

Lena-Anabar oil-and-gas region, lithology, reservoirs, Upper Riphean, Vendian.

The research was financially supported by the FSR project no. 0331-2019-0021.

REFERENCES

- Gramberg I.S. Perspektivy neftegazonosnosti severa Vostochnoy Sibiri i Severo-Vostoka SSSR [Petroleum prospects of the north of Eastern Siberia and the North-East of the USSR]. *Geologicheskoe stroenie i perspektivy neftegazonosnosti vostochnoy chasti Sovetskoy Arktiki* [Geological structure and oil and gas prospects of the eastern part of the Soviet Arctic]. Leningrad, NIIGA Publ., 1973. pp. 5–15.
- Antsiferov A.S., Bakin V.E., Varlamov I.P. *Geologiya nefti i gaza Sibirskoy platformy* [Geology of oil and gas of the Siberian platform]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 552 p.
- Dmitrievskiy A.N., Eremin N.A., Shabalin N.A. Uglevodorodny potentsial arkticheskoy zony Sibirskoy platformy [Hydrocarbon potential of the Arctic zone of the Siberian platform]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2018, no. 1, pp. 4–10.
- Kontorovich V.A., Kontorovich A.E., Gubin I.A., Zoteev A.M., Lapkovsky V.V., Malyshev N.A., Soloviev M.V., Fradkin G.S. The Neoproterozoic-Phanerozoic section of the Anabar-Lena province: structural framework, geological model, and petroleum potential. *Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1253–1274. In Rus.
- Kontorovich A.E., Burshteyn L.M., Valchak V.I., Gubin I.A., Gordeeva A.O., Kuznetsova E.N., Kontorovich V.A., Moiseev S.A., Skuzovatov M.Yu., Fomin A.M. Neftegazogeologicheskoe rayonirovaniye Sibirskoy platformy (utochnennaya versiya) [Petroleum-geological regionalization of the Siberian platform]. *XIII Mezhdunarodny nauchny kongress Interexpo GEO-Sibir* [XIII International Scientific Congress Interexpo GEO-Siberia]. Novosibirsk, 2017. Vol. 1, pp. 57–64.
- Sobolev P.N., Lezhnin D.S., Panarin I.A., Gavrilova E.N., Pimenova A.M. Geochemical criteria of oil and gas potential of the Riphean-Paleozoic sediments of the Lena-Anabar regional trough and adjacent territories. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2019, no. 8 (332), pp. 62–74. In Rus.
- Frolov S.V., Korobova N.I., Bakay E.A., Kurdina N.S. Hydrocarbon systems and oil and gas potential prospects of the Anabar-Lena trough. *Georesources*, 2017. Special issue. Part 2, pp. 173–185. In Rus. Available at: <http://doi.org/10.18599/grs.19.18> (accessed 18 October 2019).
- Kontorovich V.A., Kalinin A.Yu., Kalinina L.M., Soloviev M.V. Seismogeological models and petroleum potential of sedimentary sequences in the Arctic regions of Lena-Tunguska petroleum province (Anabar-Khatanga, Lena-Anabar petroleum areas). *Geology of oil and gas*, 2019, no. 5, pp. 15–26. In Rus.
- Kashirtsev V.A. *Organicheskaya geokhimiya naftidov vostochnoy Sibirskoy platformy* [Organic geochemistry of naphthides of the east of the Siberian platform]. Yakutsk, SO RAN Publ., 2003. 160 p.
- Kashirtsev V.A., Hein F.J. Overview of natural bitumen fields of the Siberian platform, Olenek uplift, Eastern Siberia, Russia. *Heavy-oil and Oil-sand Petroleum Systems in Alberta and Beyond*, 2013, pp. 509–529.
- Grausman V.V., Rudavskaya V.A., Vasileva N.I. Stratigrafiya verkhnego dokembriya i nizhnego kembriya Olenekskogo

- podnyatiya [Stratigraphy of the Upper Precambrian and Lower Cambrian of the Olenek Uplift]. *Otechestvennaya geologiya*, 1996, no. 8, pp. 30–35.
12. Shishkin B.B., Isaev A.V. Structural features of Precambrian and Cambrian deposits of the North-East of the Siberian Platform. *Geology and geophysics*, 1999, vol. 40, no. 12, pp. 1795–1807. In Rus.
 13. Melnikov N.V., Yakshin B.B., Shishkin B.B., Efimov A.O., Karlova G.A., Kilina L.I., Konstantinova L.N., Kochnev B.B., Kraevskij B.G., Melnikov P.N., Nagovitsyn K.E., Postnikov A.A., Ryabkova L.V., Terleev A.A., Habarov E.M. *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Rifey i vend Sibirskoy platformy i ee skladchatogo obramleniya* [Stratigraphy of the oil and gas basins of Siberia. Riphean and Vendian of the Siberian platform and its folded frame]. Novosibirsk, Geo Publ., 2005. 428 p.
 14. Staroseltsev V.S., Shishkin B.B., Berillo G.A. Topical issues of geology of the Cambrian and Proterozoic deposits in the northeast of the Anabar anticline in relation to petroleum content. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2016, no. 1(25), pp. 44–56. In Rus.
 15. Nagovitsyn K.E., Rogov V.I., Marusin V.V., Karlova G.A., Kolesnikov A.V., Bykova N.V., Grazhdankin D.V. Revised Neoproterozoic and Terreneuvian stratigraphy of the Lena-Anabar Basin and north-western slope of the Olenek Uplift, Siberian Platform. *Precambrian Research*, 2015, vol. 270, pp. 226–245.
 16. Parfenova T., Kashirtsev V., Borisova L., Ivanova E., Kochnev B., Nagovitsyn K., Melenevsky V. Carbonaceous rocks of the Neoproterozoic (Vendian) Khatyspyt Formation as a possible source of oils in the northeastern Siberian Platform. *The 25th International meeting on organic geochemistry*. Book of abstracts. Interlaken, Switzerland, 18–23 September 2011. pp. 435.
 17. Frolov S.V., Akhmanov G.G., Bakay E.A., Lubnina N.V., Korobova N.I., Karnyushina E.E., Kozlova E.V. Meso-Neoproterozoic petroleum systems of the Eastern Siberian sedimentary basins. *Precambrian Research*, 2015, vol. 259, pp. 95–113.
 18. Davis R.A., Dalrymple R.W. *Principles of Tidal Sedimentology*. London, Springer Dordrecht Heidelberg London, 2012. 609 p.
 19. Pelechaty S.M., Grotzinger J.P., Kashirtsev V.A., Zhernovsky V.P. Chemostratigraphic constraints on Vendian-Cambrian basin dynamics, Northeast Siberian Craton. *The Journal of Geology*, 1996, vol. 104, pp. 543–563.
 20. Kontorovich A., Parfenova T., Kashirtsev V., Aksenova N., Zubova E., Ivanova E., Yudina N. Organic geochemistry of the Vendian Khatyspyt Formation (northeast of the Siberian Platform). *The 24th International Meeting on Organic Geochemistry*. Bremen, Germany, 6–11 September 2009. pp. 174.
 21. Cui H., Grazhdankin D.V., Xiao S., Peek S., Rogov V.I., Bykova N.V., Sievers N.E., Liu X.-M., Kaufman A.J. Redox-dependent distribution of early macro-organisms: evidence from the terminal Ediacaran Khatyspyt Formation in Arctic Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, vol. 461, pp. 122–139.
 22. Kim N., Kashirtsev V., Dzuba O. Organic geochemistry of naphthides of the Anabar-Khatanga saddle. *The 25th International Meeting on Organic Geochemistry*. Interlaken, Switzerland, 18–23 September 2011. pp. 249.

Received: 4 September 2020.

Information about the authors

Irina V. Varaksina, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of petroleum geology and geophysics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences.

Roman D. Shavarov, geologist, Irkutsk Oil Company.

УДК 553.87

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАРЦ-ХАЛЦЕДОНОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ КУЗБАССА И ЕЁ СВЯЗЬ С ГЕОХИМИЧЕСКИМИ ОСОБЕННОСТЯМИ АГАТОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Борозновская Нина Николаевна¹,
boroznovskaya@mail.ru

Звягинцева Елизавета Владимировна¹,
zmei7772006@mail.ru

Корнева Александра Павловна¹,
korneva@mail.tsu.ru

Небера Татьяна Степановна¹,
tsnebera@mail.ru

¹ Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность. Кварц-халцедоновые образования Кузбасса являются потенциально ювелирно-поделочным материалом, при этом степень их минералогической изученности недостаточна. Кроме того, требуют дальнейшего изучения некоторые аспекты формирования агатов.

Цель: изучение люминесцентных характеристик кварц-халцедоновых образований в пределах проявлений Южно-Кузбасского магматического ареала, их изменений по зонам в исследуемых образцах, вариаций в поведении отдельных центров свечения, связанных с собственными и примесными дефектами, выяснение возможного влияния геохимических особенностей исследуемых минералов на их люминесцентные свойства.

Объекты: кварц-халцедоновые образования с проявлений Южно-Кузбасского магматического ареала (проявление россыпного типа у д. Ключи (Крапивинский район), миндалекаменные базальты с агатовой минерализацией проявления участка Терсюк (Новокузнецкий район), миндалекаменные базальты с агатовой минерализацией проявлений Салтымаковского хребта (Крапивинский район).

Методы: рентгеноструктурный анализ, рентгенолюминесцентный анализ, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.

Результаты. Методом рентгеноструктурного анализа изучен минеральный состав. Главным образом представлены кварц и халцедон, при этом наибольшее содержание халцедона наблюдается в миндалинах с концентрически-зональным строением. В числе других минералов встречаются кристобалит, доломит, кальцит, цеолиты. Посредством проведения рентгенолюминесцентного анализа получены данные о содержании собственных и примесных дефектов различной природы. Распределение центров люминесценции в слоях агата проявления Терсюк может свидетельствовать о смене окислительного потенциала (во внешней зоне) на восстановительный (во внутренних зонах), что подтверждается геохимическими данными. Для оникса Салтымаковского хребта характерна идентичность спектров РЛ для всех исследуемых слоев, что свидетельствует о постоянстве условий минералообразования. В целом сделан вывод о преобладании в миндалинах участка Терсюк восстановительной среды, а в миндалинах проявлений Салтымаковского хребта и у д. Ключи – окислительной.

Ключевые слова:

Кварц, халцедон, агат, оникс, Южно-Кузбасский магматический ареал, люминесценция, структурные дефекты.

Введение

Кварц-халцедоновые образования Кузбасса являются потенциально ювелирно-поделочным материалом, при этом степень их минералогической изученности недостаточна. Кроме того, требуют дальнейшего изучения некоторые аспекты формирования агатов [1, 2]. Нами на территории Кузбасса ранее были выделены два генетических типа подобных образований: жильный и миндалевидный [3]. По структурно-текстурному признаку среди последних отмечены три группы агатовых образований: с концентрически-зональным строением миндалины (собственно агаты), с ониковым рисунком и комбинированного типа. Кроме того, анализировался их микропримесный состав [4]. Таким образом, ранее были получены данные о структурно-текстурных и геохимических характеристиках исследуемых образцов.

Цель предлагаемой работы – исследование люминесцентных характеристик кварц-халцедоновых образований проявлений Кузбасса и выяснение возможного влияния геохимических особенностей исследуемых минералов на их люминесцентные свойства. Важно проследить, как меняется люминесценция по зонам в каждом из исследуемых образцов, отметить существенные вариации в поведении отдельных центров свечения, связанных с примесными и собственными дефектами, выявить связь люминесцентных свойств с геохимическими особенностями. Анализ полученных данных может дать важную информацию относительно генетических аспектов процесса формирования агатов.

Объект исследования

Образцы для исследований были отобраны на территории Кузнецкого бассейна с трёх участков с ага-

товой минерализацией (рис. 1). Участок Терсюк, проявления Салтымаковского хребта и проявления россыпного типа у деревни Ключи расположены на территории Новокузнецкого и Крапивинского районов. Агатовая минерализация этой зоны связана с миндалекаменными разностями раннемезозойских базальтов «мелафировой подковы», локализованной в Бунгарапской мульде среди нижнетриасовых терригенных отложений. «Мелафировая подкова» дугообразно выражается в виде Салтымаковского, Ажendarовского, Караканского хребтов, Кайлотских гор, Тарадановского увала, Осташкиного камня и входит в состав Южно-Кузбасского магматического ареала. Более подробное геологическое описание этих объектов приводится в предшествующих работах [3, 4].

Методика исследования

Отобранные образцы были проанализированы методами рентгеноструктурного анализа (РСА), рентгенолюминесцентного анализа (РЛ) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Рентгенограммы получены с помощью дифрак-

тометра PANalytical X'Pert PRO [4]. Спектры РЛ снимались с помощью установки, собранной на базе монохроматора МДР-12 с компьютерным управлением, по методике, описанной ранее [5]. Построение спектров проводилось в диапазоне длин волн 200–800 нм. Источником возбуждения служила рентгеновская трубка БСВ-2 от аппарата УРС-55 с Мо-антикатодом. Данные по микроэлементному составу получены на квадрупольном ICP-MS спектрометре Agilent 7500 (аналитик – Е.С. Рабцевич).

Для детального исследования данными прецизионными методами было отобрано с каждого проявления по 1–2 образца, которые были распилены по слоям с получением суммарно 25 проб. Распиловка производилась с помощью высококачественных алмазных дисков с непрерывной подачей воды на диск. Для применения всех методов анализа использовались порошковые пробы, истёртые в корундовой ступке [4]. Благодаря распилу образцов на отдельные слои удалось получить послойные характеристики кварц-халцедоновых образований.

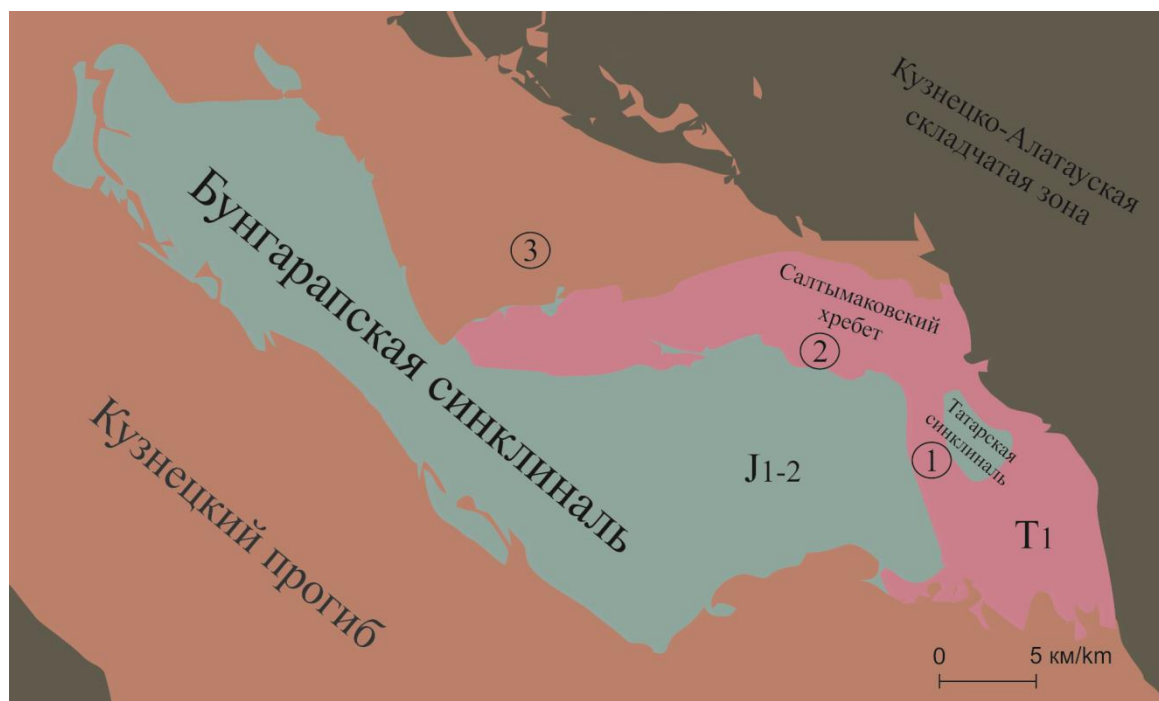


Рис. 1. Локализация проявлений агатовой минерализации на территории Кузнецкого бассейна: 1 – участок Терсюк, 2 – проявление Салтымаковского хребта, 3 – проявление у д. Ключи

Fig. 1. Allocation of occurrences of agates within Kuznetsk basin: 1 – Tersyuk occurrence, 2 – Saltymakovskiy ridge occurrence, 3 – Klyuchi occurrence

Результаты и обсуждение

По результатам рентгеноструктурного анализа минеральный состав исследуемых образцов в основном сводится к наличию кварца и халцедона, часто с преимущественно кварцевым составом, что является одной из особенностей данных образований (рис. 2). В оторочках миндалинов встречаются кристобалит, доломит, кальцит, цеолиты. Для диагностики минералов кремнезёма использована методика, применяющая различия в соотношениях интенсивностей рефлексов 110 (2.45 Å), 102

(2.27 Å) и 111 (2.22 Å) на дифрактограммах кварца и халцедона [6]. Наибольшее содержание халцедона наблюдается в миндаликах с концентрически-зональным строением. В числе других минералов встречаются кристобалит, доломит, кальцит, цеолиты.

Полученные спектры РЛ представлены полосами излучения в диапазонах (нм): 280–300, 320–350, 390–400, 420–450, 540–590, 620–700. Перечисленные полосы РЛ в основном связаны с собственными дефектами различных типов (таблица).

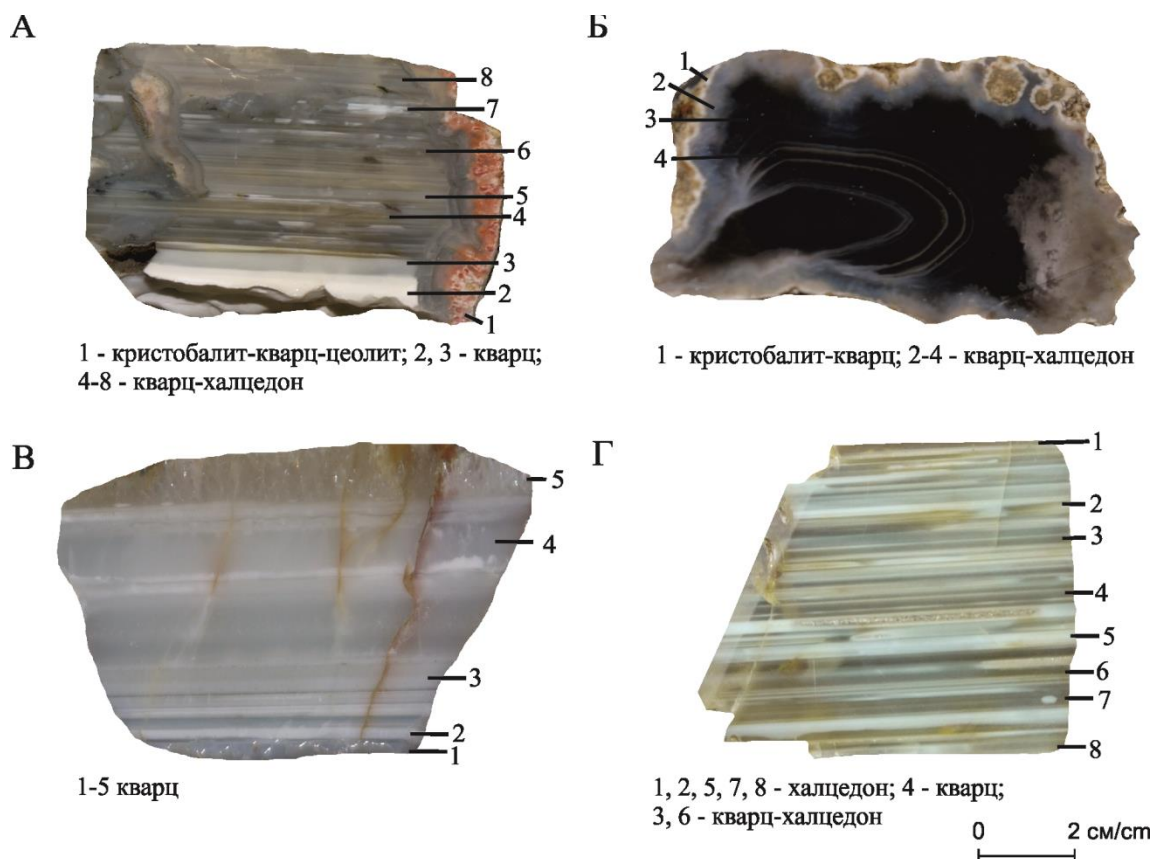


Рис. 2. Послойный минеральный состав кварц-халцедоновых образований проявления Терсюк (А, Б), Салтырмаковско-го хребта (В), проявления у д. Ключи (Г)

Fig. 2. Mineral composition of different layers of quartz-chalcedony formations from Tersyuk (A, B), Saltyrmakovskiy ridge (C) and Klyuchi (D) occurrences

Полоса РЛ в диапазоне 280–300 нм связана с присутствием вакансии кислорода. Согласно мнению некоторых авторов, содержание вакансий кислорода и кремния в агатах ощутимо выше, чем в кристаллическом кварце [7]. И все же наиболее интенсивно эта полоса проявлена в кварце верхних частей миндалин и полостей, что свидетельствует о дефиците кислорода в минералообразующей среде к концу процесса агатообразования (рис. 3). РЛ при 300–470 нм может быть связана как с собственными дефектами, так и с микропримесями Al, Li и Na. Существует корреляция между содержаниями Al и Li и интенсивностью полосы 330–340 нм, что свидетельствует в пользу того, что центры типа $\text{AlO}_4^{4-}/\text{Li}^+$ могут также выступать как активаторы свечения в ультрафиолетовой области спектра [8]. Полоса с максимумом свечения около 450 нм возникает вследствие рекомбинации samozахваченных экситонов [9]. Широкая полоса в диапазоне 560–580 нм была обнаружена при проведении люминесцентного анализа природного гидротермального кварца и связана с вакансиями кислорода [10]. По мнению ряда авторов, её присутствие может отличать спектры люминесценции кварца от спектров люминесценции халцедона [11]. Оранжево-красное свечение на 620–650 нм было зарегистрировано у многих образцов синтетического и природного кварца с наибольшей интенсивностью в гидротермальном и скрытокристаллическом [12].

Таблица. Краткая характеристика возможных центров люминесценции в кварц-халцедоновых образованиях

Table. Possible luminescence centers in quartz-chalcedony formations

Длина волны при максимальной интенсивности, нм Maximum intensity wavelength, nm	Характеристика центра люминесценции Luminescence centers
280–290 310–330 560–580	Вакансия кислорода [13, 10] Oxygen vacancy [13, 10]
330–360 400–440	$\text{AlO}_4^{4-}/\text{Na}^+, \text{Li}^+$ [8]
370–400 450–470	Междоузельный кислород, дефекты матрицы SiO_2 [5, 9, 14] Interstitial oxygen, SiO_2 matrix defects [5, 9, 14]
620–650	Дырочные центры, связанные с немостиковым кислородом и силанольными группами [13, 15] Nonbridging oxygen and silanol group hole centers [13, 15]
670–740	Fe^{3+} [14, 16, 17]

В длинноволновой области могут быть выделены по меньшей мере две накладываются друг на друга полосы – 620 и 650 нм. Появление полосы 620 нм связано с немостиковым кислородом с предшественниками в виде немостиковых гидроксильных групп ($:\text{Si}\pm\text{OH}$) [18]. Излучение при 650 нм многие исследо-

ватели также приписывают немостиковому кислороду $\equiv\text{Si}-\text{O}\cdot$, т. е. атому кислорода с одной разорванной связью. Возникновение немостикового кислорода проявляется особенно активно при наличии групп OH^- в структуре минерала [15]. Силанольные группы, представляющие собой гидроксильную группу, связанную с атомом кремния, являются наиболее благоприятными предтечами образования немостикового кислорода [19, 20]. Излучение в этой части спектра особенно характерно для халцедона [11]. Предполагается, что красное свечение на границе с инфракрасной областью (около 705 нм) может быть следствием замещения кремния либо алюминия на Fe^{3+} по аналогии с другими силикатами [14, 16, 17]. С другой стороны, на наш взгляд, и в этой спектральной области возможно участие собственных дефектов на базе силанольных групп. Необходимо проследить послойное изменение люминесцентных характеристик.

Для спектров РЛ агата и оникса участка Терсюк характерно проявление вакансий кислорода (280–325, 560–580 нм), что свидетельствует о недостатке кислорода. Это характерно для всех внутренних слоев, представленных в данном случае халцедоном (рис. 4). В кристобалите внешней зоны подобные центры не проявляют себя. В отличие от внутренних зон, в спектре внешней зоны присутствуют полосы излучения в спектральном диапазоне 400–500 нм, за которые могут быть ответственны дефекты матрицы SiO_2 , междоузельный кислород, дефекты типа $\text{SiO}_4^{3-}/\text{Na}^+$, $\text{AlO}_4^{4-}/\text{Na}^+$, $\text{AlO}_4^{4-}/\text{Li}^+$. Подобное распределение дефектов в пространстве может свидетельствовать о смене окислительного потенциала (во внешней зоне) на восстановительный (во внутренних зонах). Но и во внутренних зонах иногда наблюдается влияние колебаний окислительно-восстановительного режима. Так, в слоях 22-4 и 22-5 исчезают полосы излучения в красном диапазоне, за которые могут быть ответственны ионы Fe^{3+} , что свидетельствует об усилении восстановительного потенциала.

Это подтверждается геохимическими данными, полученными ранее (рис. 5). Для образца 22 характерна положительная европиевая аномалия для всех слоев ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=1-2,4$), что свидетельствует в пользу

восстановительной обстановки, поскольку сквозь поры свободнее проникает Eu^{2+} [21]. Для образца 25 в первом и четвертом слоях отмечена положительная аномалия ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=3-9,8$), в то время как во втором и третьем слоях – отрицательная ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0,5-0,9$). Все это может быть связано с колебаниями окислительно-восстановительного режима. Рост концентраций европия к центру может указывать на смену окислительной обстановки на восстановительную, которая способствовала повышению мобильности Eu^{2+} (рис. 6, слой 25-4). В спектрах РЛ кварц-халцедоновых образований участка Терсюк восстановительная обстановка нашла отражение в абсолютном преобладании центров свечения, связанных с вакансией кислорода.

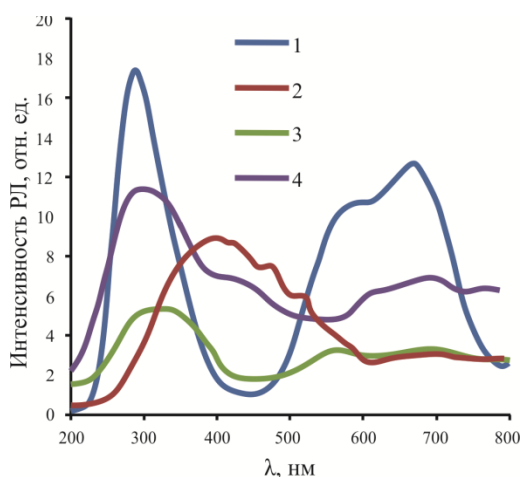


Рис. 3. Спектры РЛ кварц-халцедоновых образований Южно-Кузбасского магматического ареала: 1 – кварц из агатов Терсюк (верх миндалины), 2 – кристобалит с кварцем из концентрически-зонального агата Терсюк, 3 – халцедон из концентрически-зонального агата Терсюк, 4 – кварц с халцедоном из оникса Салтымаковского хребта

Fig. 3. XRL spectra of quartz-chalcedony formations of South Kuzbass magmatic area: 1 – quartz from Tersyuk agate (upper part of the amygdale), 2 – cristobalite and quartz from Tersyuk agate, 3 – chalcedony from Tersyuk agate, 4 – quartz and chalcedony from Saltymakovsky ridge onyx

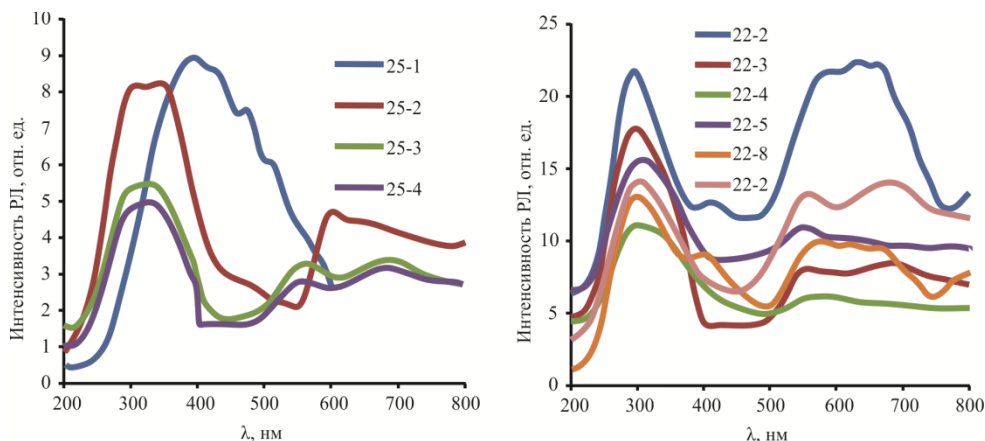


Рис. 4. Спектры РЛ отдельных слоев агата (25) и оникса (22) участка Терсюк

Fig. 4. XRL spectra of separate layers of agate (25) and onyx (22) from Tersyuk occurrence

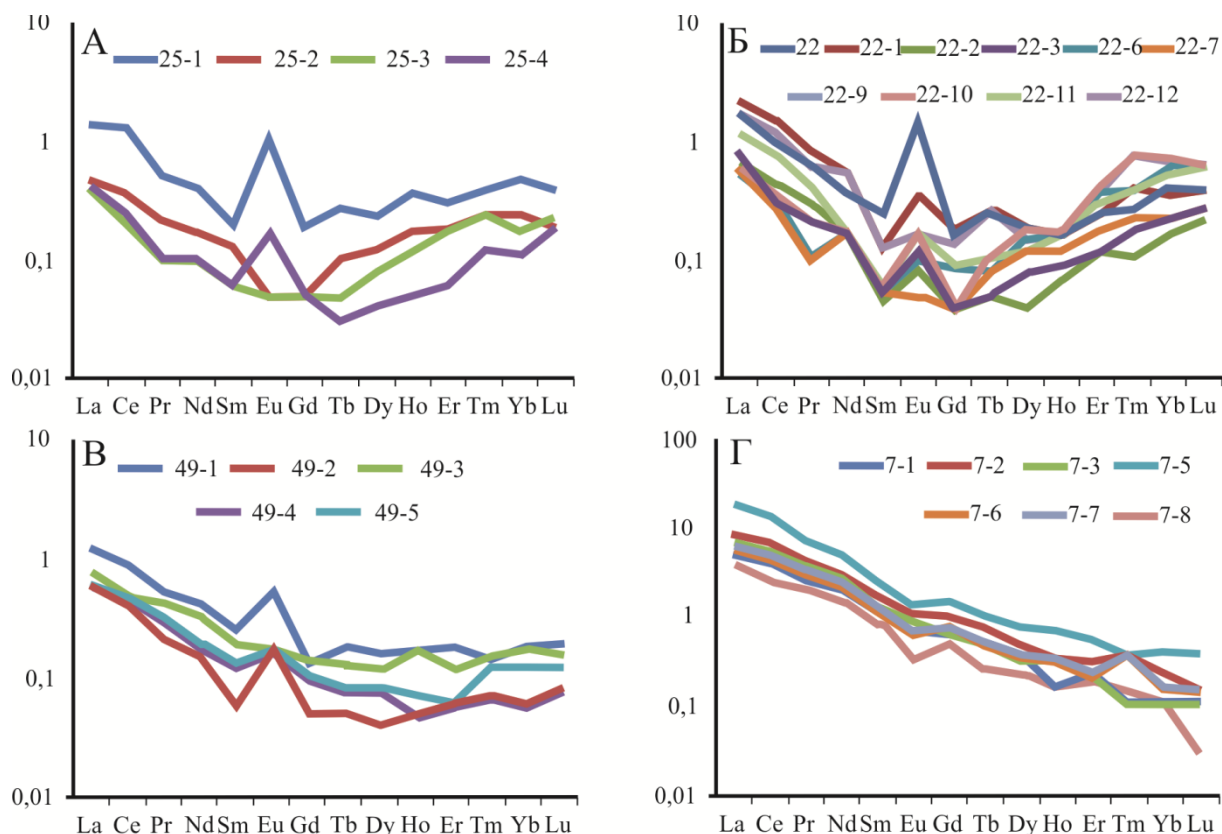


Рис. 5. Содержания редкоземельных элементов, нормированные на хондрит, для слоёв кварц-халцедоновых образований проявлений участка Терсюк (А, Б), Салтымаковского хребта (В), проявления у д. Ключи (Г) [4]

Fig. 5. Chondrite-normalized contents of rare earth elements in different layers of quartz-chalcedony formations from Tersyuk occurrence (A, B), Saltymakovskiy ridge occurrence (B), Klyuchi occurrence (G) [4]

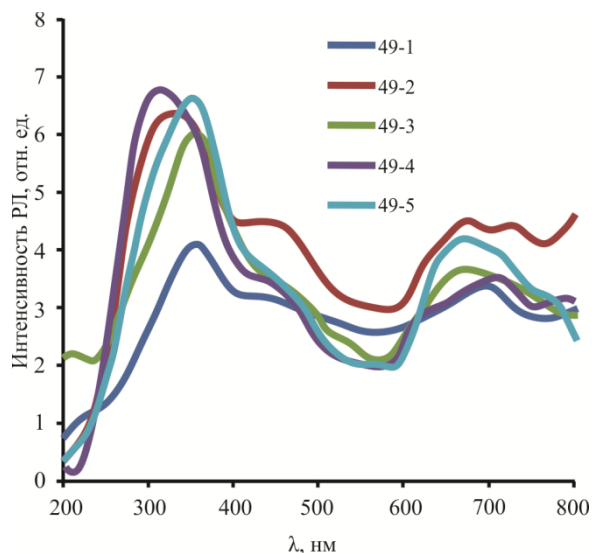


Рис. 6. Спектры рентгенолюминесценции для отдельных слоёв оникса Салтымаковского хребта

Fig. 6. XRL spectra of separate layers of Saltymakovskiy ridge onyx

Для оникса Салтымаковского хребта характерна идентичность спектров РЛ для всех исследуемых слоёв, что свидетельствует о постоянстве условий минералообразования (рис. 6). Особенностью этих спектров является отсутствие свечения, связанного с вакансией кислорода (280–320, 560–580 нм), в то время

как другие центры, связанные так или иначе с возбужденным кислородным состоянием, хорошо проявлены. Это междоузельный кислород (350–380 нм), дефекты матрицы SiO_2 (380–400, 470–500 нм), немостиковый кислород (600–660 нм). В слоях 49-2 и 49-4 кроме указанных центров присутствуют $\text{AlO}_4^{4-}/\text{Na}^+$ центры (330–340, 400–440 нм) и хорошо проявленное свечение Fe^{3+} в диапазоне 700–720 нм, что может быть связано как с усилением окислительного потенциала, так и с колебаниями щелочности, о чём свидетельствует появление щелочных компенсаторов среди центров люминесценции.

По данным геохимического изучения все слои оникса Салтымаковского хребта характеризуются положительной европиевой аномалией ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1,03\text{--}2,6$), что, казалось бы, должно свидетельствовать в пользу повышенного восстановительного потенциала, но в третьем, четвертом и пятом слоях эта аномалия совсем слабая (на уровне 1), что может отражать влияние окислительной среды на ослабление степени проникновения европия вглубь минерала (рис. 5, В).

В образце 7 (д. Ключи) по геохимическим данным (рис. 5, Г) во всех слоях отмечена отрицательная европиевая аномалия ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,3\text{--}0,8$). Данный факт может быть следствием повышенного окислительного потенциала в условиях открытого доступа кислорода. Спектры РЛ также отражают влияние повышенного окислительного потенциала: во всех слоях (как в халцедоне, так и в кварце) отсутствует свече

ние, связанное с вакансией кислорода (280–320, 560–580 нм). За свечение в видимой области спектра могут быть ответственны дефекты матрицы SiO_2 , междоузельный кислород, $\text{SiO}_4^{3-}/\text{Na}^+$, $\text{AlO}_4^{4-}/\text{Na}^+$,

$\text{AlO}_4^{4-}/\text{Li}^+$, в длинноволновой области – нестосточный кислород и Fe^{3+} (рис. 7). При этом в халцедоне примесные дефекты (свечение в диапазоне 400–600 нм) проявлены более четко.

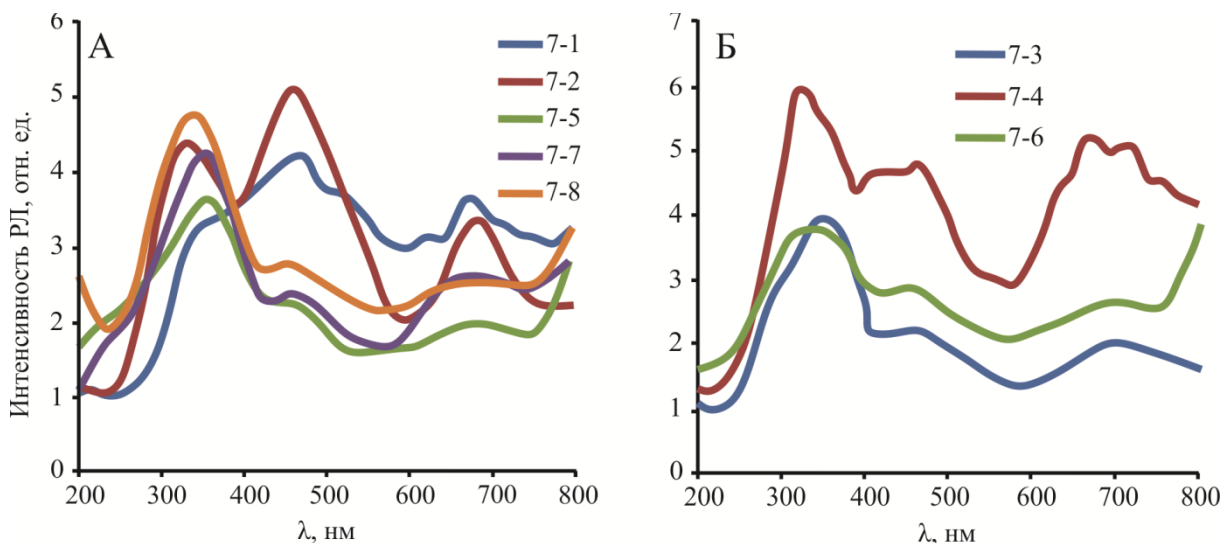


Рис. 7. Спектры рентгенолюминесценции для отдельных слоев оникса проявления у д. Ключи, сложенных халцедоном (А) и кварцем (Б)

Fig. 7. XRL spectra of separate layers of Klyuchi occurrence onyx consisting of chalcedony (A) and quartz (B)

Заключение

С помощью рентгенолюминесцентного анализа получены данные о содержании собственных и примесных дефектов различной природы. Сравнение геохимических и люминесцентных данных показало зависимость люминесцентных характеристик от окислительно-восстановительного потенциала. Влияние восстановительного режима в спектрах РЛ четко фиксируется по наличию полос излучения, за которые ответственны вакансии кислорода. Распределение центров РЛ в слоях агата и оникса участка Терсюк может свидетельствовать о смене окислительного потенциала (во внешней зоне) на восстановительный (во внутренних зонах), что подтверждается геохимическими данными. Для оникса Салтымаковского хребта характерна идентичность спектров РЛ для всех исследуемых слоев, что свидетельствует о постоянстве условий минералообразования. В целом сделан вывод о преобладании в миндалинах участка Терсюк восстановительной среды, а в миндали-

нах проявлений Салтымаковского хребта и у д. Ключи – окислительной. Наличие двух типов минерализации, отличающихся по люминесцентным свойствам минералов, коррелирующих с различными типами структурных дефектов, может быть связано с разными этапами и генерациями кварц-халцедоновых образований. Присутствие в одном образце как европиевого максимума, так и минимума с послойным их чередованием, а также смена спектрального состава излучения говорят о возможности смены окислительно-восстановительных свойств среды и стадийности процесса.

Исследования были проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Национального исследовательского Томского государственного университета в рамках государственного задания РФ. Изучение микропримесного состава проведено при поддержке Правительства Российской Федерации в рамках проекта № 14.Y26.31.0012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годовиков А.А., Рипинен О.И., Моторин С.Г. Агаты. – М.: Недра, 1987. – 368 с.
2. Шабалин Л.И. Генезис агатов, гидротермальных месторождений и гранитоидных магматических пород как результат действия СРПС (силы разуплотнения поверхностного слоя веществ). – Новосибирск: СНИИГиМС, 2013. – 269 с.
3. Текстурно-морфологические особенности кварц-халцедоновых образований в пределах проявлений Южно-Кузбасского магматического ареала (Южная Сибирь) / Е.В. Токарева, С.И. Коноваленко, Н.Н. Борозновская, Т.С. Небера // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 7. – С. 113–117.
4. Звягинцева Е.В. Геохимическая характеристика кварц-халцедоновых образований Кузбасского магматического ареала // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2018. – № 4. – С. 19–25.
5. A unit for registration of luminescence spectra of natural objects / N.N. Boroznovskaya, V.A. Dimaki, A.V. Klimkin, A.P. Korneva, V.E. Prokopiev, V.G. Sokovikov // Proceedings of SPIE. – 2018. – V. 10614. URL: https://www.researchgate.net/publication/324565774_A_unit_for_registration_of_luminescence_spectra_of_natural_objects (дата обращения 28.08.2020).
6. Барсанов Г.П., Яковлева М.С. Минералогия поделочных и полудрагоценных разновидностей тонкозернистого кремнезема. – М.: Наука, 1984. – 144 с.
7. Hatipoğlu M., Ajò D., Sezai Kirikoğlu M. Cathodoluminescence (CL) features of the Anatolian agates, hydrothermally deposited in different volcanic hosts from Turkey // Journal of Luminescence. – 2011. – V. 131. – P. 1131–1139.
8. Cathodoluminescence of quartz from sandstones: interpretation of the UV range by determination of trace element distribution and fluid-inclusion P-T-X properties in authigenic quartz / C. Demars,

- M. Pagel, E. Deloule, P. Blanc // American Mineralogist. – 1996. – V. 81. – P. 891–901.
9. Stevens-Kalceff M.A., Phillips M.R. Cathodoluminescence microcharacterization of the defect structure of quartz // Physical Review B. – 1995. – V. 52. – P. 3122–3134.
10. Thermoluminescence spectra of igneous quartz and hydrothermal vein quartz / W.J. Rink, H. Rendell, E.A. Marseglia, B.J. Luff, P.D. Townsend // Physics and Chemistry of Minerals. – 1993. – V. 20. – P. 353–361.
11. Origin and geochemistry of agates in Permian volcanic rocks of the Sub-Erzgebirge basin, Saxony (Germany) / J. Götze, R. Möckel, T. Vennemann, A. Müller // Chemical Geology. – 2016. – V. 428. – P. 77–91.
12. Defect structure and luminescence behaviour of agate – results of electron paramagnetic resonance (EPR) and cathodoluminescence (CL) studies / J. Götze, M. Plötze, H. Fuchs, D. Habermann // Mineralogical Magazine. – 1999. – V. 63. – P. 149–163.
13. Boroznovskaya N.N., Nebera T.S. Luminescence of rock-forming quartz of the granitoids from the Kolyvan-Tomsk folded belt in relation to facies features of massif formation // Acta Geodynamica et Geomaterialia. – 2018. – V. 15. – P. 57–66.
14. Таращан А.Н. Люминесценция минералов. – К.: Наукова думка, 1978. – 296 с.
15. Люминесценция кварцевого стекла, индуцированная рентгеновским излучением / И.Н. Мисюра, С.И. Кононенко, О.В. Калантарьян, В.П. Журенко, Р.В. Скиба, С.С. Авотин, Н.Я. Рохманов // Журнал физики и инженерии поверхности. – 2016. – Т. 1. – № 3. – С. 282–288.
16. Magmatic and metasomatic processes during formation of the Nb-Zr-REE deposits Khaldzan Buregte and Tsakhir (Mongolian Altai): Indications from a combined CL-SEM study / U. Kempe, J. Götze, S. Dandar, D. Habermann // Mineralogical Magazine. – 1999. – V. 63. – № 2. – P. 165–177.
17. Pott G.T., McNicol B.D. Spectroscopic study of the coordination and valence of Fe and Mn ions in and on the surface of aluminas and silicas // Discussions of the Faraday society. – 1971. – V. 52. – P. 121–131.
18. Cathodoluminescence microcharacterisation of silicon dioxide polymorphs / M.A. Stevens-Kalceff, M.R. Phillips, A.R. Moon, W. Kalceff // Cathodoluminescence in Geosciences. – 2000. – P. 193–224. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-04086-7_8 (дата обращения 28.08.2020).
19. Investigation of the thermal microstructural effects of CO2 laser engraving on agate via X-ray microtomography / M.K. Cidade, F.L. Palombini, L. Cunha Duarte, S. Paciornik // Optics and Laser Technology. – 2018. – V. 104. – P. 56–64.
20. Luminescence behavior and Raman characterization of dendritic agate in the Dereyalak village (Eskişehir), Turkey / L. Parali, J. Garcia Guinea, R. Kibar, A. Cetin, N. Can // Journal of Luminescence. – 2011. – V. 131. – P. 2317–2324.
21. Möller P. Rare earth element and yttrium fractionation caused by fluid migration // Journal of the Czech Geological Society. – 1997. – V. 42. – № 3. – P. 43.

Поступила 04.09.2020 г.

Информация об авторах

Борозновская Н.Н., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем», Томский государственный университет.

Звягинцева Е.В., аспирант кафедры минералогии и геохимии геолого-географического факультета, Томский государственный университет.

Корнева А.П., инженер-исследователь центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем», Томский государственный университет.

Небера Т.С., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер кафедры минералогии и геохимии геолого-географического факультета, Томский государственный университет.

UDC 553.87

LUMINESCENCE OF QUARTZ-CHALCEDONY FORMATIONS OF KUZBASS AND ITS RELATION TO GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF AGATES

Nina N. Boroznovskaya¹,
boroznovskaya@mail.ru

Elizaveta V. Zvyagintseva¹,
zmei7772006@mail.ru

Alexandra P. Korneva¹,
korneva@mail.tsu.ru

Tatiana S. Nebera¹,
tsnebera@mail.ru

¹ Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by quartz-chalcedony formations of Kuzbass being a potential gem and ornamental stones and by existing uncertainties related to agates formation issues. At the same time Kuzbass agates require more profound mineralogical study.

The aim of the research is to study such luminescence features of quartz-chalcedony formations of South Kuzbass magmatic area as spectral composition and its variations in different zones and layers of studied samples; variations of certain luminescence centers behavior; the way geochemical features influence luminescence spectra of studied minerals.

The objects of the research are quartz-chalcedony formations of South Kuzbass magmatic area including placer-type Klyuchi occurrence (Krapivinsk rayon), agate-containing amygdaloidal basalts of Tersyuk occurrence (Novokuznetsk rayon), agate-containing amygdaloidal basalts of Saltymakovskiy ridge occurrences (Krapivinsk rayon) in Kemerovo region.

The methods of the research are X-ray diffraction analysis, X-ray luminescence analysis and inductively coupled plasma mass spectrometry.

Results. Mineralogical composition was studied with use of X-ray diffraction analysis. The most abundant minerals are quartz and chalcedony (with quartz prevailing). Chalcedony highest content was observed in amygdules with concentric zoning. Among other minerals there are cristobalite, dolomite, calcite, zeolites. Contents of intrinsic and extrinsic defects of different nature taking places in minerals structure were studied by means of X-ray luminescence analysis. Luminescence centers distribution in different layers of Tersyuk agates may be an evidence that oxidative conditions in outer zone changed to reductive conditions in inner zones. This change was also confirmed by geochemical study results. X-ray luminescence spectra of different layers of Saltymakovskiy ridge onyxes are identical to each other. This means that mineral formation conditions were rather stable. It was concluded that there was oxidative environment in amygdules of Saltymakovskiy ridge and Klyuchi occurrences while in amygdules of Tersyuk occurrence there was reductive environment mostly.

Key words:

Quartz, chalcedony, agate, onyx, South Kuzbass magmatic area, luminescence, structure defects.

The investigations were carried out with use of equipment of collective use center «Analytical center of geochemistry of natural systems» of National research Tomsk State University. Elemental composition study was supported by the Government of the Russian Federation (project no. 14.Y26.31.0012).

REFERENCES

- Godovikov A.A., Ripinen O.I., Motorin S.G. *Agaty* [Agates]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 368 p.
- Shabalin L.I. *Genezis agatov, gidrotermalnykh mestorozhdeniy i granitoidnykh magmaticheskikh porod kak rezultat deystviya SRPS (sily razuplotneniya poverkhnostnogo sloya veshchestv)* [Genesis of agates, hydrothermal deposits and granitoid magmatic rocks as a result of action of the FDSL (force of decondensation of the surface layer of substances)]. Novosibirsk, SRIGGMR Publ., 2013. 269 p.
- Tokareva E.V., Konovalenko S.I., Boroznovskaya N.N., Nebera T.S. Textural and morphological features of quartz-chalcedony matter from South Kuzbass igneous areal occurrences (Southern Siberia). *Advances in current natural sciences*, 2017, no. 7, pp. 113–117. In Rus.
- Zvyagintseva E.V. Geochemical characteristics of quartz-chalcedony formations of Kuzbass magmatic area. *Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Science Centre UB RAS*, 2018, no. 4, pp. 19–25. In Rus.
- Boroznovskaya N.N., Dimaki V.A., Klimkin A.V., Korneva A.P., Prokopiev V.E., Sokovikov V.G. A unit for registration of luminescence spectra of natural objects. *Proceedings of SPIE*, 2018, vol. 10614. Available at: https://www.researchgate.net/publication/324565774_A_unit_for_registration_of_luminescence_spectra_of_natural_objects (accessed 28 August 2020).
- Barsanov G.P., Yakovleva M.S. *Mineralogiya podelochnykh i poludragotsennykh raznovidnostey tonkozemistogo kremnezema* [Mineralogy of ornamental and semiprecious kinds of fine-grained silica]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 144 p.
- Hatipoğlu M., Ajò D., Sezai Kirikoğlu M. Cathodoluminescence (CL) features of the Anatolian agates, hydrothermally deposited in different volcanic hosts from Turkey. *Journal of Luminescence*, 2011, vol. 131, pp. 1131–1139.
- Demars C., Pagel M., Deloule E., Blanc P. Cathodoluminescence of quartz from sandstones: interpretation of the UV range by determination of trace element distribution and fluid-inclusion P-T-X properties in authigenic quartz. *American Mineralogist*, 1996, vol. 81, pp. 891–901.
- Stevens-Kalceff M.A., Phillips M.R. Cathodoluminescence microcharacterization of the defect structure of quartz. *Physical Review B*, 1995, vol. 52, pp. 3122–3134.

9. Rink W.J., Rendell H., Marseglia E.A., Luff B.J., Townsend P.D. Thermoluminescence spectra of igneous quartz and hydrothermal vein quartz. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1993, vol. 20, pp. 353–361.
10. Götze J., Möckel R., Vennemann T., Müller A. Origin and geochemistry of agates in Permian volcanic rocks of the Sub-Erzgebirge basin, Saxony (Germany). *Chemical Geology*, 2016, vol. 428, pp. 77–91.
11. Götze J., Plötze M., Fuchs H., Habermann D. Defect structure and luminescence behaviour of agate – results of electron paramagnetic resonance (EPR) and cathodoluminescence (CL) studies. *Mineralogical Magazine*, 1999, vol. 63, pp. 149–163.
12. Boroznovskaya N.N., Nebera T.S. Luminescence of rock-forming quartz of the granitoids from the Kolyvan-Tomsk folded belt in relation to facies features of massif formation. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2018, vol. 15, pp. 57–66.
13. Taraschan A. N. *Lyuminestsentsia mineralov* [Luminescence of minerals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978. 296 p.
14. Mysiura I.N., Kononenko S.I., Kalantaryan O.V., Zhurenko V.P., Skiba R.V., Avotin S.S., Rokhmanov N.Y. Luminescence of quartz glass induced by X-rays. *Journal of Surface Physics and Engineering*, 2016, vol. 1, no. 3, pp. 282–288. In Rus.
15. Kempe U., Götze J., Dandar S., Habermann D. Magmatic and metasomatic processes during formation of the Nb-Zr-REE deposits Khaldzan Buregte and Tsakhir (Mongolian Altai): Indications from a combined CL-SEM study. *Mineralogical Magazine*, 1999, vol. 63, no. 2, pp. 165–177.
16. Pott G.T., McNicol B.D. Spectroscopic study of the coordination and valence of Fe and Mn ions in and on the surface of aluminas and silicas. *Discussions of the Faraday society*, 1971, vol. 52, pp. 121–131.
17. Stevens-Kalceff M.A., Phillips M.R., Moon A.R., Kalceff W. Cathodoluminescence microcharacterisation of silicon dioxide polymorphs. *Cathodoluminescence in Geosciences*, 2000, pp. 193–224. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-04086-7_8 (accessed 28 August 2020).
18. Cidade M.K., Palombini F.L., Cunha Duarte L., Paciornik S. Investigation of the thermal microstructural effects of CO₂ laser engraving on agate via X-ray microtomography. *Optics and Laser Technology*, 2018, vol. 104, pp. 56–64.
19. Parali L., Garcia Guinea J., Kibar R., Cetin A., Can N. Luminescence behavior and Raman characterization of dendritic agate in the Dereyalak village (Eskişehir), Turkey. *Journal of Luminescence*, 2011, vol. 131, pp. 2317–2324.
20. Möller P. Rare earth element and yttrium fractionation caused by fluid migration. *Journal of the Czech Geological Society*, 1997, vol. 42, no. 3, p. 43.

Received: 4 September 2020.

Information about the authors

Nina N. Boroznovskaya, Cand. Sc., senior researcher, Tomsk State University.

Elizaveta V. Zvyagintseva, PhD student, Tomsk State University.

Alexandra P. Korneva, research engineer, Tomsk State University.

Tatiana S. Nebera, Cand. Sc., lead engineer, Tomsk State University.

УДК 628.477.6:620.193.4

ПРОБЛЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ УТИЛИЗАЦИЯ

Барханаджян Аида Леоновна¹,
bal-37@mail.ru

Хакимов Равшан Муминович¹,
hakimov-ravshan@mail.ru

Ибрагимов Ботир Дастанович¹,
ibragimov.bd@mail.ru

Собирова Дилорам Кабуловна¹

Абдукаримова Гульсуной Уринбаевна¹

Айрапетов Дмитрий Алексеевич¹,
ayrapetov92@mail.ru

¹ Ташкентский институт по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог,
Узбекистан, 100060, г. Ташкент, пр. А. Тимура, 20.

Актуальность исследования. Коррозия металлов является наиважнейшей проблемой, с которой связаны большие потери металлов. Ежегодно от коррозии безвозвратно теряются сотни тонн металлов, поэтому все исследования, направленные на антикоррозионную защиту металлов, являются целесообразными и актуальными.

Цель исследования. Существуют различные методы антикоррозионной защиты металлических деталей, но нет достаточно эффективного метода для конкретных условий антикоррозионной защиты. Целью настоящей работы является использование отходов лакокрасочных материалов для получения антикоррозионных покрытий металлических деталей.

Объектом исследования являются отходы лакокрасочных материалов, полученные при окраске автомобилей.

Методы: изучение физико-химических свойств отходов; подбор состава для растворения отходов лакокрасочных материалов; разработка рецептуры и получение антикоррозионной мастики; испытание полученного антикоррозионного лакокрасочного покрытия на адгезию, химостойкость, прочность пленки на изгиб, прочность пленки на удар, огнестойкость, морозостойкость; определение наиболее эффективного компонентного и количественного состава полученного покрытия. Выбраны металлические пластинки для нанесения защитного лакокрасочного покрытия, растворы различных соединений для проведения испытаний по определению потери массы опытных металлических образцов

Результаты. Разработана и получена мастика на основе госсиполовой смолы и твердых отходов лакокрасочных материалов. Отходы лакокрасочных материалов – потери, получаемые при окраске автомобилей. Госсиполовая смола представляет собой отход масложиркомбината. Полученная мастика прошла испытания в лабораторных условиях по показателям качества в соответствии со стандартами, получены положительные результаты. Проведены эксплуатационные испытания в дорожных условиях, пробег автомобиля составил 12780 км, при исследовании изменения на поверхности покрытия не обнаружены.

Ключевые слова:

Отходы, лакокрасочные материалы, подготовка мастики, ингредиенты мастики, антикоррозионные свойства, адгезия, прочностные свойства, эксплуатационные испытания, защита металлов, эффективность мастики.

Введение

Высокие темпы развития промышленных предприятий приводят к образованию большого количества отходов. В связи с этим в настоящее время проблема утилизации отходов является наиважнейшей задачей и решение ее может иметь, несомненно, и экономический, и экологический эффект [1].

Проблема использования отходов может быть решена созданием системы утилизации, т. е. возможности использования отходов после их вторичной переработки. Наиболее эффективным направлением утилизации этих отходов является использование их в качестве техногенного сырья при получении полезных технических продуктов.

В настоящее время общее годовое образование твердых отходов в мире составляет приблизительно

17 млрд т и к 2050 г. достигнет 27 млрд т [2]. Из этого количества около 1,3 млрд т в данное время составляют твердые бытовые отходы, образующиеся в городах мира [3]. Известно, что любые отходы создают неблагоприятную экологическую обстановку, такую как изменение климата, истощение стратосферного озона, ущерб здоровью человека, ущерб экосистеме и истощение ресурсов, и это лишь некоторые из них. Образование большого количества твердых отходов требует комплексно решать эти экологические проблемы, что может привести к более устойчивой экологической обстановке [4].

Учеными различных стран [5–8] проводятся многочисленные исследования, посвященные проблемам утилизации отходов. Ими предлагаются различные варианты переработки промышленных и бытовых отходов. Это, например, изменение технологического

процесса, замена токсичных ингредиентов на безопасные и т. д. Так, на заводах по производству красок на основе растворителей образуются значительные количества опасных отходов, которые должны быть надлежащим образом обработаны, прежде чем их можно будет утилизировать. Поскольку стоимость обработки этих отходов высока, сокращение количества отходов стало решающей проблемой в этой отрасли.

Варианты минимизации отходов выгодны как для владельца завода, так и для окружающей среды. Количество опасных отходов можно свести к минимуму, изменив процесс производства или заменив вредные вещества, которые используются в процессе производства краски, на экологически чистые. Кроме того, разделение различных потоков отходов облегчает извлечение сырья и повышает вероятность его повторного использования в процессе производства. Это снизит эксплуатационные расходы завода [9].

Обстановка по образованию, размещению, накоплению, использованию и обезвреживанию отходов в Республике Узбекистан оценивается постепенным ростом количества образования и промышленных и бытовых отходов.

По статистическим данным в Республике Узбекистан в 2017 г. насчитывалось порядка 114,7 млн т отходов, из них токсичных отходов, подлежащих обязательной переработке, – 42,8 млн т. Поэтому в стране проводится последовательная работа в области охраны окружающей среды, улучшения санитарной и экологической обстановки [10].

В целях охраны окружающей среды в настоящее время в Узбекистане насчитывается 296 мест захоронений и утилизации всех видов отходов.

Здесь следует отметить, что более интенсивно промышленные отходы образуются на предприятиях горно-нефтедобывающей, угольной и химической промышленности. Такое положение объясняется отсутствием технологий по уменьшению их образования и повторного использования.

Вместе с тем в Республике Узбекистан ведутся работы по переработке отходов для получения вторичного сырья, в частности, это отходы газохимического комбината, шинного завода, лакокрасочных производств и др.

В связи с проблемой утилизации отходов в качестве возможного перспективного сырья для получения новой продукции нами рассмотрены отходы лакокрасочных материалов (ЛКМ).

Известно, что отходы лаков и красок по опасности относятся к 3-му классу токсичности, т. к. они содержат помимо растворителей, пластификаторов, наполнителей, пигментов и другие ингредиенты опасного характера, токсично влияющие на здоровье человека. К ним относятся тяжелые металлы, такие как свинец, фосфор, хром и кадмий [11–14].

Учитывая токсичность лакокрасочных материалов в ряде стран Европы, США, Японии были приняты нормы, ограничивающие содержание тяжелых металлов – свинца, фосфора и кадмия в красках [15, 16].

Известно, что до настоящего времени вопрос переработки отходов ЛКМ еще недостаточно изучен и имеющиеся материалы в отечественной и зарубежной литературе не дают достаточной информации по их применению. Хотя имеются некоторые технологии, применяемые для утилизации отходов ЛКМ, такие как у компании «General Motors», предусматривающие пиролиз, и технология компании «Haden», заключающаяся в обезвоживании отходов, его сушку с последующим измельчением [17].

Для решения заданной проблемы нами рассмотрена наиболее перспективная технология использования отходов ЛКМ в получении антикоррозионного покрытия. При этом были использованы отходы лакокрасочных материалов после окраски автомобиля на заводе СП ООО «Sam Auto» для получения антикоррозионной лакокрасочной мастики.

Анализ химического состава отходов показал наличие в нем следующих химических соединений: Al_2O_3 – 1,0 %, ZnO – 1,6 %, SiO_2 – 5,7 %, TiO_2 – 5,65 %, Fe_2O_3 – 0,19 %, FeO – 1,44 %, MgO – 7,4 %, MnO – 0,07 %, CaO – 15,7 %, Na_2O – 0,14 %, BaO – 0,17 %, K_2O – 0,05 %, P_2O_5 – 11,54 %, H_2O – 4,8 %, CO_2 – 4,95 %, SO_3 – 0,85 %, S – 0,7 %.

Как видно из вышеприведенного анализа, наиболее токсичным является оксид фосфора, который необходимо было перевести в нетоксичную форму.

Были отобраны отходы ЛКМ, подобран наиболее эффективный растворитель № 646 (смесь толуол – 50 %, этанол – 15 %, бутилацетат (или амилацетат) – 10 %, бутанол – 10 %, ацетон – 7 %) и др.), куда вводили измельченные до мелкодисперсного состояния отходы. После полного растворения отходов и образования однородной массы ее смешивали с предварительно подготовленной госсиполовой смолой, затем для быстрого высыхания вводили отвердитель для получения мастики. Госсиполовая смола образуется при обработке жиров и масел растворами щелочей и обладает активными функциональными группами [18]. При составлении мастики госсиполовую смолу предварительно обезвоживали.

Анализ на токсичность P_2O_5 полученного нами защитного покрытия приводится в табл. 1 [19].

Таблица 1. Содержание фосфора в образцах

Table 1. Phosphorus content in samples

Образец Sample	Фосфор Phosphorus (P_2O_5), mg/kg
отход ЛКМ/paint work waste	91,0
полученный продукт received product	7,6
ПДК/TLV	27,2

Как показали результаты анализов по токсичности, полученная антикоррозионная мастика существенно отличается от предельно допустимой концентрации (ПДК) по P_2O_5 и составляет 7,6 мг/кг.

Экспериментально был установлен наиболее эффективный компонентный состав антикоррозионной мастики (табл. 2).

Таблица 2. Компонентный состав опытной антикоррозионной мастики

Table 2. Composition of the experimental anti-corrosion mastic

Компонентный состав Component composition	Опытные образцы мастик Prototypes of mastics				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Госсиполовая смола Gossypol resin, %	40	30	60	50	50
Отходы лакокрасочных материалов Waste paint work materials, %	40	50	15	20	30
Растворитель Thesolvent, %	15	15	20	20	15
Отвердитель Hardener, %	5	5	5	10	5

Из таблицы видно, что полученная мастика состоит в основном из госсиполовой смолы (30...60 %) и отходов лакокрасочных материалов (15... 50 %).

Для выявления наиболее подходящей композиции полученной мастики ее наносили на металлические пластинки и после высыхания определяли основные показатели качества полученных покрытий. Эксперименты проводили по каждому образцу в одинаковых условиях (табл. 3) [20].

Как следует из табл. 3 опытные образцы мастики 4 и 5 по качеству не уступают промышленному образцу марки «Барьер», а по морозостойкости превосходят. При повышении температуры на поверхности промышленного образца наблюдались трещины, в то время как лабораторные образцы остались без изменения, поэтому для последующих исследований нами были отобраны образцы 4 и 5.

Определение антикоррозионных свойств полученного покрытия проводили в различных агрессивных растворах. Подготовленные по ГОСТу 9.080-77 пла-

стины из стали, меди, алюминия, латуни, чугуна с покрытием погружали в растворы H_2O , $NaCl$, Na_2CO_3 , $CaCO_3$, с концентрацией 0,1...0,15 % и выдерживали в течении 12 часов при температуре 40 °С. Растворы солей были выбраны в соответствии с условиями эксплуатации автомобилей и с учетом засоленности почвы в ряде областей республики (табл. 4).

Из таблицы видно, что потери массы испытуемых пластин незначительны и составляют от 0,001 до 0,004 г. Визуально поверхность пластин не потеряла блеска и не наблюдались изменения в виде шероховатостей и трещин.

Для эксплуатационных испытаний готовили пластинки с нанесением опытной мастики и промышленного образца марки «Барьер». Пластинки с такими покрытиями прикреплялись на автомобиль в местах, наиболее подверженных загрязнению, коррозии и гравитационному повреждению. Результаты эксплуатационных испытаний приведены в табл. 5.

После пробега автомобиля 12,780 тыс. км пластинки были сняты и проанализированы. Визуальный анализ показал, что лабораторный образец практически остался без изменения, а образец с промышленным покрытием был сильно поврежден, при этом потери массы составили для лабораторного образца 0,12 г, а для промышленного – 0,18 г. Следует отметить, что эксплуатационные испытания проводились в тяжелых погодных условиях при высокой влажности, в морозную и дождливую погоду в городских и загородных условиях.

Из результатов экспериментальных испытаний следует, что полученные покрытия на основе отходов ЛКМ и госсиполовой смолы по показателям качества соответствуют требованиям, предъявляемым к защитным покрытиям.

Таблица 3. Испытания полученных опытных образцов в лабораторных условиях

Table 3. Laboratory tests of the obtained prototypes

Показатели качества Quality indicators	Номер образца/Sample Number					Промышленный образец «Барьер» Industrial design «Barrier»
	1	2	3	4	5	
Прочность на удар, кгс/см ² Impact strength, kgс/см ²	Выдерживает With stands					
Прочность на изгиб Bending Strength (кгс/мм ²)	–	–	–	Выдерживает/Withstands		
Химическая стойкость при 80 °С Chemical resistance at 80 °C	Не выдерживает Do not withstand			Выдерживает 200 часов Withstands 200 hours		
Термостойкость при 100 °С Heat resistance at 100 °C	Провисает Sag			Не провисают под углом 45° Do not sag at an angle of 45°		Не провисает Does not sag
Морозостойкость при 20 °С Frost resistance at 20 °C	Имеются трещины Cracks			Нет трещин No cracks		Имеются глубокие трещины Deep cracks
Адгезия/Adhesion	Хор./Good					
Огнестойкость Fire resistance	Не горит Does not burn					Горит Burns
Внешний вид, цвет Appearance, color	Темно-коричневый, шероховато-гладкая поверхность Dark brown, rough smooth surface					Серый, матовая поверхность Gray, matt surface

Таблица 4. Коррозия металлов в растворах различных сред при концентрациях 0,1...0,15 %

Table 4. Corrosion of metals in solutions of various media at concentrations 0,1...0,15 %

Растворы различных сред Solutions of different media	Образец/Sample	Сталь/Steel	Медь/Copper	Алюминий Aluminum	Латунь Brass Cast	Чугун Iron
H ₂ O	До опыта Before the experiment	12,713	4,812	2,774	6,632	6,818
	После опыта After the experiment	12,713	4,812	2,774	6,632	6,817
	Потеря массы Mass loss	0	0	0	0	0,001
NaCl	До опыта Before the experiment	12,713	4,815	2,805	6,630	6,851
	После опыта After the experiment	12,711	4,811	2,805	6,628	6,849
	Потеря массы Mass loss	0,002	0,004	0	0,002	0,002
Na ₂ CO ₃	До опыта Before the experiment	12,7	4,805	2,695	6,645	6,853
	После опыта After the experiment	12,699	4,801	2,695	6,644	6,851
	Потеря массы Mass loss	0,001	0,004	0	0,001	0,002
CaCO ₃	До опыта Before the experiment	12,785	4,816	2,711	6,651	6,905
	После опыта After the experiment	12,783	4,814	2,711	6,650	6,902
	Потеря массы Mass loss	0,002	0,002	0	0,001	0,003

Таблица 5. Результаты эксплуатационных испытаний

Table 5. Results after testing

Показатели/Indicators	Опытный образец/Prototype		Промышленный образец марки «Барьер» Industrial model «Barrier»	
	I ₁	II ₁	I ₂	II ₂
Размер пластинок, см size of the plates, cm	10*10			
Масса пластинки до опыта без мастики, г Plate weight before the experiment without mastic, g	100,3	98,75	98,7	96,95
Масса пластинки с мастикой до опыта, г Weight of plate with mastic before the experiment, g	105,37	99,72	103,85	97,90
Масса пластинки с мастикой после опыта, г Weight of the plate with mastic after the experiment, g	105,22	99,60	103,65	97,72
Пробег автомобиля, тыс. км Vehicle mileage, thousand km	12,780	12,780	12,780	12,780

Особенностью данной работы является использование отходов для получения нужных технических продуктов, что важно, как с экологической, так и с экономической точки зрения.

По известным данным на окраску одного автомобиля расходуется порядка 30–35 кг краски. Потери при окраске составляют 50 % в виде отходов. Учитывая, что ежегодно завод СП ООО «Sam Auto» выпускает в среднем 4000 различных моделей автомобилей, эти потери составят более 35–50 т, которые не перерабатываются, не утилизируются, а закапываются в могильнике, при этом заражается огромная площадь земли, для восстановления которой потребуются огромные затраты.

Таким образом, возможность использования лакокрасочных отходов только на одном заводе существенно улучшит экологическую обстановку, исключается необходимость в могильниках и заражение почвы.

Заключение

1. Получено новое антикоррозионное покрытие на основе отходов ЛКМ и госсиполовой смолы.
2. Результаты испытаний антикоррозионного покрытия показали, что по прочности на удар, на изгиб, химостойкости, морозостойкости, огнестойкости, адгезии оно отвечает требованиям, предъявляемым к антикоррозионным покрытиям, и является не токсичным.
3. Полученное антикоррозионное покрытие может быть рекомендовано для покрытия днища, внутренней поверхности крыльев, кузова автомобилей, деталей сельскохозяйственной техники, а также может быть использовано в автосервисных и других производствах.
4. Применение отходов для получения антикоррозионной мастики в автомобильной промышленности и дорожно-строительной технике, несомненно, даст как экологический, так и экономический эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заболотских В.В., Васильев А.В., Батова К.Э. Анализ проблемы образования отходов лакокрасочных материалов в самарской области и перспективы их переработки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17. – № 4. – С. 273–276.
2. Karak T., Bhagat R.M., Bhattacharyya P. Municipal solid waste generation, composition, and management: the world scenario // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2012. – V. 42. – № 15. – P. 1509–1630. URL: <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.569871> (дата обращения 28.08.2020).
3. Hoornweg D., Bhada-Tata P. What a waste – a global review of solid waste management // World Bank. – 2012. – № 15. – P. 116. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388> (дата обращения 28.08.2020).
4. Review of LCA studies of solid waste management systems. P. I: Lessons learned and perspectives / A. Laurent, I. Bakas, J. Clavreul, A. Bernstad, M. Niero, E. Gentil, M.Z. Hauschild, T.H. Christensen // Waste Management. – 2014. – V. 34. – № 3. – P. 573–588. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045>
5. Vassilis J.I., Konstantinos M. Household hazardous waste management: a review // Journal of Environmental Management. – 2015. – V. 150. – P. 310–321. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.021> (дата обращения 28.08.2020).
6. Mostafa M.K., Peters R.W. Reuse paint wastewater in the manufacture of cement bricks and tiles // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2017. – V. 19. – P. 840–850.
7. Eugenio F.D., Pajarito B.B. Potential anti-corrosion additives derived from waste plastic sachets // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 634. – № 1. – P. 1–6. URL: https://www.researchgate.net/publication/336531640_Potential_anti-corrosion_additives_derived_from_waste_plastic_sachets (дата обращения 28.08.2020).
8. Mohamed M.G., Ahmed N.M., Abd El-Gawad W.M. Corrosion protection performance of reinforced steel coated with paints based on waste materials // Anti-Corrosion Methods and Materials. – 2018. – V. 65. – № 4. – P. 368–374.
9. Dursun D., Sengul F. Waste minimization study in a solvent-based paint manufacturing plant // Resources, conservation and recycling. – 2006. – V. 47. – № 4. – P. 316–331.
10. Указ Президента Республики Узбекистан № УП-5863 от 30.10.2019 «Об утверждении концепции охраны окружающей среды Республики Узбекистан до 2030 года». – Ташкент, 2019. – 43 с.
11. Козыренко М.И., Кухарчик Т.И. Загрязнение почв при производстве лакокрасочных материалов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2015. – № 3. – С. 230–238.
12. Obeng-Gyasi E. Sources of lead exposure in various countries // Reviews on environmental health. – 2019. – V. 34. – № 1. – P. 25–34.
13. Characterisation of silicon, zirconium and aluminium coated titanium dioxide pigments recovered from paint waste / M.C. Karlsson, Z. Abbas, R. Bordes, Y. Cao, A. Larsson, P. Taylor, B. Steenari // Dyes and pigments. – 2019. – V. 162. – P. 145–152.
14. A simple and effective process for recycling zinc-rich paint residue / P. Xing, B. Ma, C. Wang, L. Wang, Y. Chen // Waste management. – 2018. – V. 76. – P. 234–241.
15. Developing common core criteria for paints. Final Report submitted to Global Eco-labeling Network. – Bangkok: Thailand Environment Institute, 2003. – 17 p. URL: <https://globalecolabelling.net/assets/Uploads/tech-030522-02.pdf> (дата обращения 28.08.2020).
16. Double standard. Investigating lead (Pb) content in leading enamel paint brands in South Asia. – New Delhi: Toxics Link, 2011. – 36 p. URL: http://toxicslink.org/docs/Double_Standard_Lead_Paint_29_June_2011.pdf (дата обращения 28.08.2020).
17. Доусон Г., Мерсер Б. Обезвреживание токсичных отходов / Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1996. – 288 с.
18. The inhibition of the corrosion of carbon steel by oligomeric corrosion inhibitors in different media / K.S. Beknazarov, A.T. Dzhalilov, U.Y. Ostanov, A.M. Erkaev // International Polymer Science and Technology. – 2015. – V. 42. – № 4. – P. 33–37.
19. Использование отходов лакокрасочных материалов для получения полезных технических продуктов / А.Л. Барханаджян, Р.М. Хакимов, Р. Азизов, Т. Валитов // Актуальные проблемы автомобильно-дорожного комплекса Узбекистана: Сборник материалов республиканской научно-практической конференции. – Ташкент, 2010. – Ч. 1. – С. 67–69.
20. Проблема утилизации отходов лакокрасочных материалов / Р.М. Хакимов, Т.А. Садыков, Р. Азизов, Т. Валитов // Вестник ТАДИ Ташкент. – 2015. – № 1. – С. 103–106.

Поступила 04.09.2020 г.

Информация об авторах

Барханаджян А.Л., кандидат химических наук, доцент кафедры экологии и двигателей внутреннего сгорания Ташкентского института по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог.

Хакимов Р.М., кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и двигателей внутреннего сгорания Ташкентского института по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог.

Ибрагимов Б.Д., старший преподаватель кафедры эксплуатации автомобильного транспорта Ташкентского института по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог.

Собирова Д.К., кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры естественных наук Ташкентского института по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог.

Абдукаримова Г.У., старший преподаватель кафедры эксплуатации автомобильного транспорта Ташкентского института по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог.

Айрапетов Д.А., ассистент кафедры экологии и двигателей внутреннего сгорания Ташкентского института по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог.

UDC 628.477.6:620.193.4

PROBLEM OF USING WASTE OF PAINT AND VARNISHING MATERIALS AND THEIR DISPOSAL

Aida L. Barkhanadzhyan¹,
bal-37@mail.ru

Ravshan M. Khakimov¹,
hakimov-ravshan@mail.ru

Botir D. Ibragimov¹,
ibragimov.bd@mail.ru

Diloram K. Sobirova¹

Gulsunoy U. Abdukarimova¹

Dmitriy A. Ayrapetov¹,
ayrapetov92@mail.ru

¹ Tashkent Institute of Design, Construction & Maintenance of Automotive Roads,
20, A. Temur avenue, Tashkent, 100060, Uzbekistan.

The relevance of the research. Corrosion of metals is the most important problem with which large losses of metals are associated. Hundreds of tons of metals are irretrievably lost annually from corrosion, therefore, all studies aimed at the corrosion protection of metals are appropriate and relevant.

The main aim. There are various methods of anticorrosion protection of metal parts, but there is no sufficiently effective method for specific conditions of anticorrosion protection. The aim of this work is the use of waste paint and varnish materials to obtain anti-corrosion coatings of metal parts.

Objects: waste paint and varnish materials obtained by painting cars.

Methods: study of the physicochemical properties of the waste; selection of compositions for dissolving paintwork materials; formulation development and receipt of anticorrosive mastic; testing the obtained anticorrosive paint coating for adhesion, chemical resistance, film strength in bending, impact strength, fire resistance, frost resistance; preparation of metal plates for applying a protective paint coating and solutions of various compounds for testing to determine the mass loss of experimental metal samples; determination of the most effective component and quantitative composition of the resulting coating.

Results. The authors have developed and obtained the mastic based on gossypol resin and solid waste of paints and varnishes. Gossypol resin is a waste oil-fat plant. The resulting mastic was tested in laboratory conditions in terms of quality, positive results were obtained. Operational tests were carried out in road conditions, the car's mileage was 12,780 km, no changes were found on the surface of the coating.

Key words:

Waste, paints and varnishes, mastic preparation, mastic ingredients, anticorrosion properties, adhesion, strength properties, performance tests, metal protection, mastic efficiency.

REFERENCES

1. Zabolotskikh V.V., Vasiliev A.V., Batova K.E. Analysis of the problem of the formation of waste paint and varnish materials in the Samara region and the prospects for their processing. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 273–276. In Rus.
2. Karak T., Bhagat R.M., Bhattacharyya P. Municipal solid waste generation, composition, and management: the world scenario. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, vol. 42, no. 15, pp. 1509–1630. Available at: <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.569871> (accessed 28 August 2020).
3. Hoornweg D., Bhada-Tata P. What a waste – a global review of solid waste management. *World Bank*, 2012, no. 15, pp. 116. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388> (accessed 28 August 2020).
4. Laurent A., Bakas I., Clavreul J., Bernstad A., Niero M., Gentil E., Hauschild M.Z., Christensen T.H. Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Management*, 2014, vol. 34, no. 3, pp. 573–588. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045> (accessed 28 August 2020).
5. Vassilis J.I., Konstantinos M. Household hazardous waste management: a review. *Journal of Environmental Management*, 2015, vol. 150, pp. 310–321. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.021> (accessed 28 August 2020).
6. Mostafa M.K., Peters R.W. Reuse paint wastewater in the manufacture of cement bricks and tiles. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2017, vol. 19, pp. 840–850.
7. Eugenio F.D., Pajarito B.B. Potential anti-corrosion additives derived from waste plastic sachets. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 634, no. 1, pp. 1–6. Available at: https://www.researchgate.net/publication/336531640_Potential_anti-corrosion_additives_derived_from_waste_plastic_sachets (accessed 28 August 2020).
8. Mohamed M.G., Ahmed N.M., Abd El-Gawad W.M. Corrosion protection performance of reinforced steel coated with paints based on waste materials. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2018, vol. 65, no. 4, pp. 368–374.
9. Dursun D., Sengul F. Waste minimization study in a solvent-based paint manufacturing plant. *Resources, conservation and recycling*, 2006, vol. 47, no. 4, pp. 316–331.
10. *Ukaz Prezidenta Respubliki Uzbekistan № UP-5863 ot 30.10.2019 «Ob utverzhdenii kontseptsii okhrany okruzhayushchei sredy Respubliki Uzbekistan do 2030 goda»* [Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-5863 dated 10/30/2019 «On approval of the concept of environmental protection of the Republic of Uzbekistan until 2030»]. Tashkent, 2019. 43 p.
11. Kozlyrenko M.I., Kukharchik T.I. Soil pollution in the manufacture of paints and varnishes]. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2015, no. 3, pp. 230–238. In Rus.

12. Obeng-Gyasi E. Sources of lead exposure in various countries. *Reviews on environmental health*, 2019, vol. 34, no. 1, pp. 25–34.
13. Karlsson M.C., Abbas Z., Bordes R., Cao Y., Larsson A., Taylor P., Steenari B. Characterisation of silicon, zirconium and aluminium coated titanium dioxide pigments recovered from paint waste. *Dyes and pigments*, 2019, vol. 162, pp. 145–152.
14. Xing P., Ma B., Wang C., Wang L., Chen Y. A simple and effective process for recycling zinc-rich paint residue. *Waste management*, 2018, vol. 76, pp. 234–241.
15. *Developing common core criteria for paints. Final Report submitted to Global Eco-labeling Network*. Bangkok, Thailand Environment Institute, 2003. 17 p. Available at: <https://globalecolabelling.net/assets/Uploads/tech-030522-02.pdf> (accessed 28 August 2020).
16. *Double standard. Investigating lead (Pb) content in leading enamel paint brands in South Asia*. New Delhi, Toxics Link, 2011, p. 36. Available at: http://toxicslink.org/docs/Double_Standard_Lead_Paint_29_June_2011.pdf (accessed 28 August 2020).
17. Dawson G., Mercer B. *Obezvrezhivanie toksichnykh otkhodov* [Neutralization of toxic waste]. Translated from English. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996. 288 p.
18. Beknazarov K.S., Dzhililov A.T., Ostanov U.Y., Erkaev A.M. The inhibition of the corrosion of carbon steel by oligomeric corrosion inhibitors in different media. *International Polymer Science and Technology*, 2015, vol. 42, no. 4, pp. 33–37.
19. Barkhanadzhyan A.L., Khakimov R.M., Azizov R., Valitov T. Ispolzovanie otkhodov lakokrasochnykh materialov dlya polucheniya poleznykh tekhnicheskikh produktov [The use of waste paint and varnish materials to obtain useful technical products]. *Sbornik materialov respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Aktualnye problemy avtomobilno-dorozhnogo kompleksa Uzbekistana* [Collection of materials of the Republican scientific-practical conference. Actual problems of the automobile road complex of Uzbekistan]. Tashkent, 2010. P. 1, pp. 67–69.
20. Hakimov R.M., Sadykov T.A., Azizov R., Valitov T. The problem of the disposal of waste paint and varnish materials]. *Bulletin of TADI Tashkent*, 2010, no. 1, pp. 103–106. In Rus.

Received: 4 September 2020.

Information about the authors

Aida L. Barkhanadzhyan, Cand. Sc., associate professor, Tashkent Institute of Design, Construction & Maintenance of Automotive Roads.

Ravshan M. Khakimov, Cand. Sc., associate professor, Tashkent Institute of Design, Construction & Maintenance of Automotive Roads.

Botir D. Ibragimov, senior lecturer, Tashkent Institute of Design, Construction & Maintenance of Automotive Roads.

Diloram K. Sobirova, Cand. Sc., senior lecturer, Tashkent Institute of Design, Construction & Maintenance of Automotive Roads.

Gulsunoy U. Abdukarimova, senior lecturer, Tashkent Institute of Design, Construction & Maintenance of Automotive Roads.

Dmitriy A. Ayrapetov, assistant, Tashkent Institute of Design, Construction & Maintenance of Automotive Roads.

УДК 550.8.053

ВЫДЕЛЕНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ТИПОВ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА С УЧЕТОМ ИХ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Путилов Иван Сергеевич¹,
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

Разницын Александр Вячеславович¹,
alexandrraznitsyn@gmail.com

¹ Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми,
Россия, 614015, г. Пермь, ул. Пермская, 3а.

Актуальность. Значительная часть мировых запасов углеводородов приурочена к карбонатным резервуарам, характеризующимся сложным строением пустотного пространства. Подсчет запасов и проектирование разработки таких залежей требуют детального изучения структуры пустотного пространства, которая напрямую определяет коллекторские свойства пород. Выделение петрофизических классов пород является неотъемлемой частью построения петрофизической модели залежи углеводородов. Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) является одним из методов изучения структуры пустотного пространства горных пород и имеет ряд преимуществ перед другими методами. Однако в опубликованной литературе отсутствует информация о применении данного метода для решения задач петротипизации. Результаты выделения петрофизических классов на основе комплексирования данных ядерного магнитного резонанса и микролитологического описания шлифов позволят значительно улучшить качество петрофизического обеспечения геологического и гидродинамического моделирования залежи и, следовательно, повысить точность подсчета запасов углеводородов и эффективность их разработки.

Цель: выделение петрофизических типов карбонатных пород на основе комплексирования данных ядерного магнитного резонанса и микроописания шлифов, а также оценка правильности выделения классов методами математической статистики.
Объект: карбонатные породы формации Мишриф, являющейся продуктивной в разрезе одного из месторождений Месопотамской нефтегазоносной провинции.

Методы: анализ результатов ЯМР-исследований образцов керн, микроописания шлифов и стандартных лабораторных исследований керн, методы математической статистики.

Результаты. На основе комплексного анализа результатов ЯМР-исследований керн и микроописания шлифов выделены три петрофизических класса в разрезе изучаемой скважины, вскрывшей продуктивные отложения: образцы со структурами породы вакстоун и вакстоун/флаутстоун объединены в 1 класс, со структурами пакстоун, грейнстоун и рудстоун – во 2 класс, и со структурой фреймстоун – в 3 класс. Данная петротипизация подтверждена результатами статистического анализа.

Ключевые слова:

Петрофизический тип, метод ядерного магнитного резонанса, классификация Р. Данема, время поперечной релаксации, карбонатные породы, статистический анализ.

Введение

Явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР), начиная с 90-х гг. XX в., широко используется при изучении петрофизических свойств коллекторов нефти и газа (как в лаборатории, так и в скважине – ядерный магнитный каротаж), а также исследовании свойств пластовых флюидов [1]. Исследования горных пород и флюидов методом ЯМР основаны на изучении резонансного поглощения электромагнитной энергии ядрами атомов водорода. Физические основы явления ЯМР подробно описаны в работе И.С. Джафарова, П.Е. Сынгаевского и С.Ф. Хафизова «Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов» [2]. Метод ЯМР является уникальным неразрушающим методом исследования горных пород и позволяет определять такие важные характеристики коллекторов, как коэффициенты пористости и остаточной водонасыщенности, структуру порового пространства, распределение по типам пористости, смачиваемость и многие другие [3–12].

При выполнении лабораторных ЯМР-исследований, как правило, проводят измерение времен поперечной релаксации (ввиду того, что поперечная релаксация протонов происходит быстрее, чем продольная, что значительно сокращает время проведения эксперимента). Известно, что при полном насыщении образца керн одним флюидом с известным водородным индексом и отсутствии градиента магнитного поля доминирующим механизмом релаксации ядер является их релаксация на поверхности пор. Время поперечной релаксации в этом случае определяется следующим выражением [2]:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V}, \quad (1)$$

где T_2 – время поперечной релаксации, мс; ρ – релаксационная активность породы, мкм/мс; S/V – площадь удельной поверхности порового пространства, мкм²/мкм³.

Как видно из выражения (1), отношение площади поры (S) к ее объему (V) пропорционально обратной величине размера поры, а время поперечной релаксации T_2 , в свою очередь, пропорцио-

нально размеру поры. Таким образом, метод ЯМР при определенных условиях (насыщение образца одним флюидом и отсутствие градиента магнитного поля) можно рассматривать в качестве метода изучения структуры пустотного пространства горных пород, применение которого в отличие от других известных методов позволяет сократить временные и трудовые затраты, а также получить ряд других важных петрофизических характеристик (комплексный метод).

Выделение петрофизических типов пород является одним из этапов построения петрофизической модели, лежащей в основе геологической модели залежи углеводородов [13]. Как правило, разделение пород на классы основано на взаимосвязи размеров пор и структурных особенностей [14], размерах поровых каналов [15], единиц гидравлического потока (FZI) [16] и др. [17].

В данной работе выделение петрофизических классов карбонатных пород проведено на основе комплексного анализа результатов микроописания шлифов и ЯМР-исследований керн, а именно на взаимосвязи структуры отложений и структуры пустотного пространства пород.

Объектом исследования является формация Мишириф, представляющая собой один из продуктивных комплексов изучаемого нефтяного месторождения Месопотамской нефтегазоносной провинции [18]. Исследуемые отложения изучены по керну и представлены чередованием известняков от светло-серой до бурой окраски, в различной степени доломитизированных, неравномерно пористых, прослоями органогенно-детритовых, неравномерно битуминизированных. Накопление осадков происходило в сеноман-раннетуронское время поздне меловой эпохи в условиях шельфовой окраины палеоокеана Тетис.

Структурная характеристика изучаемых отложений

Структура изучаемых отложений охарактеризована по классификации карбонатных пород Р. Данема, дополненной А. Эмбри и Дж. Кловеном в интерпретации В.Г. Кузнецова. При разделении карбонатных пород здесь учитываются такие факторы, как наличие или отсутствие первичных структур, количественные соотношения между первичными форменными элементами и цементом, форма, размер и степень упаковки компонентов, структура цемента (основной массы), характер кристаллов. Являясь прежде всего структурной, данная классификация также несет определенный генетический смысл, отражая прежде всего динамику среды отложения. Так, по мере увеличения гидродинамической активности возрастает количество скелетного материала, сокращается количество микрита при одновременном увеличении спарита [19].

В данной работе анализируются результаты ЯМР-исследований 91 образца керн со следующими структурами пород по Р. Данему [19]:

1) *Вакстоун (49 образцов)* – микро- и тонкозернистый известняк с достаточно обильным содержа-

нием (до 40–50 %) форменных элементов размером менее 2 мм. Обязательным условием определения структуры является погружение форменных компонентов в ил без их соприкосновения.

- 2) *Вакстоун/флаутстоун (14 образцов)* – промежуточная структура. Флаутстоун – известняк, состоящий из форменных элементов размером более 2 мм, с микро-тонкозернистым цементом порового и базального типов. Флаутстоуны характеризуют спокойную гидродинамическую среду седиментации.
- 3) *Пакстоун (8 образцов)* – известняк, состоящий из форменных элементов размером менее 2 мм, с тонко-микрозернистым цементом порового и базального типов. Для этой структуры характерно соприкосновение зерен друг с другом. Пакстоуны накапливались в обстановках с неустойчивой гидродинамикой среды;
- 4) *Грейнстоун (13 образцов)* – известняк, состоящий из форменных элементов размером менее 2 мм, с яснокристаллическим (спаритовым) цементом порового и базального типов. Опорой («каркасом») структуры являются зерна. Эта структура по уровню энергоемкости самая высшая. Отсутствие ила и наличие спарита свидетельствуют о «промытости» породы.
- 5) *Рудстоун (3 образца)* – известняк, состоящий из форменных элементов размером более 2 мм, с яснокристаллическим (спаритовым) цементом порового типа. Зерна опираются друг на друга, образуя «каркас» породы. Формирование этой структуры происходило в условиях высокой активности водной среды, причем чем меньше размерность структурных компонентов породы, тем выше динамическая характеристика среды осадконакопления.
- 6) *Фреймстоун (4 образца)* – автохтонный известняк, в котором массивные формы ископаемых организмов образуют во время осадконакопления прочный трехмерный остов, промежутки которого могли заполняться карбонатным материалом другой структуры или оставаться пустыми.

Выделение петрофизических типов изучаемых отложений

Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на структуру пустотного пространства пород, а следовательно, и на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) является структура породы [20, 21]. Поэтому первичное разделение образцов керн изучаемых отложений основано на результатах литологического микроописания шлифов.

Для изучения петрофизических характеристик выделенных групп образцов в работе используются следующие показатели, полученные в результате интерпретации данных ЯМР-исследований:

1. Коэффициент общей пористости (K_n).
2. Распределение времен поперечной релаксации T_2 по типам пористости (вклад в общую пористость), включающее:

- глинисто-связанную воду (CBW) и микропористость (отделяется по общепринятой [22] граничной отсечке $T_2=3$ мс);
 - капиллярно-связанную воду (отделяется по двум граничным отсечкам – 3 мс и $T_{2гр}$, определенной методом граничной отсечки [2]);
 - эффективную пористость (отделяется по двум граничным отсечкам – $T_{2гр}$, определенной методом граничной отсечки, и общепринятой граничной отсечке $T_2=750$ мс [22]);
 - каверновую пористость (отделяется по граничной отсечке 750 мс).
3. Коэффициент остаточной водонасыщенности $K_{ов}$, определенный по методу граничной отсечки и соответствующее время граничной отсечки $T_{2гр}$.
 4. Индекс свободного флюида FFI, определяемый как сумма эффективной и каверновой пористостей.
 5. Отношение индекса свободного флюида к индексу связанной воды FFI/BVI.
 6. Модальное значение времени поперечной релаксации T_{2mode} .
 7. Логарифмическое среднее $T_{2logmean}$, определяемое по формуле:

$$T_{2logmean} = 10^{\frac{\sum K_{ni} \log(T_{2j})}{\sum K_{ni}}},$$

где K_{ni} – i -я пористость, соответствующая j -му значению T_{2j} .

В табл. 1 приведены основные статистические характеристики результатов ЯМР-исследований отдельно для образцов с различной структурой породы по Р. Данему. По приведенным средним данным видно, что наилучшими коллекторскими свойствами обладают образцы со структурой фреймстоун (K_n (ЯМР)=17,76 %, $K_{ов}$ (ЯМР)=11,50 %, FFI=88,50 %, FFI/BVI=8,06), наихудшими – образцы со структурой вакстоун (K_n (ЯМР)=10,85 %, $K_{ов}$ (ЯМР)=71,73 %, FFI=28,27 %, FFI/BVI=0,49).

С целью определения статистических различий образцов с разной структурой пород по средним значениям результатов ЯМР-исследований был применен t -критерий Стьюдента (табл. 2) [23]. Среди анализируемых показателей наиболее информативными (по средним значениям которых изучаемые группы образцов статистически отличаются друг от друга) являются коэффициент остаточной водонасыщенности ($K_{ов}$), содержание капиллярно-связанной воды (BVI), каверновая пористость, индекс свободного флюида (FFI), отношение индекса свободного флюида к индексу связанного флюида (FFI/BVI), модальное значение времени поперечной релаксации (T_{2mode}), логарифмическое среднее значение времени поперечной релаксации ($T_{2logmean}$). При этом стоит отметить, что ни по каким показателям не разделяются между собой образцы со структурами пакстоун, грейнстоун и рудстоун, что свидетельствует о близких значениях результатов ЯМР-исследований и, следовательно, о схожей структуре пустотного пространства.

Таблица 1. Основные статистические характеристики результатов ЯМР-исследований образцов с различной структурой породы

Table 1. The main statistical characteristics of the different rock structure samples nuclear magnetic resonance (NMR) experiments results

Параметры Parameters	Тип структуры по Р. Данему Rock structure type (R. Dunham classification)					
	Вакстоун Wackestone	Вакстоун/ флаутстоун Wackestone/ Floatstone	Пакстоун Packstone	Грейнстоун Grainstone	Рудстоун Rudstone	Фреймстоун Framestone
K_n (ЯМР), %	10.85±5.09 3,42–23.08	16.52±6.44 6,18–24.35	21.22±2.92 15,75–24,13	17.47±9.38 5,20–32,07	15.67±7.77 9,37–24,35	17.76±2.56 14,52–20,79
$T_{2гр}$, мс (ms)	111.88±48.78 55,00–344,00	113.07±33.23 69,00–175,00	131.88±41.44 83,00–220,00	159.15±62.76 45,00–282,00	98.67±46.23 70,00–152,00	83.50±32.54 60,00–129,00
$K_{ов}$ (ЯМР), %	71.73±13.84 29,43–94,02	60.05±22.10 25,09–89,16	31.08±15.27 15,45–54,38	32.63±16.08 11,06–61,30	23.84±9.54 13,29–31,85	11.50±2.67 10,03–15,50
Глинисто-связанная вода + микропористость*, % Clay-bound water + microporosity, %	3.24±2.91 0,00–13,36	1.24±1.07 0,00–3,20	0.27±0.19 0,00–0,64	0.63±1.11 0,00–3,46	0.56±0.50 0,08–1,07	0.12±0.14 0,00–0,24
Капиллярно-связанная вода*, % Capillary-bound water, %	68.49±13.08 28,65–90,18	58.80±21.69 25,09–87,19	30.81±15.22 15,09–54,18	32.00±15.46 10,70–58,65	23.28±9.06 13,21–30,78	11.39±2.60 9,89–15,28
Эффективная пористость*, % Free fluid porosity, %	25.86±12.37 2,98–65,20	35.24±18.77 9,83–66,66	49.08±12.24 30,91–71,78	43.34±10.07 29,73–60,90	54.99±13.51 40,82–67,73	25.29±8.38 16,49–35,79
Каверновая пористость*, % Vuggy porosity, %	2.41±3.33 0,00–18,20	4.72±5.68 0,21–20,55	19.84±14.09 0,64–40,79	24.03±15.57 0,00–46,31	21.18±22.99 0,42–45,89	63.20±6.71 54,08–68,47
ИСФ, % FFI, %	28.27±13.84 5,98–70,58	39.95±22.10 10,85–74,91	68.92±15.27 45,63–84,85	67.37±16.08 38,70–88,94	76.16±9.54 68,15–86,71	88.50±2.67 84,50–89,97
ИСФ/ИСВ FFI/BVI	0.47±0.44 0,06–2,40	0.98±0.96 0,12–2,99	2.94±1.75 0,84–5,47	2.89±2.07 0,63–8,05	3.82±2.37 2,14–6,53	7.99±1.70 5,45–8,97
T_{2mode} , мс (ms)	74.07±71.03 13,51–451,30	109.02±61.55 30,35–203,10	525.53±356.77 130,60–1117,00	590.09±359.33 55,03–1117,00	492.13±418.13 174,30–965,80	1812.25±179.70 1650,00–2056,00
$T_{2logmean}$, мс (ms)	54.65±33.57 12,63–179,28	88.15±48.78 28,54–169,53	255.43±123.72 99,75–461,98	291.01±136.59 34,86–520,41	257.23±201.26 113,40–487,22	691.65±95.20 574,76–795,68

Примечание: в числителе указаны среднее арифметическое значение ± среднее квадратическое отклонение, в знаменателе – размах значений; * – вклад в общую пористость.

Note: numerator is arithmetic mean value ± standard deviation, denominator is value range; * – percent of total porosity.

Таблица 2. Т-критерии Стьюдента для сравнения результатов ядерно-магнитно-резонансных (ЯМР) исследований образцов с различной структурой породы
Table 2. Student's t-tests for comparison of the different rock structure samples nuclear magnetic resonance (NMR) experiments results

Структуры по Р. Данему Rock structure type (R. Dunham classification)	Параметры (Parameters)										T ₂ mode	T ₂ logmean
	K _r (ЯМР) K _p (NMR)	T ₂ pr T _{2cut-off}	K _{св} (ЯМР) K _{св} (NMR)	Глинисто-связанная вода+микропористость, Clay-bound water+microporosity	Капиллярно- связанная вода Capillary-bound water	Эффективная пористость Free fluid porosity	Каверновая пористость Vuggy porosity	ИСФ FFI	ИСФ/ИСВ FFI/BVI			
Вакстоун–грейнстоун Wackestone–grainstone	<u>-3,429</u> <u>0,001</u>	<u>-2,921</u> <u>0,005</u>	<u>8,756</u> <u>0,000</u>	<u>3,164</u> <u>0,002</u>	<u>8,608</u> <u>0,000</u>	<u>-4,690</u> <u>0,000</u>	<u>-10,249</u> <u>0,000</u>	<u>-8,756</u> <u>0,000</u>	<u>-7,683</u> <u>0,000</u>	<u>-9,572</u> <u>0,000</u>	<u>-11,131</u> <u>0,000</u>	
Вакстоун–пакстоун Wackestone–packstone	<u>-5,591</u> <u>0,000</u>	<u>-1,095</u> <u>0,278</u>	<u>7,599</u> <u>0,000</u>	<u>2,873</u> <u>0,006</u>	<u>7,390</u> <u>0,000</u>	<u>-4,927</u> <u>0,000</u>	<u>-7,735</u> <u>0,000</u>	<u>-7,599</u> <u>0,000</u>	<u>-8,645</u> <u>0,000</u>	<u>-8,248</u> <u>0,000</u>	<u>-9,725</u> <u>0,000</u>	
Вакстоун–фреймстоун Wackestone–framestone	<u>-2,672</u> <u>0,010</u>	1,138 0,261	<u>8,617</u> <u>0,000</u>	<u>2,113</u> <u>0,038</u>	<u>8,644</u> <u>0,000</u>	<u>-0,090</u> <u>0,929</u>	<u>-32,320</u> <u>0,000</u>	<u>-8,617</u> <u>0,000</u>	<u>-24,317</u> <u>0,000</u>	<u>-40,994</u> <u>0,000</u>	<u>-30,683</u> <u>0,000</u>	
Грейнстоун–фреймстоун Grainstone–framestone	-0,060 0,953	<u>2,282</u> <u>0,038</u>	<u>2,561</u> <u>0,022</u>	0,909 0,378	<u>2,597</u> <u>0,020</u>	<u>3,237</u> <u>0,006</u>	<u>-5,478</u> <u>0,000</u>	<u>-2,561</u> <u>0,022</u>	<u>-4,459</u> <u>0,001</u>	<u>-6,452</u> <u>0,000</u>	<u>-5,416</u> <u>0,000</u>	
Вакстоун–вакстоун/флаутстоун Wackestone–wackestone/floatstone	<u>-3,466</u> <u>0,001</u>	-0,086 0,932	<u>2,415</u> <u>0,019</u>	<u>2,514</u> <u>0,015</u>	<u>2,085</u> <u>0,041</u>	<u>-2,212</u> <u>0,031</u>	-1,929 0,058	<u>-2,415</u> <u>0,019</u>	<u>-2,823</u> <u>0,006</u>	-1,669 0,100	<u>-2,962</u> <u>0,004</u>	
Вакстоун–рудстоун Wackestone–rudstone	-1,553 0,127	0,456 0,650	<u>5,881</u> <u>0,000</u>	1,582 0,120	<u>5,874</u> <u>0,000</u>	<u>-3,943</u> <u>0,000</u>	<u>-5,596</u> <u>0,000</u>	<u>-5,881</u> <u>0,000</u>	<u>-8,772</u> <u>0,000</u>	<u>-6,461</u> <u>0,000</u>	<u>-6,552</u> <u>0,000</u>	
Пакстоун–вакстоун/флаутстоун Packstone–wackestone/floatstone	1,938 0,067	1,168 0,256	<u>-3,272</u> <u>0,004</u>	<u>-2,522</u> <u>0,020</u>	<u>-3,211</u> <u>0,005</u>	1,861 0,078	<u>3,590</u> <u>0,002</u>	<u>3,272</u> <u>0,004</u>	<u>3,429</u> <u>0,003</u>	<u>4,334</u> <u>0,000</u>	<u>4,543</u> <u>0,000</u>	
Пакстоун–фреймстоун Packstone–framestone	2,007 0,073	2,027 0,070	<u>2,486</u> <u>0,032</u>	1,401 0,192	<u>2,475</u> <u>0,033</u>	<u>3,462</u> <u>0,006</u>	<u>-5,736</u> <u>0,000</u>	<u>-2,486</u> <u>0,032</u>	<u>-4,759</u> <u>0,001</u>	<u>-6,685</u> <u>0,000</u>	<u>-6,146</u> <u>0,000</u>	
Вакстоун/флаутстоун–грейнстоун Wackestone/floatstone–grainstone	<u>-0,307</u> 0,761	<u>-2,410</u> <u>0,024</u>	<u>3,662</u> <u>0,001</u>	<u>-1,459</u> 0,157	<u>3,672</u> <u>0,001</u>	<u>-1,382</u> 0,179	<u>-4,889</u> <u>0,000</u>	<u>-3,662</u> <u>0,001</u>	<u>-3,113</u> <u>0,005</u>	<u>-4,939</u> <u>0,000</u>	<u>-5,217</u> <u>0,000</u>	
Вакстоун/флаутстоун–рудстоун Wackestone/floatstone–rudstone	0,202 0,843	0,643 0,530	<u>2,728</u> <u>0,016</u>	1,055 0,308	<u>2,730</u> <u>0,016</u>	-1,710 0,108	<u>-2,608</u> <u>0,020</u>	<u>-2,728</u> <u>0,016</u>	<u>-3,601</u> <u>0,003</u>	<u>-3,693</u> <u>0,002</u>	<u>-3,076</u> <u>0,008</u>	
Вакстоун/флаутстоун–фреймстоун Wackestone/floatstone–framestone	<u>-0,369</u> 0,717	1,576 0,135	<u>4,291</u> <u>0,001</u>	2,053 0,057	<u>4,272</u> <u>0,001</u>	1,113 0,326	<u>-17,535</u> <u>0,000</u>	<u>-4,291</u> <u>0,001</u>	<u>-10,918</u> <u>0,000</u>	<u>-31,437</u> <u>0,000</u>	<u>-17,662</u> <u>0,000</u>	
Рудстоун–фреймстоун Rudstone–framestone	-0,516 0,628	0,515 0,629	2,533 0,052	1,771 0,137	2,562 0,051	<u>3,623</u> <u>0,015</u>	<u>-3,563</u> <u>0,016</u>	<u>-2,533</u> <u>0,052</u>	<u>-2,741</u> <u>0,041</u>	<u>-5,784</u> <u>0,002</u>	<u>-3,867</u> <u>0,012</u>	
Пакстоун–грейнстоун Packstone–grainstone	1,090 0,289	-1,087 0,291	<u>-0,218</u> 0,830	<u>-0,910</u> 0,374	<u>-0,172</u> 0,866	1,169 0,257	<u>-0,677</u> <u>0,507</u>	0,218 0,830	0,060 0,953	<u>-0,401</u> 0,693	<u>-0,600</u> 0,556	
Пакстоун–рудстоун Packstone–rudstone	1,832 0,100	1,153 0,279	<u>-0,753</u> 0,471	<u>-1,502</u> 0,167	0,790 0,450	<u>-0,697</u> 0,504	<u>-0,119</u> 0,908	<u>-0,753</u> <u>0,471</u>	<u>-0,684</u> 0,511	0,133 0,897	<u>-0,018</u> 0,986	
Грейнстоун–рудстоун Grainstone–rudstone	-0,306 0,764	1,557 0,142	0,896 0,385	0,104 0,919	0,925 0,371	<u>-1,711</u> 0,109	0,292 0,775	<u>-0,896</u> 0,385	<u>-0,689</u> 0,502	0,415 0,684	0,357 0,726	

Примечание: в числителе указана величина t-критерия, в знаменателе – p-value, жирным шрифтом выделены статистически значимые t-критерии ($p \leq 0,05$).
Note: numerator is Student's t-test value, denominator is p-value, statistically significant Student's t-test values are highlighted in bold ($p \leq 0,05$).

Для сравнения распределений времен поперечной релаксации T_2 образцов был проведен корреляционный анализ [23]: сопоставлены ЯМР-интенсивности конкретных времен поперечной релаксации T_2 , соответствующие разным образцам. Всего было определено 4095 коэффициентов корреляции. В табл. 3 приведено распределение коэффициентов корреляции разной величины для образцов с различной структурой породы по Р. Данему. По таблице видно, что для всех образцов (за исключением образцов со структурой рудстоун ввиду малого объема выборки) внутри одного класса (образцы с одинаковой структурой породы) наблюда-

ется преобладание высоких (0,7–0,9) и очень высоких (0,9–1) коэффициентов корреляции, что свидетельствует о схожем характере распределений времен поперечной релаксации T_2 для образцов с одинаковой структурой породы. При этом стоит отметить большое количество высоких и очень высоких коэффициентов корреляции при сравнении образцов со следующими структурами: вакстоун–вакстоун/флаутстоун, пакстоун–грейнстоун, пакстоун–рудстоун, вакстоун/флаутстоун–рудстоун, грейнстоун–рудстоун. Это говорит о схожем строении пустотного пространства анализируемых групп образцов.

Таблица 3. Распределение коэффициентов корреляции разной величины для образцов с различной структурой породы (в %)

Table 3. Distribution of different values correlation coefficients for different rock structure samples (%)

Структуры по Р. Данему Диапазон изменения коэффициента корреляции Rock structure type (R. Dunham classification) Range of coefficient correlation variation	0–0,3 (очень слабая very weak)	0,3–0,5 (слабая weak)	0,5–0,7 (средняя moderate)	0,7–0,9 (высокая strong)	0,9–1 (очень высокая very strong)
Вакстоун Wackestone	0,93	5,19	19,39	64,63	9,86
Пакстоун Packstone	3,57	14,29	17,86	53,57	10,71
Вакстоун/флаутстоун Wackestone/floatstone	1,10	7,69	19,78	60,44	10,99
Грейнстоун Grainstone	10,26	12,82	19,23	50,00	7,69
Рудстоун Rudstone	33,33	0,00	33,33	33,33	0,00
Фреймстоун Framestone	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Вакстоун–пакстоун Wackestone–packstone	33,93	23,98	25,00	14,54	2,55
Вакстоун–вакстоун/флаутстоун Wackestone–wackestone/floatstone	1,90	8,89	23,18	57,14	8,89
Вакстоун–грейнстоун Wackestone–grainstone	40,82	25,28	14,29	16,32	3,29
Вакстоун–рудстоун Wackestone–rudstone	35,37	14,29	27,21	20,41	2,72
Вакстоун–фреймстоун Wackestone–framestone	95,92	4,08	0,00	0,00	0,00
Пакстоун–вакстоун/флаутстоун Packstone–wackestone/floatstone	19,64	16,07	22,32	40,18	1,79
Пакстоун–грейнстоун Packstone–grainstone	4,81	11,54	22,12	50,00	11,53
Пакстоун–рудстоун Packstone–rudstone	8,33	12,50	20,83	41,67	16,67
Пакстоун–фреймстоун Packstone–framestone	31,25	25,00	18,75	21,88	3,12
Вакстоун/флаутстоун–грейнстоун Wackestone/floatstone–grainstone	22,53	23,08	25,28	26,37	2,74
Вакстоун/флаутстоун–рудстоун Wackestone/floatstone–rudstone	23,81	14,29	9,52	47,62	4,76
Вакстоун/флаутстоун–фреймстоун Wackestone/floatstone–framestone	89,28	5,36	5,36	0,00	0,00
Грейнстоун–рудстоун Grainstone–rudstone	10,26	7,69	30,77	43,59	7,69
Грейнстоун–фреймстоун Grainstone–framestone	26,93	11,54	38,46	21,15	1,92
Рудстоун–фреймстоун Rudstone–framestone	41,68	25,00	16,67	16,67	0,00

С целью наглядной визуализации на рис. 1 представлены осредненные распределения нормализованных ЯМР-интенсивностей по временам поперечной релаксации T_2 для образцов с разной структурой породы. Под графиком представлены вклады различных

типов пористостей в общую пористость (границы проведены по общепринятым отсечкам [22]). Данные кривые отражают наиболее вероятное время поперечной релаксации T_2 , а следовательно, и размер пор, который вносит наибольший вклад в объем пустотного про-

странства. Приведенный график отображает структуру пустотного пространства, характерную для образцов с определенной структурой породы. По рисунку видно, что группы образцов со структурой породы вакстоун и вакстоун/флаутстоун, а также рудстоун, пакстоун и грейнстоун слабо отличаются по виду своих кривых.

Статистический анализ результатов ЯМР-исследований образцов керна отображает целесообразность объединения выделенных групп в три класса: вакстоун и вакстоун/флаутстоун (1 класс); рудстоун, пакстоун и грейнстоун (2 класс); фреймстоун (3 класс).

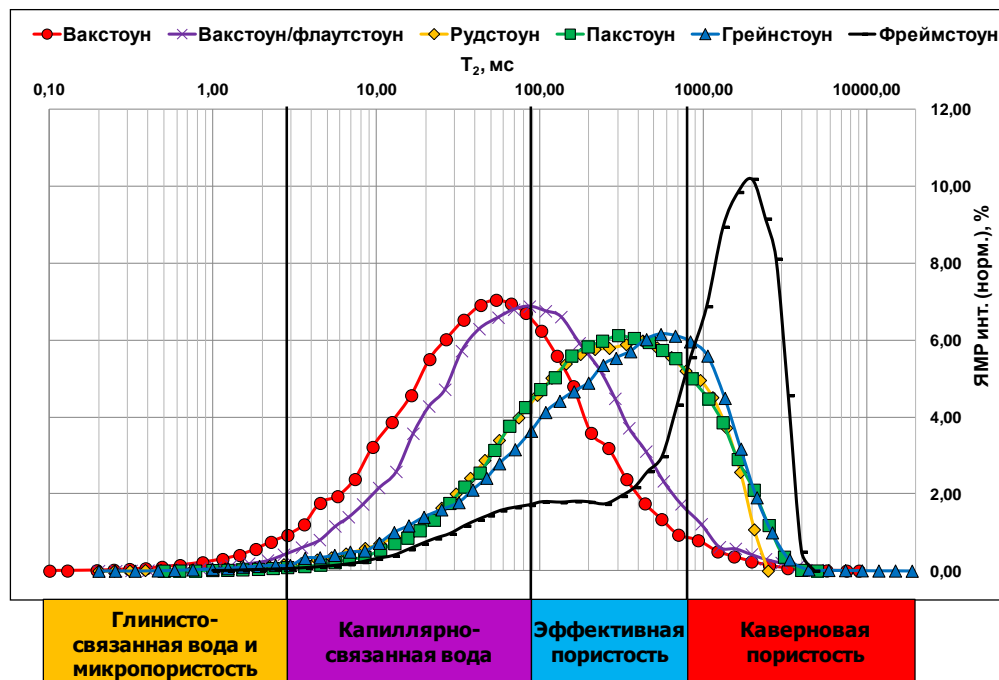


Рис. 1. Осредненные распределения нормализованных ЯМР-интенсивностей по временам поперечной релаксации T_2 различных групп образцов с одинаковой структурой породы

Fig. 1. Averaged distributions of normalized NMR intensities over transverse relaxation times T_2 of different rock structure samples groups

Согласно В.Г. Кузнецову, «первичные коллекторские свойства пород, тип пустотного пространства и величина пористости, а также тип вторичных преобразований и характер возникающей при этом вторичной пористости во многом определяются первичной структурой. Они различны для биогермных известняков – баундстоунов, зернистых пород – пакстоунов, грейнстоунов, флаутстоунов и рудстоунов, причем тип зерен имеет сугубо подчиненное значение, и, наконец, микрозернистых – мадстоунов и вакстоунов» [19], что также подтверждается по результатам ЯМР-исследований.

На рис. 2 представлены осредненные распределения нормализованных ЯМР-интенсивностей по временам поперечной релаксации T_2 для выделенных классов образцов: петротипы достаточно хорошо дифференцируются по данным ЯМР-исследований. Под графиком представлены вклады различных типов пористостей в общую пористость (границы проведены по общепринятым отсечкам [22]). Также над графиком показаны фотографии шлифов, соответствующие различным классам. По фотографиям видно, что от 1 класса к 3 классу размер пор увеличивается, что подтверждается результатами ЯМР-исследований.

Основным критерием, определяющим тип коллектора, является способность породы пропускать через

себя флюид при наличии перепада давления, то есть проницаемость. В зависимости от того, по каким пустотам преобладает фильтрация флюида, внутри каждого выделенного класса образцы были разделены на несколько групп. Результаты представлены на рис. 3. В результате аппроксимации данных получены следующие зависимости:

1) для образцов 1 класса:

- каверново-поровый тип коллектора:

$$K_{пр} = 4 \cdot 10^{-5} K_{оп}^{4,07}, R^2=0,79;$$

- трещинно-каверново-поровый тип коллектора:

$$K_{пр} = 0,52 K_{оп}^{1,52}, R^2=0,39;$$

2) для образцов 2 класса:

- каверново-поровый тип коллектора:

$$K_{пр} = 3 \cdot 10^{-5} K_{оп}^{4,42}, R^2=0,91;$$

- трещинно-каверново-поровый тип коллектора:

$$K_{пр} = 1,04 K_{оп}^{1,66}, R^2=0,35;$$

3) для образцов 3 класса:

- трещинно-каверново-поровый тип коллектора: уравнение связи не выведено.

По рис. 3 видно, что при одинаковой величине открытой пористости значения проницаемости среди образцов с одинаковым типом коллектора отличаются

для выделенных классов – наблюдается увеличение от 1 к 3 классу. Это говорит о различии в размерах проводящих каналов. Стоит отметить, что анализ зависимостей $K_{пр} = f(K_{оп})$ не позволяет с высокой достоверностью выделять петрофизические типы пород.

Это связано с тем, что коэффициенты открытой пористости и проницаемости являются интегральными характеристиками и не дают детальной картины строения пустотного пространства пород.

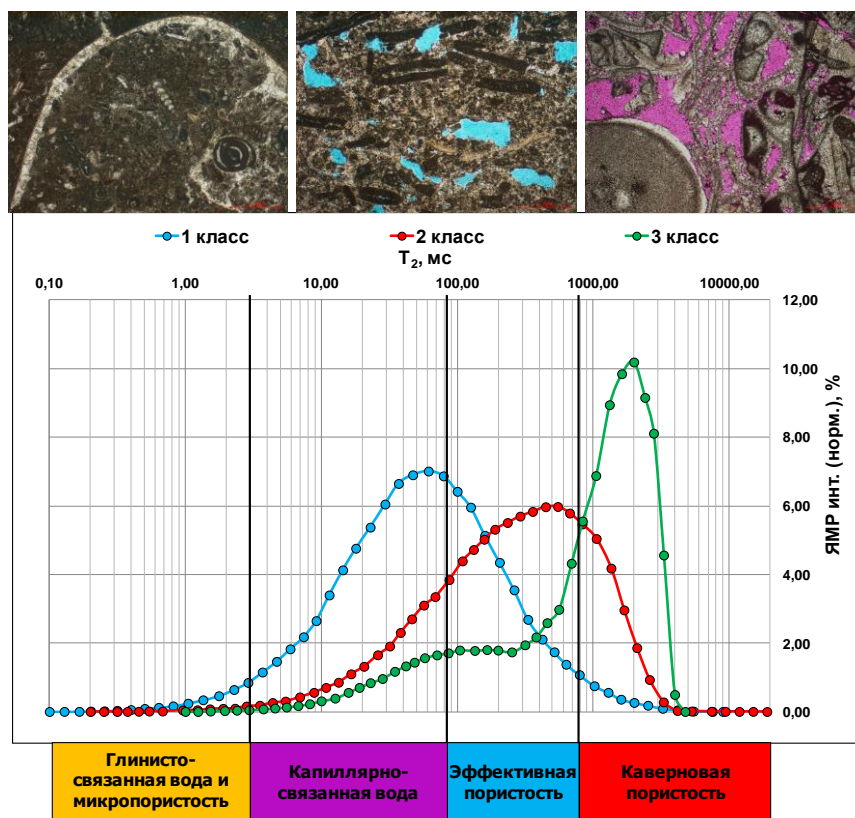


Рис. 2. Осредненные распределения нормализованных ЯМР-интенсивностей по временам поперечной релаксации T_2 выделенных петрофизических типов

Fig. 2. Averaged distributions of normalized NMR intensities over transverse relaxation times T_2 of identified petrophysical rock types

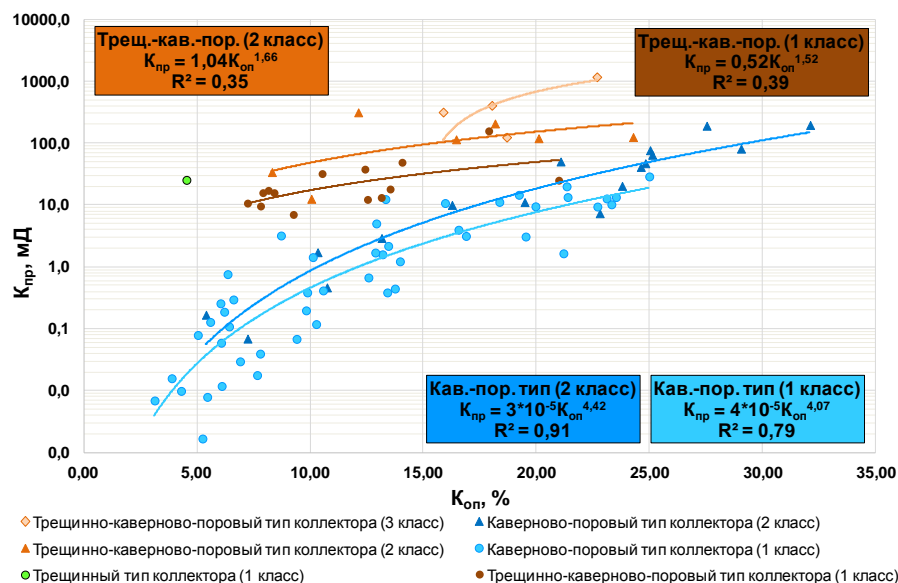


Рис. 3. Зависимость коэффициента абсолютной газопроницаемости (с учетом поправки Клинкенберга) от коэффициента открытой пористости

Fig. 3. Relationship between coefficient of absolute permeability to gas (Klinkenberg-corrected) and coefficient of effective porosity

На рис. 4 представлена зависимость параметра пористости от коэффициента открытой пористости раздельно по выделенным классам. В результате аппроксимации экспериментальных данных функцией Дахнова–Арчи [24] получены следующие зависимости для образцов:

1) 1 класса:

$$P_n = 1,15K_{оп}^{-1,79}, R^2 = 0,97;$$

2) 2 класса:

$$P_n = 0,95K_{оп}^{-2,02}, R^2 = 0,97;$$

3) 3 класса:

$$P_n = 0,99K_{оп}^{-2,13}, R^2 = 0,99.$$

По приведенным зависимостям видно, что показатель цементации (m) возрастает от 1 к 3 классу, что говорит о межзерновой пористости для пород 1 класса ($m=1,79$), и каверново-межзерновой для пород 2 и 3 классов ($m=2,02$ и $2,13$ соответственно), причем для 3 класса доля каверновой составляющей выше, что также подтверждается результатами ЯМР-исследований.

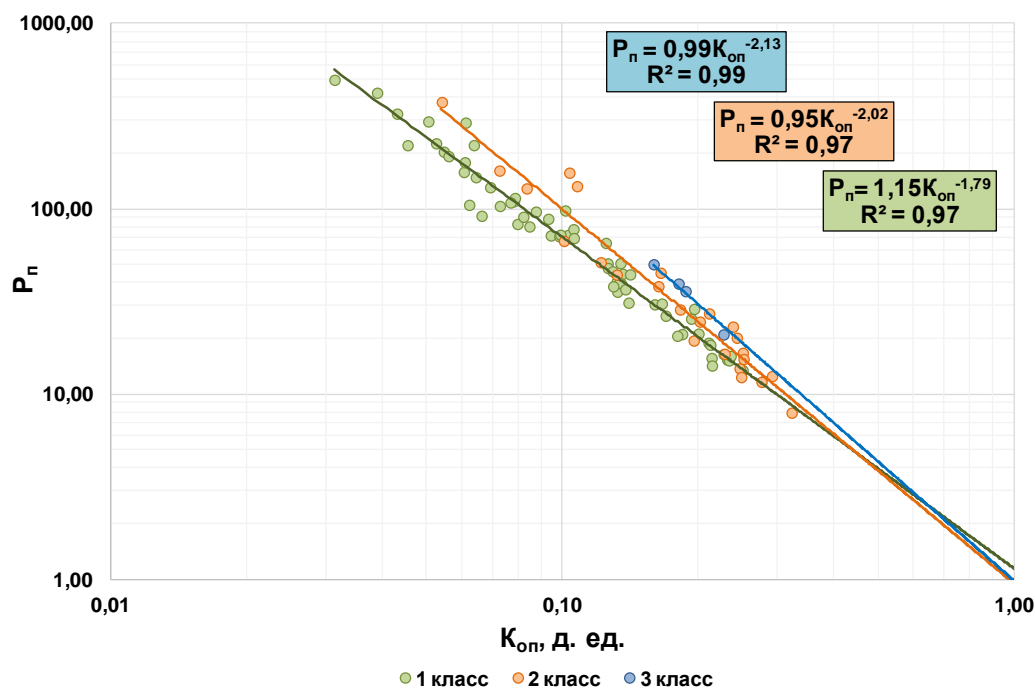


Рис. 4. Зависимость параметра пористости от коэффициента открытой пористости

Fig. 4. Relationship between formation factor and coefficient of effective porosity

Применение методов главных компонент и линейного дискриминантного анализа при выделении петрофизических типов пород

Для оценки правильности выделения петрофизических типов пород были применены методы главных компонент и дискриминантного анализа.

Основными задачами метода главных компонент является сокращение числа переменных и изучение скрытой структуры взаимосвязей между переменными, то есть их классификация (один из методов классификации «без учителя») [23].

В результате применения данного метода осуществляется переход от исходных переменных к новым, которые носят название главных компонент. В данной работе в качестве исходных переменных выступают значения ЯМР-интенсивностей, соответствующие определенным интервалам времен поперечной релаксации (0–0,1 мс, 0,1–0,2 мс, 0,2–0,3 мс ... 1–2 мс, 2–3 мс, 3–4 мс ... 10–20 мс, 20–30 мс, 30–40 мс и т. д.). В результате применения метода главных компонент из 47 исходных переменных были получены 45 новых, причем наиболее информативными

(с величиной собственного значения более 1) являются 11 главных компонент, которые объясняют 82,63 % от общей дисперсии. На рис. 5 представлено расположение выделенных классов образцов в осях Фактор 1 и Фактор 2, которые являются новыми переменными, вносящими наибольший вклад в объяснение общей дисперсии (26,02 и 13,19 % соответственно). По приведенному рисунку видно, что точки, соответствующие образцам различных классов, достаточно хорошо дифференцируются в пределах данного поля.

Другим широко используемым при решении геологических задач методом является дискриминантный анализ [25, 26]. Метод заключается в построении на основе исходных переменных дискриминантных функций, позволяющих максимально возможно разделить априорно выделенные группы объектов. В данной работе для получения линейных дискриминантных функций использовались показатели, полученные в результате интерпретации данных ЯМР-исследований. В результате расчетов в модель были включены семь переменных и получены следующие линейные дискриминантные функции (коэффициенты перед переменными – стандартизованные):

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= 1,80937T_2 \log \text{mean} + 0,18717K_{\text{ов}} - 0,40135T_{2\text{гр}} + 0,63618 \left(\frac{\text{FFI}}{\text{BVI}} \right) - 1,11029K_{\text{эфп}} + 0,30135K_{\text{п}} - 0,71870(\text{Кав. пор.}), \\
 Z_2 &= -0,55670T_2 \log \text{mean} - 0,88176K_{\text{ов}} + 0,63057T_{2\text{гр}} - 0,73491 \left(\frac{\text{FFI}}{\text{BVI}} \right) + 1,54409K_{\text{эфп}} - 0,90435K_{\text{п}} + 0,27914(\text{Кав. пор.}), \\
 \text{при } R &= 0,922, \chi^2 = 221,9151, p = 0,000000; & \text{при } R &= 0,719, \chi^2 = 61,3824, p = 0,000000.
 \end{aligned}$$

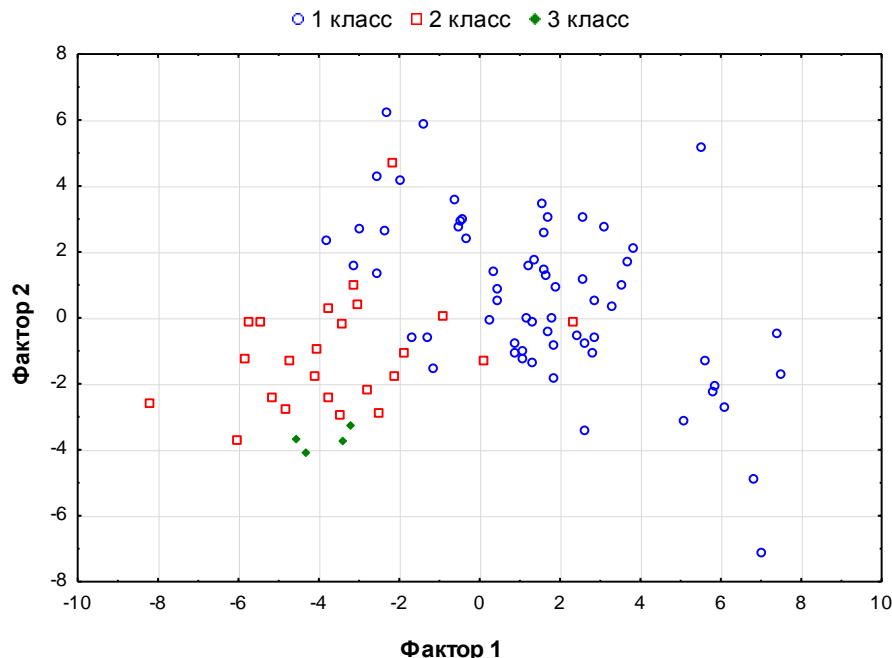


Рис. 5. Соотношение значений факторов 1 и 2 для выделенных классов

Fig. 5. Correlation of factor 1 and 2 values for identified classes

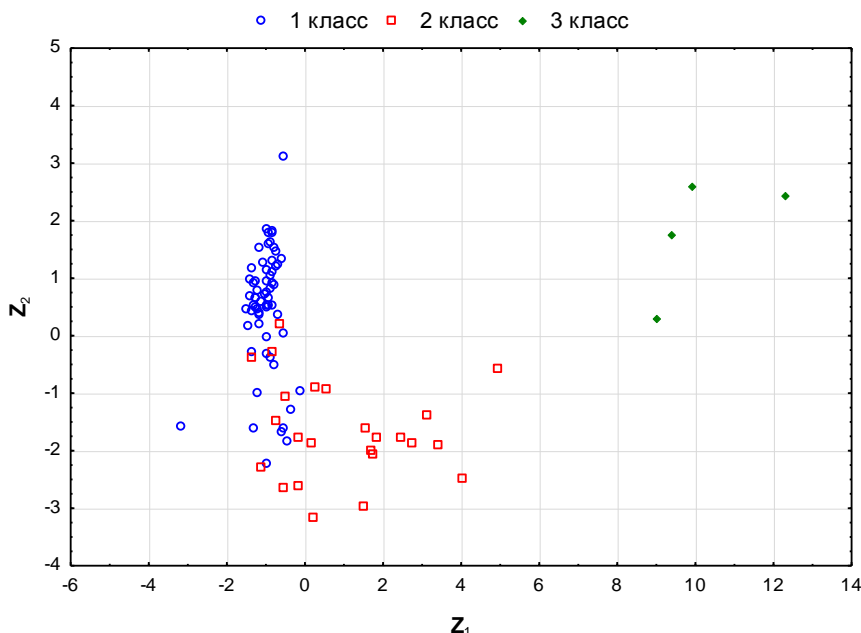


Рис. 6. Распределение значений Z_1 и Z_2 для выделенных классов

Fig. 6. Distribution of Z_1 and Z_2 values for identified classes

По данным функциям были вычислены значения Z_1 и Z_2 , которые для различных выделенных классов приведены на рис. 6. По приведенному графику видно, что значения Z_1 и Z_2 достаточно хорошо разделя-

ются в пределах выделенных петрофизических типов (Лямбда Уилкса составляет 0,08096). Среднее значение Z_1 для 1 класса равно $-1,005$, для 2 класса $+1,063$, для 3 класса $+9,443$. Среднее значение Z_2 для 1 класса

составляет –0,488, для 2 класса +1,598, для 3 класса –1,898. Достоверность распознавания образцов 1 класса составляет 93,7 %, 2 класса – 79,2 %, 3 класса – 100,0 %, что значительно выше, чем до объединения групп образцов с различной структурой породы в классы. Основными параметрами, вносящими больший вклад в разделение, являются среднее логарифмическое значение времен поперечной релаксации ($T_2\log\text{mean}$) (для первой дискриминантной функции) и коэффициент эффективной пористости ($K_{эфп}$) (для второй дискриминантной функции).

Неопределенности, возникающие при классификации, связаны со степенью проявления вторичных (постседиментационных) преобразований пустотного пространства. Накопление большего объема фактического материала в дальнейшем позволит повысить точность выделения петрофизических типов.

Полученные дискриминантные функции позволяют на основании результатов ЯМР-исследований образцов керн, отобранного из скважин изучаемого месторождения, относить их с определенной долей вероятности к выделенному классу.

Результаты проведенного анализа показывают, что по результатам ЯМР-исследований с учетом литологических особенностей пород возможно выделение петрофизических типов, характеризующихся различной структурой пустотного пространства и, следовательно, ФЕС.

Заключение

В ходе выполнения данной работы были получены следующие выводы и результаты:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Coates G.R., Xiao L., Prammer M.G. NMR logging. Principles and applications. – Houston: Halliburton Energy Services, 1999. – 253 p.
- Джафаров И.С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ЯМР для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. – М.: Химия, 2002. – 439 с.
- Looyestijn W., Zhang X., Hebing A. How can NMR assess the wettability of a chalk reservoir // International Symposium of the Society of Core Analysts. – Vienna, Austria, 2017. – P. 1–12.
- Dick M.J., Veselinovic D., Green D. Spatially resolved wettability measurements using NMR wettability index // International Symposium of the Society of Core Analysts. – Trondheim, Norway, 2018 – P. 1–12.
- Quick and simple porosity measurement at the well site / M.J. Dick, D. Green, T. Kenney, D. Veselinovic, J. Tallarita, M.A. Smith // International Symposium of the Society of Core Analysts. – Vienna, Austria, 2017. – P. 1–10.
- Brandimarte F., Eriksson M., Moss A. How to obtain primary drainage capillary pressure curves using NMR T2 distributions in a heterogeneous carbonate reservoir // International Symposium of the Society of Core Analysts. – Vienna, Austria, 2017. – P. 1–9.
- Valori A., Nicot B. A review of 60 years of NMR wettability // International Symposium of the Society of Core Analysts. – Trondheim, Norway, 2018. – P. 1–13.
- Measuring relative permeability with NMR / M.J. Dick, D. Veselinovic, T. Kenney, D. Green // International Symposium of the Society of Core Analysts. – Trondheim, Norway, 2018 – P. 1–10.
- Злобин А.А. Теория и практика применения ядерного магнитного резонанса в физике нефтяного пласта. – Пермь: Изд-во ПМ, 2015. – 271 с.
- Оценка лиофильности пород баженовской свиты методами адсорбции и ядерной магнитной релаксометрии / С.А. Борисенко, Н.Н. Богданович, Е.В. Козлова, М.Ю. Спасенных, Д.Е. Заграновская // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 3. – С. 12–16.
- Эффективность применения метода ядерно-магнитного резонанса при лабораторных петрофизических исследованиях керн и шлама / В.А. Вавилин, А.А. Кунакасов, Т.Р. Галиев, Е.В. Сорокина // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 8. – С. 21–23.
- Кулявцев А.В., Федорцов И.В. Результаты опытно-промышленных работ по использованию ЯМР-релаксометра GeoSpres для измерения общей и эффективной пористости горных пород // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 9. – С. 34–36.
- Закревский К.Е., Кундин А.С. Особенности геологического 3D моделирования карбонатных и трещинных резервуаров. – М.: ООО «Белый Ветер», 2016. – 404 с.
- Лусиа Ф.Дж. Построение геолого-гидродинамической модели карбонатного коллектора: интегрированный подход. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. – 384 с.
- Kolodzie S. Jr. Analysis of pore throat size and use of the Waxman-Smiths equation to determine OOIP in Spindle Field, Colorado // The 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME. – Dallas, Texas, the USA, 1980. – P. 1–10.
- Enhanced reservoir description: using core and log data to identify Hydraulic (Flow) Units and predict permeability in uncured intervals/wells / J.O. Amaefule, M. Altunbay, D. Tiab, D.G. Kersey, D.K. Keelan // The 68th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. – Houston, Texas, the USA, 1993. – P. 205–220.
- Skalinski M., Kenter J. Carbonate petrophysical rock typing – integrating geological attributes and petrophysical properties while linking with dynamic behavior // The SPWLA 54th Annual Logging Symposium. – New Orleans, Louisiana, the USA, 2013. – P. 1–11.

18. Бакиров А.А., Варенцов М.И., Бакиров Э.А. Нефтегазоносные провинции и области зарубежных стран. – М.: Изд-во «Недра», 1971. – 544 с.
19. Кузнецов В.Г. Литология. Осадочные горные породы и их изучение. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 511 с.
20. Кобранова В.Н. Петрофизика. – М.: Недра, 1986. – 392 с.
21. Топорков В.Г., Денисенко А.С. Практическое применение данных ЯМР для оценки свойств и структуры пород продуктивных нефтегазоносных залежей // Каротажник. – 2008. – № 12. – С. 162–188.
22. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / под ред. В.И. Петерсилье, В.И. Порокуна, Г.Г. Яценко. – М.; Тверь: ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика», 2003. – 258 с.
23. Девис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. – М.: Недра, 1990. – 319 с.
24. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (Физика горных пород). – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 368 с.
25. Галкин В.И., Пономарева И.Н., Репина В.А. Исследование процесса нефтеизвлечения в коллекторах различного типа пустотности с использованием многомерного статистического анализа // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15. – № 19. – С. 145–154. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.5.
26. Способ оценки коэффициента вытеснения нефти на основе стандартных исследований керна / Е.А. Гладких, Г.П. Хижняк, В.И. Галкин, Н.А. Попов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16. – № 3. – С. 225–237. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.3.

Поступила 04.09.2020 г.

Информация об авторах

Путилов И.С., доктор технических наук, заместитель директора Филиала по научной работе в области геологии, Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

Разницын А.В., инженер 2-й категории Отдела физики пласта Управления комплексных исследований керна Центра исследования керна и пластовых флюидов, Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

UDC 550.8.053

IDENTIFICATION OF CARBONATE ROCKS PETROPHYSICAL TYPES WITH NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE EXPERIMENTS DATA TAKING INTO ACCOUNT THEIR LITHOLOGICAL CHARACTERISTICS

Ivan S. Putilov¹,
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

Alexandr V. Raznitsyn¹,
alexandrznitsyn@gmail.com

¹ Branch of OOO «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm,
3a, Permskaya street, Perm, 614015, Russia.

The relevance. Significant part of world hydrocarbons reserves is confined to carbonate reservoirs, which are characterized by complex structure of voids. Reserves estimation and development design of such reservoirs require detailed study of porous media structure, that directly influences the reservoir properties. Identification of petrophysical rock classes is an integral part of hydrocarbons reservoir petrophysical model building. Nuclear magnetic resonance (NMR) method is one of the methods of rock porous structure research and has a number of advantages over other methods. However, there is no information in the published literature about application of this method for petrophysical typing. The results of petrophysical classes identification based on integration of NMR experiments and thin sections description data enhance the quality of reservoir geological and hydrodynamic simulation and hence improve accuracy of hydrocarbons reserves estimation and efficiency of field development.

The main aim of the research is carbonate rock petrophysical typing based on integration of NMR experiments and thin sections description data, and estimation of classes identification accuracy with the methods of mathematical statistics.

Object: carbonate rocks of Mishrif formation, which is productive in the field of Mesopotamian oil-and-gas province.

Methods: analysis of core sample NMR experiments results, thin sections description and routine core analysis, methods of mathematical statistics.

Results. Three petrophysical rock types are identified in the log of the well, which intersects productive deposits. The types are: 1st class (wackestone and wackestone/floatstone rock structure), 2nd class (packstone, grainstone and rudstone rock structure) and 3rd class (framestone rock structure). These petrophysical classes are proved with statistical analysis results.

Key words:

Petrophysical type, nuclear magnetic resonance method, R. Dunham classification, transverse relaxation time, carbonate rocks, statistical analysis.

REFERENCES

- Coates G.R., Lizhi Xiao, Prammer M.G. *NMR Logging. Principles and Applications*. Houston, Halliburton Energy Services Publ., 1999. 253 p.
- Dzhafarov I.S., Syngaevskiy P.E., Khafizov S.F. *Primenenie metoda YAMR dlya kharakteristiki sostava i raspredeleniya plastovykh flyuidov* [Application of the NMR method for characterization of reservoir fluids composition and distribution]. Moscow, Khimiya Publ., 2002. 439 p.
- Looyestijn W., Zhang X., Hebing A. How can NMR assess the wettability of a chalk reservoir. *International Symposium of the Society of Core Analysts*. Vienna, Austria, SCA Publ., 2017. pp. 1–12.
- Dick M.J., Veselinovic D., Green D. Spatially resolved wettability measurements using NMR wettability index. *International Symposium of the Society of Core Analysts*. Trondheim, Norway, SCA Publ., 2018. pp. 1–12.
- Dick M.J., Green D., Kenney T., Veselinovic D., Tallarita J., Smith M.A. Quick and simple porosity measurement at the well site. *International Symposium of the Society of Core Analysts*. Vienna, Austria, SCA Publ., 2017. pp. 1–10.
- Brandimarte F., Eriksson M., Moss A. How to obtain primary drainage capillary pressure curves using NMR T2 distributions in a heterogeneous carbonate reservoir. *International Symposium of the Society of Core Analysts*. Vienna, Austria, SCA Publ., 2017. pp. 1–9.
- Valori A., Nicot B. A review of 60 years of NMR wettability. *International Symposium of the Society of Core Analysts*. Trondheim, Norway, SCA Publ., 2018. pp. 1–13.
- Dick M.J., Veselinovic D., Kenney T., Green D. Measuring relative permeability with NMR. *International Symposium of the Society of Core Analysts*. Trondheim, Norway, SCA Publ., 2018. pp. 1–10.
- Zlobin A.A. *Teoriya i praktika primeneniya yadernogo magnitnogo rezonansa v fizike neftyanogo plasta* [Theory and practice of nuclear magnetic resonance application in oil reservoir physics]. Perm, PM Publ., 2015. 271 p.
- Borisenko S.A., Bogdanovich N.N., Kozlova E.V., Spasennykh M.Yu., Zagranovskaya D.E. Estimating lyophilic properties of the Bazhenov formation rocks by adsorption and NMR methods. *Oil industry*, 2017, no. 3, pp. 12–16. In Rus.
- Vavilin V.A., Kunakasov A.A., Galiev T.R., Sorokina E.V. Effectiveness of nuclear magnetic resonance method use for core samples and drilling sludge laboratory petrophysical study. *Oil industry*, 2011, no. 8, pp. 21–23. In Rus.
- Kulyavtsev A.V., Fedortsov I.V. Results of pilot-industrial works on the use of the GeoSpec NMR-relaxometer to measure the total and effective porosity of rocks. *Oil industry*, 2017, no. 9, pp. 34–36. In Rus.
- Zakrevskiy K.E., Kunder A.S. *Osobennosti geologicheskogo 3D modelirovaniya karbonatnykh i treshchinnykh rezervuarov* [Special characteristics of 3D geological modeling of carbonate reservoirs]. Moscow, OOO «Bely Veter» Publ., 2016. 404 p.
- Lusia F.Dzh. *Postroenie geologo-gidrodinamicheskoy modeli karbonatnogo kolektora: integrirrovanny podkhod* [Carbonate reservoir characterization: an integrated approach]. Moscow, Izhevsk, NIC «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», Izhevsk Institute of Computer Research Publ., 2010. 384 p.
- Kolodzie S.Jr. Analysis of pore throat size and use of the Waxman-Smits equation to determine OOIP in Spindle Field, Colorado. *The 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. Dallas, Texas, the USA, SPE Publ., 1980. pp. 1–10.
- Amaefule J.O., Altunbay M., Tiab D., Kersey D.G., Keelan D.K. Enhanced reservoir description: using core and log data to identify Hydraulic (Flow) Units and predict permeability in uncured

- intervals/wells. *The 68th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers*. Houston, Texas, the USA, SPE Publ., 1993. pp. 205–220.
17. Skalinski M., Kenter J. Carbonate petrophysical rock typing – integrating geological attributes and petrophysical properties while linking with dynamic behavior. *The SPWLA 54th Annual Logging Symposium*. New Orleans, Louisiana, the USA, SPWLA Publ., 2013. pp. 1–11.
 18. Bakirov A.A., Varentsov M.I., Bakirov E.A. *Neftegazonosnye provintsii i oblasti zarubezhnykh stran* [Oil-and-gas bearing provinces and regions of foreign countries]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 544 p.
 19. Kuznetsov V.G. *Litologiya. Osadochnye gornye porody i ikh izuchenie* [Lithology. Sedimentary rocks and study of them]. Moscow, Nedra-Businesscenter Publ., 2007. 511 p.
 20. Kobranova V.N. *Petrofizika* [Petrophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 392 p.
 21. Toporkov V.G., Denisenko A.S. Prakticheskoe primeneniye dannykh YAMR dlya otsenki svoystv i struktury porod produktivnykh neftegazonosnykh zalezhey [Practical application of the NMR data for estimation of productive oil-and-gas bearing accumulations rocks properties and structure]. *Karotazhnik*, 2008, no. 12, pp. 162–188.
 22. *Metodicheskie rekomendatsii po podschetu geologicheskikh zapasov nefii i gaza obyemnym metodom* [Methodological recommendations for oil and gas reserves estimation with volumetric method]. Eds. V.I. Petersilye, V.I. Poroskun, G.G. Yatsenko. Moscow, Tver, Tvergeophizika Publ., 2003. 258 p.
 23. Devis Dzh.S. *Statisticheskiy analiz dannykh v geologii* [Statistics and data analysis in geology]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 319 p.
 24. Dobrynin V.M., Vendelshteyn B.Yu., Kozhevnikov D.A. *Petrofizika (Fizika gornyykh porod)* [Petrophysics: physics of rocks]. Moscow, «Neft i gas» Publ., 2004. 368 p.
 25. Galkin V.I., Ponomareva I.N., Repina V.A. Study of oil recovery from reservoirs of different void types with use of multidimensional statistical analysis. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and gas engineering and mining*, 2016, vol. 15, no. 19, pp. 145–154. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.5.
 26. Gladkikh E.A., Khizhnyak G.P., Galkin V.I., Popov N.A. Method for evaluation of oil displacement coefficient based on conventional core analysis. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and gas engineering and mining*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 225–237. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.3.

Received: 4 September 2020.

Information about the authors

Ivan S. Putilov, Dr. Sc., deputy director, the Branch of OOO «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.
Alexandr V. Raznitsyn, 2nd category engineer, the Branch of OOO «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.

УДК 549:552.323.6, 549:553.491

ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ КАРБОНАТИТОВ ЛИНЕЙНО-ТРЕЩИННОГО ТИПА РУДОПРОЯВЛЕНИЯ МАЙКЕ МАЯТАССКОГО РУДНОГО РАЙОНА (СЕВЕРНЫЙ УЛЫТАУ)

Степанец Владимир Григорьевич¹,
vladimir@stepanez.de

Левин Владимир Леонидович²,
levin_v@inbox.ru

Ли Елена Сергеевна³,
li_elena.kstu@mail.ru

Бекенова Галия Кабешовна²,
bekenova@mail.ru

Жуков Николай Мефодьевич²,
nik.zhukov.33@mail.ru

Хакимжанов Марат Сабиржанович⁴,
m.khakimzhanov@gmail.com

¹ «Astra Mining Kazakhstan»,
W1B3HH, г. Лондон, ул. Реджент, 207.

² ТОО «Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева»,
Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Кабанбай батыра, ул. Валиханова, 69/94.

³ Карагандинский государственный технический университет,
Казахстан, 100008, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56/2.

⁴ SRK Consulting (Kazakhstan) Limited,
Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Кунаева, 77.

Актуальность исследования заключается в том, что проведенные детальные минералогические исследования с упором на электроннозондовый микроанализ дают информацию о составе руд и форме нахождения благородных металлов (группы платины), редких и редкоземельных элементов, что может значительно повлиять на экономическую ценность рудопроявления Майке.

Цель: определить распределение и формы нахождения благородных, редкоземельных и редких металлов в поликомпонентных медноколчеданных рудах проявления Майке.

Объекты: метасоматиты линейно-трещинного типа и генетически связанные с ними медноколчеданные руды на правобережье реки Майке в пределах Маятасского рудного поля.

Методы. Состав медноколчеданных руд и породообразующих минералов метасоматитов был изучен в лабораториях минералогии и физических и химических методов исследований ТОО «ИГН им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы). Элементный состав определен методом электроннозондового микроанализа на JCSA 733 с применением энергодисперсионного спектрометра INCA ENERGY. Проведены атомно-эмиссионный полуквантитативный спектральный анализ, рентгенодифрактометрический и термический анализы.

Результаты. Рассмотрены основные критерии петрографии и минералогии метасоматитов линейно-трещинного типа и генетически связанных с ними медноколчеданных руд, впервые выделенных в пределах Маятасского рудного района. Доказывается, что основные рудные тела медного колчедана локализуется в составе кварц-рутил-сидерит-хлоритовых и сидерит-мусковит-хлоритовых сланцев, являющихся составной частью силицит-карбонат-углеродистого комплекса. На основании детальных минералогических исследований показано, что медноколчеданные руды являются источниками платиноидов, редкоземельных элементов и рения. В составе медноколчеданных руд проявления Майке выделены виоларит, пирит, сфалерит, пирротин, микровключения кобальтина, никелистого кобальтина, феррокобальтина, герсдорфита, теллурида серебра, акантита, теллурида свинца, галенита, тесстибиопалладита, висмутистого тесстибиопалладита, мелонита, вавринита. Показано, что зональный никелистый кобальтин является источником платиноидов (Pt, Ir, Ru, Rh, Os), образующих поликомпонентные твердые растворы. Рений входит в состав сульфидов меди, железа, никеля, свинца и висмута. Теллур был обнаружен в составе теллурида серебра, теллурида свинца, тесстибиопалладита, мелонита и вавринита. Эрбий встречен в составе незонального никелистого кобальтина и виоларита. Кадмий обнаружен в виде изоморфной примеси только в сфалерите. Элементы цериевой (легкие – La, Ce, Pr, Nd, Sm) подгруппы и Y входят в состав фосфатов, фторфосфатов и являются источником образования водных фосфатов в зоне окисления медноколчеданных руд проявления Майке.

Ключевые слова:

Улытау, карбонатиты, медноколчеданные руды, сульфиды, арсениды, антимониды, минералы рения.

Введение

Рудопроявление Майке располагается в пределах Маятасского рудного района к северо-востоку от посёлка Маятас в бассейне одноименной реки, впадающей в реку Кара-Тургай Северного Улытау (рис. 1).

Литогеохимическая аномалия в пределах контура рудопроявления Майке имеет субмеридиональное простирание до 4,0 км при ширине от 20 до 400 м. Минерализованная зона на глубине 120 м выклинивается и в разрезе имеет форму морковки, мощность которой на поверхности достигает более 30 м при субмеридиональном простирании круто ($70\text{--}80^\circ$) погружается на восток. Зона минерализации с медно-колчеданными рудами мощностью не более 35 см приурочена к выходам графит-кварц-рутил-сидерит-мусковит-хлоритовым, которые являются составной частью графит-кварц-мусковит-полевошпат-хлоритовой толщи, исторически выделяемой в раннепротерозойскую аралбайскую серию [1]. К выходам пород аралбайской серии пространственно и генетически приурочены зоны минерализации линейно-трещинного типа. Сульфидные медно-цинк-свинцовые руды с платиноидами и редкоземельными элементами и свинцовые руды с редкоземельными элементами приурочены к углеродисто-карбонатным сланцам, а медноколчеданные руды с платиноидами и редкоземельными элементами обнаружены в разрезе кварц-рутил-сидеритовых сланцев, их геохимическая специализация, как и природа углеродистого материала, не исключает их сопоставления с карбонатитами.

Материал и методика исследования

Для исследования нами был использован керн со скважины № п-10, предоставленный компанией «Маятас», которая на протяжении последних десяти лет проводит поисково-разведочные работы в пределах Маятасского рудного района. Из распила керна для детальных минералого-петрографических исследований было изготовлено четыре аншлифа (рис. 2).

Минералогическое исследование медноколчеданных руд и породообразующих минералов метасоматитов проводилось в лабораториях минералогии и физических и химических методов исследований ТОО «ИГН им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы). Элементный состав изучался с помощью энергодисперсионного спектрометра INCA ENERGY, фирмы OXFORD INSTRUMENTS (Англия), установленного на электронно-зондовый микроанализатор Superprobe 733, фирмы JEOL (Япония) при ускоряющем напряжении 25 кВ, токе зонда 25 нА, диаметре зонда 1–2 мкм. В качестве образцов сравнения при анализе сульфидов использовали: для МПГ – чистые металлы, для РЗЭ (А) – искусственные соединения (А)PO₄, для Fe, Cu, S – CuFeS₂, для Pb – PbS, для Zn – ZnS, для остальных элементов – чистые металлы. Результаты анализов нормировали на 100 %. Все фото были выполнены в режиме обратно-рассеянных электронов, в котором контраст на изображении зависит от среднего атомного номера фазы \bar{Z} . Чем больше \bar{Z} , т. е. чем больше тяжёлых элементов, тем светлее эта фаза на изображении.

Атомно-эмиссионный полуколичественный спектральный анализ проводился на дифракционном спектрографе ДФС-13 с дифракционной решеткой 500 штрихов на мм (аналитик к.х.н. Т.А. Озерова). Обратная линейная дисперсия прибора составляла 0,4 нм/мм, разрешающая сила спектрографа близка к теоретическому значению и составляла 720000. В качестве источника возбуждения спектров использовалась дуга электрического тока силой 14 А. Спектры фотографировались на фотопластинки ПФС-03 в ультрафиолетовой области.

На автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с CuK α -излучением, β -фильтр. Условия съемки дифрактограмм: $U=35$ кВ; $I=20$ мА; съемка θ - 2θ ; детектор 2 град/мин. Рентгенофазовый анализ на полуколичественной основе выполнен по дифрактограммам порошковых проб с применением метода равных навесок и искусственных смесей. Определялись количественные соотношения кристаллических фаз. Интерпретация дифрактограмм проводилась с использованием данных картотеки ICDD: база порошковых дифрактометрических данных PDF2 (Powder Diffraction File) и дифрактограмм чистых от примесей минералов.

Термический анализ выполнялся на дериватографе Q-1000/D системы F. Paulik, J. Paulik и L. Erdey фирмы «МОМ» (Венгрия) (аналитик к.г.-м.н. И.Б. Саматов). Метод основан на регистрации прибором изменений термохимических и физических параметров вещества, которые могут быть вызваны при его нагревании. Термохимическое состояние пробы описываются кривыми: Т (температурной), DTA (дифференциальной термоаналитической), TG (термогравиметрической) и DTG (дифференциальной термогравиметрической). Последняя из представленных кривых является производной от TG-функции. Съемка осуществлялась в воздушной среде, в диапазоне температур 20–1000 °С. Режим нагревания динамический ($dT/dt=10$ град/мин), эталонное вещество – прокаленный Al₂O₃, навеска образца – 100 мг, чувствительность весов – 100 мг на шкалу в 200 мм.

Петрография

Кварц-рутил-сидерит-хлоритовые сланцы, вмещающие медноколчеданные руды, сложены кварцем (2,0 %), железистым, железомagneзиальным карбонатом, более всего сидеритом (10–20 %), рутилом (5,0–7,0 %) и железисто-магнезиальным хлоритом.

По химическому составу *хлорит*, слагающий основную массу породы, приближается к клинохлору, по классификации А.Г. Бетехтина [3], обогащенному FeO (до 27,08 %) и отчасти Al₂O₃ (23,62 %). Высокий уровень содержания Al₂O₃ при пересчете на нормативный состав дает корунд (21,50 %), также клинохлор характеризуется высокими содержаниями нормативного оливина (53,51 %) и гиперстена (27,10 %), что не исключает его образование по ультраосновным породам. Он почти постоянно содержит примеси Cr₂O₃ (1,49 %), CuO (0,70 %) и редко V₂O₅ (0,48 %).

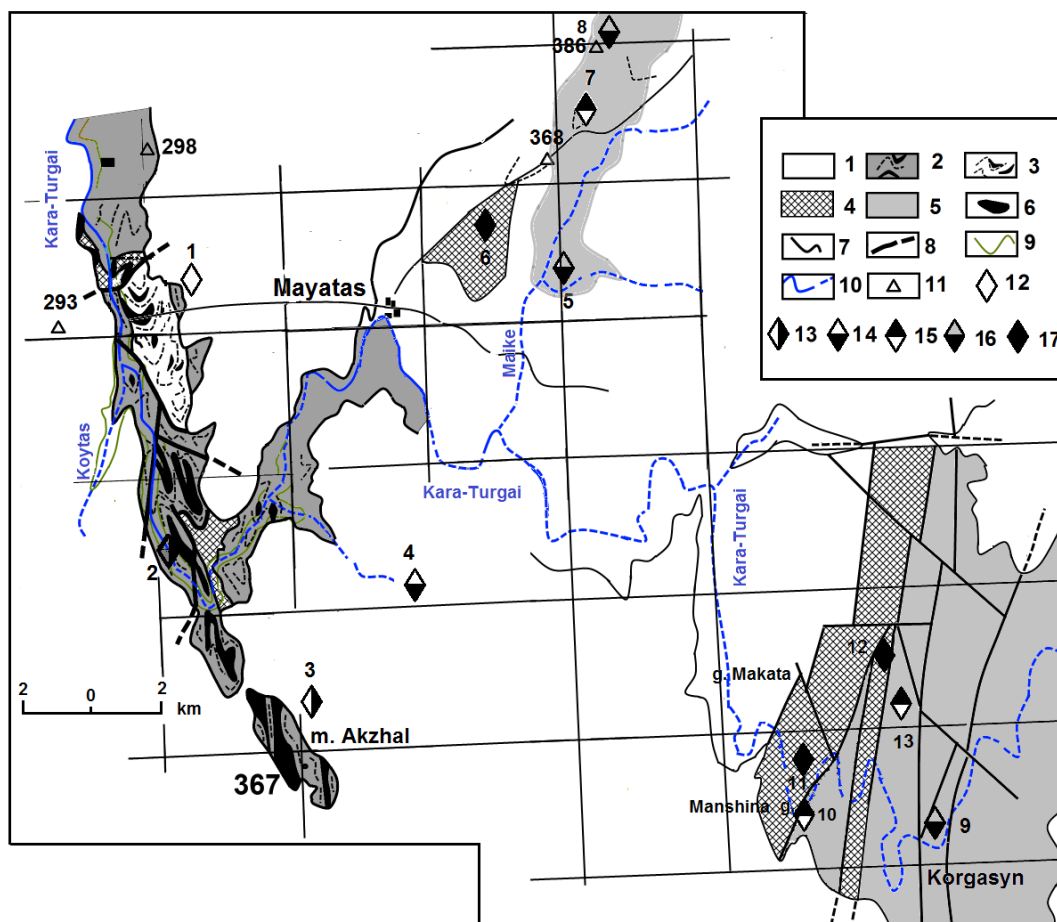


Рис. 1. Схема геологического строения района среднего течения р. Кара-Тургай по И.И. Вишневской и И.Ф. Трусовой [1], С.С. Чудину [2] с изменениями и дополнениями авторов: 1 – кайнозойские отложения; 2, 3 карсакпайская серия (PR_2kr): 2 – толща метабазальтов, реже андезитов с подчиненными горизонтами мусковито-кварцитовых и кварцитовых сланцев, 3 – толща пестроцветных туфов кварцевых альбитофиров и пепловых полосчатых туфов среднего состава; 4 – аралбайская серия (PR_{1ar}): мусковито-альбитовые и графитовые сланцы, альбитовые гнейсы и микрогнейсы; 5 – бектурганская серия (PR_{1bt}): амфиболиты, амфиболитовые, слюдяные сланцы, метасоматиты маятасского комплекса и коры выветривания по ним; 6 – каратургайский долерито-пикритовый комплекс (PR_3k); 7 – геологические границы; 8 – тектонические нарушения; 9 – топографические изолинии; 10 – река Кара-Тургай и ее притоки Койтас и Майке; 11 – тригонометрические высоты; 12–17 – генетические типы месторождений полезных ископаемых: 12 – магматическая группа (ликвационный класс), сульфидные медно-никелевые с платиноидами и редкоземельными элементами (Dy, Y, Ce) руды в пикритах; 13–16 – флюидно-магматический класс, 13 – карбонатиты кварц-карбонат-альбитового состава с сульфидами меди и платиноидами, 14 – сульфидные медно-цинк-свинцовые руды с платиноидами и редкоземельными элементами (Y, TREE) в углеродисто-карбонатных сланцах, 15 – медно-колчеданные руды с платиноидами и редкоземельными элементами в карбонатах линейно-трещинного типа, 16 – свинцовые руды с редкоземельными элементами в углеродисто-карбонатных сланцах; 17 – гидротермальная группа (золото). Рудопроявления: 1 – Каратургай, 2 – Северный Акжал, 3 – Восточный Акжал, 4 – Барха, 5 – Заречное, 6 – Крестовое-Увальное, 7 – Майке, 8 – Бошке, 9 – Коргасын, 10 – Ажин, 11 – проявление № 76, 12 – проявление № 6, 13 – проявление № 60

Fig. 1. Geological aspects scheme at the middle reaches of Kara-Turgai [1, 2] with authors' edits and additions: 1 – Cenozoic sedimentary cover; 2, 3 – Karsakpai series (Mesoproterozoic): 2 – units of metabasalts, occasional andesites with subordinate horizons of muscovite-quartzite and quartzite shales, 3 – units of multicolored tufts of quartz albitephyres and ash banded tufts of medium composition, 4 – muscovite-albite and graphite shales, albite gneisses and microgneiss of the Aralbaia Series (PR_{1ar}); 5 – Bekturgan series (PR_{1bt}): amphibolites, amphibolite, micaceous schists, carbonatites of the Maytas complex and weathering crusts; 6 – Karaturgai dolerites-picritic complex (PR_3k); 7 – geological boundaries; 8 – tectonic disturbances; 9 – topographical isolines; 10 – the river Kara-Turgai and its tributaries Koytas and Mayke; 11 – trigonometric heights; 12–17 – genetic types of mineral deposits: 12 – magmatic group (liquation class), sulfide copper-nickel ores with platinum and REE (Dy, Er, Y, Ce) in picrites; 13–16 – fluid-magmatic class; 13 – quartz-carbonate-albite metasomatic composition with copper sulphides and platinoids; 14 – sulfide copper-zinc-lead ores with platinoids and REE and Y in carbonaceous-carbonate schists; 15 – copper-pyrite ores in metasomatic of linear-crack type; 16 – lead ores with rare earth elements in carbonaceous schists; 17 – hydrothermal group (gold). Ore deposits: 1 – Karaturgai, 2 – North Akzhal, 3 – Eastern Akzhal, 4 – Barha, 5 – Zarechnoe, 6 – Krestovoe-Uvalnoe, 7 – Mayke, 8 – Boshke, 9 – Korgasyn, 10 – № 76, 11 – № 6, 12 – № 60

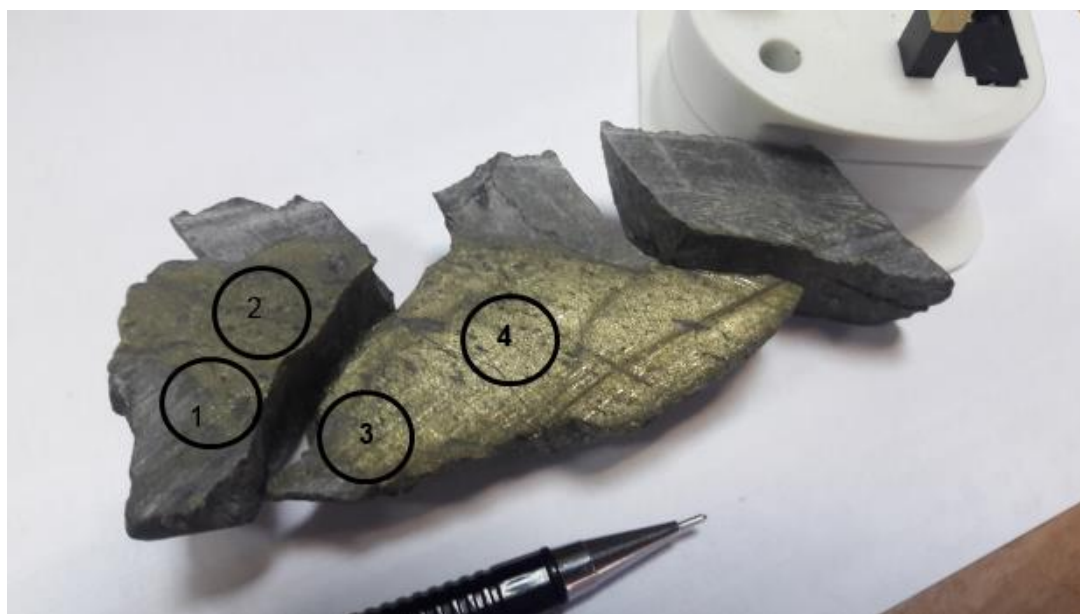


Рис. 2. Кругами указаны места отбора образцов на ашлифы из керна скважины № n-10

Fig. 2. Circles show the sampling points for the polished sections from the core of the borehole no. n-10

Рутил образует пластинки, как правило, ориентированные параллельно слоистости, отмечающейся в сланцах. Он содержит примеси Al_2O_3 (3,10 %), FeO (3,94 %) и MgO (5,20 %).

Хлориты прослоены железистым, железисто-магнезиальным карбонатом (сидеритом), в который проникают мелкие чешуйки хлорита, что создает впечатление их сингенетичности. Уровень содержания FeO не превышает 60 %, в составе примесей встречаются такие оксиды, как: CaO (2,86 %), CuO (0,99 %), MgO (1,24 %), MnO (0,37 %), SO_3 (0,32 %).

Кварц выполняет трещины и пустоты, нередко ассоциирует с сидерит-хлорит-сульфидной массой. Редко в кварце встречаются микровключения хромита, содержащие редкоземельные элементы (Y, La, Ce),

фосфаты, слагающие прожилки в халькопирите, также содержат элементы цериевой подгруппы. Часто встречаются хорошо ограненные кристаллики циркона и апатита.

Сидерит и хлорит содержат включения или сами заключены в сульфиды, большей частью в халькопирит (рис. 3, А, В), а также присутствует виоларит, пирит, пирротин, сфалерит. В халькопирите встречаются микроскопические зерна сульфидов железа, меди, свинца и рения, виоларит и сфалерит содержат примеси Er и Cd . Также в халькопирите встречаются включения минералов кобальтин-герсдорфитового ряда, содержащие Pt , Ir , Rh , Ru , Os , образующие микроминералы и фазы, мелонит и вавринит напротив содержат только Pd .

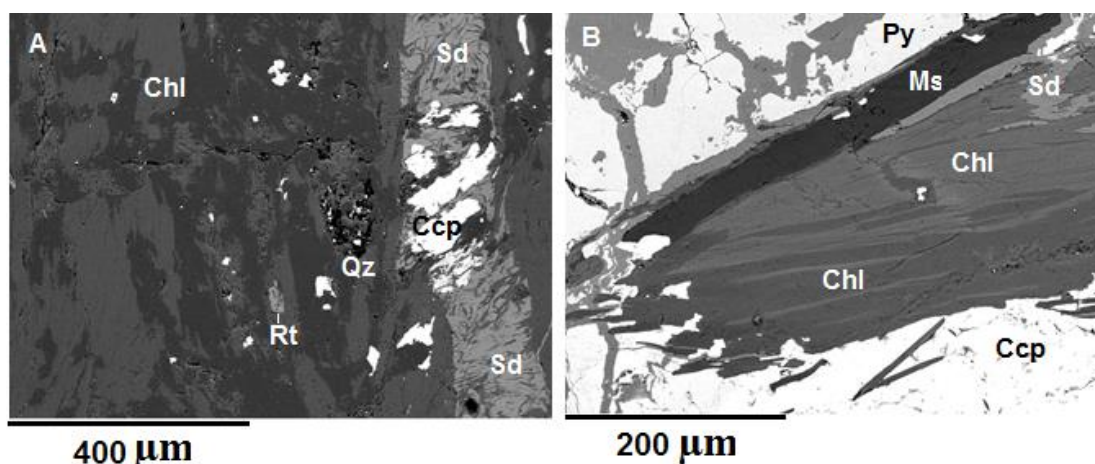


Рис. 3. Изображение в обратно-рассеянных электронах участков ашлифа керна скважины № n-10: А) кварц-рутил-сидерит-хлоритовые сланцы, вмещающие медноколчеданные руды; В) ксенолит сидерит-мусковит-хлоритовых сланцев. Хлорит (Chl); кварц (Qz); мусковит (Ms); рутил (Rt); сидерит (Sd); халькопирит (Ccp); пирит (Py)

Fig. 3. Back-scattered electron image of polished sections made from ore samples containing core of the borehole no. n-10: А) quartz-rutile-siderite-chlorite schists containing copper-pyrite ores; В) xenolith siderite-muscovite-chlorite shale. Chlorite (Chl); quartz (Qz); muscovite (Ms); rutile (Rt); siderite (Sd); chalcopyrite (Ccp); pyrite (Py)

По данным полуколичественного рентгенофазового анализа кристаллических фаз в составе сидерит-кварц-рутил-хлоритовых сланцев содержание альбита (45,8 %), хлорита (32,0 %), кварца (13,0 %), кальцита (6,2 %), сидерита (3,1 %). Присутствие карбонатов в составе сланцев установлено и термическим анализом, указывающим на их мантийное происхождение.

По результатам атомно-эмиссионного полуколичественного спектрального анализа сланцы содержат в значимых концентрациях: Y (30 г/т), La (30 г/т), Ce (70 г/т), V (200 г/т), Cr (150 г/т), а также Ba (0,02 %), Mn (0,02 %), As (0,01 %), Pb (<0,002 %), Sb (<0,002 %), при крайне высоких содержаниях Cu (>1,0%).

Сидерит-мусковит-хлоритовые сланцы слагают линейно вытянутые прослои или ксенолиты, заключённые в рудную массу. Минеральные составы сланцев и их взаимоотношения с рудными минералами показаны на рис. 3.

Хлорит слагает большую часть сланцев и по химическому составу отвечает в целом клинохлору. Более темные его полосы обогащены MgO (17,73 %), но обеднены Al_2O_3 (19,64 %), FeO (31,50 %) при этом светлые полосы содержат V_2O_5 (0,33 %), Cr_2O_3 (1,34 %), MnO (0,51 %). По отношению к хлориту из кварц-рутил-сидерит-хлоритовых сланцев клинохлор сидерит-мусковит-хлоритовых сланцев несколько обеднен MgO, однако он в целом содержит больше Cr_2O_3 .

Мусковит по уровню содержания Cr_2O_3 (3,17 %) отвечает фукситу. С фукситом ассоциирует сидерит с примесями MgO (0,65 %), MnO (0,32 %) и CaO (2,20 %).

Мусковит и клинохлор характеризуются высокой температурой полного плавления.

За пределами рудной зоны установлены прожилки углеродсодержащих и графит-мусковит-клинохлор-альбитовых сланцев, пронизанных тонкими прожилками карбонат железистого алюмосиликата, содержащего до 15 % LREE.

По данным Р.А. Нсанова [4] мусковитсодержащие сланцы характеризуются ярко выраженной иттриеисодержащестью.

В составе кор выветривания по кварц-рутил-сидерит-хлоритовым, сидерит-мусковит-хлоритовым сланцам, наряду с апатитом, сфеном, ильменитом, гранатом, цирконом, встречаются желваки черчита [4]. Неодимовая разновидность черчита является основным источником иттрия, европия и тяжелых лантаноидов. Черчит, по мнению [4], является продуктом изменения микровключений реликтовых относительно устойчивых REE-минералов типа паризита, ксенотима, монацита.

Петрологическая специализация рудовмещающих толщ

Нормативный минеральный состав клинохлора кварц-рутил-сидерит-хлоритовых и сидерит-мусковит-хлоритовых сланцев дает нам право предположить, что данные породы есть продукт метаморфизма щелочных ультраосновных пород, вероятно всего эс-сексит-пикритов. На щелочную природу исходного материнского материала указывает и присутствие постмагматических продуктов (фосфатов), содержащих элементы цериевой подгруппы. Этот вывод согласуется и с присутствием в составе коры выветри-

вания, вскрытой скважиной № 7 в интервале глубин от 19,2 до 24,0 м в профиле рудной зоны монтмориллонита, который образуется, как правило, по основным и ультраосновным горным породам [3].

Ассоциация карбонатов, включая сидерит, апатита, титанита, альбита, кварца, граната (пироп-альмандинового ряда), хромсодержащего мусковита и обогащенного хромом клинохлора и их пространственная связь с графит-кварц-хлоритовыми сланцами позволяет рассматривать сланцы составной частью силицит-карбонат-углеродистого комплекса, отражающего состав ростового расплава мантийного происхождения. Интенсивно рассланцованный материал углерода, клинохлора и карбоната обогащен сульфидными, которые, как правило, встречаются на плоскостях рассланцевания. Углеродистый материал проникает в клинохлор-карбонат-кварцевый материал. Часто можно наблюдать, что этот материал пронизан тонкими прожилками сульфидов.

По мнению Ю.А. Литвина [5, 6], силицит-карбонат-углеродистый расплав является высокоэффективной алмазообразующей средой, что установлено экспериментально. Присутствие алмаза в составе графитов карбонатитов описываемого комплекса было еще ранее доказано В.А. Чевердиным и Ю.А. Смеловым (1988). Этот вывод вполне согласуется с присутствием фуллерена и алмаза в графит-мусковит-полевошпат-кварцевых сланцах Керегешинского рудного поля, что обнажается юго-западной г. Аркалык [7], которые находятся в переслаивании с метаморфизованными вулканитами базальт-риолитовой карасулейменской толщи. По данным С.С. Чудина [7], содержание графита в этих сланцах достигает 4,12 %, большая часть которого слагает тонкие чешуйки мощностью менее 1,0 мм с температурой выгорания 900 °С. В углеродсодержащих сланцах также установлены незначительные концентрации платины и палладия, что указывает на неорганическое происхождение углерода.

Карбонатиты довольно широко представлены в районе поселка Коргасын (Кургасын) [8], что лежит в излучине реки Кара-Тургай (рис. 1). Здесь в составе хлорито-альбитовой толщи встречаются карбонатизированные мусковито-альбитовые и карбонатизированные графит-содержащие мусковито-хлорито-кварцевые сланцы, аналогичные тем, что были описаны на Керегешинском рудном поле [7] и нами в пределах проявления Майке [9]. Важно отметить, что графит-мусковит-кварцевые и графит-мусковит-хлорит-полевошпат-кварцевые сланцы этих комплексов содержат колчеданно-полиметаллические оруденения. В районе Керегешин сульфиды, в составе графитсодержащих пород, достигают 15 % (пирротин, пентландит, пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, марказит, кубанит, арсенопирит, борнит), присутствие полисульфидной ассоциации, аналогичной по составу таковой карбонатитам Майке, что не исключает обнаружение в ней платиноидов.

По данным И.И. Вишневской и И.Ф. Трусовой [11], акцессорные минералы графитсодержащих пород представлены апатитом, титанитом, цирконом, турмалином, гранатом (3 %) и графитом (до 12 %). Хи-

мический состав граната: альмандин ($\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$) – 50 мол. %, гроссуляр ($\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$) – 32 мол. %, пирроп ($\text{Mg}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$) – 7 мол. %. Редко циркон, апатит и титанит образуют округлые зерна размером до 0,02 мм.

Как отмечает Г.П. Зарайский [10], парагенезис турмалина с мусковитом указывает на хлоридно-борнокислый состав растворов, под воздействием которых происходят гидротермальные изменения пород.

Выходы метасоматитов в районе поселка Коргасын сопровождаются литогеохимическими ореолами Y, Yb, La и Au, также Pb, Ag, W, Y, Li, что дает основание провести параллель с карбонатами Маятасского рудного района. К ореолам Pb, Ag, W, Y, Li приурочено месторождение свинца с пиритом и халькопиритом. По данным Л.А. Мирошниченко и А.В. Попова [11], галенитовые руды содержат редкоземельную минерализацию в виде мелких включений фторкарбонатов и фосфатов. Состав фторкарбонатов (в %): La – 22,5; Ce – 36,1; Pr – 6,2, Nd – 20,0; Sm – 3,0; Gd – 5,7; Te – 0,6 и Y – 1,5; фосфатов: La – 22,7; Ce – 42,3; Pr – 6,0; Nd – 19,0; Sm – 4,4; Eu – 0,4; Gd – 5,2. Его аналогом является месторождение Заречное, полиметаллические руды которого наряду с галенитом содержат сфалерит, смитсонит, а также Au, Ag, Pt, Pd и REE (Y, Yb).

В существующих объемных моделях вертикальной зональности оруденения карбонатитовых массивов плутонического типа, как правило, выше гематитовых и барит-стронцианитовых месторождений располагаются ториево-редкоземельные с сульфидами меди, свинца и цинка проявления, которые приурочены к анкерито-доломитовым жилам [12]. Для описываемого нами типа характерно присутствие графит-мусковит-клинохлор-углеродистых и графит-мусковит-клинохлор-карбонат-кварцевых жил, содержащих медноколчеданные руды, обогащенные платиноидами и редкоземельными минералами.

Минералогия

В составе прожилка мощностью до 35 см, вскрытого скважиной № п-10 на глубине 100 м, были установлены: халькопирит (>95 %), виоларит, пирит, сфалерит, пирротин (в порядке убывания), нерудные минералы представлены сидеритом и гематитом.

Микровключения в халькопирите представлены самородным серебром (78,18 % Ag), теллуридом серебра (Ag_2Te), акантитом (Ag_2S), кобальтином (CoAsS), герсдорфитом (NiAsS), минералами кобальтин-герсдорфитового ряда с Pt, Ir, Rh, Ru, Os, вавринитом ($\text{Ni}_2\text{SbTe}_2+\text{Pd}+\text{Ag}$), сперрилитом (PtAs_2), тестибиопалладитом ($\text{Pd}(\text{Sb}, \text{Bi})\text{Te}$), мелонитом (NiTe_2), галенитом (PbS), ульманнитом (NiSbS), фосфатом, фторфосфатом с REE и алюмосиликатом с LREE, также обнаружены фазы ($\text{Pb}, \text{Ag})\text{Te}$ и PbTe . Особую группу микровключений образуют многочисленные минеральные фазы сульфидов Re, Mo, Cu, Fe, Pb, Bi.

Основные рудные минералы

Халькопирит (CuFeS_2) слагает основную массу руды (более 95 %), с ним ассоциируют все нижеописанные минералы. В халькопирите примеси платиноидов и REE не обнаружено. Учитывая средний химический состав (35,20 % S, 30,32 % Fe, 34,52 % Cu) халькопирита,

его кристаллохимическая формула имеет вид $\text{Cu}_{1,0}\text{Fe}_{1,0}\text{S}_{2,02}$ при крайне малом избытке серы.

Виоларит (FeNi_2S_4) представляет собой полную псевдоморфозу по пентландиту, в которой сохраняется типичная для пентландита спайность. Зерна виоларита имеют неправильную форму, их размер достигает 500 мкм. В качестве примеси в виоларите присутствует Co (<1,25 %), реже отмечаются беспримесные формы. Крайне редко он содержит микровключения теллурида серебра. Средний химический состав виоларита следующий: 42,54 % S, 21,32 % Fe, 34,03 % Ni. Его кристаллохимическая формула с учетом среднего химического состава имеет вид $(\text{Fe}_{1,19}\text{Ni}_{1,81})_{\Sigma 3,0}\text{S}_{4,14}$. В целом в виоларите отмечается избыток серы и железа. Встречено единичное зерно виоларита с сетчатой структурой распада.

Пентландит ($\text{Fe}_4\text{Ni}_4(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni})\text{S}_8$) встречается крайне редко. Он сильно обогащен серой.

Пирротин ($\text{Fe}_{1,0}\text{S}_{1,14}$) встречается крайне редко, и он характеризуется избыточным содержанием серы.

Пирит (FeS_2) слагает ксеноморфные зерна размером до 200 мкм, погруженные в халькопирит. Нередко можно наблюдать, как пирит по трещинам проникает в халькопирит. В качестве примеси почти постоянно присутствует Ni (0,41–3,71 %) и значительно реже – Cu (0,63–0,75 %). Высокие концентрации Ni (2,67–3,71 %) характерны для пирита, ассоциирующего с виоларитом. Также в этом пирите отмечается незначительный недостаток серы ($\text{Fe}_{0,97}\text{Ni}_{0,06}\text{S}_{1,97}$). Стехиометрическая формула пирита имеет вид $\text{Fe}_{0,99}\text{Ni}_{0,01}\text{S}_{2,00}$, развивающийся по трещинам и слагающий отдельные зерна в халькопирите.

Сфалерит ($(\text{Zn}, \text{Fe})\text{S}$) встречается крайне редко и часто совместно с микровключениями кобальтина (рис. 4). Он, как правило, содержит примесь Cd (0,66–0,76 %) и Cu (0,80–1,30 %), но недосыщен Fe (6,77–7,03 %). Исходя из среднего химического состава (32,28 % S, 6,89 % Fe, 1,10 % Cu, 0,72 % Cd, 56,70 % Zn) сфалерита, его кристаллохимическую формулу можно представить как $\text{Zn}_{0,86}\text{Fe}_{0,12}\text{Cu}_{0,02}\text{S}_{1,03}$ при крайне малом избытке серы. Сфалерит, встречающийся в ассоциации с акантитом, не содержит Cd, но обогащен Fe (8,45 %), Cu (2,46 %) и не испытывает избытка серы ($\text{Zn}_{0,79}\text{Fe}_{0,14}\text{Cu}_{0,04}\text{S}_{1,00}$).

Микровключения

Ряд кобальтин-герсдорфит. Ni-Co-сульфоарсениды в основном представлены промежуточными членами ряда кобальтин-герсдорфит – никелистым кобальтином и реже кобальтином, феррокобальтином и герсдорфитом (рис. 4). Они образуют минералы двух типов, зональные и незональные кристаллы, которые слагают гирлянды кристаллов и одиночные хорошо ограненные прямоугольные, ромбические, пятигранные и шестигранные пластинки. Максимальный размер одиночных пластинок не превышает 30 мкм, как правило, их величина составляет от 5 до 15 мкм. Нередко можно наблюдать соседство кобальтина со сфалеритом (рис. 4, В). Также минерал часто обрастает мелонитом, тестибиопалладитом, теллуридом серебра и магнетитом. Мышьяк значительно преобладает над серой независимо от уровня содержания Co и Ni.

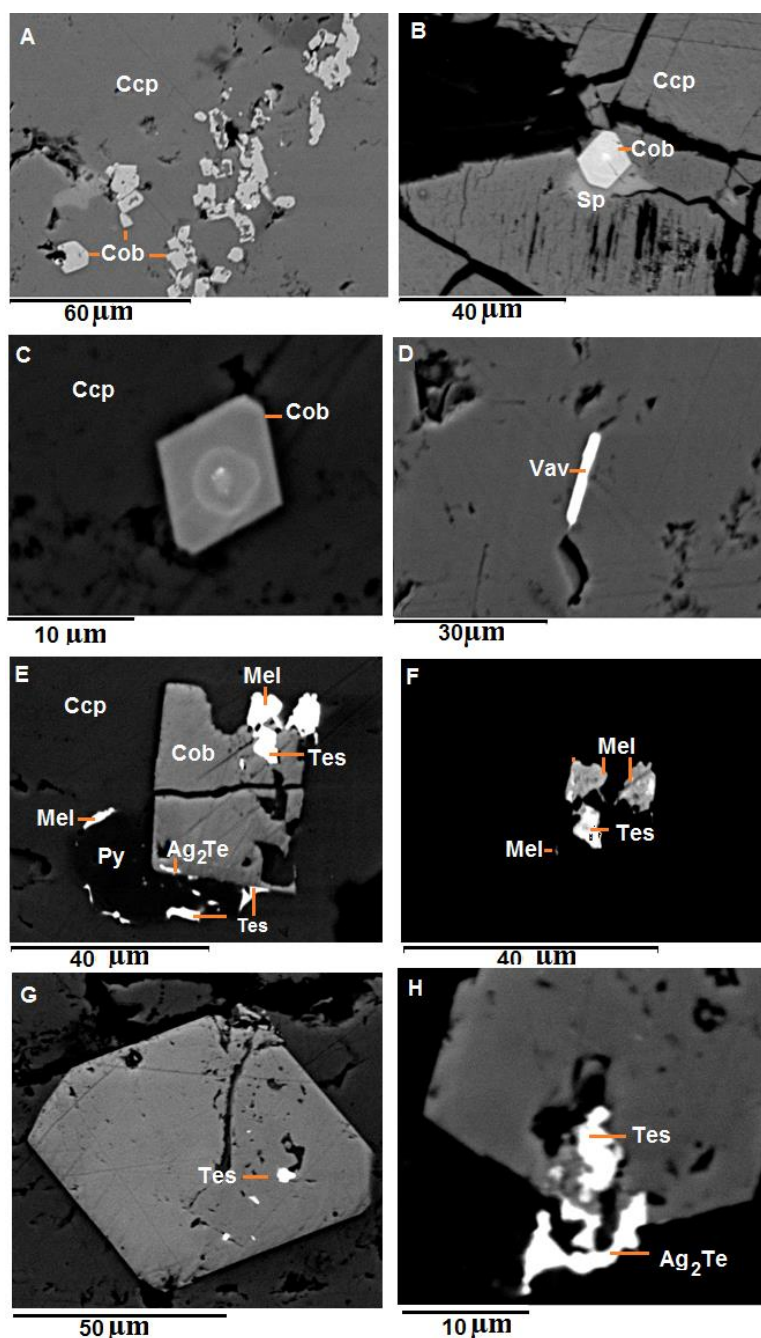


Рис. 4. Изображение в обратно-рассеянных электронах участков анилифа рудных минералов керна скважины № n-10: A) характер взаимоотношения халькопирита и кобальтина, образующего сплошные массы, зерна неправильной, реже идеально ограниченные кристаллы; B, C) идеальные кристаллы зонального никелистого кобальтина: B) яркое зерно в центре – Pt; C) яркое зерно в центре и кольцо содержат Ru, Rh, Os, Ir, Pt; D) удлиненная пластинка вавринита (Ni_2SbTe_2); E) характер прорастания халькопирита минералом кобальтин-герсдорфитового ряда и его мелонитом, тесибипалладитом и Ag_2Te ; F) пример отличия минералов по среднему атомному номеру фазы ($Z_{\text{ср.}}$). Чем больше $Z_{\text{ср.}}$, т. е. чем больше тяжёлых элементов, тем светлее эта фаза на изображении (мелонит $Z_{\text{ср.}}=44$, тесибипалладит $Z_{\text{ср.}}=55$); G) никелистый кобальтин с микровключением тесибипалладита; H) никелистый кобальтин с микровключениями тесибипалладита и теллурида серебра

Fig. 4. Back-scattered electron image of polished sections made from ore samples containing core of the borehole no. n-10: A) nature of the germination of chalcopyrite by cobaltin, forming continuous masses, irregular grains, rarely ideally faceted shapes; B, C) ideal crystals of polished nickel-plated cobaltite; B) bright grain in the center is Pt; C) bright grain in the center and the ring contain Ru, Rh, Os, Ir, Pt; D) elongated plate of waverrite (Ni_2SbTe_2); E) nature of the germination of chalcopyrite by the mineral of the cobaltin-gersdorffite series and its melonite, testibiopalladite and Ag_2Te ; F) example of the difference in minerals by the average atomic phase number ($Z_{\text{med.}}$). The larger $Z_{\text{med.}}$, more heavy elements, the lighter this phase in the image (melonite $Z_{\text{med.}}=44$, testibiopalladium $Z_{\text{med.}}=55$); G) nickel-plated cobaltite with microincorporation of testibiopalladite; H) nickel-plated cobaltite with microinclusions of testibiopalladite and silver telluride

Герсдорфит (NiAsS) по составу приближается к стехиометрической формуле $\text{Ni}_{1,02}\text{As}_{0,99}\text{S}_{0,99}$. Из примесей в составе герсдорфита присутствует Sb (1,60 %), Fe (0,2 %) и Co (0,1 %) (табл. 1).

Кобальтин (CoAsS) встречается чаще, чем герсдорфит. Он слагает грозди и одиночные шестигранные, реже ромбические кристаллы (рис. 4, А) и, как правило, кобальтин незональный (рис. 5). По отношению к стандартному кобальтину [3] он обогащен Ni (<9,20 %), и, как правило, присутствует примесь Fe (4,83–5,97 %) и Cu (1,08–2,93 %).

Средний химический состав кобальтина, рассчитанный по пяти анализам, следующий: 22,18 % Co, 7,56 % Ni, 5,69 % Fe, 20,18 % S, 42,33 % As. Его теоретическая формула с учетом среднего химического состава имеет вид: $(\text{Co}_{0,62}\text{Ni}_{0,11}\text{Fe}_{0,17}\text{Cu}_{0,04})_{1,04}\text{As}_{0,93}\text{S}_{1,03}$. В составе кобальтина постоянно отмечается недостаток мышьяка.

Никелистый кобальтин (NiCoAsS) представлен зональными и незональными кристаллами, которые существенно различаются по цвету. Зональные кристаллы имеют светлый и матовый оттенок, что обусловлено присутствием платиноидов. *Незональные кристаллы никелистого кобальтина* имеют серую окраску, отдельные его кристаллы достигают 90 мкм в поперечнике, они хорошо огранены и представлены

шестигранниками и прямоугольниками (рис. 4, 5), крайне редко встречаются его скелетные кристаллы (рис. 5). Он содержит микровключения тестибиопалладита, мелонита и теллурида серебра, которые вместе с никелистым кобальтином заключены в халькопирит. Отдельные микровключения незонального никелистого кобальтина обогащены эрбием (<7,32 %) и часто содержат примесь меди (<7,72 %).

Несмотря на слабую разницу химического состава незонального никелистого кобальтина, все же были рассчитаны две формулы с учетом их различия по содержанию мышьяка и серы. Низкосернистый никелистый кобальтин по химическому составу приближается к стехиометрической формуле $(\text{Ni}_{0,53}\text{Co}_{0,24}\text{Fe}_{0,21}\text{Cu}_{0,03})_{\Sigma 1,01}\text{As}_{1,00}\text{S}_{0,99}$, тогда как в обогащенных серой минералах отчетливо проявлен недостаток мышьяка, что отчетливо видно по формуле $(\text{Ni}_{0,44}\text{Co}_{0,33}\text{Fe}_{0,22}\text{Cu}_{0,04})_{\Sigma 1,03}\text{As}_{0,94}\text{S}_{1,03}$. Недостаток мышьяка отмечен и в незональном кобальтине.

Кристаллохимическая формула соответствует номеру анализа:

1. $\text{Ni}_{1,02}\text{As}_{0,99}\text{S}_{0,99}$;
2. $(\text{Ni}_{0,38}\text{Co}_{0,23}\text{Fe}_{0,22}\text{Cu}_{0,08}\text{Er}_{0,08})_{\Sigma 1,00}\text{As}_{1,01}\text{S}_{0,99}$;
3. $(\text{Ni}_{0,55}\text{Co}_{0,24}\text{Fe}_{0,20}\text{Cu}_{0,02}\text{Er}_{0,01})_{\Sigma 1,02}\text{As}_{0,99}\text{S}_{0,99}$;
4. $(\text{Ni}_{0,54}\text{Co}_{0,22}\text{Fe}_{0,20}\text{Cu}_{0,03}\text{Er}_{0,01})_{\Sigma 1,00}\text{As}_{1,1}\text{S}_{0,99}$.

Таблица 1. Результаты микрозондовых анализов (мас. %) незональных минералов кобальтин-герсдорфитового ряда

Table 1. Results of microprobe analyzes (wt. %) of non-polished minerals of the cobaltin-gersdorffite series

№ п/п	Минерал/Mineral	S	Fe	Cu	Co	Ni	As	Sb	Er
1	Герсдорфит/Gersdorffite	19,0	0,2	н	0,1	35,70	44,30	1,60	н
2	Ni-кобальтин Ni-cobaltite	17,75	7,17	2,73	7,64	12,46	42,25	н	7,32
3		18,89	6,60	0,71	8,57	19,12	44,49	н	1,40
4		18,67	6,59	1,01	7,75	18,68	44,63	н	1,50

Примечание: н – элемент не определен.

Note: n – not determined.

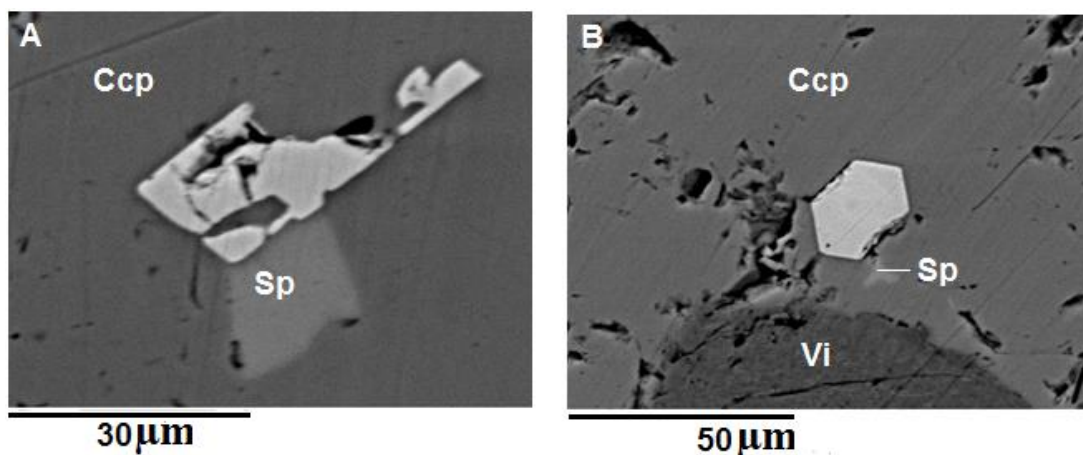


Рис. 5. Изображение в обратно-рассеянных электронах участков анилифа незонального никелистого кобальтина

Fig. 5. Back-scattered electron image of polished sections made from ore samples containing non-polished nickel-plated cobaltite

Форма, размер и характер строения зональных кристаллов никелистого кобальтина отображены на рис. 6. Характерной особенностью строения кристаллов является присутствие, как правило, ярко белого ядра, представленного платиноидами, в центре мине-

рала, от которого отходит кольцо белого или матового цвета (рис. 4, В, С), также встречаются зерна и по периферии кристалла. Нередко эти кристаллы раздроблены. Встречаются кристаллы, в которых центральное ядро отсутствует и наблюдается только

светлое кольцо или широкий ободок матового или белого цвета. Контрастность белого или матового цвета отражает уровень содержания платиноидов (рис. 6). Максимальное содержание платиноидов в одном из кристаллов зонального никелистого кобальтина составило 17,40 %, где Ir 13,88; Pt 2,34; Os 1,18. В зональных минералах никелистого кобальтина легкие (Ru, Rh) и тяжелые (Pt, Ir, Os) платиновые метал-

лы находятся вместе (табл. 2). Платиноиды (Pt, Ir, Ru, Rh, Os) образуют микровключения в никелистом кобальтине. Поликомпонентные твердые растворы системы Pt-Ir-Os-Ru-Rh образуют следующие разновидности: (Pt, Ir), (Ir, Pt), (Pt, Ir, Ru, Os, Rh), (Ir, Pt, Os), (Ir, Pt, Rh), (Ru, Os), (Ir, Pt, Rh, Ru), (Pt, Os), соединения перечислены в порядке убывания.

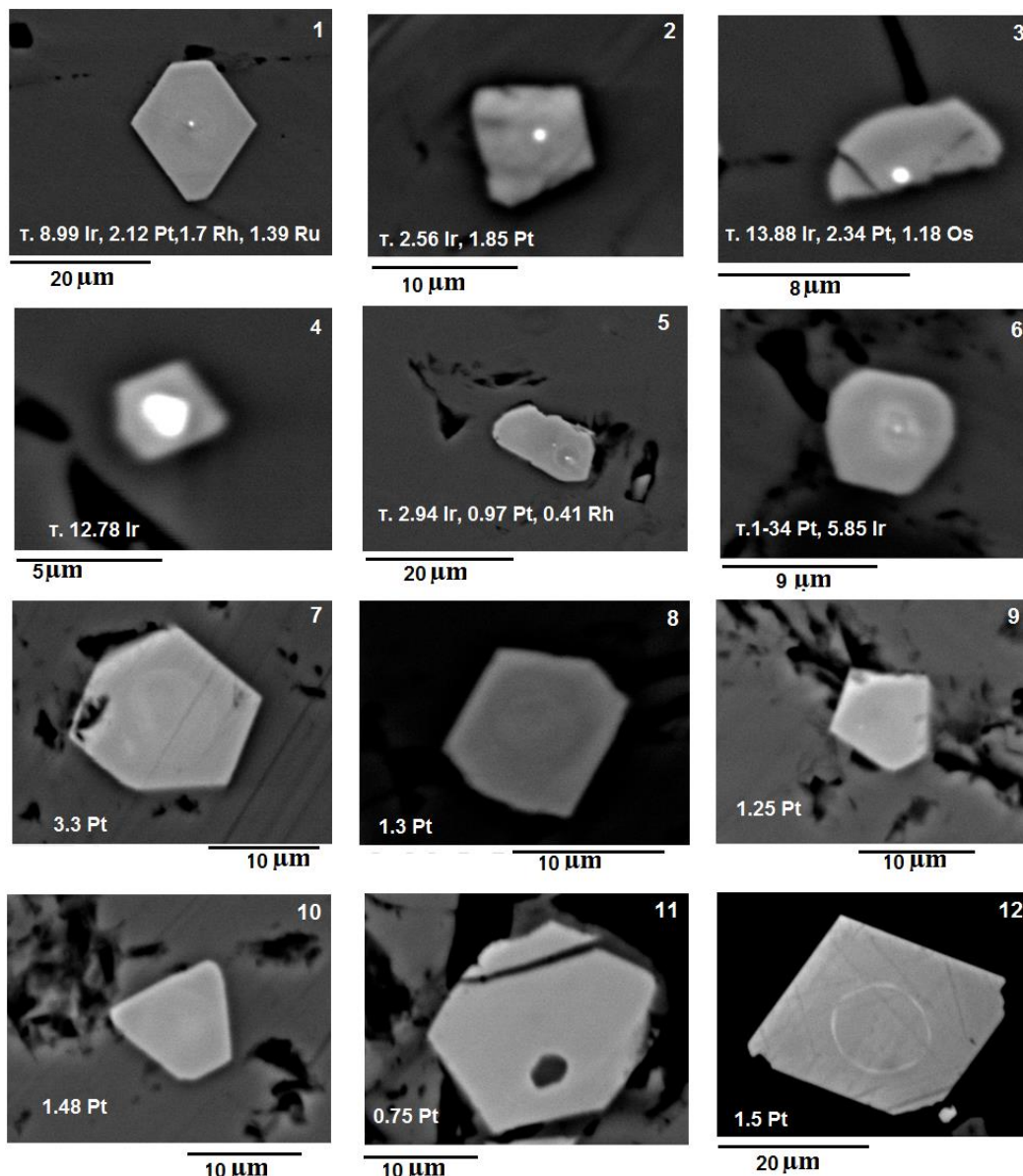
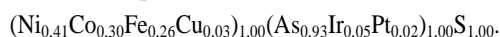


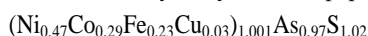
Рис. 6. Изображение в обратно-рассеянных электронах участков анилифа зональных минералов никелистого кобальтина с идиоморфными (1–3) ядрами, ксеноморфными выделениями (7–12) и смешанными (4–6) типами платиноидов

Fig. 6. Back-scattered electron image of polished sections made from ore samples containing polished nickel-plated cobaltite with idiomorphic (1–3) nuclei, xenomorphic precipitates (7–12) and mixed (4–6) types of platinoide

В тех случаях, когда в составе никелистого кобальтина присутствует платина и иридий, формула имеет стехиометрический вид

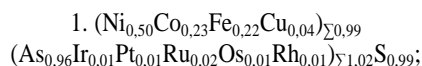


Если платиноиды отсутствуют, то в формуле



выявляется недостаток мышьяка, что также характерно для незональных кристаллов никелистого кобальтина.

Кристаллохимическая формула соответствует номеру анализа:



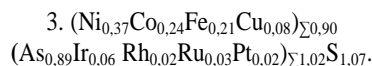
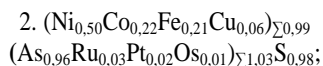


Таблица 2. Результаты микрозондовых анализов (мас. %) зонального никелистого кобальтина

Table 2. Results of microprobe analyzes (wt. %) of polished nickel-plated cobaltite

№ п/п	Минерал Mineral	S	Fe	Cu	Co	Ni	As	Pt	Ir	Rh	Ru	Os
1	Ni-кобальтин Ni-cobaltite	18,39	6,99	1,64	7,95	16,92	41,66	1,24	1,03	0,30	1,11	0,69
2		18,46	6,95	2,14	7,65	17,07	41,96	1,98	0,78	0,35	1,94	0,91
3		19,69	6,81	2,81	8,30	12,34	38,24	2,48	6,37	1,09	1,87	н

Встречен один корродированный кристалл ульманнита (NiSbS) в сростках с пиритом и теллуридом серебра (рис. 7). Ульманнит имеет широкий спектр элементов-примесей: Ag, Te, Pd, Bi (табл. 3), что ха-

рактерно для минералов гидротермальных месторождений серебряно-кобальтово-никелевых и кобальтово-никелевых руд.

Таблица 3. Результаты микрозондового анализа (мас. %) ульманнита

Table 3. Results of microprobe analysis (wt. %) of ullmannite

Минерал/Mineral	S	Fe	Sb	Co	Ni	As	Bi	Ag	Te	Pd
Ульманнит/Ullmannite	10,88	1,77	41,28	0,25	18,79	1,23	8,07	7,51	7,26	2,96

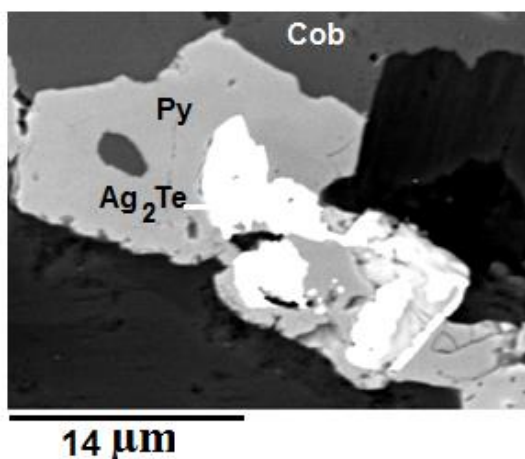
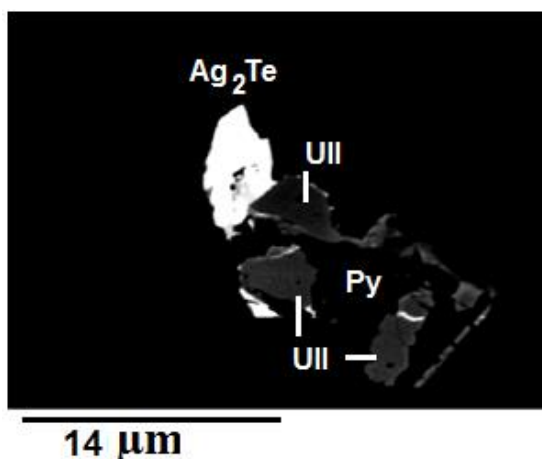


Рис. 7. Изображение в обратно-рассеянных электронах участков анилифа незонального никелистого кобальтина, пирита и ульманнита (Ull)

Fig. 7. Back-scattered electron image of polished sections made from ore samples containing polished nickel-plated cobaltite, pyrite and ullmannite (Ull)

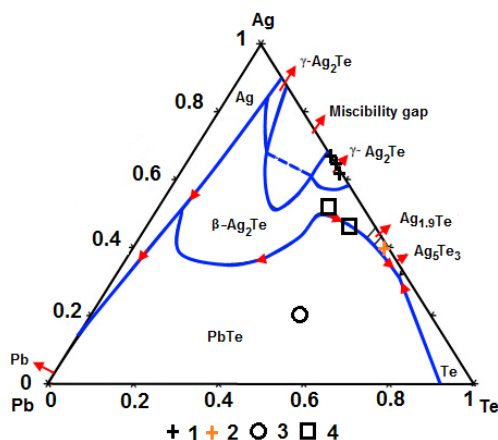


Fig. 8. Projection of the liquidus of the ternary Ag-Pb-Te system (at. %) was projected onto experimental alloys [13]: 1, 2 – silver telluride ($\gamma\text{-Ag}_2\text{Te}$): 1 – $\text{Ag} < 61,12\%$, 2 – $\text{Ag} = 21\text{--}11\%$; 3 – lead telluride PbTe ($\text{Pb} 34,57\text{--}37,31\%$), 4 – silver telluride ($\beta\text{-Ag}_2\text{Te}$) ($\text{Pb} 7,84\text{--}8,90\%$)

Рис. 8. Проекция ликвидуса тройной системы Ag-Pb-Te (ат%), спроецирована на экспериментальные сплавы [13]: 1, 2 – теллурид серебра ($\gamma\text{-Ag}_2\text{Te}$): 1 – $\text{Ag} < 61,12\%$, 2 – $\text{Ag} = 21\text{--}11\%$; 3 – теллурид свинца PbTe ($\text{Pb} 34,57\text{--}37,31\%$), 4 – теллурид серебра ($\beta\text{-Ag}_2\text{Te}$) ($\text{Pb} 7,84\text{--}8,90\%$)

Теллурид серебра образует кристаллы двух модификаций: $\beta\text{-Ag}_2\text{Te}$, $\gamma\text{-Ag}_2\text{Te}$, что отчетливо можно наблюдать на диаграмме Ag-Pb-Te (ат. %) (рис. 8) [13]. Он является одним из часто встречающихся микровключений, пространственно ассоциирующих с ми-

нералами ряда кобальтин-герсдорфит, халькопиритом и нередко образует двухфазные кристаллы (рис. 9, D). Габитус кристаллов теллурида серебра пластинчатый, но чаще они образуют зернышки неправильной округлой формы размером не более 20 мкм.

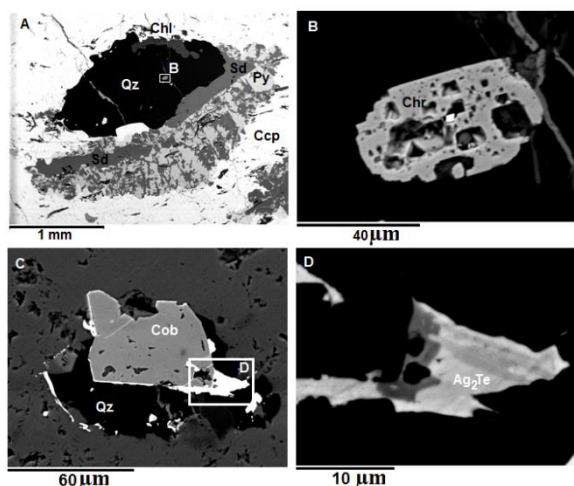


Рис. 9. Изображение в обратно-рассеянных электронах участков анилифа микровключений рудных минералов медного колчедана: А) микровключение хромита в зерне кварца, заключенное в сидерит-хлорит-сульфидную массу; В) скелетный кристалл хромита (Chr), в центре высвечивается кристаллик редких земель; С, D) никелистый кобальтин обрастает теллуридом серебра; D) две фазы теллурида серебра

Fig. 9. Back-scattered electron image of polished sections made from ore samples containing microinclusions of ore minerals of copper pyrite: A) microinclusion of chromite in quartz grain enclosed in siderite-chlorite-sulfide mass; B) skeletal crystal of chromite (Chr), in the center a crystalline of rare earths is highlighted; C, D) nickel cobaltite is overgrown with silver telluride; D) two phases of silver telluride

β - Ag_2Te содержит примеси свинца (<8,90 % Pb) и никеля (<5,53 % Ni) на фоне высоких концентраций элементов халькопирита, тогда как γ - Ag_2Te не содержит свинца, а никель встречается спорадически, однако присутствует примесь мышьяка.

Теллурид свинца (PbTe) содержит примесь никеля (<2,50 % Ni) при относительно высоком содержании серебра (<15,62 % Ag).

Галенит (PbS) распространен гораздо реже, чем теллурид свинца. Он заполняет пустоты и трещины в халькопирите и сидерит-мусковит-хлоритовых сланцах, образуя округлые зерна не более 3 мкм в диаметре.

Этапы рудообразования

Учитывая состав руды проявления Майке и модель последовательности формирования PGE, редких минералов и сульфидов медноколчеданных руд, разработанную ранее [14, 15], можно предположить, что образование медноколчеданных руд Майке произошло в условиях магматических и постмагматических процессов минералообразования (рис. 10).

Вслед за [16, 17] можно предположить, что на ранней стадии из сульфидного расплава кристаллизовалась основная масса кристаллов платиносодержащих сульфидов и сперрилит, что типично для магматической стадии минералообразования, в этот расплав также были заключены небольшие кумулаты MSS, не содержащего благородных металлов.

В позднемагматическую или гидротермальную стадию (рис. 10, С) на минералы предыдущих стадий накладываются сульфиды цветных металлов, не образующие правильные кристаллографические формы. Это такие минералы, как тестибиопалладит, мелонит и вавринит, являющиеся основными источниками палладия.

В ассоциации с сульфидоарсенидами никеля и кобальта крайне редко встречается ульманит. Для него свойственен широкий спектр элементов-примесей: Ag, Pd, Te, Bi, что характерно для минеральных ассоциаций гидротермальных месторождений.

На этом этапе на медноколчеданные руды накладываются полиметаллическая минерализация. Сфалерит, как правило, сопровождается образованием акантита и самородного серебра. Наиболее поздними образованиями являются фосфаты и фторфосфаты REE.

Предполагаемая последовательность образования медноколчеданных руд карбонатитов линейно-трещинного типа косвенно подтверждается изотопным составом свинца колчеданно-полиметаллических месторождений Северного Улытау, изученным ранее О.Г. Кошечевым [18]. Им было высказано, что изотопные составы свинца месторождений данного района указывают на сложную многостадийную историю формирования ряда месторождений Кургасинского района Северного Улытау путем смешивания древнего аномального свинца протерозойского возраста с обыкновенным свинцом, возникшим в последующие периоды тектономагматических активизаций в раннем палеозое [18].

Вероятнее всего, по такому типу формируется большинство месторождений карбонатитов, связанных с мантийными очагами изначально формирующихся над зонами субдукции. Их пространственная связь с зонами субдукции находит подтверждение присутствием NaCl, рутила, апатита и монацита в изначально плутонических ультраосновных породах [19–21].

Завершается рудогенез образованием Nd-содержащих черчитовых кор выветривания.

Заключение

Распределение и формы нахождения Au и Ag

Теллурид серебра является одним из часто встречающихся микровключений, пространственно ассоциирующихся с минералами ряда кобальтин-герсдорфит, халькопиритом и сфалеритом. Серебро в виде примеси также встречается в мелоните, где его концентрации достигают 12,37 %, а в ваврините содержание серебра не превышает 5,0 %. Акантит (87,00 % Ag) повсеместно ассоциирует со сфалеритом, образуя внешние каймы.

Результаты атомно-эмиссионного полуколичественного спектрального анализа после химического обогащения показали, что медноколчеданные руды содержат до 15 г/т серебра. Уровень концентрации золота меньше 2 г/т. Самородное золото не обнаружено.

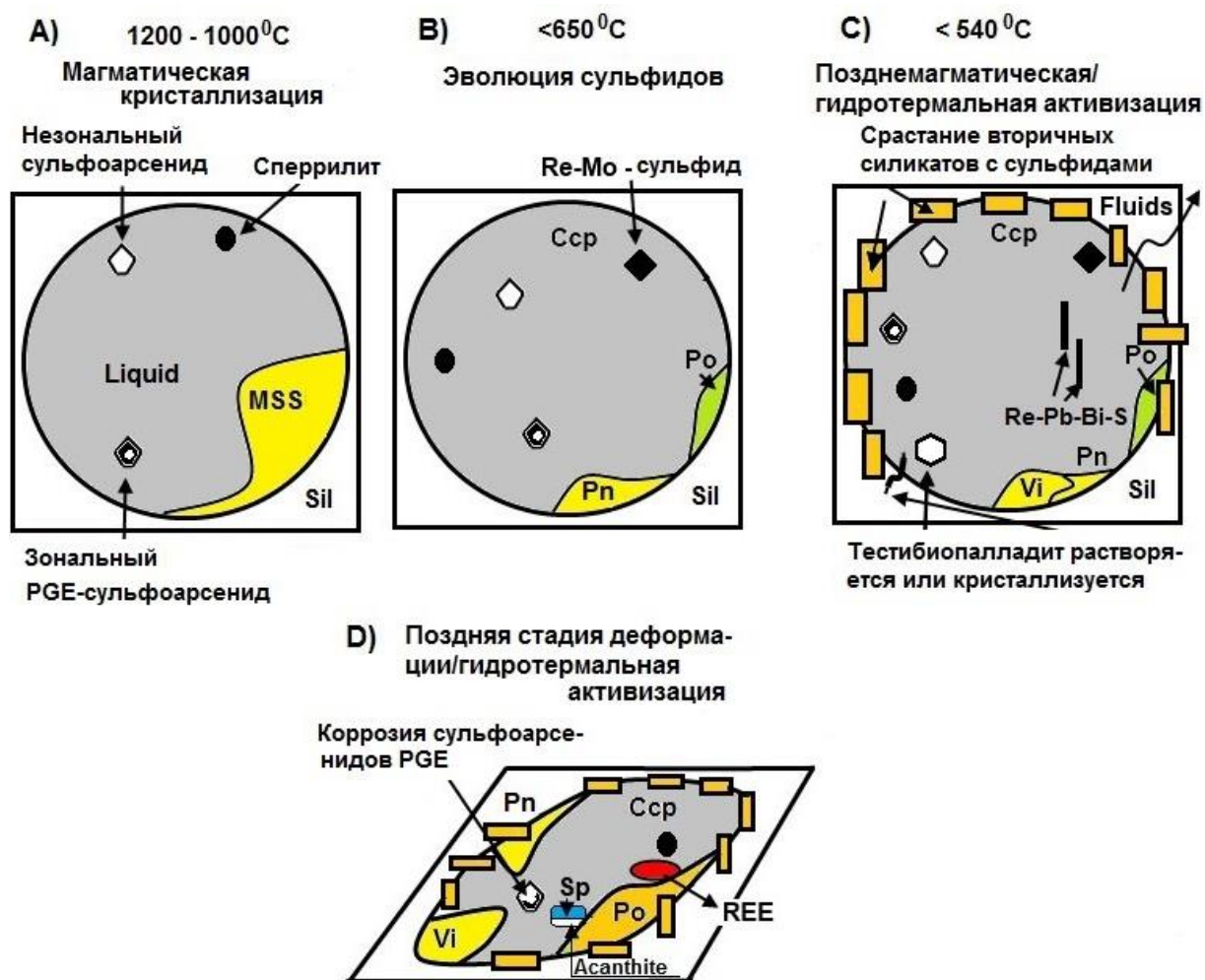


Рис. 10. Схематическая модель последовательности формирования PGE, редких минералов и сульфидов медноколчеданных руд месторождения Майке построена на основе материалов [14, 16]: A) ранняя кристаллизация мелких идиоморфных зональных PGE-сульфоарсенидов и сперрилита из сульфидной жидкости и их слияние в MSS (моносulfидный твердый раствор); B) эволюция сульфидных минералов (пентландит, пирротин, халькопирит), включая сульфиды рения и молибдена, при охлаждении до температуры ниже 650 °C; C) поздняя магматическая и/или гидротермальная активность и последующая рекристаллизация сульфидов основных металлов с вторичными силикатами одновременно с образованием тестибиопалладита и Pb-Te-фаз либо в виде растворения сульфидов основных металлов, либо при кристаллизации из небольших объемов захваченного расплава; D) демобилизация сульфидов на поздней стадии в зонах разломов и коррозия существующих сульфоарсенидов PGE, образование акантита по сфалериту и образование по трещинам фторфосфатов и фосфатов редкоземельных элементов

Fig. 10. Schematic model of the sequence of formation of PGE, rare minerals and sulfide copper-sulphide ores from the Mayke deposit, built on the basis of the materials of the article [14, 16]: A) early crystallization of small idiomorphic zonal PGE-sulfoarsenides and sperrylite from sulphide liquid and their fusion in MSS; B) evolution of sulphide minerals (pentlandite, pyrrhotite, chalcopyrite), including rhenium sulphide and molybdenite sulphide, when cooled to – 650 °C; C) late magmatic and/or hydrothermal activity and the subsequent recrystallization of sulphides of base metals with secondary silicates simultaneously with the formation of testibiopalladite and Pb-Te phases either as dissolution of sulphides of the base metals, or during crystallization from small volumes of trapped melt; D) demobilization of sulphides at a later stage in fracture zones and corrosion of existing sulfoarsenides PGE, formation of acanthite on sphalerite and formation of rare-earth fluorophosphates and phosphates of rare earth elements

Распределение и формы нахождения платиновых металлов

В процессе минералогических исследований нам не удалось обнаружить совместного нахождения платины и палладия в одном рудном минерале.

Сульфоарсенид Ni-Co (никелистый кобальтин) является источником минералов Pt (3,93 %), Ir (4,93 %), Rh (0,35 %), Ru (1,94 %); Os (0,91 %).

Распределение и формы нахождения редких и редкоземельных элементов (Re, Te, Y, La, Ce, Nd, Sm, Er, Cd, C)

Рений (3,41–51,44 % Re) обнаружен в составе сульфидов меди, железа, никеля, свинца и висмута, микровключения, которых заключены в халькопирит, и только сульфид рения (50,46 % Re), молибдена, меди и железа встречается совместно с пиритом.

Теллур входит в состав таких минералов, как теллурид серебра, теллурид свинца, теситиопалладит, мелонит и вавринит, их микровключения встречаются в халькопирите и минералах ряда кобальтингерсдорфит.

Иттрий, лантан, церий встречаются в составе хромита в зернах кварца, заключенного в сидерит-хлорит-сульфидную массу. Высокий уровень концентрации Y (30 г/т), La (30 г/т), Ce (70 г/т) также установлен и в кварц-рутил-сидерит-хлоритовых сланцах.

Алмаз крайне редко встречается в составе графитов карбонатитов Маятасского рудного района. Он ассоциирует с гранатом пироп-альмандинового и пироп-сперилито-альмандинового ряда.

По результатам атомно-эмиссионного полуквантитативного спектрального анализа медноколчеданные руды содержат: Ag (30 г/т), Pt (<2 г/т), Ru (10 г/т),

Ir (10 г/т), Y (10 г/т), а также As (0,015 %), Pb (0,0015 %), Cd (0,001 %) Bi (0,0002 %), Sb (<0,002 %), Mo (0,0001 %) при крайне высоких содержаниях Cu (>1,0%) и Zn (0,2 %).

Петрология рудовмещающих пород, содержащих поликомпонентные медноколчеданные руды проявления Майке

Парагенетическая ассоциация карбонатов, включающая сидерит, апатита, титанита, альбита, кварца, граната (пироп-альмандинового ряда), хромсодержащего мусковита и обогащенного хромом клинохлора и их пространственная связь с графит-кварц-хлоритовыми сланцами позволяют рассматривать данные породы составной частью силицит-карбонат-углеродистого комплекса, отражающего состав ростового расплава мантийного происхождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневская И.И., Трусова И.Ф. Западно-Улытауский пояс ультраосновных и основных пород // Геология и разведка. – 1967. – № 11. – С. 32–43.
2. Чудин С.С.К проблеме платиноносности недр Казахстана // Горно-Геологический Журнал. – 2012. – № 3–4. – С. 31–32.
3. Бетехтин А.Г. Минералогия. – М.: Изд-во ГИГЛ, 1950. – 957 с.
4. Нсанов Р.А. Иттрий-редкоземельное оруденение в корях выветривания Маятасского рудного поля (Северный Улытау): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Алмата, 1993. – 17 с.
5. Литвин Ю.А. Экспериментальные исследования физико-химических условий образования алмаза в мантийном веществе // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 12. – С. 1530–1546.
6. Материнские среды алмазов и первичных включений по данным физико-химического эксперимента / Ю.А. Литвин, П.Г. Васильев, А.В. Бобров, В.Ю. Окоемова, А.В. Кузюра // Геохимия. – 2012. – № 9. – С. 811–847.
7. Чудин С.С., Воинов В.Н. Природные фуллерены Северного Казахстана // Горно-Геологический Журнал. – 2003. – № 1. – С. 7–10.
8. Кембаев М.К. Формы нахождения редких земель в корях выветривания месторождений Северного Казахстана и их 3D модели: диссертация на соискание степени доктора философии (PhD) – Алмата, 2017. – 111 с.
9. Minerals of noble and rare elements in Karatargay and Mayke ore types of Mayatas ore region (North Ulytau, Kazakhstan) / V.G. Stepanets, V.L. Levin, G.K. Bekenova, E.S. Li, N.M. Zhukov, M. Khakimzhanov // News NAN PR. Series of geology and technical. – 2019. – V. 2. – P. 21–29.
10. Зарайский Г.П. Зональность и условия образования метасоматических пород. – М.: Изд-во «Недра», 1989. – 344 с.
11. Месторождения свинца и цинка Казахстана. Справочник / Х.А. Беспяев, К.М. Егембаев, Л.А. Мирошников, В.В. Колесников, С.А. Акылбеков, Г.Д. Ганженко. – Алматы, 1997. – 152 с.
12. Карбонатиты и кимберлиты / А.А. Фролов, А.В. Лапин, А.В. Толстов, Н.Н. Зинчук, С.В. Белов, А.А. Бурмистров. – М.: Изд-во «НИИ-Природа», 2005. – 540 с.
13. The microstructure, liquidus projection and thermodynamic modeling of thermoelectric Ag–Pb–Te system / H. Wu, W. Foo, W. Gierlotka, S. Chen // Materials Chemistry and Physics. – 2013. – V. 141. – P. 758–767.
14. The timing and formation of platinum-group minerals from the creighton Ni-Cu-platinum-group element sulfide deposit, Sudbury, Canada: early crystallization of PGE-rich sulfarsenides / S.A.S. Dare, S.-J. Barnes, H.M. Prichard, P.C. Fisher // Economic Geology. – 2010. – V. 105. – P. 1071–1096.
15. Naldrett A. Magmatic sulfide deposits geology, geochemistry and exploration. – Berlin: Springer, 2004. – 728 p.
16. Mineralogy and geochemistry of Cu-Rich ores from the McCreedy east Ni-Cu-PGE deposit (Sudbury, Canada): implications for the behavior of platinum group and chalcophile elements at the end of crystallization of a sulfide liquid / S.A.S. Dare, S.-J. Barnes, H.M. Prichard, P.C. Fisher // Economic Geology. – 2014. – V. 109. – P. 343–366.
17. Carter W.M., Watkinson D.H., Jones P.C. Post-magmatic remobilization of platinum-group elements in the Kelly Lake Ni-Cu sulfide deposit, Copper Cliff Offset, Sudbury // Exploration and Mining Geology. – 2001. – V. 10. – P. 95–110.
18. Кошевой О.Г. Изотопный состав свинца на полиметаллических и свинцово-цинковых месторождениях Центрального и Южного Казахстана в связи с их возрастом и генезисом: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Алма-Ата, 1984. – 19 с.
19. Manning C.E. Fluids of the lower crust: deep is different // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 2018. – V. 46. – P. 67–97.
20. Ayers J.C., Watson E.B. Solubility of apatite, monazite, zircon, and rutile in supercritical aqueous fluids with implications for subduction zone geochemistry philosophical transactions // Physical Sciences and Engineering. – 1991. – V. 335. – P. 365–375.
21. Практическая петрология: методические рекомендации по изучению магматических образований применительно к задачам госгеолкарт / М.В. Наумов, Е.А. Кухаренко, А.Е. Костин, Д.Н. Ремизов. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2017. – 168 с.

Поступила 01.05.2020 г.

Информация об авторах

Степанец В.Г., доктор естественных наук, главный геолог «Astra Mining Kazakhstan».

Левин В.Л., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории минералогии ТОО «Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева».

Ли Е.С., магистр техники и технологии, докторант PhD, старший преподаватель кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Карагандинского государственного технического университета.

Бекенова Г.К., доктор геолого-минералогических наук, руководитель лаборатории минералогии ТОО «Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева», Казахстан.

Жуков Н.М., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории региональной металлогении ТОО «Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева».

Хакимжанов М.С., бакалавр, старший консультант SRK Consulting (Kazakhstan) Limited.

UDC 549:552.323.6, 549:553.491

GEOLOGY AND MINERALOGY OF CARBONATITES OF LINEAR-CRACKED TYPE IN MAYKE ORE OCCURRENCE OF MAYATAS ORE REGION (NORTH ULYTAU)

Vladimir G. Stepanets¹,
vladimir@stepanez.de

Vladimir L. Levin²,
levin_v@inbox.ru

Elena S. Li³,
li_elena.kstu@mail.ru

Galiya K. Bekenova²,
bekenova@mail.ru

Nikolay M. Zhukov²,
nik.zhukov.33@mail.ru

Marat S. Khakimzhanov⁴,
m.khakimzhanov@gmail.com

¹ Astra Mining Kazakhstan,
207, Regent street, London, W1B3HH, UK.

² LLP «Institute of Geological Sciences K.I. Satpayev»,
69/94, Valikhanov street, Almaty, 050010, Kazakhstan.

³ Karaganda State Technical University,
56/2, Nursultan Nazarbaev street, Karaganda, 100008, Kazakhstan.

⁴ SRK Consulting (Kazakhstan) Limited,
69/94, Valikhanov street, Almaty, 050010, Kazakhstan.

The relevance of the research consists in detailed mineralogical studies with a focus on electron probe microanalysis provide information on the composition of ores and the form of occurrence of noble metals (platinum groups), rare and rare earth elements, which can significantly affect the economic value of the Mayke ore occurrence.

The main aim of the research is to determine the distribution and forms of occurrence of noble, rare-earth and rare metals in multicomponent copper-pyritic ores of Mayke occurrence.

Objects: linear-cracked type metasomatites and pyrite-copper ore on the right bank of the Mayke River in the Mayatas ore region.

Methods. The composition of copper pyrite ores and rock-forming minerals of metasomatites was studied in the laboratories of mineralogy and physics-chemical researches of the Institute of Geological Sciences named after K.I. Satpayev (Almaty) using an INCA ENERGY dispersive spectrometer, OXFORD INSTRUMENTS. Atomic emission semi-quantitative spectral analysis, X-ray diffractometric and thermal analyzes were carried out.

Results. The paper considers the main criteria of petrography and mineralogy of metasomatites of linear-cracked type and genetically associated copper-pyrites, first identified within the Mayatas ore region. It is proved that the main ore bodies of copper pyrites are localized in quartz-rutile-siderite-chlorite and siderite-muscovite-chlorite schists, which are an integral part of the silicite-carbonate-carbon complex. Based on the detailed mineralogical studies, it was shown that copper-pyrite ores are sources of platinoids, rare earth elements and rhenium. The violarite, pyrite, sphalerite, pyrrhotite, microinclusions of cobaltin, nickel cobaltin, ferrocobaltin, gersdorffite, silver telluride, acanthite, lead telluride, galena, testibiopalladite, bismuthistite, are identified in the composition of copper-pyrite ores of Mayke occurrence. It is shown that zonal nickel cobaltin is a source of platinoids (Pt, Ir, Ru, Rh, Os) that form multicomponent solid solutions. Rhenium is a component of sulfides of copper, iron, nickel, lead and bismuth. Tellurium was found in silver telluride, lead telluride, testibiopalladite, melonite and wavrinite. Erbium is found in non-zonal nickel-containing cobaltin and violarite. Cadmium is found as an isomorphic impurity only in sphalerite. The elements of cerium (light – La, Ce, Pr, Nd, Sm) subgroups and Y are included in the composition of phosphates, fluorophosphates and are the source of formation of aqueous phosphates in the oxidation zone of copper-pyrite ores of the Mayke occurrence.

Key words:

Ulytau, carbonatites, pyrite ores, sulfides, arsenides, antimonides, rhenium minerals.

REFERENCES

1. Vishnevskaya I.I., Trusova I.F. Zapadno-Ulytauskiy po yas ul-traosnovnykh i osnovnykh porod [West Ulytau belt of ultrabasic and basic rocks]. *Geologiya i razvedka*, 1967, no. 11, pp. 32–43.
2. Chudin S.S. To the problem of platinum mineral resources of Kazakhstan. *Gorno-Geologicheskii Zhurnal*, 2012, no. 3–4, pp. 31–32. In Rus.
3. Betekhtin A.G. *Mineralogiya* [Mineralogy]. Moscow, GIGL Publ., 1950. 957 p.
4. Nsanov R.A. *Ittriy-redkozemelnoe orudnenie a korakh vyvetrivaniya Mayatasskogo rudnogo polya (Severny Ulytau)*. Avtoreferat Dis. Kand. Nauk [Yttrium-rare-earth mineralization in the weathering crusts of the Mayatassky ore field (Northern Ulytau). Kand. Diss. Abstract]. Almaty, 1993. 17 p.

5. Litvin Yu.A. Experimental studies of the physicochemical conditions for formation of diamond in mantle matter. *Geologiya i geofizika*, 2009, vol. 50, no. 12, pp. 1530–1546. In Rus.
6. Litvin Yu.A., Vasilyev P.G., Bobrov A.V., Okoyemova V.Yu., Kuz'yura A.V. Maternal environments of diamonds and primary inclusions according to the physicochemical experiment. *Geokhimiya*, 2012, no. 9, pp. 811–847. In Rus.
7. Chudin S.S., Voinov V.N. Natural fullerenes of Northern Kazakhstan. *Gorno-Geologicheskii Zhurnal*, 2003, no. 1, pp. 7–10. In Rus.
8. Kembayev M.K. *Formy nakhozhdeniya redkikh zemel v korakh vyvetrivaniya mestorozhdeniy Severnogo Kazakhstana i ikh 3D modeli*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Forms of finding rare earths in the weathering crusts of deposits in Northern Kazakhstan and their 3D models. Dr. Diss.]. Almaty, 2017. 111 p.
9. Stepanets V.G., Levin V.L., Bekenova G.K., Li E.S., Zhukov N.M., Khakimzhanov M. Minerals of noble and rare elements in karatargay and mayke ore types of Mayatas ore region (North Ulytau, Kazakhstan). *News NAN PR. Series of geology and technical*, 2019, vol. 2, pp. 21–29.
10. Zarayskiy G.P. *Zonalnost i usloviya obrazovaniya metasomaticheskikh porod* [Zoning and conditions for formation of metasomatic rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 344 p.
11. Bespayev Kh.A., Yegembayev K.M., Miroshnichenko L.A., Kolesnikov V.V., Akyzbekov S.A., Ganzhenko G.D. *Mestorozhdeniya svintsa i tsinka Kazakhstana. Spravochnik* [Deposits of lead and zinc in Kazakhstan. Directory]. Almaty, 1997. 152 p.
12. Frolov A.A., Lapin A.V., Tolstov A.V., Zinchuk N.N., Belov S.V., Burmistrov A.A. *Karbonatity i kimberlity* [Carbonatites and kimberlites]. Moscow, NIA-Priroda Publ., 2005. 540 p.
13. Wu H., Foo W., Gierlotka W., Chen S. The microstructure, liquidus projection and thermodynamic modeling of thermoelectric Ag–Pb–Te system. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, vol. 141, pp. 758–767.
14. Dare S.A.S., Barnes S.-J., Prichard H.M., Fisher P.C. The timing and formation of platinum-group minerals from the creighton Ni–Cu–platinum-group element sulfide deposit, Sudbury, Canada: early crystallization of PGE-rich sulfarsenides. *Economic Geology*, 2010, vol. 105, pp. 1071–1096.
15. Naldrett A. *Magmatic Sulfide Deposits Geology, Geochemistry and Exploration*. Berlin, Springer, 2004. 728 p.
16. Dare S.A.S., Barnes S.-J., Prichard H.M., Fisher P.C. Mineralogy and geochemistry of Cu-rich ores from the McCreedy east Ni–Cu–PGE deposit (Sudbury, Canada): implications for the behavior of platinum group and chalcophile elements at the end of crystallization of a sulfide liquid. *Economic Geology*, 2014, vol. 109, pp. 343–366.
17. Carter W.M., Watkinson D.H., Jones P.C. Post-magmatic remobilization of platinum-group elements in the Kelly Lake Ni–Cu sulfide deposit, Copper Cliff Offset, Sudbury. *Exploration and Mining Geology*, 2001, vol. 10, pp. 95–110.
18. Koshevoy O.G. *Izotopny sostav svintsa na polimetallicheskikh i svintsovo-tsinkovykh mestorozhdeniyakh Tsentralnogo i Yuzhnogo Kazakhstana v svyazi s ikh vozrastom i genezisom*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [The isotopic composition of lead in the polymetallic and lead-zinc deposits of Central and Southern Kazakhstan due to their age and genesis. Kand Diss. Abstract]. Alma-Ata, 1984. 19 p.
19. Manning C.E. Fluids of the lower crust: deep is different. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2018, vol. 46, pp. 67–97.
20. Ayers J.C., Watson E.B. Solubility of apatite, monazite, zircon, and rutile in supercritical aqueous fluids with implications for subduction zone geochemistry philosophical transactions. *Physical Sciences and Engineering*, 1991, vol. 335, pp. 365–375.
21. Naumov M.V., Kukharensky E.A., Kostin A.E., Remizov D.N. *Practical petrology: guidelines for the study of magmatic formations as applied to the tasks of state geological maps*. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2017. 168 p.

Received: 1 May 2020.

Information about the authors

Vladimir G. Stepanets, Dr. Sc., chief geologist, Astra Mining Kazakhstan.

Vladimir L. Levin, Cand Sc., leading researcher, Institute of Geological Sciences K.I. Satpayev.

Elena S. Li, master student, Karaganda State Technical University.

Galiya K. Bekenova, Dr. Sc., head of the Laboratory of Mineralogy, Institute of Geological Sciences K.I. Satpayev.

Nikolay M. Zhukov, Cand Sc., leading researcher, Institute of Geological Sciences K.I. Satpayev.

Marat S. Khakimzhanov, senior consultant, SRK Consulting (Kazakhstan) Limited.

УДК 622.253.3

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ

Семина Михаил Александрович¹,
seminma@outlook.com

Зайцев Артем Вячеславович¹,
aerolog.artem@gmail.com

Паршаков Олег Сергеевич¹,
olegprashakov@gmail.com

Желнин Максим Сергеевич²,
zhelninmax@gmail.com

¹ Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А.

² Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1.

Актуальность исследования обусловлена отсутствием в нормативных документах, регламентирующих выполнение контроля за породным массивом в условиях его искусственного замораживания, единых требований к организации и осуществлению контроля за формированием и состоянием ледопородного ограждения.

Цель работы заключается в обосновании оптимальных технологических параметров термометрического контроля ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов.

Объектами исследования в настоящей работе являются замораживаемый породный массив и система искусственного замораживания.

Методы: экспериментальные исследования динамики температуры замораживаемых горных пород, статистическая обработка и анализ экспериментальных данных; математическое моделирование термодинамических процессов, происходящих в условиях искусственного замораживания породного массива.

Результаты. Приведены результаты обработки экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах строящихся шахтных стволов способом искусственного замораживания. На основании обработки и анализа экспериментальных данных установлена закономерность влияния процесса искусственного замораживания на локальные участки породного массива. Проведено исследование влияния расположения контрольно-термической скважины на точность решения обратной задачи Стефана, позволяющей производить корректировку теплофизических свойств породного массива и рассчитывать температурное поле во всем объеме участка замораживаемого массива горных пород. Определено, что термометрическую скважину следует размещать в замковой плоскости ледопородного ограждения в точке с наименьшей температурой. На основе анализа аварийного выхода из строя замораживающих колонок найдено требуемое количество контрольно-термических скважин, которое позволяет обеспечить всесторонний контроль за состоянием ледопородного ограждения. При осуществлении термометрического контроля для установления достоверных параметров ледопородного ограждения и выполнения дальнейшего адекватного моделирования термодинамических процессов, происходящих в замораживаемом породном массиве, выполнено обоснование оптимального расположения и количества контрольно-термических скважин с необходимым пространственным разрешением измерений температуры горных пород по их глубине. По результатам проведенной работы разработана методика выбора технологических параметров способа термометрического контроля ледопородных ограждений шахтных стволов.

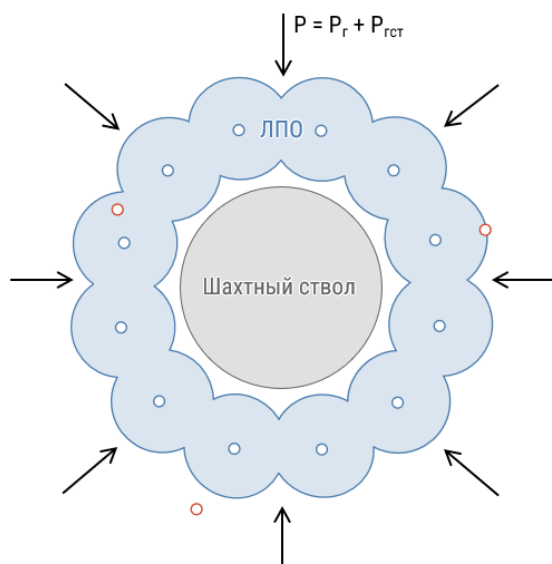
Ключевые слова:

Ледопородное ограждение, шахтный ствол, термометрический контроль, технологические параметры, контрольно-термическая скважина, экспериментальные измерения температуры, замораживающая скважина, задача Стефана.

Введение

Промышленное освоение месторождений, залегающих в сложных геологических и гидрогеологических условиях, тесно связано с искусственным замораживанием горных пород при строительстве вертикальных шахтных стволов [1]. Действующие на территории Российской Федерации и Республики Беларусь правила безопасности предъявляют ряд требований к проведению подземных выработок способом

замораживания. В частности, за состоянием замороженного породного массива должен быть организован систематический контроль, при этом ведение горных работ в условиях заморозки разрешается только после образования герметичного (замкнутого) ледопородного ограждения (ЛПО) требуемой толщины. Ледопородное ограждение шахтного ствола служит для восприятия горного и гидростатического давлений (рис. 1).



замораживающая скважина ○ Контрольно-термическая скважина

Рис. 1. Упрощенное двухмерное представление ледопородного ограждения в плане

Fig. 1. Schematic 2D representation of the frozen wall in horizontal plane

Одним из наиболее распространенных и информативных способов контроля параметров ледопородного ограждения шахтных стволов является термометрический. Термометрический способ контроля ЛПО заключается в осуществлении периодических измерений температуры горных пород в ограниченном количестве контрольно-термических скважин (как правило, бурится не более 3–4 скважин), расположенных на различных участках строительной площадки. Данные о распределении температуры в обводненном породном массиве позволяют судить о параметрах ледопородного ограждения – герметичности и толщине.

Точность и надежность определения фактического состояния ЛПО напрямую зависит от рационального выбора технологических параметров термометрического способа контроля, которые определяются до начала процесса замораживания горных пород. К технологическим параметрам относятся количество и расположение контрольно-термических скважин на промышленной площадке строящихся стволов, а также пространственное разрешение измерений температуры породного массива по глубине его замораживания.

Основы способа термометрического контроля преимущественно представлены в работе Н.Г. Трупака [2]. Автор указывает, что для представления хода процесса замораживания горных пород и суждения о состоянии ледопородного ограждения в тот или иной период его существования необходимо в первую очередь знать температуру пород в отдельных участках массива. Информация о температуре пород предоставляет возможность, с одной стороны, определить границы распространения теплоты, а следовательно, и контур ЛПО, а с другой стороны – прочность замороженной породы, находящуюся в прямой

зависимости от понижения температуры. В работе представлены рекомендации по расположению и количеству контрольно-термических скважин, а также отмечена необходимость измерения температуры по всей глубине замораживания. Однако описанные технологические параметры термометрического контроля ледопородного ограждения не обоснованы и имеют только рекомендательный характер.

Следует отметить, что нормативные документы [3–8], регламентирующие выполнение контроля за породным массивом в условиях его искусственного замораживания, не предъявляют единых требований к организации и осуществлению контроля за формированием и состоянием ЛПО либо совсем не устанавливают их, а именно не изложены:

- требования к расположению контрольно-термических скважин и последовательности определения мест их заложения с учетом возможных отклонений фактических положений скважин от проектных и различия физических свойств обводненных горных пород;
- требования к оптимальному количеству контрольно-термических скважин, обеспечивающих получение достаточного объема информации о температуре горных пород в пределах участка строительства шахтных стволов;
- требования к техническим характеристикам термометрического оборудования (пространственное разрешение, точность и периодичность измерений).

На основании анализа можно сделать вывод, что в существующей литературе отсутствуют сведения по обоснованию технологических параметров способа термометрического контроля, кроме того, не предъявляются требования к организации и выполнению контроля за состоянием ледопородного ограждения шахтных стволов. В связи с чем для получения наиболее точных и полных данных о температуре замораживаемого породного массива, учитывая возможность применения ограниченного количества контрольно-термических скважин, необходимо провести исследование и выполнить обоснование оптимальных технологических параметров термометрического способа контроля ЛПО.

В результате для достижения поставленной цели в настоящей работе решаются следующие задачи:

1. Обработка и анализ экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах шахтных стволов.
2. Исследование влияния расположения термометрической скважины на точность решения обратной задачи Стефана.
3. Анализ требуемого количества контрольно-термических скважин для выполнения всестороннего контроля параметров состояния ледопородного ограждения.
4. Определение необходимого пространственного разрешения распределенных измерений температуры массива пород по глубине термометрической скважины.

Экспериментальные измерения температуры горных пород

Эффективность ледопородного ограждения главным образом зависит от его толщины, которая рассчитывается для каждого исследуемого слоя замораживаемого обводненного породного массива. Таким образом, основная задача термометрического контроля заключается в определении посредством контрольно-термических скважин положения границ ЛПО в массиве горных пород. Необоснованное расположение термометрических скважин затрудняет процедуру установления истинной толщины ледопородного ограждения, и, как следствие, приводит либо к более длительному процессу активного замораживания горных пород, либо, наоборот, к раннему переходу на пассивный режим заморозки.

В целях установления закономерности влияния искусственного замораживания на локальные участки породного массива выполнен анализ экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах, расположенных на различных расстояниях от контура замораживающих скважин. Измерение температуры осуществлялось при помощи оптоволоконной технологии с использованием волоконно-оптического регистратора Ultima DTS производителя Silixa Ltd (Великобритания). Благодаря обработке и интерпретации обратного комбинационного рассеяния температура вдоль оптического волокна определялась с пространственным разрешением 25 см и с точностью измерения 0,1 °С.

Экспериментальные данные получены при помощи автоматизированной системы термометрического

контроля, которая позволяет вывести на качественно новый уровень контроль формирования и состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях [9]. Отличительной особенностью системы контроля является возможность прогнозирования температурного поля во всем объеме участка породного массива на откалиброванной термодинамической модели породного массива. Калибровка параметров модели производится посредством численного решения обратной задачи Стефана с использованием данных экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах [10]. Система контроля ЛПО реализована на строящихся рудниках Петриковского ГОК ОАО «Беларуськалий», Нежинского ГОК ИООО «Славкалий» и Талицкого ГОК ЗАО «ВКК».

Принципиальная схема конструкции контрольно-термической скважины, включающая размещенный на всю глубину скважины оптоволоконный кабель, а также показательная динамика распределенной температуры замораживаемых горных пород, фиксируемая автоматизированной системой контроля, представлены на рис. 2.

В таблице приведены параметры некоторых исследуемых слоев горных пород замораживаемых участков породного массива, относящихся к различным горно-обогатительным комплексам, в которых авторами настоящей работы осуществлялся мониторинг температуры при проходке стволов. Параметры горных пород определены на основе результатов инженерно-геологических изысканий [11–15].

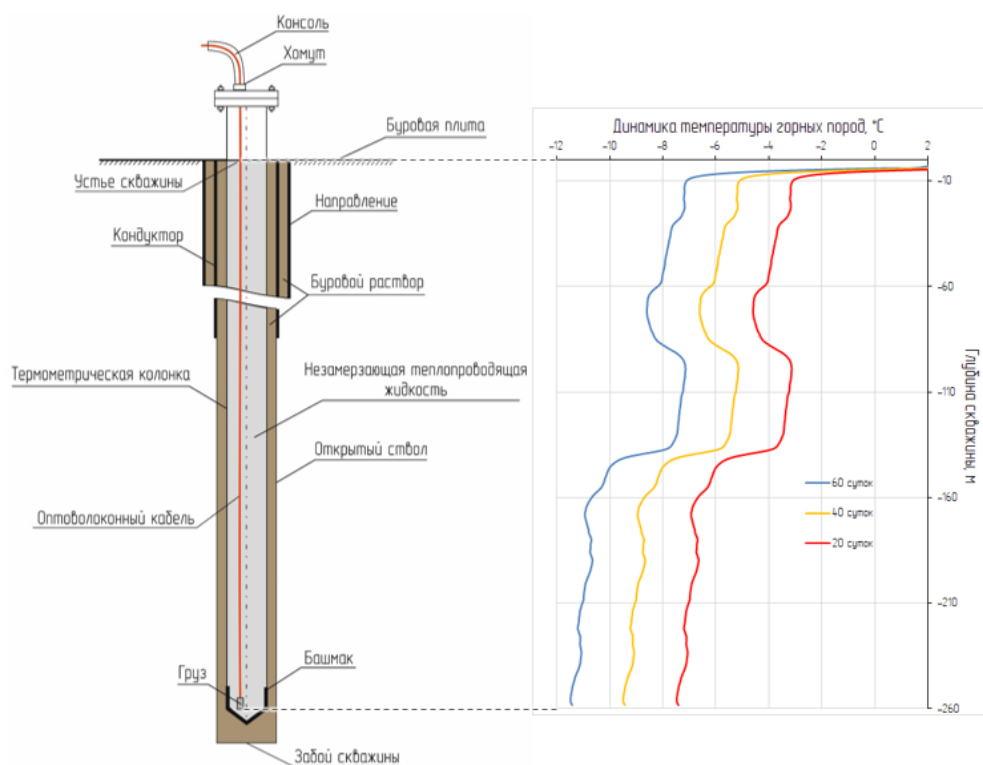


Рис. 2. Принципиальная схема конструкции контрольно-термической скважины и показательная динамика температуры пород

Fig. 2. Design of the thermal control well and the time-dependent distribution of rock temperature in depth

Таблица. Параметры исследуемых слоев породного массива

Table. Parameters of the studied layers of the rock mass

Горно-обогатительный комплекс Mining and Processing Plant	Слой породы Rock layer	Интервал залегания, м Interval, m	Температуропроводность, м ² /с Thermal diffusivity, m ² /s		Влагосодержание, кг/кг Moisture content, kg/kg	Проектная толщина ЛПО, м* Frozen wall design thickness, m*
			в зоне льда frozen zone	в зоне охлаждения unfrozen zone		
Нежинский Nezhinskiy	Глина Clay	119...147	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$8,38 \cdot 10^{-7}$	0,36	3,79
Петриковский Petrikovskiy	Мел Chalk	85...136	$8,1 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	0,26	1,85
	Песчаник Sandstone	136...146	$1,47 \cdot 10^{-6}$	$8,14 \cdot 10^{-7}$	0,17	2,50
Талицкий Talitskiy	Мергель Mergel	159...187	$1,57 \cdot 10^{-6}$	$9,52 \cdot 10^{-7}$	0,13	6,34

* – проектная толщина ледопородного ограждения в исследуемых слоях глины и песчаника рассчитана для температуры замороженной горной породы -8°C , в слое мергеля для температуры -10°C .

* – the design thicknesses of the frozen wall in clay and sandstone layers are calculated for a temperature -8°C , the design thickness in a mergel layer is calculated for temperature -10°C .

Из таблицы видно, как существенно может варьироваться требуемая толщина ледопородного ограждения для разных слоев замораживаемых участков породного массива. Необходимо отметить, что ниже будут приведены результаты обработки экспериментальных данных по термометрии только для слоя глины.

На рис. 3 представлена динамика температуры слоя глины в контрольно-термических скважинах ствола № 1 Нежинского ГОК и фактическое положение границ ЛПО на момент (90 суток после начала замораживания) достижения им проектных параметров.

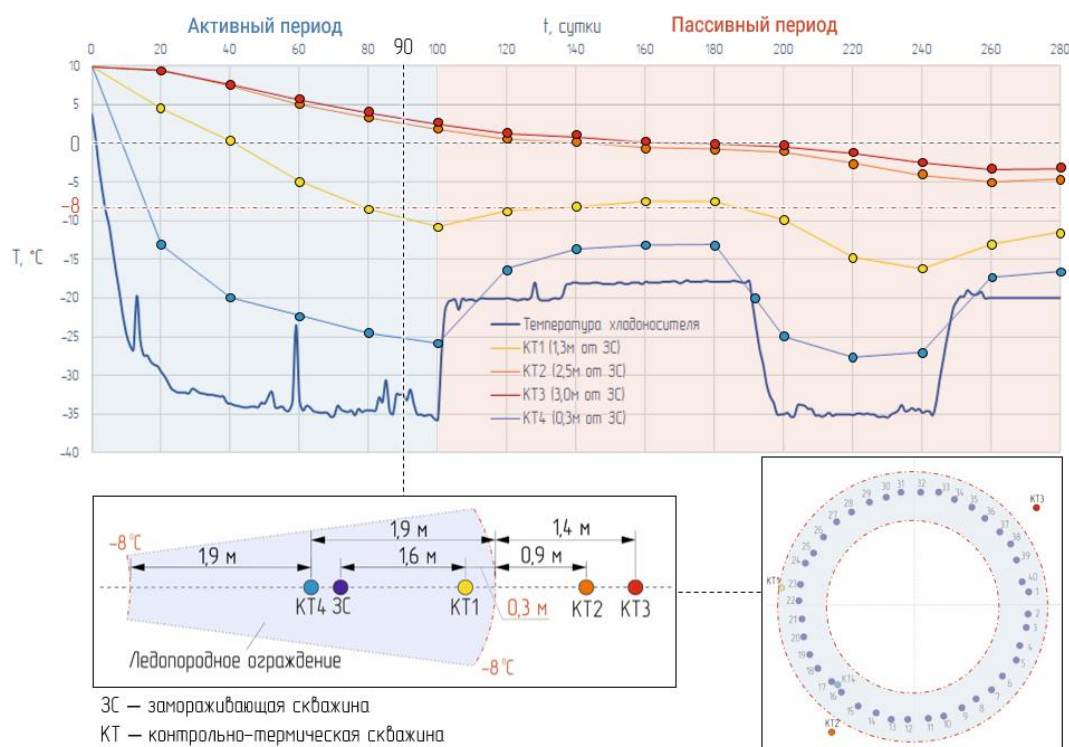


Рис. 3. Динамика температуры слоя глины в контрольно-термических скважинах и фактическое положение границ ледопородного ограждения на момент достижения им проектных параметров

Fig. 3. Dynamics of the clay layer temperature in the control wells and the actual position of the frozen wall boundaries at the time it reaches design parameters

На основании полученных экспериментальных данных установлено, что графики температуры в контрольно-термических скважинах, расположенных в пределах проектной толщины ЛПО (в зоне льда), качественно повторяют график температуры прямого потока хладоносителя, циркулирующего в замораживающих скважинах. На удалении от внешней границы ледопородного огражде-

ния температура в термометрических скважинах, расположенных в зоне охлаждения, длительное время (до 250 суток) после начала замораживания горных пород продолжала понижаться независимо от изменения температуры хладоносителя. Отмечается, что в других исследуемых слоях замораживаемых горных пород, составляющих породный массив, наблюдаются аналогичные процессы.

Кроме этого, из рис. 3 следует, что на момент достижения ЛПО (90 суток после начала замораживания) требуемой толщины ближайшая к его внешней границе контрольно-термическая скважина расположена на расстоянии 0,3 м. Это связано с тем, что при выборе места заложения контрольно-термических скважин не учитываются их отклонения от вертикали и отклонения замораживающих скважин. Также зачастую не принимается во внимание неравномерность распространения замороженной зоны от контура замораживающих скважин. Опыт показывает, что замороженная зона распространяется примерно в соотношении 60 % в направлении к оси шахтного ствола и 40 % в направлении от нее [1, 2].

Следовательно, экспериментальные исследования показывают, что выбор мест заложения контрольно-термических скважин на промышленной площадке строительства шахтных стволов обуславливается проектными параметрами ледопородного ограждения, координатами замораживающих скважин и необходимостью получения данных о температуре породного массива на различных его участках относительно контура замораживающих скважин.

Исследование влияния расположения термометрической скважины на точность решения обратной задачи Стефана

Базовой математической моделью для описания распределения температуры в среде с учетом фазового перехода является модель теплопереноса в обводненном породном массиве с движущейся границей фазового перехода, а соответствующая задача называется прямой задачей Стефана [16–20]. При калибровке параметров тепловой модели массива используются данные экспериментальных измерений температуры пород в контрольно-термических скважинах. Математически это приводит к переопределению прямой задачи Стефана и необходимости решать коэффицентную обратную задачу Стефана [21].

Известно, что при идентификации параметров среды, участвующей в нестационарном теплообмене, посредством решения некорректных и обратных задач адекватность восстанавливаемых теплофизических характеристик реальным величинам во многом определяется условиями проведения эксперимента [22–27]. Поэтому для повышения точности и надежности решений, получаемых в результате решения обратной задачи Стефана, важно оптимальным образом спланировать эксперимент, найти оптимальный план. В широком смысле планирование экспериментальных измерений температуры подразумевает определение количества и мест заложения контрольных скважин, выбор измерительной аппаратуры, выбор методов обработки собираемых данных, методов калибровки измерительной аппаратуры посредством сравнения с эталонными датчиками и пр. В настоящей работе рассматривается вопрос выбора количества и мест заложения контрольных скважин, при котором корректировка теплофизических свойств породного массива будет проводиться с наибольшей точностью [28–30].

Рассматривается горизонтальный разрез породного массива и система замораживающих скважин. В силу симметрии задачи можно рассмотреть только часть массива, находящуюся между двумя главными плоскостями ледопородного ограждения, проведенными через соседние замораживающие скважины. Геометрия расчетной области Ω представлена на рис. 4.

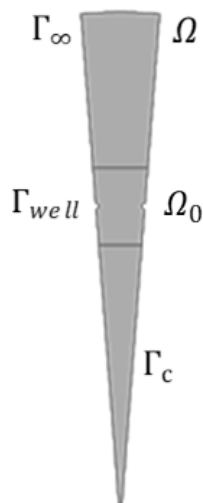


Рис. 4. Геометрия расчетной области: Ω, Ω_0 – область, заключенная между двумя горизонтальными линиями, Γ_{well} – граница замораживающей скважины, Γ_∞ – внешняя граница расчетной области, $\Gamma_c = \partial\Omega \setminus (\Gamma_{well} \cup \Gamma_\infty)$

Fig. 4. Geometry of the computational domain: Ω, Ω_0 – the area enclosed between two horizontal lines, Γ_{well} – the boundary of the freezing well, Γ_∞ – the external boundary of the calculation domain, $\Gamma_c = \partial\Omega \setminus (\Gamma_{well} \cup \Gamma_\infty)$

Задается множество точек ξ – кандидатов на место расположения термометрической скважины.

$$\xi = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}. \quad (1)$$

Здесь N – общее количество возможных точек расположения контрольно-термической скважины.

Также задается набор параметров термодинамической модели (или теплофизических свойств) $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_m\}$, которые требуется определить в ходе решения обратной задачи Стефана максимально достоверно и для определения которых разрабатывается оптимальный план эксперимента, ищется оптимальное расположение контрольно-термической скважины.

Поиск оптимального плана в настоящей работе осуществлялся с помощью информационной матрицы Фишера [26], которая имеет следующий вид:

$$\mathbf{F}(\xi, t_k) = \frac{1}{N(t_k - t_0)} \int_{t_0}^{t_k} \mathbf{S}(\theta, \xi)^T \mathbf{S}(\theta, \xi) dt, \quad (2)$$

где t_0 – начальный момент времени, с; t_k – конечный момент времени, с; $\mathbf{S}(\theta)$ – матрица чувствительности, которая для общего случая идентификации m параметров $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_m\}$ при решении обратной задачи, имеет вид:

$$\mathbf{S}(\theta) = \begin{pmatrix} \left. \frac{\partial T}{\partial \theta_1} \right|_{(x_1, y_1)} & \dots & \left. \frac{\partial T}{\partial \theta_m} \right|_{(x_1, y_1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial T}{\partial \theta_1} \right|_{(x_N, y_N)} & \dots & \left. \frac{\partial T}{\partial \theta_m} \right|_{(x_N, y_N)} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Компоненты матрицы $\mathbf{S}(\theta)$ – частные производные температуры по каждому из искомых теплофизических параметров θ_i в каждой точке из множества (1) точек-кандидатов на месторасположение термометрической скважины. Наибольшие значения компонент в каждом j -м столбце матрицы (3) соответствуют тем точкам, в которых влияние параметра θ_j на решение проявляется наиболее сильно в данный момент времени.

Переход от матрицы чувствительности $\mathbf{S}(\theta, \xi)$ к матрице Фишера $\mathbf{F}(\xi, t_k)$ с помощью преобразования (2) делается для того, чтобы учесть при анализе временной фактор. То есть найти такие точки ξ_i , в которых влияние параметра θ_j на поле температур проявляется наиболее сильно для всего рассматриваемого временного промежутка $[t_0, t_k]$.

Далее для решения оптимизационной задачи вводится следующий скалярный критерий оптимальности экспериментального плана (D-критерий) [26]:

$$\Phi(\xi, t_k) = -\ln \det \mathbf{F}(\xi, t_k), \xi \in \Xi, \quad (4)$$

где \det – операция взятия определителя матрицы.

Оптимальный план ξ^* эксперимента находится из решения задачи минимизации функции Φ . В данной работе для поиска минимума функции Φ используется

метод сопряженных градиентов. Для простоты в работе рассматривается случай, когда обратная задача Стефана сформулирована относительно одного неизвестного теплофизического параметра λ_{sd} – теплопроводности в зоне льда.

Решение задачи оптимального планирования выполнено для условий исследуемых слоев горных пород рудника Петриковского ГОК – для наиболее (песчаник кварцевый) и наименее (мел) теплопроводных. Результаты решения задачи оптимального планирования эксперимента по определению одной контрольно-термической скважины представлены для слоя мела.

Геометрические параметры расчетной области: радиус кругового сектора $R = 16,25$ м, угол сектора $\alpha = 2\pi/41$, радиус замораживающей скважины $R_{well} = 0,073$ м, расстояние от центра кругового сектора до центра замораживающей скважины (или радиус контура замораживания) $R_c = 8,25$ м.

Теплофизические параметры задачи: начальная температура породного массива и температура на внешней границе области $T = 7^\circ\text{C}$. Удельная теплота кристаллизации $L = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг, температура фазового перехода $T_{ph} = 0^\circ\text{C}$. Основные теплофизические свойства песчаника кварцевого и мела приведены в таблице.

На рис. 5 представлены распределения функции Φ в рассматриваемой области породного массива для слоя мела при различных временах t_k и график функции Φ в зависимости от t в точках (x_i, y_i) .

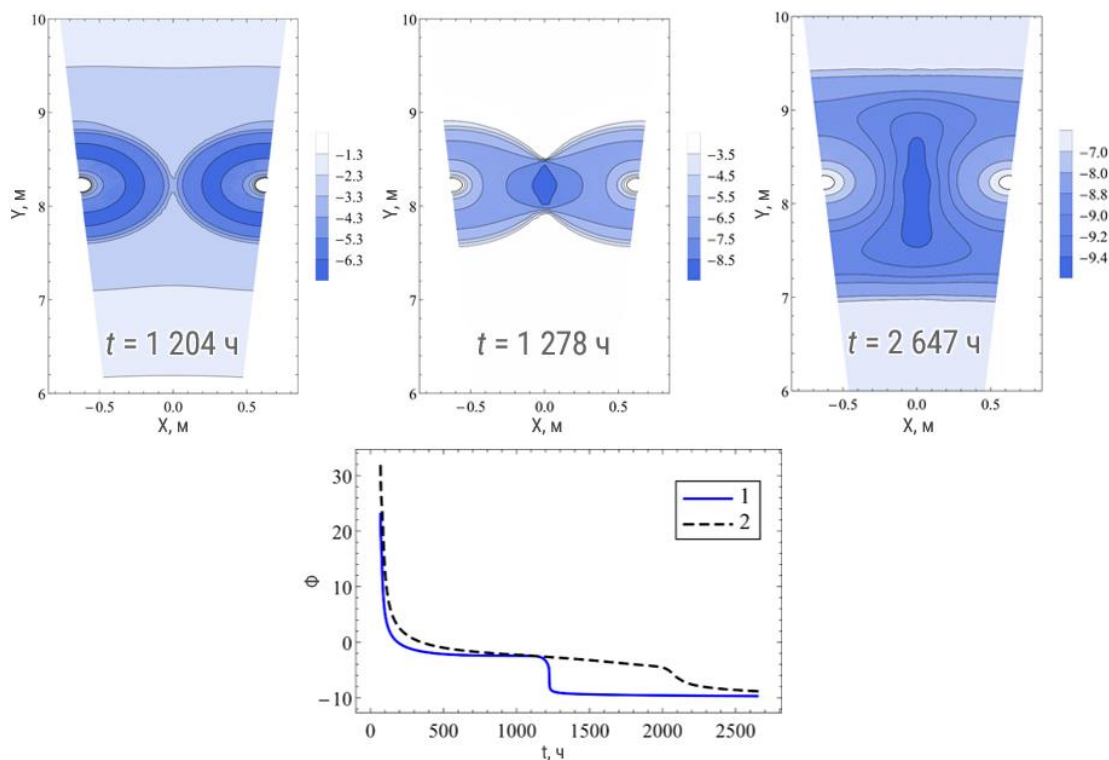


Рис. 5. Распределение D-критерия Φ в области Ω_0 и график функции Φ от времени t : 1 – в точке $(x_1, y_1) = (0, 0; 8, 22)$, 2 – в точке $(x_2, y_2) = (0, 0; 9, 25)$

Fig. 5. Distribution of the D-criterion Φ in the domain Ω_0 and a the function Φ versus time t : 1 – at the point $(x_1, y_1) = (0, 0; 8, 22)$, 2 – at the point $(x_2, y_2) = (0, 0; 9, 25)$

В момент времени $t_k = t_{\min,ph} = 1\,204$ ч происходит смыкание границ фазового перехода, минимумы функции Φ расположены на кривых, находящихся в двух областях вблизи замораживающих скважин. На графиках для моментов времени $t_k = t_{\min,infl} = 1\,278$ ч и $t_k = t_{\min,pr} = 2\,647$ ч, где $t_{\min,infl}$ – момент времени после резкого убывания графика Φ , $t_{\min,pr}$ – время достижения ЛПО проектной толщины, минимум функции Φ расположен в замковой плоскости на прямой, проходящей посередине между замораживающими скважинами.

Путем решения задачи минимизации (4) для различных времен t_k из промежутка $t_{\min,infl}$ до $t_{\min,pr}$ с шагом 342,25 ч установлено, что во всех случаях точка минимума функции Φ совпадает с точкой (0,0; 8,22), имеющей наименьшую температуру. Исходя из этого можно сделать вывод, что в исследуемом слое мела для решения обратной задачи с наибольшей точностью на момент достижения ЛПО проектной толщины контрольно-термическую скважину следует размещать в точке с минимальной температурой – на прямой, проходящей посередине между замораживающими скважинами.

В работе также получено решение задачи об оптимальном расположении контрольной скважины для слоя песчаника кварцевого. Установлено, что точка минимума функции Φ практически совпадает со слоем мела. Это указывает на то, что оптимальные координаты скважины, скорее всего, не зависят от теплофизических параметров горной породы. Следует отметить, что здесь рассматривался случай, когда в ходе решения обратной задачи требуется определить только один модельный параметр – теплопроводность в зоне льда. При рассмотрении обратных задач с определением других теплофизических свойств задачи положение минимума Φ может измениться.

**Анализ требуемого количества
контрольно-термических скважин для выполнения
всестороннего контроля параметров
ледопородного ограждения**

Рассчитываемые параметры ледопородного ограждения напрямую зависят от количества контрольно-термических скважин, используемых для осуществления контроля за тепловым полем участка замораживаемого породного массива вокруг строящихся шахтных стволов. Существует множество исследований, посвященных вопросам контроля состояния ЛПО [31–36]. Однако вопрос о требуемом количестве термометрических скважин, которое позволит обеспечить получение информации о состоянии ледопородного ограждения в полном объеме (по всему замораживаемому контуру), а следовательно, и безопасность ведения горных работ при проходке ствола, остается нерешенным.

При определении оптимального количества термометрических скважин следует учитывать два основных фактора:

- 1) повышение безопасности за счет получения наиболее полной информации о температуре гор-

- ных пород на всем участке замораживаемого породного массива с учетом возможности раннего предупреждения аварийной ситуации при выходе из работы замораживающих колонок или наличии в породном массиве локальных неоднородностей;
- 2) обеспечение минимальных сроков и затрат на бурение, а также обустройство контрольно-термических скважин.

Данные факторы находятся в разногласии между собой, так как чем больше количество контрольно-термических скважин, тем более достоверное представление о параметрах состояния ледопородного ограждения во всем объеме замораживаемого породного массива, а значит, и большая вероятность раннего предотвращения аварии, но с другой стороны, тем более высокие затраты на производство работ по бурению и обустройству скважин, и наоборот. Как правило, в целях экономии финансовых и трудовых ресурсов предпочтение отдается второму фактору, в связи с чем количество контрольно-термических скважин при искусственном замораживании горных пород зачастую не превышает 3–4 скважин при общем количестве замораживающих скважин более 40. При этом задача по нахождению максимального количества термометрических скважин, обеспечивающих всесторонний контроль параметров ледопородного ограждения и исключение аварийных ситуаций, связанных с выходом из строя замораживающих колонок, прежде не рассматривалась.

По данной причине выполнено многовариантное численное моделирование теплопереноса в замораживаемом породном массиве, в процессе которого исследовалось влияние полочки двух смежных замораживающих колонок на распределение температуры в слое горной породы. Выбор двух, а не одной замораживающей колонки сделан для того, чтобы добиться ситуации, когда в окрестности неисправных колонок после их выхода из строя толщина ЛПО не увеличивалась в течение длительного времени (более 100 суток). В качестве критерия K , позволяющего оценить влияние полочки скважин, выступало рассогласование температур:

$$K = T_1 - T_2, \quad (5)$$

где T_1 – температура породного массива при учете выхода из строя двух соседних замораживающих колонок, °C; T_2 – температура породного массива без учета выхода из строя двух соседних замораживающих колонок, °C.

Рассмотрен случай, при котором спустя 5 суток после начала замораживания наиболее теплопроводного слоя горной породы выходят из строя две смежные колонки. Случай соответствует неблагоприятному развитию событий, при котором в начальный период замораживания теплопритоки являются максимальными.

Распределение температуры спустя 5 суток после начала замораживания слоя породы при нормальной работе всех замораживающих колонок и рассогласование температур (5) без и с отключением двух смежных замораживающих колонок через сутки, 15 и 25 суток представлены на рис. 7.

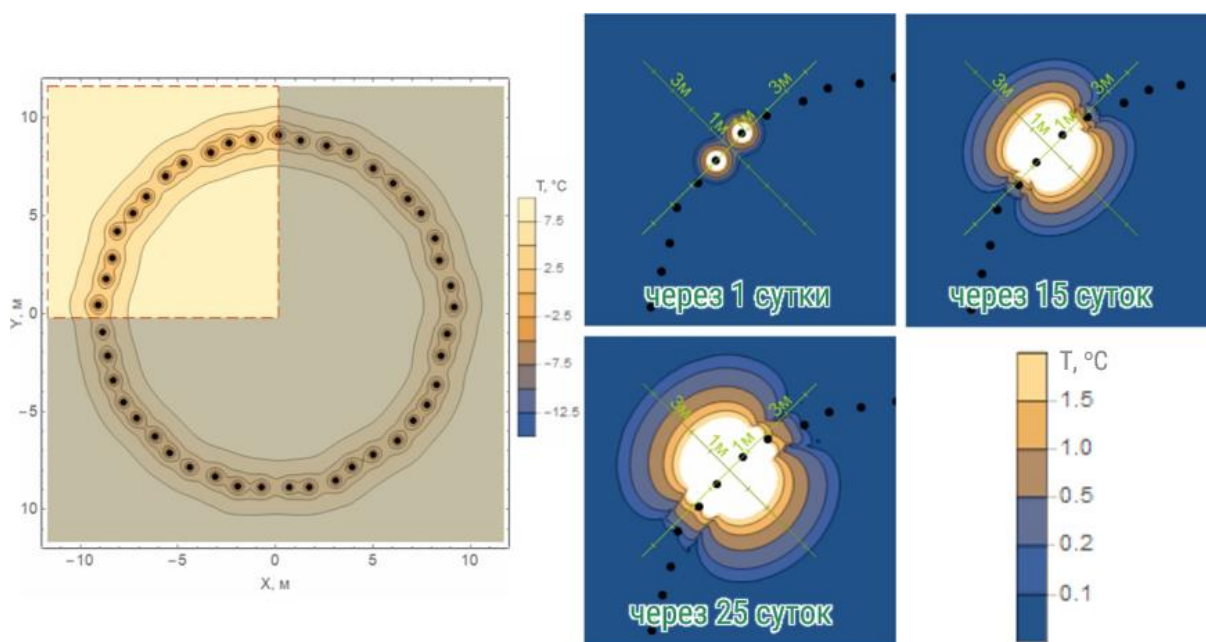


Рис. 7. Распределение температуры в исследуемом слое породы спустя 5 суток после начала его замораживания и рассогласования температурных полей при аварийном выходе колонок из строя

Fig. 7. Temperature distribution in the studied rock layer 5 days after the start of freezing and mismatch of temperature fields during an emergency freezing pipe failure

Точность измерений большинства приборов, с помощью которых определяется распределенная температура горных пород в термометрических скважинах, составляет $\pm 1,0^\circ\text{C}$. Поэтому рассчитанные области с рассогласованием температуры, значение которой находится в пределах точности измерительных приборов, в реальных условиях не могут быть зафиксированы в окрестности скважин.

Из рис. 7 видно, что рассогласование температур более чем на $1,0^\circ\text{C}$ через сутки после выхода из строя замораживающих колонок находится на их границе. Спустя 15 суток границы фиксируемой области рассогласования увеличиваются и находятся в среднем в радиусе 1,5 м от замораживающих скважин, через 25 суток – в радиусе 2,0 м. На основании анализа следует, что выявить аварийную ситуацию, связанную с выходом из строя замораживающих колонок, в начальный период ее развития не представляется возможным. При этом для того, чтобы обеспечить всесторонний контроль за состоянием ледопородного ограждения, количество контрольно-термических скважин должно быть значительным. Например, для рассматриваемого выше варианта, где замораживание породы вокруг шахтного ствола осуществлялось с применением 45 замораживающих скважин с расстоянием между ними равным 1,26 м, требуется не менее 30 % контрольно-термических скважин от общего количества замораживающих скважин, при этом достоверное рассогласование температур, вызванное аварией, возможно зафиксировать только через 15 суток.

Обоснование пространственного разрешения измерений распределенной температуры горных пород

Как правило, измерения температуры горных пород в контрольно-термических скважинах произво-

дятся на уровне кровли и почвы каждого водоносного горизонта, однако, как показывают данные оптоволоконной термометрии, температура в интервале залегания даже одного горизонта может варьироваться в значительных пределах.

На рис. 8 представлено сравнение результатов экспериментальных измерений температуры породного массива в контрольно-термической скважине КТЗ шахтного ствола рудника Петриковского ГОК, которые получены при помощи оптоволоконного кабеля и локальных датчиков.

Сравнительный анализ результатов показывает, что ошибка определения фактической температуры может достигать $2,9^\circ\text{C}$. В целях получения точных данных о тепловом поле замораживаемого участка породного массива, учитывая развитие технологии оптоволоконной термометрии, требуется решить вопрос о том, через какие минимальные интервалы необходимо и достаточно производить измерения температуры горных пород по глубине контрольно-термической скважины.

Для обоснования пространственного разрешения измерений температуры замораживаемых горных пород прежде всего следует использовать данные инженерно-геологических изысканий, включающих бурение вертикальных контрольно-стволовых скважин в местах расположения проектируемых выработок (геологическая колонка и описание керна). На основании полученных данных о бурении, включающих геологический разрез по оси каждого планируемого к строительству шахтного ствола, выделяются и объединяются близкие по составу и строению горные породы, слагающие породный массив.

Объединение горных пород в укрупненные литологические разности производится по теплофизиче-

ским характеристикам (теплопроводность, теплоемкость, влагосодержание) при помощи соотношения:

$$\Delta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{\theta_{\max}}, \quad (6)$$

где θ_{\max} – максимальное значение теплофизической характеристики в выделенном слое горной породы; θ_{\min} – минимальное значение теплофизической характеристики в выделенном слое горной породы.

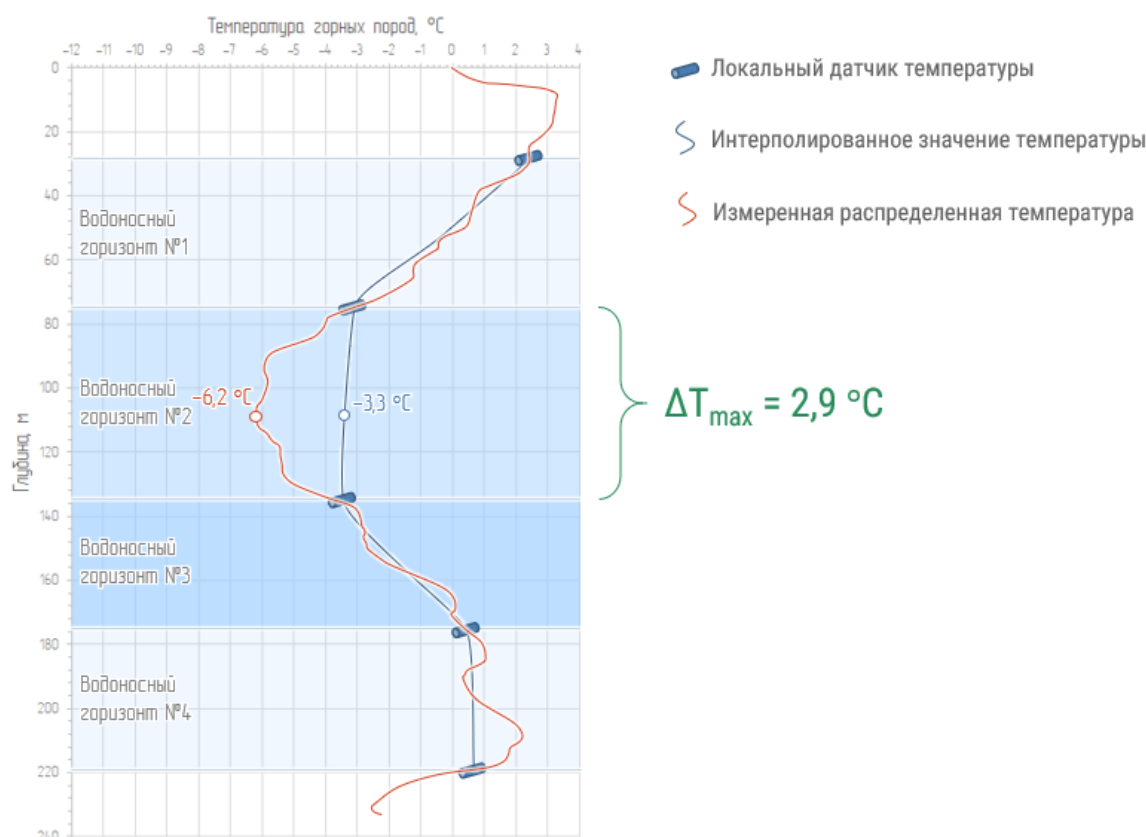


Рис. 8. Результаты экспериментальных измерений температуры породного массива в контрольно-термической скважине

Fig. 8. Results of experimental measurements of rock mass temperature in the control well

Следует отметить, что объединение слоев горных пород осуществляется таким образом, чтобы величина Δ в выделенном слое составляла не более 30 %. При этом, как показывает анализ динамики экспериментальных измерений температуры замораживаемого слоистого породного массива, значение мощности укрупненной литологической разности не должно составлять менее 2 м. Температура в маломощном слое в условиях его замораживания определяется температурой выше- или нижележащих более мощных литологических разностей, что объясняется влиянием вертикальных тепловых потоков через границы слоев.

В дальнейшем для получения детальной информации об изменении температуры по глубине каждой выделенной укрупненной литологической разности следует производить минимум три измерения. Два измерения должны выполняться на границах укрупненного слоя горных пород, и одно – по его середине. Таким образом, при мощности литологической разности, равной 2 м, и необходимости проведения в нем трех замеров температуры пространственное разрешение измерений распределенной температуры горных пород должно быть не более 1 м.

Методика определения оптимальных технологических параметров способа термометрического контроля

На основании проведенной статистической обработки экспериментальных измерений температуры замораживаемых горных пород и исследования влияния расположения термометрической скважины на точность решения обратной задачи Стефана получены следующие результаты по определению оптимального расположения контрольно-термических скважин на участке строительства шахтных стволов.

- Выбор мест заложения контрольно-термических скважин следует производить с учетом отклонений замораживающих скважин от проектного направления (идеально вертикального). Следовательно, бурение термометрических скважин должно производиться только после бурения замораживающих скважин и выполнения инклинометрических измерений.
- В целях точного определения проектных параметров ЛПО и времени их достижения контрольно-термическую скважину необходимо размещать на внешней границе ледопородного ограждения с его наибольшим расчетным значением требуемой толщины по всей глубине замораживания. При

переходе на пассивный режим замораживания термометрия данной скважины позволит качественно управлять процессом искусственного замораживания посредством корректировки рабочих параметров холодильного оборудования.

- Расположение контрольно-термической скважины на внешней границе ЛПО с учетом допустимого отклонения от заданного направления скважин и неравномерного распространения замороженной зоны определяется по формуле:

$$r_E = R_{3C} + kE_{\max} + \alpha_{\max 3C} + \alpha_{\text{перКТ}}, \quad (7)$$

где R_{3C} – проектный радиус контура замораживающих скважин, м; $k = 0,4$ – установленный опытом коэффициент распространения замороженной зоны от контура замораживающих скважин в направлении от оси шахтного ствола; E_{\max} – наибольшее значение требуемой толщины ледопородного ограждения по глубине замораживаемого породного массива, м; $\alpha_{\max 3C}$ – максимальное отклонение замораживающей скважины от вертикали в направлении от оси шахтного ствола, м; $\alpha_{\text{перКТ}}$ – допустимое отклонение контрольно-термической скважины от вертикали, м.

- Согласно терминологии, введенной в [1], зона замораживаемого массива с отрицательной температурой, где вода обращена в лед, называется зоной льда, а остальная зона, в которой температура превышает температуру кристаллизации воды, – зоной охлаждения. При решении задачи Стефана теплораспределение в рассматриваемой расчетной области обусловлено теплофизическими параметрами замораживаемой горной породы как в зоне льда, так и в зоне охлаждения, которые напрямую зависят от температуры. В связи с этим контрольно-термические скважины должны быть расположены не только в пределах ледопородного ограждения, но и за его внешними границами (границами движения фазового перехода). Для определения температуры горных пород в зоне охлаждения, как показывает опыт, термометрическая скважина должна располагаться от проектной внешней границы ЛПО на расстоянии не менее чем 3 м, но не более 5 м.
- Для повышения надежности и точности определения температуры во всем объеме участка замораживаемого породного массива, учитывая влияние расположения термометрической скважины на точность решения обратной задачи Стефана, необходимо, чтобы контрольно-термическая скважина размещалась на прямой, проходящей посередине между двумя смежными замораживающими скважинами (замковая плоскость).
- По результатам термометрии контрольных скважин, расположенных в пределах границ ледопородного ограждения, можно производить оценку влияния параметров работы холодильного оборудования на замороженный породный массив и в случае необходимости корректировать их.

На основании результатов проведенных исследований с учетом анализа требуемого количества контрольно-термических скважин и обоснования пространственного разрешения измерений температуры горных пород разработана следующая методика определения оптимальных технологических параметров способа термометрического контроля состояния ледопородных ограждений.

1. По данным инклинометрических измерений, в пробуренных замораживающих скважинах определяется наибольшее расстояние по всему контуру их расположения и глубине бурения между двумя смежными скважинами. Середина наибольшей дуги окружности между замораживающими скважинами является местом заложения первой контрольно-термической скважины.
2. В соответствии с формулой (7) рассчитывается место заложения второй термометрической скважины.
3. Третья контрольно-термическая скважина должна быть расположена на участке замораживания горных пород за пределами ледопородного ограждения на удалении 3–5 м от внешней границы ледопородного ограждения.
4. Контрольно-термические скважины необходимо размещать на максимально возможном расстоянии друг от друга по периметру замораживаемого участка горных пород шахтного ствола.
5. В случае если проектная документация предусматривает проходку технологического отхода шахтного ствола до достижения проектных параметров ледопородным ограждением во всем интервале замораживания горных пород, требуется предусмотреть четвертую термометрическую скважину.
6. Пространственное разрешение измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах шахтных стволов определяется на основе данных инженерно-геологических изысканий по формуле (6).

Отсюда следует, что для выполнения контроля за параметрами состояния ЛПО требуется три контрольно-термические скважины на участке замораживания строящегося шахтного ствола. На рис. 9 приведено схематичное представление мест заложения термометрических скважин, необходимых для контроля теплового поля замораживаемого породного массива.

При необходимости получения дополнительной информации о температуре породного массива целесообразность расположения дополнительных контрольно-термических скважин обосновывается проектом замораживания горных пород.

Выводы

Проведенные исследования, направленные на обоснование технологических параметров термометрического контроля ледопородного ограждения, позволяют сделать следующие выводы.



Рис. 9. Схематичное представление мест заложения контрольно-термических скважин

Fig. 9. Schematic representation of the location of the control thermal wells

1. Выявлены закономерности влияния процесса искусственного замораживания породного массива на его локальные участки.
2. Определено, что термометрическую скважину следует располагать в точке с наименьшей температурой на прямой, проходящей посередине между замораживающими скважинами.
3. Обеспечить всесторонний безаварийный контроль состояния ледопородного ограждения можно, только если количество контрольно-термических скважин составит не менее 30 % от общего количества замораживающих скважин.
4. Экспериментальные измерения распределенной температуры горных пород в контрольно-

термических скважинах рекомендуется осуществлять с шагом не более 1 м по глубине замораживаемого массива пород.

Полученные результаты по определению оптимальных технологических параметров термометрического контроля ледопородного ограждения включены в Инструкцию по расчету параметров, контролю и управлению искусственным замораживанием горных пород при строительстве шахтных стволов на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий».

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 17-11-01204.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трупаков Н.Г. Замораживание пород при сооружении вертикальных стволов шахт. – М.: Недра, 1983. – 270 с.
2. Трупаков Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. – М.: Углетехиздат, 1954. – 896 с.
3. Временное руководство по проектированию процесса замораживания пород для проходки вертикальных стволов шахт. – Харьков: ВНИИОМШС, 1971. – 103 с.
4. ВСН 189-78. Ведомственные строительные нормы. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей, утв. Приказом Главного технического управления Министерства транспортного строительства СССР 10.05.1978. № 21. – 79 с.
5. ПБ 03-428-02. Правила безопасности при строительстве подземных сооружений, утв. постановлением Госгортехнадзора России 01.11.2001 г. № 49. – 167 с.
6. Правила технической безопасности при проходке стволов шахт специальными способами: утв. постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 17.03.2004. № 5. 2004. – 14 с.
7. СП 103.13330.2012. Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод, утв. приказом Министерства региона-
- ного развития Российской Федерации (Минрегион России) 30.06.2012 г. – 68 с.
8. СП 45.13330.2012. Земляные сооружения, основания и фундаменты, утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) 29.12.2011 г. – 140 с.
9. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов / Л.Ю. Левин, И.И. Головатый, Д.А. Диулин, О.С. Паршаков // Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 48–53. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.06. URL: <http://www.rudmet.ru/journal/1746/article/29905/?language=en> (дата обращения 20.11.2019).
10. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Решение обратной задачи Стефана при анализе замораживания грунтовых вод в породном массиве // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91. – № 3. – С. 655–663. DOI: 10.1007/s10891-018-1782-3
11. Отчет о НИР «Проанализировать результаты теплофизических исследований образцов горных пород и обобщить данные для расчета и обоснования оптимальной толщины ледогрунтового ограждения при строительстве шахтных стволов способом замораживания на Нежинском (восточная часть) участке Старобинского месторождения калийных солей». – Минск: Институт природопользования НАН Беларуси, 2013. – 177 с.

12. Отчет о НИР «Разработка исходных данных для проектирования скипового и клетового шахтных стволов (научно-методическое сопровождение при бурении скважин, лабораторные работы и исходные данные) Нежинского участка. – Минск: ОАО «Белгорхимпром», 2014. – 235 с.
13. Отчет о выполненных работах «Проходка контрольно-стволовых скважин на шахтном поле рудника Талицкого ГОКа». – Пермь: ООО «Генезис-Пермь», 2011. – 504 с.
14. Отчет «Лабораторные исследования керна из контрольно-стволовых скважин на Талицком ГОКе». – Березники: ООО «Персил», 2011. – 51 с.
15. Отчет о НИР № 58-12 «Разработка исходных данных для проекта проходки стволов Петриковского ГОКа», в т.ч.: исходные данные по скиповому стволу». – Минск: ОАО «Белгорхимпром», 2013. – 192 с.
16. Sopko J. Coupled heat transfer and groundwater flow models for ground freezing // ASCE GeoFlorida. – 2017. – V. 280. – P. 719–729.
17. Lewis R.W., Ravindran K. Finite element simulation of metal casting // International journal for numerical methods in engineering. – 2000. – V. 47. – № 1–3. – P. 29–59.
18. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities / M. Vitel, A. Rouabhi, M. Tijani, F. Guerin // Computers and Geotechnics. – 2015. – V. 63. – P. 99–111.
19. Voller V.R., Swaminathan C.R., Thomas B.G. Fixed grid techniques for phase change problems: a review // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1990. – V. 30. – № 4. – P. 875–898.
20. Zhou M.M., Meschke G.A. three-phase thermo-hydro-mechanical finite element model for freezing soils // International journal for numerical and analytical methods in geomechanics. – 2013. – V. 37. – P. 3173–3193.
21. Левин Л.Ю., Семина М.А., Паршаков О.С. Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 268–274. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.274.
22. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
23. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненарокомов А.В. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена. – М.: Янус-К, 2009. – 297 с.
24. Ермаков С.М. Математическая теория планирования эксперимента. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
25. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
26. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента (планирование регрессионных экспериментов). – М.: Наука, 1971. – 312 с.
27. Inverse engineering handbook / Ed. by K.A. Woodbury. – Boca Raton: CRC press, 2002. – 466 p.
28. Fadale T.D., Nenarokomov A.V., Emery A.F. Two approaches to optimal sensor locations. // Journal of Heat Transfer. – 1995. – V. 117. – № 2. – P. 373–379.
29. Karalashvili M., Marquardt W., Mhamdi A. Optimal experimental design for identification of transport coefficient models in convection-diffusion equations // Computers & Chemical Engineering. – 2015. – V. 80. – P. 101–113.
30. Uciniski D. Optimal measurement methods for distributed parameter system identification. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 371 p.
31. Амосов П.В., Лукичев С.В., Наговицын О.В. Влияние пористости породного массива и температуры хладоносителя на скорость создания сплошного ледопородного ограждения // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 4 (27). – С. 43–50.
32. Экспериментальные измерения температуры породного массива с использованием оптоволоконной технологии для анализа формирования ледопородного ограждения шахтных стволов / О.С. Паршаков, Л.Ю. Левин, О.А. Плехов, И.А. Пантелеев // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. – Магадан, 2017. – С. 292–293.
33. Пугин А.В. Исследование динамики тепловых полей при размораживании ледопородных ограждений строящихся стволов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. Вып.14. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2018. – С. 272–275.
34. Хайден Т.В., Вегнер Б. Современная технология замораживания пород на примере двух объектов, находящихся на стадии строительства, состоящих из пяти вертикальных шахтных стволов // Горный журнал. – 2014. – № 9. – С. 65–69.
35. Numerical simulation of artificial ground freezing in a fluid-saturated rock mass with account for filtration and mechanical processes / I.A. Panteleev, A.A. Kostina, O.A. Plekhov, L.Yu. Levin // Sciences in Cold and Arid Regions. – 2017. – V. 9. – № 4. – P. 363–377.
36. Schmall P., Maishman D. Ground freezing a proven technology in mine shaft sinking // Tunneling & Underground Construction. – 2007. – V. 59. – № 6. – P. 25–30.

Поступила: 26.11.2019 г.

Информация об авторах

Семина М.А., кандидат технических наук, научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук.

Зайцев А.В., доктор технических наук, заведующий сектором математического моделирования и информационных технологий, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук.

Паршаков О.С., младший научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук.

Желнин М.С., младший научный сотрудник лаборатории термомеханики твердых тел, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук.

UDC 622.253.3

SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THERMAL CONTROL OF THE FROZEN WALL

Mikhail A. Semin¹,
seminma@outlook.com

Artem V. Zaitsev¹,
aerolog.artem@gmail.com

Oleg S. Parshakov¹,
olegprashakov@gmail.com

Maxim S. Zhelnin²,
zhelninmax@gmail.com

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
78-A, Sibirskaia street, Perm, 614007, Russia.

² Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Academician Korolev street, Perm, 614013, Russia.

The relevance of the study is caused by the lack of regulatory documents for the control of the rock mass in the conditions of its artificial freezing, unified requirements for organization and monitoring of the frozen wall formation.

The main aim of the work is to substantiate the optimal technological parameters of the thermal control of the frozen wall.

Objects of the research are the rock mass under the conditions of artificial freezing and the freezing system.

Methods: experimental study of the temperature dynamics of the frozen rocks, statistical processing and analysis of experimental data; simulation of thermodynamic processes occurring in artificially frozen rock mass.

Results. The paper presents the experimental measurements of temperature distribution in control wells in artificially frozen rock mass. The artificial freezing is considered in relation to the problem of mine shaft sinking in flooded rocks. Processing and analysis of experimental data shown the influence of the artificial freezing on local sections of the rock mass. A study was made of the influence of the control well location on the accuracy of the solution of the inverse Stefan problem. It makes possible to adjust the thermophysical properties of the rock mass model and calculate the temperature field in the entire volume of the frozen rock mass. It was determined that the control well should be placed straight between the adjacent freezing wells. The analysis of the emergency failures of the freezing wells showed that the required number of control wells should be at least 30 % of the total number of freezing wells. Performed thermal monitoring allows the substantiation of optimal locations and number of control wells with the necessary spatial resolution of temperature measurements of rock mass in depth. According to the results of the work, a methodology for selecting technological parameters of the method of frozen wall thermal control were proposed.

Key words:

Frozen wall, mine shaft, thermal control, technological parameters, thermal control well, temperature measurements, freezing well, Stefan problem.

The research was financially supported by the Russian Science Foundation within the scientific project no. 17-11-01204.

REFERENCES

1. Trupak N.G. *Zamorazhivanie porod pri sooruzhenii vertikalnykh stvolov shakht* [Freezing rocks during vertical mine shaft sinking]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 270 p.
2. Trupak N.G. *Zamorazhivanie gornykh porod pri prokhodke stvolov* [Freezing rocks in the case of shaft sinking]. Moscow, Uglekhizdat Publ., 1954. 896 p.
3. *Vremennoe rukovodstvo po proektirovaniyu protsessa zamorazhivaniya porod dlya prokhodki vertikalnykh stvolov shakht* [Interim guidance on designing a process for freezing rocks for sinking vertical mine shafts]. Kharkiv, VNIOMShS, 1971. 103 p.
4. VSN 189-78 *Vedomstvennye stroitelnye normy. Instruktsiya po proektirovaniyu i proizvodstvu rabot po iskusstvennomu zamorazhivaniyu gruntov pri stroitelstve metropolitenov i tonneley*, utv. Prikazom Glavnogo tekhnicheskogo upravleniya Ministerstva transportnogo stroitelstva SSSR [Departmental building codes. Instructions for the design and production of works on artificial freezing of soils during the construction of subways and tunnels, approved by order of the Main Technical Department of the Ministry of Transport Construction of the USSR] 10.05.1978. No. 21. 79 p.
5. PB 03-428-02 *Pravila bezopasnosti pri stroitelstve podzemnykh sooruzheniy*, utv. postanovleniem Gosgortekhnadzora Rossii [Safety rules for the construction of underground structures, approved by Resolution of the Gosgortekhnadzor of Russia]. 01.11.2001. No. 49. 167 p.
6. *Pravila tekhnicheskoy bezopasnosti pri prokhodke stvolov shakht spetsialnymi sposobami*: utv. postanovleniem Ministerstva po chrezvychaynym situatsiyam Respubliki Belarus [Technical safety rules for tunneling in special ways: approved by resolution of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus] 17.03.2004. № 5. 2004. 14 p.
7. SP 103.13330.2012 *Zashchita gornykh vyrabotok ot podzemnykh i poverkhnostnykh vod*, utv. prikazom Ministerstva regionalnogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii [Protection of mine workings from underground and surface waters, approved by the order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation]. 30.06.2012. 68 p.
8. SP 45.13330.2012 *Zemlyanye sooruzheniya, osnovaniya i fundamenty*, utv. prikazom Ministerstva regionalnogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii [Earthworks and foundations, approved by the order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation]. 29.12.2011. 140 p.

9. Levin L.Y., Golovaty I.I., Diulin D.A., Parshakov O.S. Optimization of frozen wall formation in shaft construction. *Gorny Zhurnal*, 2018, no. 8, pp. 48–53. In Rus. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.06. Available at: <http://www.rudmet.ru/journal/1746/article/29905/?language=en> (accessed 20 November 2019).
10. Levin L.Yu., Semin M.A., Zaitsev A.V. Solution of an inverse Stefan problem in analyzing the freezing of groundwater in a rock mass. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 3, pp. 611–618. In Rus. DOI: 10.1007/s10891-018-1782-3
11. *Otchet o NIR. Proanalizirovat rezultaty teplofizicheskikh issledovaniy obraztsov gornyykh porod i obobshchit dannye dlya rascheta i obosnovaniya optimalnoy tolshchiny ledogruntovo ogra-zhdeniya pri stroitel'stve shakhtnykh stvolov sposobom zamora-zhivaniya na Nezhinskom (vostochnaya chast) uchastke Starobinskogo mestorozhdeniya kaliynykh soley* [Research report. Analyze the results of thermophysical studies of rock samples and summarize the data for calculating and justifying the optimal thickness of the frozen wall during the construction of mine shafts by freezing in the Nezhinsky (eastern part) section of the Starobinsky potassium salt deposit]. Minsk, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, 2013. 177 p.
12. *Otchet o NIR. Razrabotka iskhodnykh dannykh dlya proektirovaniya skipovogo i klevetovogo shakhtnykh stvolov (nauchno metodicheskoe soprovozhdenie pri burenii skvazhin, laboratornye raboty i iskhodnye dannye Nezhinskogo uchastka)* [Research report. Development of initial data for the design of skip and cage shaft shafts (scientific and methodological support when drilling wells, laboratory work and initial data) of the Nezhinsky site]. Minsk, Belgorkhimprom, 2014. 235 p.
13. *Otchet o NIR. Prokhodka kontrolno stvolovykh skvazhin na shakhtnom pole rudnika Talitskogo GOKa* [Research report. Drilling control wells in the mine field of the Talitsky mine]. Perm, Perm-Genesis Publ., 2011. 504 p.
14. *Otchet o NIR. Laboratornye issledovaniya kerna iz kontrolno stvolovykh skvazhin na Talitskom GOKe* [Research report. Laboratory tests of core from control wells at Talitsky GOK]. Berezniki, Persil Publ., 2011. 51 p.
15. *Otchet o NIR. Razrabotka iskhodnykh dannykh dlya proekta prokhodki stvolov petrikovskogo gok v tom chisle iskhodnye dannye po skipovomu stvolu* [Research report. Development of initial data for the project of sinking the shafts of Petrikovsky GOK, including initial data on the skip shaft]. Minsk, Belgorkhimprom Publ., 2013. 192 p.
16. Sopko J. Coupled heat transfer and groundwater flow models for ground freezing. *ASCE GeoFlorida*, 2017, vol. 280, pp. 719–729.
17. Lewis R.W., Ravindran K. Finite element simulation of metal casting. *International journal for numerical methods in engineering*, 2000, vol. 47, no. 1–3, pp. 29–59.
18. Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guerin F. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 63, pp. 99–111.
19. Voller V.R., Swaminathan C.R., Thomas B.G. Fixed grid techniques for phase change problems: a review. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1990, vol. 30, no. 4, pp. 875–898.
20. Zhou M.M., Meschke G.A. three-phase thermo-hydro-mechanical finite element model for freezing soils. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 2013, vol. 37, pp. 3173–3193.
21. Levin L.Y., Semin M.A. Parshakov O.S. Improving methods of frozen wall state prediction for mine shafts under construction using distributed temperature measurements in test wells. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, pp. 268–274. In Rus. DOI: 10.31897/PML.2019.3.274.
22. Alifanov O.M. *Inverse heat transfer problems*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1994. 348 p. Available at: <https://www.springer.com/gp/book/9783642764387> (accessed 20 November 2019).
23. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Nenarokomov A.V. *Obratnye zadachi v issledovanii slozhnogo teploobmena* [Inverse problems in the study of complex heat transfer]. Moscow, Janus-K Publ., 2009. 297 p.
24. Ermakov S.M. *Matematicheskaya teoriya planirovaniya eksperimenta* [The mathematical theory of experimental design]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 392 p.
25. Ermakov S.M., Zhiglyavskiy A.A. *Matematicheskaya teoriya optimalnogo eksperimenta* [The mathematical theory of an optimal experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 320 p.
26. Fedorov V.V. *Teoriya optimalnogo eksperimenta (planirovanie regressiynykh eksperimentov)* [The theory of optimal experiment (planning regression experiments)]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 312 p.
27. *Inverse engineering handbook*. Ed. by K.A. Woodbury. Boca Raton, CRC press, 2002. 466 p.
28. Fadale T.D., Nenarokomov A.V., Emery A.F. Two approaches to optimal sensor locations. *Journal of Heat Transfer*, 1995, vol. 117, no. 2, pp. 373–379.
29. Karalashvili M., Marquardt W., Mhamdi A. Optimal experimental design for identification of transport coefficient models in convection–diffusion equations. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, vol. 80, pp. 101–113.
30. Uciniski D. *Optimal measurement methods for distributed parameter system identification*. Boca Raton, CRC Press, 2005. 371 p.
31. Amosov P.V., Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V. Influence of rock massif porosity and coolant's temperature on velocity of solid ice wall creation. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 4 (27), pp. 43–50. In Rus.
32. Parshakov O.S., Levin L.Yu., Plekhov O.A., Pantelev I.A. Experimental measurements of rock mass temperature with the use of fiber-optic technology for analysis of ground freezing while shaft sinking. *Book of abstracts. XI international symposium on permafrost*. Magadan, 2017. pp. 292–293.
33. Pugin A.V. Issledovanie dinamiki teplovykh poley pri razmora-zhivani ledoporodnykh ogra-zhdeniy stroyashchikhsya stvolov [The study of the dynamics of thermal fields during the thawing of the frozen wall of constructed mine shafts]. *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov: sbornik nauchnykh trudov. Vyp.14*. Perm, GI UrO RAN, 2018. pp. 272–275.
34. Van Heyden T., Wegner B. Modern shaft freezing technology implemented in two big shaft sinking projects with total 5 surface mine shafts are being constructed. *Gogny Zhurnal*, 2014, no. 9, pp. 65–69. In Rus.
35. Pantelev I.A., Kostina A.A., Plekhov O.A., Levin L.Yu. Numerical simulation of artificial ground freezing in a fluid-saturated rock mass with account for filtration and mechanical processes. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 363–377.
36. Schmall P., Maishman D. Ground freezing a proven technology in mine shaft sinking. *Tunneling & Underground Construction*, 2007, vol. 59, no. 6, pp. 25–30.

Received: 26 November 2019.

Information about the authors

Mikhail A. Semin, Cand. Sc., researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Artem V. Zaitsev, Dr. Sc., head of the sector, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Oleg S. Parshakov, junior researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Maxim S. Zhelnin, junior researcher, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректura 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 28.09.2020. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,64. Уч.-изд. л. 24,09.
Заказ 123-20. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ