

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 332, № 5, 2021

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. 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)
Уленеков О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
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, 2021

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on_line) – 2413-1830

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

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

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com

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

Volume 332, № 5, 2021

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

Editorial Board

Semiletov I.P., editor in chief, 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)
Belozherov 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)
Tretiak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)
Arbuzov S.I., Dr. Sc. (Russia)
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on
www.elibrary.ru, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Характеристика руд Лисаковского месторождения с целью их комплексной переработки**
Каскатаева К.Б., Кряжева Т.В., Садчиков А.В., Дьяконов В.В. 7
Characteristics of ores of the Lisakovsky deposit for their complex processing
Kaskataeva K.B., Kryazheva T.V., Sadchikov A.V., Dyakonov V.V.
- Новые данные по геохимии и условиям образования германий-угольного месторождения спецугли (Приморский край)**
Арбузов С.И., Чекрыжов И.Ю., Ильенок С.С., Соктоев Б.Р., Соболева Е.Е. 17
New data on geochemistry and genesis of the Spetsugli germanium-coal deposit (Primorsky krai)
Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Ilenok S.S., Soktoev B.R., Soboleva E.E.
- Модель скорости ветра на основе дробного стохастического процесса**
Давыдов Д.Ю., Обухов С.Г. 39
Wind speed model based on fractional stochastic process
Davydov D.Yu., Obukhov S.G.
- Оценка суффозионной опасности на территории г. Томска**
Строкова Л.А., Леонова А.В. 49
Assessment of suffosion hazard on the territory of Tomsk
Strokova L.A., Leonova A.V.
- Современные направления совершенствования бурового инструмента типа PDC**
Нескоромных В.В., Баочанг Л., Чен Ч., Петенев П.Г., Попова М.С., Головченко А.Е. 60
Modern trends in development of PDC-type drilling tools
Neskoromnykh V.V., Baochang L., Chen Zh., Petenev P.G., Popova M.S., Golovchenko A.E.
- Моделирование пространственных течений вязких сред в системе каналов с участками соединений сложной формы**
Харламов С.Н., Фатьянов Д.С. 70
Simulation of viscous media spatial flows in the system of channels with sections of complex form junctions
Kharlamov S.N., Fatyanov D.S.
- История развития трехмерного геологического моделирования как метода изучения залежей нефти и газа**
Закревский К.Е., Попов В.Л. 89
The history of development of 3D geology modeling as a method for studying oil and gas reservoirs
Zakrevskiy K.E., Popov V.L.
- Обоснование технологии ультразвукового воздействия для разрушения стойких водонефтяных эмульсий**
Лекомцев А.В., Мордвинов В.А., Дворецкас Р.В., Степаненко И.Б., Баканеев В.С., Силичев М.А., Корнилов К.В. 101
Justification of ultrasonic impact technology for destruction of stable water-oil emulsions
Lekomtsev A.V., Mordvinov V.A., Dvoreckas R.V., Stepanenko I.B., Bakaneev V.S., Silichev M.A., Kornilov K.V.
- Экспериментальное исследование влияния забойного давления добывающих скважин на выработку запасов из сложнопостроенных карбонатных коллекторов**
Мартюшев Д.А. 110
Experimental study of the influence of bottomhole pressure of producing wells on reserve production from complicated carbonate reservoirs
Martyushev D.A.
- Вторичные геохимические процессы в качестве атрибута нефтегазонасыщенности песчаных коллекторов Тамбейского месторождения**
Мельник И.А., Родивилов Д.Б., Никитин И.А. 120
Secondary geochemical processes as hydrocarbon saturation attribute of the sand reservoirs of Tambey field
Melnik I.A., Rodivilov D.B., Nikitin I.A.
- Использование вторичных материалов при восстановлении работоспособности втулок подшипников скольжения**
Пилипенко С.В., Фруцкий В.А., Дудан А.В. 130
Use of secondary materials in the restoration of sleeve bearing bushings efficiency
Pilipenko S.V., Frutski V.A., Dudan A.V.
- Комплексный подход к параметризации геолого-гидродинамической модели для её автоадаптации к процессам разработки залежей нефти**
Еремян Г.А., Давуди Ш., Рукавишников В.С., Степико А.В. 138
Comprehensive approach to parametrization of a petroleum reservoir model for automated history matching
Eremyan G.A., Davoodi Sh., Rukavishnikov V.S., Stepiko A.V.
- Исследование русловых деформационных процессов на участках мостовых переходов георесурсных транспортных систем**
Саруханян А.А., Балджян П.О. 148
Study of channel deformation at bridge crossing sections of georesources transportation systems
Sarukhanyan A.A., Baldjyan P.O.
- Геохимическая характеристика снежного покрова г. Тобольск**
Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Соромотин А.В. 156
Geochemical characteristics of snow cover in Tobolsk
Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Soromotin A.V.
- Электродуговой синтез карбида вольфрама из рудных концентратов**
Пак А.Я., Якич Т.Ю., Кокорина А.И. 170
Electric arc synthesis of tungsten carbide from ore concentrates
Pak A.Ya., Yakich T.Yu., Kokorina A.I.
- Обзор современного состояния соляной промышленности России**
Боярко Г.Ю., Хатков В.Ю. 179
Current state of the Russian salt industry
Boyarko G.Yu., Khatkov V.Yu.
- Комплексная оценка потенциальной природной пожароопасности осушенных болот на территории еврейской автономной области**
Зубарева А.М., Зубарев В.А. 191
Complex evaluation of potentially natural dried bog-associated fire hazards in the territory of the Jewish autonomous region
Zubareva A.M., Zubarev V.A.

- | | | |
|---|------------|--|
| Реликты фторидно-кальциевого (флюоритового) и солевых расплавов в породах массива Ары-Булак (Восточное Забайкалье)
Дмитриева А.С., Перетьяжко И.С., Савина Е.А. | 201 | Relicts of fluoride-calcium (fluoritic) and salt melts in rocks of the Ary-Bulak massif (East Transbaikalia)
Dmitrieva A.S., Peretyazhko I.S., Savina E.A. |
| Комплексное исследование модифицированного бетона на основе активированного микрокремнезема совместно с микроармирующим волокном для повышения эксплуатационных характеристик
Ткач Е.В., Темирканов Р.И., Ткач С.А. | 215 | Comprehensive study of modified concrete based on activated microsilicon together with micro-reinforcing fiber to improve performance
Tkach E.V., Temirkanov R.I., Tkach S.A. |
| Применение сейсмофациального анализа для оценки перспектив сложнопостроенных карбонатных коллекторов на примере нефтяного месторождения (по данным геофизических исследований скважин)
Чучалина К.Ю., Коровин М.О. | 227 | Application of seismic facies analysis for evaluating the prospects of complex carbonate reservoir on the example of oil deposit (by the data of well logs)
Chuchalina K.Yu., Korovin M.O. |

УДК 553.31

ХАРАКТЕРИСТИКА РУД ЛИСАКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ЦЕЛЮ ИХ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

Каскатаева Куралай Балапашовна¹,
aigakk@mail.ru

Кряжева Татьяна Владимировна¹,
kryazheva_t@mail.ru

Садчиков Александр Викторович¹,
a.sadchikov@kstu.kz

Дьяконов Виктор Васильевич²,
mdf.rudn@mail.ru

¹ Некоммерческое акционерное общество «Карагандинский технический университет»,
Казахстан, 100027, г. Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56.

² Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки возможности попутного извлечения цветных, редких металлов и рассеянных элементов. В основу исследования положены результаты анализа проб оолитовых руд с западного участка месторождения. В ходе проведения научно-исследовательских работ изучаются промышленные типы железных руд месторождения, рассматривается распределение редких металлов по различным промышленным типам, фракциям лисаковских железных руд и концентратам.

Цель: изучение характеристик руд Лисаковского месторождения с целью их комплексной переработки.

Объект: оолитовые руды Лисаковского месторождения.

Методика. Проведены лабораторные исследования руд и концентратов Лисаковского месторождения. Проведен гранулометрический анализ руд по типам и сортам. Изучен химический состав руд и концентратов по фракциям.

Результаты. Исследования гранулометрического состава руд показывают, что руды I и II сорта состоят в основном (до 80 %) из фракции $-0,63+0,16$ мм. В руде III сорта количество основных фракций понижается до 60 %, а количество фракций $+0,63$ и $-0,16$ мм повышается суммарно до 40 %. Анализ результатов лабораторных исследований проб из хвостов обогащения показал, что содержания металлов: Sr, Ti, Zr, Ga, Se, Ba, Be, Li, Cd, Y и Co, ниже кларкового значения в литосфере. Содержание Mn, Pb, As, W, Cr, Ni, Bi, Mo, V, Cu выше среднего значения содержания металлов в литосфере. Так, содержания Cu, Ag и W превышают кларковые содержания в 5, 9 и 12,5 раз, а содержания Mn, Pb и Bi превышают средние значения в 33, 55 и 59 раз.

Ключевые слова:

Продуктивная толща, оолиты, типы руд, фазовый состав, минеральный состав, внутреннее строение оолитов, концентрат, гранулометрический состав, химический состав.

Введение

Лисаковское железорудное месторождение является градообразующим для г. Лисаковск, который расположен на правом берегу р. Тобол в Костанайской области. Месторождение находится в 20 км южнее железнодорожной станции Тобол. Запасы руды, с утвержденными в ГКЗ, оценены: по категориям А+В+С1 со средним содержанием железа 35,4 % и составляют 1728,2 млн т и по категории С2 со средним содержанием железа 25,56 % и составляют 1158,36 млн т. Забалансовые руды со средним содержанием железа 25,56 % составляют 3031,6 млн т.

Руды содержат 0,071 % серы и 0,64 % фосфора, залегают на небольшой глубине. Добыча производится с минимальным количеством взрывных работ [1–5].

Для изучения промышленных типов нами отобраны пробы оолитовых руд с западной части месторождения.

Общие сведения

Геологоразведочными работами было установлено, что руды месторождения приурочены к речной па-

леодолине, имеющей возраст среднего олигоцена. Процессы, протекающие во время стадии седиментации и раннего диагенеза, играют основную роль в образовании оолитов, а в стадию позднего диагенеза совершаются главным образом процессы дегидратации, усыхания, синерезиса и перекристаллизации минерального вещества. В стадию седиментации в речных условиях, в окислительной геохимической обстановке формируются осадки, выпадающие из коллоидных растворов: коагуляты и коагели $Fe(OH)_3$, $Al(OH)_3$, MnO_2 , SiO_2 и др., которые в разных условиях среды образуют оолиты, бобовины, сгустки, агрегаты и хлопьевидные массы.

Долина реки Праторгай простирается в широтном направлении, с запада на восток, от западного борта Тургайского прогиба к его осевой части. Она выполнена рыхлыми отложениями, представленными: галечниками, гравием, разнородными, крупно-, средне- и мелкозернистыми кварцевыми песками с железистыми оолитами или лишенными их, алевритами, песчанистыми глинами, а также гидрогетито-

выми и гидрогетито-сидерито-хлоритовыми оолитовыми рудами [2].

Исследованиями, проведенными в 2017–2019 гг., выявлено, что руды представлены тремя типами, имеющими близкий минеральный, химический и фазовый состав [3]. Следует отметить повышенное содержание вредной примеси пятиоксида фосфора до 1,19 % [3].

Залежи западной части месторождения, вошли в состав рудной базы Лисаковского ГОКа. Здесь отмечены Главная, Южная, Степная и Восточная группы залежей. 75 % основных запасов месторождения сосредоточены в западной части Главной залежи, имеющей протяженность в 21 км. Здесь сосредоточено до 50 % запасов балансовых руд (в количестве 317 млн т со средним содержанием железа 39,2 %), которые разрабатываются на участках № 2 и 3.

На месторождении выделяется 26 рудных залежей, разделённых между собой условными границами. Разрабатывается главная залежь (участки 1, 2, 3) со среднеассоцированной долей железа 38,2 %, мощность уступов 12–13 м. Массовая доля железа в рудах колеблется в широком диапазоне – от 14,4 до 48 % – при средней массовой доле серы 0,03 % и фосфора до 0,7 %. Мощность вскрыши 1–2 м в центральной части и до 20 м на периферии.

По составу руды гидрогетитовые, гидрогетито-сидерито-хлоритовые и гидрогетит-лептохлоритовые. Руда легко измельчается. Первые развиты в песках, песчаниках и гравийно-галечных отложениях речных русел и отчасти озер. Второй тип относится к аллювиально-пролювиальным и встречается на террасах палеодолины. Третий обнаружен в озерно-болотных, старичных и отчасти в русловых отложениях под покровом глинистых пород, предохранивших руды от окисления [4].

Типы железных руд Лисаковского месторождения

Лисаковское месторождение характеризуется наличием трех типов железных руд, которые добываются в карьере на трёх различных участках.

Оолитовые лисаковские руды крупностью 0,2–0,6 мм представлены в основном гидрогетитом, размер которого менее 0,04 мм. Руда залегает неглубоко, добыча ее производится с незначительной крышей. Оолитовая структура руды позволяет производить добычу без взрывных работ и использовать ее в дальнейшем переделе без дробления.

Изучение руды Лисаковского месторождения под электронным микроскопом показывает, что в оолитах руды главная рудообразующая роль принадлежит гидрогетиту. Гидрогетит образует зерна в виде микроагрегатов размером 5–7 мкм. Здесь мы находим оолитовые, корковые, плитчатые, сплошные, конкреционные и жеодистые, а также охристые порошковатые его образования.

Исходным материалом для образования гидрогетитовых оолитов служили: а) коллоидные частицы гидрата окиси железа, с примесью окислов алюминия, марганца, коллоидные частицы кремнезема и т. д.; б) электролиты, подвергавшиеся в растворах диссо-

циации, с образованием различных ионов (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ , Cl^- и др.); в) механические частицы – зерна кварца, иногда полевого шпата, гидрогетита, обломки расколовшихся железистых оолитов и бобовин, вторичные агрегаты и сгустки коагулятов гидрата окиси железа и других веществ.

Оолиты имеют округлую или неправильно округлую форму, окрашены в желтовато-бурый, бурый или темно-бурый, почти черный, цвет. Внешняя поверхность обладает полуметаллическим или матовым блеском.

Оолиты, обладающие концентрически зональным строением, содержат в себе центральные ядра, вокруг которых происходило наслаение коллоидальных частиц гидроокислов железа. Ядрами в оолитах служат песчинки кварца, гидрогетита, полевого шпата, обломки расколовшихся оолитов и т. д.

В нижних горизонтах рудной толщи, кроме гидрогетита, в составе цемента встречаются лептохлориты и частично сидерит. В составе некоторых оолитов вместе с гидрогетитом присутствует стильносидерит. Содержание железа в оолитах 51,25 %. В составе гидрогетита находится 34,3–34,4 %, а в силикатах 7,7–8,2 % трёхвалентного железа, двухвалентное железо не обнаружено [2].

Кварц широко распространен в составе рудной толщи. Он представлен обломочными зернами, гравием и гальками, которые в неодинаковом количестве встречаются в разных слоях оолитовых железняков. Крупность зерна – 1+0,03 мм.

На месторождении хлориты слагают главным образом цемент в оолитовых рудах и в песчаниках. В них можно увидеть отдельные скопления коагулятов, состоящих из зеленой лептохлоритовой минеральной массы.

Устойчивым классом крупности руд является фракция руд –1+0,28 мм. Класс +0,074 мм в основном представлен железистыми алюмосиликатами, количество которых составляет 73,3–85,5 %.

Результат лабораторных исследований

Детальные анализы результатов макро- и микроскопического, рентгенографического, электронно-микроскопического, микрозондового и других видов исследований показывают, что основными структурными элементами в железных рудах месторождения являются оолиты, сцементированные зелено-цветной лептохлоритовой минеральной массой.

Результаты проведенных исследований показывают, что строение, минеральный состав, цвет, размер и форма оолитов различаются. Эти различия разных типов оолитов, по-видимому, являются отражением условий их образования и последующих преобразований, произошедших уже в сформировавшейся оолитовой породе.

Рыхлые оолитовые руды содержат в основном гидрогетит, гетит, кварц, феррихлорит; глинистые вещества, реже карбонаты, калиевые полевые шпаты; изредка в виде единичных включений встречаются зерна магнетита, мартита, пирита, гематита, биотита, серицита, глауконита, плагиоклаза, роговой обманки,

эгирина, эпидота, апатита, циркона, мусковита, турмалина.

В рудах наблюдается несколько форм гидрогетита: оолиты, конкреции, плитки и аморфные порошковатые образования (охра).

Составной частью оолитов является гидрогетит двух генераций с тонкодисперсной примесью феррихлоритового и глинистого вещества. Гидрогетит первой генерации плотный темно-бурого цвета образует зерна, которые просматриваются лишь под электронным микроскопом в виде микроагрегатов размером до 5–7 мкм. Оолиты трещиноваты, поэтому слабо сопротивляются измельчению. Оолиты, сложенные таким гидрогетитом, с поверхности имеют металлический блеск. Строение оолитов преимущественно сплошное, реже концентрическое, форма округлая, реже овальная и эллипсоидальная. Магнетит редок и представлен тонкими кристаллическими частицами мельче 0,0050 мм, часто окислен до маргита. Размеры оолитов колеблются от 0,05 до 0,66 мм, преобладают 0,18–0,60 мм.

Массовая доля железа в гидрогетите этой генерации составляет 53,5 %.

Гидрогетит второй генерации красновато-бурого и бурого цвета. Оолиты, сложенные таким гидрогетитом, имеют концентрическое и концентрически-зональное строение и содержат в себе центральные ядра, выполненные гидрогетитом, иногда кварцем, изредка полевым шпатом и др. Размер таких оолитов изменяется от 0,10 до 1,0 мм, преобладают от 0,2 до 0,37 мм.

Особенностью минерального состава этих руд является то, что в оолитах ферриалюмосиликаты диспергированы в гидрогетит, а в цементной части присутствует охристый гидрогетит, цементирующий оолиты и кварц. Массовая доля железа в таком гидрогетите составляет 62,8 %. Многие оолиты сильно изменили свое концентрически-зональное строение за счет растворения и перемещения железа внутри оолитов и при выносе железа из них, поэтому массовая доля железа в таких оолитах в среднем составляет 51,5 %.

Феррихлорит под микроскопом наблюдается в виде аморфной, изотропной или метаколлоидной массы от светло- до темно-зеленого цвета. Хлорит принадлежит к типу шамозита, он содержит магний и двухвалентное железо. В оолитовых рудах и рудных песчаниках феррихлориты слагают в основном цемент. В них можно видеть отдельные скопления, состоящие из зеленой феррихлоритовой массы. Формирование феррихлоритов происходило в окислительно-восстановительной обстановке в ассоциации с сидеритом. Находясь в этих условиях и подвергаясь процессам выветривания, феррихлорит желтеет, бурет, обохривается и замещается бурыми гидроокислами железа, что наблюдается в охристо-феррихлорито-гидрогетитовой разновидности [1–5].

Карбонаты встречаются в рудах второго и третьего горизонтов и представлены сидеритом в виде оторочек на сферолитовых зернах (0,02–0,15 мм) буроватого цвета. На некоторых участках залежей в рудах встречается сидерит в массивной форме, обладающий повышенной магнитной восприимчивостью за счет

включений тонкорассеянного магнетита. В очень незначительном количестве на отдельных участках встречается кальцит, выполняющий микротрещинки в зернах калиевых полевых шпатов.

Сидерит часто нарастает на гидрогетитовых или гидрогетито-хлоритовых оолитах в виде внешних оторочек. Такие же оторочки сидерита мы видим иногда на кварцевых зернах и на расколовшихся обломках оолитов.

Кальциевый фосфат относится к группе апатита, его молекула может содержать одну или несколько групп OH и, возможно, немного SiO₂ вместо PO₄. Его морфология может быть различной – аморфной и псевдогексагональной.

Калиевые полевые шпаты встречаются почти во всех пробах в виде корродированных изометричных зерен (0,05–0,35 мм) буроватого цвета, трещиноватых, в различной степени пелитизированных и хлоритизированных. По трещинкам развивается гидрогетит, серицит, кальцит. В некоторых зернах калиевого полевого шпата наблюдаются включения апатита, турмалина, циркона.

Глина в цементе руд представлена в основном пелитовой массой серого и буровато-серого цвета, состоящей из тонкочешуйчатого каолинита в смеси с феррихлоритом и дисперсным гидрогетитом. В рудах второго и третьего горизонтов встречаются гнездообразные и массивные выделения глин с включениями тонкодисперсного магнетита. Глина интенсивно замещает калиевые полевые шпаты.

Кварц в рудах представлен обломочными зернами, иногда гравием и галькой, которые в неодинаковом количестве встречаются в разных слоях оолитовых и массивных руд. Имеются слои и прослойки кварцевых песков, содержащие оолиты. Размер зерен кварца изменяется от 0,02 до 1,37 мм. Зерна кварца слегка желтоватого цвета, иногда содержат включения апатита.

Концентрически-зональное строение оолитов хорошо наблюдается в полированных шлифах в отраженном свете.

Многие оолиты под воздействием позднего диагенеза и последующих процессов выветривания сильно изменились и утратили частично или полностью свое концентрически-зональное строение. Действия этих процессов проявились, с одной стороны, в раскристаллизации коагулятов, а с другой – в частичном растворении и перемещении железа внутри оолитов и в выносе железа из них [1, 2].

В одних случаях это приводило к срастанию соприкасавшихся оолитов, а в других, вообще, – к цементации гидроокислами железа оолитов, кварцевых зерен и другого пластического материала в данном слое.

Содержание кремнезема объясняется, с одной стороны, наличием в оолитах кварцевых песчинок, а с другой – вхождением в состав центров коагулятов кремнезема, отрицательно заряженные коллоидные частицы которого, взаимодействуя в растворах с положительно заряженными коллоидными частицами гидрата окиси железа, коагулировали и осаждались,

образуя тончайшие концентрические наслоения на концентрах гидроокислов железа. Растворение оолитов в соляной кислоте приводит иногда к сохранению кремнеземного скелета в осадке.

Глинозем в изучаемых оолитах не образует обособленных самостоятельных минералов. По-видимому, глинозем в оолитах входит в состав гидрогетитовых концентров в виде коагулятовой примеси алюмогеля (гидраргиллит-гель), осаждавшейся вместе с коллоидными частицами гидрата окиси железа, обладавшими положительными знаками электрического заряда.

В рудной толще, особенно в верхних и средних ее горизонтах, нередко встречаются прожилки, гнезда, корки, конкреции и жёды, состоящие из гидрогетита,

а иногда из гидрогетита, гетита и лепидокрокита. Образование их связано частично с процессами разложения и окисления хлоритов и сидеритов, вторичные прожилки и гнезда которых наблюдаются местами в оолитовых железняках и песчаниках, где последние содержат включения растительных остатков. Частично же образование их связано с миграцией гидроокислов железа в коллоидных растворах. Гидрогематит встречается в рудной толще редко. Обычно он ассоциирует здесь с гидрогетитом, с которым образует прожилки и гнезда [2–7].

На примере участка № 1 проведен анализ фазового состава по железу структурно-минералогических разновидностей руд Лисаковского месторождения бурых железняков, результаты которого приведены в табл. 1 [3].

Таблица 1. Фазовый состав по железу структурно-минералогических разновидностей лисаковских руд

Table 1. Phase composition for iron of structural and mineralogical varieties of Lisakovsky ores

Индекс, Разновидности Index, Varieties	Удельная магнитная восприимчивость, $n \cdot 10^8 \text{ см}^2/\text{кг}$ Specific magnetic susceptibility, $n \cdot 10^8 \text{ cm}^2/\text{kg}$	Содержание, % Content, %			Распределение по фазам, % Phase distribution, %			
		Fe _{общ} Fe _{gen}	Fe ²⁺	Fe _{магн} Fe _{magn}	силикатное, в т. ч. including silicate		Fe ²⁺ _{карб} Fe ²⁺ _{carbo}	Fe ³⁺ _{ги} Fe ³⁺ _{hi}
					Fe _{ген}	Fe ³⁺		
Ч (черные) (black)	36,74	44,6	0,71	0,06	6,80	6,80	0,69	37,07
Б (бурые) (brown)	35,13	42,02	0,29	0,05	6,65	6,65	0,27	5,05
З (зеленые) (green)	34,36	39,64	0,92	0,06	5,54	5,54	0,90	33,14
Ж, З (желто-зеленые) (yellow-green)	36,85	43,32	0,45	0,06	6,93	6,93	0,43	35,90
С (серые) (gray)	29,3	39,35	0,18	0,03	6,55	6,55	0,16	32,61

Геолого-технологическая классификация руд Лисаковского месторождения

Геолого-технологическая классификация руд Лисаковского месторождения представлена в табл. 2. В каждой из групп выделены типы, по наличию дополнительных отличительных признаков – подтипы. Руды существующих типов содержат от 30 до 49 % железа и обладают различными магнитными свойствами.

В рудах выделяются три структурных вида: густооолитовые руды, сложенные преимущественно рудными оолитами (50–80 %) с подчиненным количеством цемента и кварца; редкооолитовые руды, состоящие из рудных оолитов (менее 50 %) с преобладанием цемента и свободного кварца; и мелкооолитовые цементированные руды.

Таблица 2. Геолого-технологическая классификация Лисаковского месторождения [4]

Table 2. Geological and technological classification of the Lisakovsky field [4]

Характеристика руд Ore characteristics			Массовая доля, % Mass fraction, %		Классы крупности, мм Size classes, mm						Концентрат Concentrate	
Тип руды Ore type	Сорт руды Ore grade	Структурно-текстурная и минералогическая Structural-textural and mineralogical	Fe	оолитов oolites	1,6		–0,6+0,3		–0,3+0,15		Выход, % Yield, %	м.д. Fe, % m.f. Fe, %
					Выход, % Yield, %	м.д. Fe, % m.f. Fe, %	Выход, % Yield, %	м.д. Fe, % m.f. Fe, %	Выход, % Yield, %	м.д. Fe, % m.f. Fe, %		
1	1–1	Рыхлые густооолитовые Loose dense oolitic	42–49	60–85	0–7	27–46	35–65	44–49	4–24	38–47	–	–
	1–2	Крупно-средне-оолитовые Large-medium oolitic	40–42	55–75	0–10	25–44	33–60	42–48	4–24	35–46	65–85	49–51
2	2–3	Рыхлые густо-оолитовые Loose dense oolitic	38–40	50–70	0–10	23–44	29–57	33–47	6–31	33–45	60–75	48–50
	2–4	Рыхлые редкооолитовые Loose rare oolitic	34–38	40–65	0–15	21–42	24–52	32–46	7–38	27–44	53–70	47–49
	2–7	Средне-мелкооолитовые Medium-small oolitic	30–34	25–60	0–10	19–42	11–50	20–43	8–48	20–42	40–65	44–47
3	3–5	Редкооолитовые Rare oolitic	34–38	40–65	10–45	24–47	19–15	38–46	3–20	30–46	45–70	47–50
	3–6	Мелкооолитовые Small-oolitic	34–38	30–60	10–45	22–46	12–47	21–45	3–35	25–45	45–60	44–47
	3–8	Редко- и мелкооолитовые Rare small oolitic	30–34	25–60	10–45	19–45	9–44	17–45	3–35	15–43	30–60	42–47

Анализируя оолитовые руды Лисаковского месторождения, следует отметить, что руда I типа имеет в основном крупно- и среднеоолитовую форму с минимальным количеством сростков оолитов с примесями и может хорошо разделяться при обогащении.

Руда II типа представляет собой крупно-, средне- и мелкооолитовый вид, включает значительное количество сростков оолитов с примесями, что затрудняет в процессе обогащения отделение примесей.

Оолитовая железная руда III типа представляет собой скопления относительно крупных, средних и мелких оолитов с большим количеством примесей, которые образуют прочные сростки с оолитами, что требует больших затрат на измельчение и сортировку в процессе подготовки руды к обогащению.

Богатый железорудный концентрат содержит 59,5–60 % железа, 6,0–6,5 % диоксида кремния, немагнитная фракция – 7,0–9,5 %, при этом содержание железа в хвостах обогащения менее 23,0 %.

Из руд II и III типа, содержащих до 40,0 % железа, получен гравитационно-магнитный концентрат, содержащий 57,8 % железа, 10,7–11,0 % диоксида кремния и 12,1–12,5 % гидратной влаги.

Гранулометрический анализ оолитовых руд и концентратов

Гранулометрический анализ руд показывает: руды I и II сорта состоят на 80 % из фракции –0,63+0,16 мм; количество основных фракций в руде III сорта понижается до 60 %, а количество фракций более 0,63 и менее 0,16 мм повышается суммарно с 20 до 40 %. Железорудный концентрат после обогащения содержит более 95 % фракции –0,63 +0,16 мм [3, 4].

Характер изменения качества оолитовых лисаковских железных руд I, II и III типов и концентрата гравитационного и магнитного обогащения представлен в табл. 3 [3, 4, 6].

Таблица 3. Качественный состав Лисаковской руды и концентрата

Table 3. Qualitative composition of Lisakovsky ore and concentrate

Крупность/Coarseness		Химический состав/Chemical composition, %									P Fe-100, %
фракция, мм fraction, mm	Выход, % Yield, %	Fe _{общ} Fe _{ген}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	
I тип руды/I type of ore											
>0,63	16,2	24,38	12,59	48,49	2,16	1,19	1,31	0,35	0,030	0,27	1,108
0,315...0,63	42,8	45,56	2,05	16,63	4,65	1,98	1,04	0,30	0,024	0,74	1,578
0,16...0,315	34,1	33,93	2,24	39,31	2,82	1,49	1,14	0,28	0,027	0,48	1,415
<0,16	6,9	30,70	0,50	45,59	2,49	1,98	1,14	0,26	0,027	0,39	1,270
общ/gen	100	37,14	3,72	31,52	3,47	1,68	1,12	0,30	0,026	0,55	1,425
II тип руды/II type of ore											
>0,63	14,9	19,58	4,02	53,49	2,53	0,27	0,77	0,15	0,036	0,28	1,430
0,315...0,63	26,2	21,31	2,41	56,92	2,43	0,37	1,06	0,21	0,020	0,31	1,408
0,16...0,315	52,2	31,69	2,81	38,43	3,34	0,37	1,06	0,21	0,023	0,51	1,608
<0,16	6,7	18,24	3,22	52,95	2,24	0,74	0,87	0,19	0,023	0,22	1,205
общ/gen	100	26,26	2,91	46,49	2,91	0,38	1,00	0,20	0,024	0,40	1,502
III тип руды/III type of ore											
>0,63	28,3	29,56	0,4	39,18	4,06	0,74	1,25	0,23	0,020	0,43	1,455
0,315...0,63	27,7	37,42	0,6	29,11	3,05	0,74	1,25	0,23	0,023	0,50	1,336
0,16...0,315	31,2	46,74	0,4	11,58	4,53	0,37	1,35	0,22	0,020	0,70	1,297
<0,16	12,8	37,02	1,41	29,39	3,82	0,74	1,16	0,19	0,026	0,48	1,297
общ/gen	100	38,05	0,58	26,53	3,90	0,62	1,27	0,22	0,022	0,54	1,353
Концентрат/Concentrate											
>0,63	4,34	41,44	7,7	20,05	3,49	0,74	н/о/n/d	0,38	0,017	0,503	1,214
0,315...0,63	62,42	46,88	1,75	11,07	4,30	0,74	н/о/n/d	0,33	0,013	0,673	1,463
0,16...0,315	32,74	48,32	1,15	9,51	4,61	0,74	н/о/n/d	0,33	0,011	0,707	1,463
<0,16	0,5	38,80	1,75	25,15	3,21	0,74	0,36/	0,38	0,025	0,463	1,193
общ/gen	100	47,07	1,81	11,02	4,36	0,74	–	0,33	0,013	0,676	1,451

Руды I и II сорта по гранулометрическому составу состоят в основном (до 80 %) из фракции –0,63 +0,16 мм. В руде III сорта количество основных фракций понижается до 60 %, а количество фракций более 0,63 и менее 0,16 мм повышается суммарно до 40 % [2–4].

Результаты магнитной сепарации руд I и III сорта в лабораторных условиях показывают, что более 95 % железорудного концентрата содержится во фракции –0,63+0,16 мм, руда II типа всех фракций содержит менее 30 % и ее можно не обогащать, оставив в залежи или переместив в хвостохранилище.

В руде I, III типов содержится менее 30 % железа во фракциях более 0,63 мм, поэтому необходимо провести предварительную сортировку руд I и III для удаления фракции более 0,63 мм [7–9].

Учитывая повышенную влажность руды, практически сортировку можно создать на грохотах с размером ячейки сита 3 (5) мм. Предварительное грохочение позволяет удалить 17 % руды I типа, 28 % руды III типа. Если руду II типа удалить из общего процесса обогащения, то общее исключение руд крупнее 1,0 мм из обогащения составит 40,5 % общей массы.

Содержание тонких фракций менее 0,16 мм в рудах I–III типов составляет 8, 7 и 12 % соответственно. Расчеты показывают, что общее количество мелочи в исходной руде составит около 10 %.

Расчеты лабораторных исследований показывают, что предварительное удаление указанных фракций руды позволит повысить эффективность процесса обогащения [1].

Результаты исследований электронной микроскопии, проведенных авторами, показывают, что зерна оолитов имеют сложную структуру: часть зерен имеет оболочковую структуру, часть оолитов представлены смесью зерен различных минералов размером менее 50 микрон, поэтому для эффективного выделения железорудного концентрата необходимо измельчение.

Содержание железа в концентрате повышается за счет фракции $-0,63+0,16$ мм. Другие фракции руды I–III типа имеют пониженное содержание и их присутствие снижает качество готового концентрата.

Окись железа в рудах и концентрате находится ниже уровня 4,0 %, повышаясь во фракции крупнее 0,63 мм руды I типа до 12,59 %. Целесообразно определить магнитные свойства указанных фракций и провести сепарацию при магнитной индукции порядка 0,1 тесла.

Повышенное содержание кремнезема находится во фракциях руды крупнее 0,63 мм и менее 0,16 мм. В процессе обогащения руды содержание кремнезема во всех фракциях концентрата понижается.

Количество глинозема во всех фракциях руд I–III типов от 2,16 % (фракция $>0,63$, руда I типа) до 4,65 % (фракция $0,315-0,63$, руда I типа), в процессе обогащения повышается до 5,26 %.

Оксид кальция в руде I типа составляет 1,98 % (фракция $0,315-0,63$) и понижается до 0,74 % в концентрате. Это свидетельствует о том, что окись кальция в значительной мере сосредоточена вне оолитов. Можно предположить, что кальций связан с фосфором, образуя химические соединения типа апатит.

Содержание окиси магния в концентрате понижается до 0,36 % с 1,00–1,21 % в исходной руде.

Величина закиси марганца во всех сравниваемых материалах находится на одном уровне.

Количество серы в концентрате по сравнению с рудами I–III типа снижается на 30 % [8–11].

Содержание фосфора в процессе обогащения повышается по сравнению с содержанием в рудах I–III типов. Отмечено неравномерное распределение фосфора по фракциям руды. Меньшая концентрация фосфора содержится во фракциях $<0,16$ и крупнее 0,63 мм, во фракциях $-0,63+0,16$ мм содержится повышенное его количество.

Представленная информация свидетельствует о том, что оолиты всех трех типов руд представляют собой смесь железосодержащих зерен в обрамлении обломков, не содержащих железа. Ярко выраженной зональной структуры зерен не обнаружено. Отмечена высокая трещиноватость оолитов, что обеспечивает минимальные затраты при измельчении руд. Для определения требуемой крупности измельчения – менее 0,074 или 0,040 мм – необходимо провести дополнительные исследования [12–18].

Из представленного качества концентрата, полученного последовательно произведенными гравитационным и магнитным методами, следует, что гравитационно-магнитный концентрат представляет собой смесь оолитов крупных, средних, мелких размеров с кварцем и примесями руды, наличие которых свиде-

тельствует о том, что качество обогащения требуется улучшить.

Ярко выраженной зональной структуры зерен не обнаружено. Отмечено, что оолиты обладают высокой трещиноватостью, что обеспечивает минимальные затраты при измельчении руд [19, 20].

Рудные запасы месторождения подразделяются на 26 рудных залежей, разделенных между собой условными границами. В настоящее время разрабатывается главная залежь (участки 1–3) со средней массовой долей железа 38,2 %, мощность уступов 12–13 м. Массовая доля железа в рудах колеблется в широком диапазоне – от 14,5 до 48 % – при средней массовой доле серы 0,03 % и фосфора 0,5–0,7 %. Мощность вскрышного слоя 1–2 м в центральной части и до 20 м на периферии.

В ходе проведения лабораторных исследований мы впервые проанализировали содержание редких металлов и рассеянных элементов в рудах и концентратах.

Результаты распределения цветных, редких металлов и рассеянных элементов в процессе магнитного обогащения представлены в табл. 4 [3, 4].

Анализ результатов лабораторных исследований проб из хвостов обогащения показал, что содержания металлов: Sr, Ti, Zr, Ga, Ce, Ba, Be, Li, Cd, Y и Co, ниже кларкового значения в литосфере. Содержания Mn, Pb, As, W, Cr, Ni, Bi, Mo, V, Cu выше среднего значения содержания металлов в литосфере. Так, содержания Cu, Ag и W превышают в 5, 9 и 12,5 раз кларковые содержания.

Содержания Ti, Zr, Ga, Ge, Bi, Be, Nb, Sn, Li, Y, Sr ниже кларкового значения в литосфере и их распределение не рассматривается, т. к. не имеет практического значения.

Превышают среднее значения в литосфере Sc, Mn, Pb, W, Cr, Ni, Ba, Mo, V, Cd, Cu, Zn, Ag, в том числе, в 5 раз и более превышают значения металлы: Mn, Pb, W, Cr, Ba, Cu, Zn, Ag [4].

Выводы

1. Исследования гранулометрического состава руд показывают, что руды I и II сорта состоят в основном (до 80 %) из фракции $-0,63+0,16$ мм. В руде III сорта количество основных фракций понижается до 60 %, а количество фракций $+0,63$ и $-0,16$ мм повышается суммарно до 40 %.
2. Анализ результатов лабораторных исследований проб из хвостов обогащения показал, что содержания металлов: Sr, Ti, Zr, Ga, Ce, Ba, Be, Li, Cd, Y и Co, ниже кларкового значения в литосфере. Содержания Mn, Pb, As, W, Cr, Ni, Bi, Mo, V, Cu выше среднего значения содержания металлов в литосфере. Так, содержания Cu, Ag и W превышают в 5, 9 и 12,5 раз кларковые содержания. В отдельных случаях Mn, Pb и Bi превышают средние значения в 33, 55 и 59 раз. Выявить закономерности связи повышения содержания редких металлов и рассеянных элементов, связанных с процессами магнитного обогащения, не удалось.

Таблица 4. Результаты распределения цветных, редких и рассеянных металлов в процессе магнитного обогащения
Table 4. Results of distribution of non-ferrous, rare and scattered metals in magnetic enrichment

Номер пробы* Number	Sc	P	Sb	Mn	Pb	Ti	Zr	As	Ga	W	Cr	Ni	Ge	Bi	Ba	Be	Nb	Mo	Sn	V	Li	Cd	Cu	Yb	Y	
	r/t g/t																									
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
3*	2	500	15	1500	15	600	25	1200	5	5	8	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
4*	8	600	15	8000	15	1500	100	300	15	5	25	15	2	4	100	0,3	4	3	6	25	10	5	100	1	8	
5*	4	300	15	1000	20	800	30	500	4	5	8	40	1,5	2	100	0,3	3	6	4	100	10	5	200	1,5	5	
6*	15	800	15	10000	25	1500	25	1000	25	5	15	12	1,5	2	100	0,4	4	4	5	20	10	5	120	1,5	6	
7	3	500	15	2500	25	1000	15	1000	8	5	10	60	3	2	400	0,3	6	5	6	80	10	5	600	3	30	
8	20	600	15	8000	20	2500	20	600	10	5	12	25	1,5	2,5	100	0,3	4	3	6	40	10	5	500	1	8	
9	2	300	15	1200	12	500	25	400	8	5	10	40	1,5	2	100	0,3	4	4	4	40	10	5	600	3	30	
10	20	800	15	8000	20	1500	80	600	8	5	12	15	1,5	2	100	0,3	4	5	8	80	10	5	120	1	10	
Значение кларка/Clark value																										
	6	800	–	900	16	6000	200	5	15	1		80	7	0,2	500	6	10	3	40	150	65	0,5	100	–	28	
Отношение содержания элементов в пробах к кларковому содержанию Ratio of the content of elements in samples to the clarke content																										
3	0,33	0,63	–	1,67	0,94	0,10	0,13	240,0	0,33	5,00	0,04	0,19	0,29	20,00	0,20	0,05	0,40	1,00	0,15	0,17	0,15	10,0	1,00	–	0,29	
4	1,33	0,75	–	8,89	0,94	0,25	0,50	60,00	1,00	5,00	0,13	0,50	0,21	10,00	0,20	0,05	0,30	2,00	0,10	0,67	0,15	10,0	2,00	–	0,54	
5	0,67	0,38	–	1,11	1,25	0,13	0,15	100,0	0,27	5,00	0,04	0,15	0,21	10,00	0,20	0,07	0,40	1,33	0,13	0,13	0,15	10,0	1,20	–	0,21	
6	2,50	1,00	–	11,11	1,56	0,25	0,13	200,0	1,67	5,00	0,08	0,75	0,43	10,00	0,80	0,05	0,60	1,67	0,15	0,53	0,15	10,0	6,00	–	1,07	
7	0,50	0,63	–	2,78	1,56	0,17	0,08	200,0	0,53	5,00	0,05	0,31	0,21	12,50	0,20	0,05	0,40	1,00	0,15	0,27	0,15	10,0	5,00	–	0,29	
8	3,33	0,75	–	8,89	1,25	0,42	0,10	120,0	0,67	5,00	0,06	0,50	0,21	10,00	0,20	0,05	0,40	1,33	0,10	0,53	0,15	10,0	6,00	–	1,07	
9	0,33	0,38	–	1,33	0,75	0,08	0,13	80,00	0,53	5,00	0,05	0,19	0,21	10,00	0,20	0,05	0,40	1,67	0,20	0,53	0,15	10,0	1,20	–	0,36	
10	3,33	1,00	–	8,89	1,25	0,25	0,40	120,0	0,53	5,00	0,06	0,63	0,21	10,00	0,30	0,05	0,30	1,33	0,06	0,53	0,15	4,00	4,00	–	1,43	

*Примечание: проба 3 – концентрат магнитной сепарации фракции –5+3 мм; проба 4 – хвосты магнитной сепарации фракции –5+3 мм; проба 5 – концентрат магнитной сепарации фракции –3+1 мм; проба 6 – хвосты магнитной сепарации фракции –3+1 мм.

*Note: sample 3 – magnetic separation concentrate of fraction –5+3 mm; sample 4 – tails of magnetic separation of fraction –5+3 mm; sample 5 – magnetic separation concentrate of fraction –3+1 mm; sample 6 – magnetic separation tails of –3+1 mm fraction.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Оолитовые железные руды Лисаковского месторождения Кустанайской области // под ред. И.П. Бардина. – М.: Изд-во «Академия наук», 1962. – 234 с.
- Каскатаева К.Б., Кряжева Т.В., Аскарлова Н.С. Минеральный состав руд Лисаковского месторождения // Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации: Международная научно-практическая конференция. (Сагинновские чтения № 11). – Караганда: КарГТУ, 2019. – Ч. 3. – С. 287–290.
- Каскатаева К.Б., Каскатай А.М., Кряжева Т.В. Характеристика оолитовых руд Лисаковского месторождения // Проблемы геологии и освоения недр: XXIV Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова. – Томск: ТПУ, 2020. – С. 205–207.
- Результаты изучения содержания редких металлов в рудах Лисаковского месторождения / К.Б. Каскатаева, Т.В. Кряжева, В.В. Дьяконов, А.В. Садчиков, А. Каскатай // Управление инновационными процессами в условиях модернизации образования и науки: II Международная научно-практическая конференция. – Мюнхен, Германия, 2020. – С. 225–232.
- Бекмухаметов А.Е. Металлогения экзогенных руд железа Торгайского прогиба и перспективы промышленного освоения их Лисаковским ГОКом. – Алматы: Гылым, 2003. – 256 с.
- Исследования лисаковских железных руд / Т.В. Кряжева, Г.Ж. Досетова, К.Т. Шынбергенова, Л.А. Максютин // Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Экибастуз: КузГТУ, 2018. – С. 389–397.
- Рева И.В., Сорокина А.М. Геохимические особенности оолитовых железняков Лисаковского месторождения (Торгайский прогиб, Казахстан) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – Т. 1. – С. 169–171.
- Юрьев Б.П., Дудко В.А. Разработка экологически чистой технологии обогащения железных руд // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 10 (1426). – С. 35–45.
- Saidung S., Starostin V.I., Prokofiev V.Y. Ore-forming fluids of Xishimen skarn iron deposit, China // Geology of Ore Deposits. – 2017. – V. 59. – № 2. – P. 176–182.
- Trushko V.L., Trushko O.V., Potemkin D.A. Provision of stability of development mining at Yakovlevo iron ore deposit // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – V. 11. – № 18. – P. 9248–9255.
- Garnit H., Bouhrel S. Petrography, mineralogy and geochemistry of the late Eocene oolitic ironstones of the Jebel Ank, southern Tunisian atlas // Ore Geology Reviews. – 2017. – V. 84. – P. 134–153.
- Process oriented characterization of oolitic iron concentrate during dephosphorisation by roasting and leaching / K. Ionkov, S. Gaydardzhiev, O. Gomes, R. Neumann, A. Correa de Araujo // IMPC 2016 – 28th International mineral processing congress. Conference proceedings. – Québec, Canada: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2016. – 116 p.
- Quast K.A review on the characterisation and processing of oolitic iron ores // Minerals Engineering. – 2018. – V. 126. – P. 89–100.
- Potemkin D.A., Popov M.G., Trushko O.V. Examination and analysis of actual stability of mine workings at the Yakovlevsky iron ore deposit // Arpn journal of engineering and applied sciences. – 2018. – V. 13. – № 7. – P. 2490–2499.
- Сорокина А.М., Рева И.В., Рудмин М.А. Минеральная форма редкоземельных элементов в морских ооидовых железняках // Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных

- металлов – от прогноза к добыче: Сборник тезисов докладов I молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ. – М.: Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, 2020. – С. 179–182.
16. Такишов А.А., Капсалямов Б.А., Шынбергенова К.Т. Техногенные отходы – как резерв минерально-сырьевого комплекса // Академик О.А. Байконуров и его вклад в развитие горного дела, науки и образования Казахстана: Материалы XII Международных Байконуровских чтений. – Жезказган, 2018. – С. 378–383.
17. Bio-extraction of phosphorus from goethite ore with alkali addition / L. Zhang, S. Ankathi, M. Zhang, T. Eisele // Minerals engineering. – 2019. – V. 141. – P. 105850.
18. Kokal H.R., Farias J.M., Chop S.V. A roasting-leaching demonstration plant for removal of phosphorus from iron ore // Hydrometallurgy 2008: Proceedings of the 6th International Symposium. – Финикс, Аризона, 2008. – 431 p.
19. Дефосфорация лисаковского железорудного концентрата / Л.А. Зайнуллин, В.Г. Карелин, А.Ю. Епишин, Д.А. Артов // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья. Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр». – Екатеринбург: ОАО «Уралмеханобр», 2019. – С. 217–219.
20. Карелин В.Г., Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю. Кинетика высокотемпературной дегидратации лисаковского железорудного концентрата // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 8. – С. 656–661.

Поступила 01.03.2021 г.

Информация об авторах

Каскатаева К.Б., докторант кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Некоммерческого акционерного общества «Карагандинский технический университет».

Кряжева Т.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Некоммерческого акционерного общества «Карагандинский технический университет».

Садчиков А.В., кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Некоммерческого акционерного общества «Карагандинский технический университет».

Дьяконов В.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой общей геологии и геологического картирования Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ).

UDC 553.31

CHARACTERISTICS OF ORES OF THE LISAKOVSKY DEPOSIT FOR THEIR COMPLEX PROCESSING

Kuralay B. Kaskataeva¹,
aigakk@mail.ru

Tatyana V. Kryazheva¹,
kryazheva_t@mail.ru

Alexander V. Sadchikov¹,
a.sadchikov@kstu.kz

Viktor V. Dyakonov²,
mdf.rudn@mail.ru

¹ Non-profit Joint Stock Company «Karaganda Technical University»,
56, Nazarbayev avenue, Karaganda, 100027, Kazakhstan.

² Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University (MGRI),
23, Miklukho-Maklay street, Moscow, 117997, Russia.

The relevance of the study is caused by the necessity to assess the possibility of associated extraction of non-ferrous, rare metals and scattered elements. The study is based on the results of analysis of samples of oolite ores from the western section of the field. In the course of research. The industrial types of iron ores of the deposit are studied, the distribution of rare metals by various industrial types, fractions of Lisakovsky iron ores and concentrates is considered

The aim of the research is to study the characteristics of the ores of the Lisakovsky deposit for their complex processing.

The object of research is the oolite ores of the Lisakovsky deposit.

Method. Laboratory studies of ores and concentrates of the Lisakovsky deposit were carried out. Granulometric analysis by types and grades of ores was carried out. Chemical composition of ores and concentrates by fractions was studied

Results. Studies of the granulometric composition of ores show that grade I and II ores consist mainly (up to 80 %) of a fraction of $-0,63+0,16$ mm. In grade III ore, the number of main fractions decreases to 60 %, and the number of fractions of $+0,63$ and $-0,16$ mm increases to a total of 40 %. Analysis of the results of laboratory studies of samples from the enrichment tailings shown that the content of metals: Sr, Ti, Zr, Ga, CE, Ba, Ve, Li, Cd, Y and Co, is below the standard value in the lithosphere. The content of Mn, Pb, As, W, Cr, Ni, Bi, Mo, V, Cu is higher than the average value of the metal content in the lithosphere. Thus, the contents of Cu, Ag and W exceed the clarke contents by 5, 9 and 12.5 times, and the contents of Mn, Pb and Bi are higher than the average values by 33, 55 and 59 times.

Key words:

Productive thickness, oolites, ore types, phase composition, mineral composition, internal structure of oolites, concentrate, granulometric composition, chemical composition.

REFERENCES

- Bardin I.P. *Oolitovye zheleznye rudy Lisakovskogo mestorozhdeniya Kustanayskoy oblasti* [Oolite iron ores of the Lisakovsky district of the Kostanay region]. Moscow, Akademiya nauk Publ., 1962. 234 p.
- Kaskataeva K.B., Kryazheva T.V., Askarova N.C. Mineralny sostav rud Lisakovskogo mestorozhdeniya [Mineral composition of the Lisakovsky Deposit ores]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnova realizatsii Plana natsii* [International scientific and practical conference. Integration of science, education and production is the basis for the implementation of the national Plan]. Karaganda, KarGTU Publ., 2019. pp. 287–290.
- Kaskataeva K.B., Kaskatay A.M., Kryazheva T.V. Kharakteristika oolitovykh rud Lisakovskogo mestorozhdeniya [Characteristics of oolite ores of the Lisakovsky Deposit]. *XXIV Mezhdunarodny nauchny simpozium studentov i molodykh uchenykh imeni akademika M.A. Usova. Problemy geologii i osvoeniya nedr* [XXIV international scientific Symposium of students and young scientists named after academician M.A. Usov. Problems of Geology and development of mineral resources]. Tomsk, TPU Publ., 2020. pp. 205–207.
- Kaskataeva K.B., Kryazheva T.V., Diakonov V., Sadchikov A.V., Kaskatay A. Rezultaty izucheniya sodержaniya redkikh metallov v rudakh Lisakovskogo mestorozhdeniya [Results of studying the content of rare metals in the ores of the Lisakovsky Deposit]. *II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Upravlenie innovatsionnymi protsessami v usloviyakh modernizatsii obrazovaniya i nauki* [II international scientific and practical conference. Management of innovative processes in the conditions of modernization of education and science]. Munich, Germany, 2020. pp. 225–232.
- Bekmukhametov A.E. *Metallogeniya ekzogennykh rud zheleza Torgayskogo progiba i perspektivy promyshlennogo osvoeniya ikh Lisakovskim GOKom* [Metallogeny of exogenous iron ores of the Torgay bend and prospects for their industrial development by Lisakovsky GOK]. Almaty, Gylym Publ., 2003. 256 p.
- Kryazheva T.V., Dosetova G.Zh., Shynbergenova K.T., Maksyutin L.A. Issledovaniya lisakovskikh zheleznykh rud [Research of lisakovsky iron ores]. *Povyshenie kachestva obrazovaniya, sovremennyye innovatsii v nauke i proizvodstve* [Improving the quality of education, modern innovations in science and production]. Ekibastuz, KuzGTU Publ., 2018. pp. 389–397.
- Reva I.V., Sorokina A.M. Geokhimicheskie osobennosti oolitovykh zheleznyakov Lisakovskogo mestorozhdeniya (Torgayskiy progib, Kazakhstan) [Geochemical features of oolitic ironstones of the Lisakovsky birthplace (torgaysky deflection, Kazakhstan)]. *Problemy geologii i osvoyeniya nedr. Trudy XXIII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya rozhdeniya akademika K.I. Saptayeva, 120-letiyu so dnya rozhdeniya professor K.V. Radugina* [Problems of Geology and subsoil development. Proc. of the XXIII international Symposium

- named after academician M.A. Usov of students and young scientists, dedicated to the 120th anniversary of the birth of academician K.I. Satpayev, the 120th anniversary of the birth of Professor K.V. Radugin]. Tomsk, TPU Publ., 2019. pp. 169–171.
8. Yuriev B.P., Dudko V.A. Development of environmentally friendly technology for iron ore enrichment. *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 10 (1426), pp. 35–45. In Rus.
 9. Saidung S., Starostin V.I., Prokofiev V.Y. Ore-forming fluids of Xishimen skarn iron deposit. China. *Geology of Ore Deposits*, 2017, vol. 59, no. 2, pp. 176–182.
 10. Trushko V.L., Trushko O.V., Potemkin D.A. Provision of stability of development mining at Yakovlevo iron ore deposit. *International Journal of Applied Engineering Re-search*, 2016, vol. 11, no. 18, pp. 9248–9255.
 11. Garnit H., Bouhlef S. Petrography, mineralogy and geochemistry of the late Eocene oolitic ironstones of the Jebel Ank, southern Tunisian atlas. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 84, pp. 134–153.
 12. Ionkov K., Gaydardzhiev S., Gomes O., Neumann R., Correa de Araujo A. Process oriented characterization of oolitic iron concentrate during dephosphorisation by roasting and leaching. *IMPC 2016 – 28th International mineral processing congress Conference proceedings*. Québec, Canada, 2016. pp. 116–122.
 13. Quast K. A review on the characterisation and processing of oolitic iron ores. *Minerals Engineering*, 2018, vol. 126, pp. 89–100.
 14. Potemkin D.A., Popov M.G., Trushko O.V. Examination and analysis of actual stability of mine workings at the yakovlevsky iron ore deposit. *Arpn journal of engineering and applied sciences*, 2018, vol. 13, no. 7, pp. 2490–2499.
 15. Sorokina A.M., Reva I.V., Rudmin M.A. Mineralnaya forma redkozemelnykh elementov v morskikh ooidovykh zheleznyakakh [Mineral form of rare earth elements in marine ooid ironstones]. *Sbornik tezisev dokladov I molodezhnoy nauchno-obrazovatelnoy konferentsii CNIGRI – Mineralno-syrevaya bazaalmazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov – ot prognoza k dobyche* [Collection of abstracts of the I youth scientific and educational conference TsNIGRI – Mineral resource base of diamonds, precious and non-ferrous metals – from forecast to production]. Moscow, Central Scientific-Research Geological Exploration Institute of Non-ferrous and Noble Metals Publ., 2020. pp. 179–182.
 16. Takishov A.A., Kapsalyamov B.A., Shynbergenova K.T. Tekhnogennye otkhody – kak rezerv mineralno-syrevovogo kompleksa [Technogenic waste – as a reserve of mineral raw materials complex]. *Materialy XII Mezhdunarodnykh Baykonurovskikh chteniy. Akademik O.A. Baykonurov i ego vklad v razvitiye gornogo dela, nauki i obrazovaniya Kazakhstana* [Materials of the XII international Baikonur readings. Academician O.A. Baikonurov and his contribution to the development of mining, science and education in Kazakhstan]. Zhezkazgan, JESU Publ., 2018. pp. 378–383.
 17. Zhang L., Ankathi S., Zhang M., Eisele T. Bio-extraction of phosphorus from goethite ore with alkali addition. *Minerals engineering*, 2019, vol. 141, pp. 105850.
 18. Kokal H.R., Farias J.M., Chop S.V. A roasting-leaching demonstration plant for removal of phosphorus from iron ore. *Proceedings of the 6th International Symposium*. Phoenix, AZ, Hydrometallurgy Publ., 2008. pp. 431–438.
 19. Zainullin L.A., Karelin V.G., Epishin A.Yu., Artov D.A. Defosforatsiya lisakovskogo zhelezorudnogo kontsentrata [Dephosphorization of lisakovsky iron ore concentrate]. *Sovremennye tendentsii v oblasti teorii i praktiki dobychi i pererabotki mineralnogo i tekhnogennogo syrya. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 90-letiyu so dnya osnovaniya instituta «Uralmekhanobr»* [Current trends in the theory and practice of mining and processing of mineral and man-made raw materials. Materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Foundation of the Institute «Uralmekhanobr»]. Ekaterinburg, JSC «Uralmekhanobr» Publ., 2019. pp. 217–219.
 20. Karelin V.G., Zainullin L.A., Epishin A.Yu. Kinetics of high-temperature dehydration of lisakovsky iron ore concentrate. *Proceedings of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 656–661. In Rus.

Received: 1 March 2021.

Information about the authors

Kuralay B. Kaskataeva, doctoral student, Non-profit Joint Stock Company «Karaganda Technical University».

Tatyana V. Kryazheva, Cand. Sc., associate professor, Non-profit Joint Stock Company «Karaganda Technical University».

Alexander V. Sadchikov, Cand. Sc., senior lecturer, Non-profit Joint Stock Company «Karaganda Technical University».

Viktor V. Dyakonov, Dr. Sc., professor, head of the Department of General Geology and geological mapping, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University (MGRI).

УДК 553.493:550.42

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ГЕОХИМИИ И УСЛОВИЯМ ОБРАЗОВАНИЯ ГЕРМАНИЙ-УГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СПЕЦУГЛИ (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)

Арбузов Сергей Иванович¹,
siarbuzzov@mail.ru

Чекрыжов Игорь Юрьевич²,
chekr2004@mail.ru

Ильенок Сергей Сергеевич¹,
ilenokss@tpu.ru

Соктоев Булат Ринчинович¹,
bulatsoktoev@tpu.ru

Соболева Елена Евгеньевна³,
SobolevaEE@suek.ru

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

² Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостоку, 159.

³ РУ «Новошахтинское» ООО «Приморскуголь»,
Россия, 690090, г. Владивосток, ул. Тигровая, 29.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки прогнозно-поисковых критериев для выявления стратегически важного типа германиевого сырья – германий-угольных месторождений.

Цель: изучить геохимические особенности и условия образования комплексного редкометалльного оруденения в углях месторождения Спецугли (Дальний Восток) и на его примере разработать геолого-геохимическую модель формирования месторождений подобного типа.

Объекты: угли, углевлещающие породы, подземные воды и породы фундамента германий-угольного месторождения.

Методы: геолого-геохимическое изучение и опробование, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, инструментальный нейтронно-активационный анализ, сканирующая электронная микроскопия, оптическая микроскопия, рентгенофазовый анализ, корреляционный анализ.

Результаты. Получены новые данные по геологическому строению и особенностям геохимии углей и углевлещающих пород германий-угольного месторождения Спецугли в Приморье. Обоснован комплексный полиэлементный состав редкометалльного оруденения, согласующийся с особенностями геохимии и минерогении пород фундамента и обрамления Павловской впадины. Для металлоносных углей характерны аномально высокие, превышающие в десятки и сотни раз средние содержания для бурых углей мира, концентрации Ge, Sb, Hg, W, Li, Be, Cs, и As. Менее аномальны уровни накопления U, Mo, Y, Rb, лантаноидов, Zr и Ga. Выполненный комплексный минералого-геохимический и геолого-структурный анализ особенностей состава и строения Ge-угольного месторождения Спецугли позволил пересмотреть принятую гидротермальную модель его образования и обосновать предложенную ранее гипергенную модель, когда источником металлов являются породы фундамента, вмещающие угольные месторождения. Формирование Ge и сопутствующего оруденения в месторождении Спецугли происходило под влиянием формирующейся коры выветривания по редкометалльному граниту вознесенского комплекса, прорванному дайками позднепермского возраста. Месторождение приурочено к возвышенности гранитного состава, образуя концентрически-зональный ореол Ge и сопутствующих элементов вокруг неё. Граниты подвергнуты гидротермально-метасоматическим изменениям докайнозойского возраста с формированием кварц-альбит-микроклиновых метасоматитов и грейзенов, содержащих W-Mo и Hg-Sb-As минерализацию. Образование редкометалльного оруденения в углях связано с формированием каолиновой коры выветривания по гранитам, выносом и переотложением основных элементов в окружающие палеоторфяники в палеогеновое время.

Ключевые слова:

Германий-угольное месторождение, уголь, геохимия, редкие элементы, редкометалльное оруденение, условия образования, гидrogenная модель.

Введение

Германий – основной попутный элемент в углях, извлечение которого освоено промышленностью. Германий-угольное месторождение Спецугли, открытое в середине 60-х гг. прошлого столетия, в настоящее время является одним из крупнейших в мире и

единственным обрабатываемым месторождением такого типа в Российской Федерации. Аналогичные месторождения известны и эксплуатируются в Китае [1–5]. Их отличительной особенностью является комплексный характер руд, включающих помимо германия также вольфрам, бериллий, сурьму и другие ценные элементы-примеси.

Несмотря на более чем полувековой период изучения месторождения Спецугли и промышленную отработку значительной его части, дискуссии о природе его формирования не прекращаются. Основным вопросом, не решенным до настоящего времени, является природа источника германия и других сопутствующих элементов. По одним представлениям это продукты коры выветривания пород обрамления бассейна, по другим – гидротермальные растворы. Первая модель, обоснованная на первом этапе изучения месторождения, получила название гипергенной [6–8]. Вторая модель появилась несколько позднее, хотя и почти одновременно с гипергенной, и названа гидротермально-осадочной, эксгалиционно-осадочной или эксфильтрационной [9–18 и др.]. В основу ее изначально были положены результаты исследования распределения повышенных содержаний германия в торфах Налычевской депрессии полуострова Камчатка в зоне влияния термального источника [9]. Привлекательность этой модели обусловлена сходством геохимических ассоциаций, характерных для большинства германий-угольных месторождений мира, объясняемых привнесом этих элементов синхронными угленакоплением гидротермами.

В настоящее время на месторождении Спецугли ведется разработка германиеносных углей открытым способом. Месторождение вскрыто карьером на полную глубину, в том числе вскрыт фундамент, что позволяет не только моделировать, но визуально наблюдать и изучать строение месторождения, картировать следы различных геологических процессов, протекавших здесь в различные геологические периоды. Данная работа посвящена анализу новых, полученных в последнее десятилетие геолого-геохимических данных с целью сравнения двух основных гипотез образования месторождения и разработке геолого-геохимической модели его формирования. Решение этого вопроса имеет не только большое научное значение, но и чрезвычайно важно для решения задачи поисков подобного оруденения на других площадях и в других регионах.

Особенности геологического строения месторождения

Месторождение германия Спецугли расположено на юго-западной окраине Ханкайского срединного массива в непосредственной близости от Вознесенского рудного района, известного своими месторождениями W, Sn и флюорита, связанными с палеозойским гранитоидным магматизмом. Месторождение расположено в восточной части Павловской впадины (рис. 1), одной из депрессий, составляющих Павловское угольное поле [19]. Общие особенности геологического строения германий-угольного месторождения Спецугли в пределах Павловского буроугольного месторождения достаточно подробно описаны в многочисленных работах [7, 17, 20–22].

Фундамент. Фундамент Павловской впадины гетерогенный. Представлен кембрийскими осадочно-вулканогенными толщами григорьевской серии, сложенной кварц-серицитовыми, серицит-хлоритовыми, углисто-графитовыми сланцами, песчаниками, алев-

ролитами, туфами, туффитами, лавобрекчиями кислого состава и, редко, прослоями известняков [23]. Важную роль в строении фундамента также играют магматические породы, преимущественно палеозойские гранитоиды (рис. 1).

Непосредственно на участке Спецугли фундамент достаточно однороден по составу. Представлен он средне-крупнозернистыми гранитами с единичными дайками предположительно андезитового состава и хорошо развитой каолиновой корой выветривания. Мощность коры выветривания достигает 40–50 м [12]. Граниты биотитовые, грейзенизированные. В связи с этим комплексом за пределами вскрытой части фундамента описаны также скарпные тела, распространенные в зоне контакта гранитоидов с карбонатными породами. Рельеф фундамента впадины сильно дифференцирован. Имеют место возвышенности и пониженные в палеорельефе участки. Относительное превышение поднятий над долинами составляет 40–80 м. В связи с этим мощность осадочных отложений кайнозоя колеблется на участке от 42 до 200 м [12]. В пределах месторождения и в непосредственной близости от него выделены 5 поднятий, одно из которых расположено в центре месторождения Спецугли. Характер расположения возвышенностей в фундаменте позволяет рассматривать их как реликты водораздела существовавшей до формирования Павловской впадины речной сети. Отсутствие в фундаменте и перекрывающих отложениях постугольных разрывных нарушений, а также следов конседиментационной складчатости не дает оснований для отнесения этих возвышенностей к конседиментационным поднятиям [11], а позволяет рассматривать их как реликты водораздела древней гидросети.

В настоящее время угледобывающим разрезом вскрыт участок фундамента в пределах центрального поднятия. На участке хорошо сохранилась элювиальная кора выветривания по гранитам. Отчетливо видна реликтовая структура средне-крупнозернистого гранита без следов тектонических нарушений (зон брекчирования, катаклаза, милонитизации). Хорошо проявлена вертикальная зональность коры выветривания, выраженная в смене зоны дезинтеграции гидрослюдисто-каолининовой и каолининовой зоной. Реликтовая структура гранита сохраняется по всему разрезу. В центре возвышенности под корой выветривания имеется останец слабо выветрелого грейзенизированного гранита. Гранит, согласно классификации TAS, относится к группе от нормально-щелочных до умеренно щелочных лейкогранитов. Сумма щелочей составляет 6,9–8,6 %, содержание кремнезема 73–76 % (табл. 1).

В границах вскрытого разрезом гранитного тела также имеется выход дайки предположительно андезитового состава с хорошо сохранившейся мелкозернистой реликтовой структурой. Следов тектонической активности после формирования коры выветривания с формированием зон дезинтеграции – путей миграции термальных растворов – не выявлено. Гидротермально-метасоматической зональности, обусловленной гидротермальными процессами после

формирования коры выветривания в пределах пород фундамента, также не установлено. Исходные, не подвергшиеся выветриванию, граниты, изученные в останце, подвержены альбитизации, микроклинизации и наложенной на них грейзенизации. Грейзенизация проявлена слабо, преимущественно в виде развития мусковита по полевому шпату, хлоритизации биотита и формировании специфической акцессорной минерализации. Ранние альбит-микроклиновые метасоматические преобразования сопровождаются также формированием вторичного зеленого биотита. В грейзенизированных гранитах установлена разнообразная минерализация, представленная сульфидами:

молибденитом, мышьяковистым пиритом, галенитом, а также касситеритом, фосфатами и фтор-карбонатами редкоземельных элементов.

Возраст гранитов из центрального поднятия, определенный U-Pb методом (SHRIMP-II, АЦ ВСЕГЕИ), составляет $448,2 \pm 4,1$ млн лет. Результаты определения изотопного возраста, наряду с геохимическими особенностями гранитов, позволяют отнести их к вознесенскому комплексу редкометалльных протилизионитовых гранитов [24–26]. Исследованные граниты отличаются аномальной радиоактивностью. В изученных образцах содержание тория изменяется от 38,8 до 118 г/т, урана – от 10 до 37,6 г/т (табл. 2).

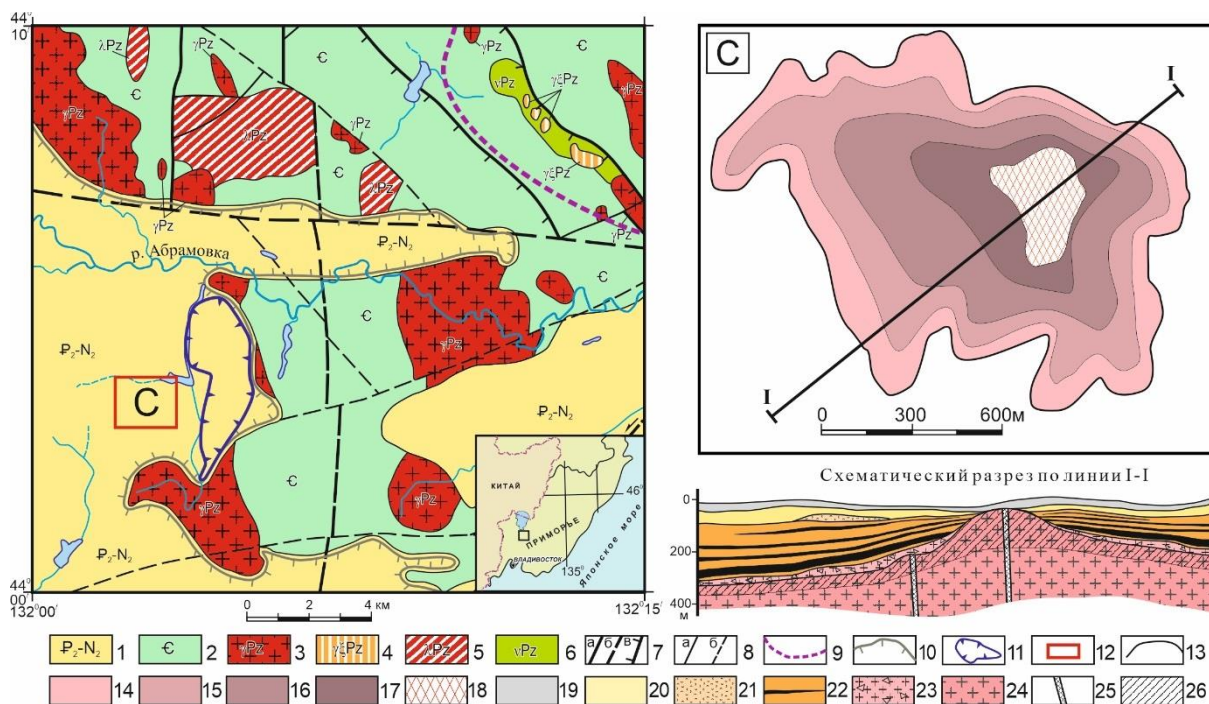


Рис. 1. Геологическая карта района (по [23] с изменениями и дополнениями авторов), схема распределения германия и геологический разрез месторождения Спецугли. Условные обозначения: 1 – палеоген-неогеновые песчано-галечниковые (неоген) и угленосные отложения (песчаники, алевролиты, аргиллиты и угли) (палеоген); 2 – кембрийские отложения (сланцы серицитовые, кварц-серицитовые, углеродистые, алевролиты, линзы известняков); Палеозойские магматические породы: 3 – граниты; 4 – граносиениты; 5 – риолиты; 6 – габбро и габбро-диориты; 7 – главные разломы: а – достоверные, б – предполагаемые, в – надвиги; 8 – второстепенные разломы: а – установленные, б – предполагаемые; 9 – Вознесенский рудный район; 10 – граница угленосных отложений Павловского угольного поля; 11 – рабочий участок Павловский-2; 12 – контур участка месторождения Спецугли (С); 13 – контур промышленного оруденения с содержанием Ge в углях (г/т): 14 – >50; 15 – >200; 16 – >400; 17 – >1000; 18 – выход фундамента; Отложения: 19 – современные рыхлые; 20 – неогеновые слабо литифицированные; 21 – линзы туфов и туффитов; 22 – палеогеновые угленосные; 23 – переотложенная кора выветривания; 24 – интрузивные породы (граниты); 25 – дайки; 26 – кора выветривания

Fig. 1. Geological map of the studied area (by [23] with changes and supplements of the authors) and scheme of Ge distribution and geological cross-section of the Spetsugli deposit. Legend: 1 – Paleogene-Neogene sandy-pebble (Neogene) and coal-bearing sediments (sandstones, siltstones, claystones and coals) (Paleogene); 2 – Cambrian sediments (sericite, quartz-sericite and carbonaceous slates, siltstones, limestone lenses); Paleozoic magmatic rocks: 3 – granites; 4 – granosyenite; 5 – rhyolite; 6 – gabbro and gabbro-diorite; 7 – major faults: a – proven, б – predicted, в – overthrusts; 8 – secondary faults: a – determined, б – predicted; 9 – Voznesenky ore district; 10 – boundary of coal-bearing deposits of the Pavlovskoe coal field; 11 – Pavlovsky-2 working area; 12 – contour of the Spetsugli deposit area (C); 13 – contour of the industrial mineralization with the Ge content in coals (ppm): 14 – >50; 15 – >200; 16 – >400; 17 – >1000; 18 – foundation outcrop; Deposits: 19 – modern soft sediments; 20 – Neogene slightly lithified sediments; 21 – tuff and tuffite lenses; 22 – Paleogene carbonaceous sediments; 23 – redeposited weathering crust; 24 – intrusive rocks (granites); 25 – dikes; 26 – weathering crust

Таблица 1. Химический состав слабо измененных гранитов фундамента месторождения Спецугли, %

Table 1. Chemical composition of weakly altered granites from the foundation of the Spetsugli deposit, %

Компоненты Components	СУ-81-19А	СУ-81-19В	СУ-81-19С	СУ-55-18
SiO ₂	73,01	76,17	75,31	74,56
TiO ₂	0,52	0,14	0,34	0,27
Al ₂ O ₃	11,11	11,60	11,82	13,63
Fe ₂ O ₃	6,10	2,69	3,21	1,22
MnO	0,13	0,03	0,05	0,03
CaO	0,49	0,16	0,56	0,25
MgO	0,48	0,12	0,19	0,13
K ₂ O	4,05	6,17	3,85	5,13
Na ₂ O	2,85	2,46	3,44	3,06
P ₂ O ₅	0,09	0,05	0,10	0,08
H ₂ O-	0,04	0,07	0,17	0,28
ППП/LOI	1,05	0,27	0,53	1,04
Сумма/Sum	99,91	99,92	99,57	99,68
K ₂ O+ Na ₂ O	6,90	8,63	7,29	8,19

Примечание: ППП – потери при прокаливании.

Note: LOI – losses of ignition.

Исследованные образцы двуслюдяного гранита отличаются также аномально высоким содержанием большой группы редких элементов (РЗЭ, Y, Be, Rb, Cs, Nb, Se, Hf), W, Sn и элементов-халькофилов (Mo, Pb, Sb, Ag, As, Co).

Возраст дайки в гранитах, определенный U-Pb методом (SHRIMP-II, АЦ ВСЕГЕИ), составляет 263±1,6 млн лет, что соответствует поздней перми. Ранее эти дайки рассматривались как дайковый комплекс позднего мела [12] и даже кайнозоя [28]. С ними связывалось гидротермальное редкометалльное оруденение в обрамлении Павловской впадины и в угленосных отложениях на участке Спецугли [17, 28]. Как следует из полученных новых данных, формирование даек существенно оторвано по времени от периода углеобразования.

Крупных тектонических нарушений в пределах осадочного чехла кайнозойского возраста вблизи месторождения не выявлено [23]. Нет сведений и о наличии таковых в фундаменте в пределах этого участка угленосной впадины. Тем не менее некоторая тектоническая активность отмечается на исследуемой территории не только наличием здесь позднепалеозойских даек, но и общим наклоном угленосных отложений от 2 до 12° в западном направлении к центру угленосной впадины, а также наклоном фундамента в том же направлении. Тектоническая активность, выразившаяся в формировании зон катаклаза и милонитизации в палеозойских гранитоидах и кембрийских сланцах, проявлена и в горно-складчатом обрамлении Павловской впадины. В связи с ней известно гидротермальное (?) РЗЭ оруденение в дайках и сопутствующих им аргиллизитах к востоку от участка Павловский-2 Павловского буроугольного месторождения [28]. Тектонические активные зоны сдвигового характера постугольного заложения выявлены в пределах того же участка в 2 км к северо-западу от месторождения Спецугли, а также на участке Южном [20].

Таблица 2. Содержание микроэлементов в гранитах фундамента, г/т

Table 2. Content of trace elements in the granites of the foundation, ppm

Элемент Element	СУ-63-19	СУ-81-19А	СУ-81-19В	СУ-81-19С	СУ-55-18	СУ-62-19	Гранит* Granite
Li	52,4	92,6	27,0	36,7	28,1	45,5	37,0
Be	6,7	6,1	3,2	8,3	3,9	6,0	3,6
Sc	14,1	18,2	5,9	8,9	8,1	8,0	6,5
V	19,1	32,1	13,8	16,0	6,8	18,0	38,0
Cr	7,1	8,5	7,6	3,1	6,2	4,2	5,6
Co	55,6	34,2	15,1	60,0	14,3	1,2	1,0
Ni	4,5	4,3	4,1	5,6	0,4	1,2	3,5
Cu	5,8	11,4	10,0	21,0	4,0	3,7	10,0
Zn	69,7	100,1	37,9	59,9	49,6	56,0	39,0
Ga	30,0	30,6	24,2	34,6	36,3	36,7	18,0
Ge	3,0	2,4	1,9	2,7	25,7	3,2	2,8
As	35,2	3,5	3,1	9,5	72,8	2,6	1,6
Se	8,9	6,0	1,6	12,8	47,5	4,9	0,07
Rb	396	386	593	327	311	357	180
Sr	101	80	89	98	82	49,3	150
Y	378	270	101	156	467	154	50
Zr	130	230	100	94	193	219	180
Nb	35,9	76,3	29,8	51,6	38,4	57,7	21
Mo	3,7	5,0	7,4	4,7	1,8	0,48	1,5
Ag	0,46	0,48	0,26	0,18	0,21	0,27	0,038
Cd	0,75	0,42	0,58	0,29	0,27	0,14	0,17
Sn	9,4	14,6	4,9	8,9	6,0	11,9	3,0
Sb	4,9	1,7	1,0	2,7	7,4	1,2	0,2
Cs	7,0	8,1	5,5	6,0	7,1	11,2	5,0
Ba	397	314	463	294	406	242	750
La	414	261	196	652	1063	207	48
Ce	1124	609	338	1193	991	95,3	72
Pr	79,1	62,8	44,7	128	250	55,6	7,4
Nd	221	250	173	484	808	196	31
Sm	54,3	61,9	40,0	107	187	36,3	7,5
Eu	2,6	2,5	1,9	4,2	8,4	2,1	1,4
Gd	52,7	51,3	31,8	78,4	118	33,7	6,8
Tb	9,5	9,0	4,8	11,1	17,4	4,5	1,1
Dy	54,0	56,0	27,9	54,7	88,0	26,2	5,0
Ho	10,5	9,4	4,3	7,1	12,8	5,0	1,3
Er	30,9	31,0	12,4	18,6	32,4	15,7	3,1
Tm	4,1	4,3	1,7	2,1	4,6	2,4	0,3
Yb	28,5	32,1	11,8	13,5	26,5	16,0	4,0
Lu	3,9	3,9	1,5	1,5	3,1	2,38	0,9
Hf	4,3	9,1	4,2	4,1	5,4	8,5	3,9
Ta	2,9	7,2	2,0	3,5	2,1	4,3	3,6
W	17,4	11,1	5,9	11,4	15,3	20,8	2,2
Tl	3,5	2,5	3,5	2,6	Н.д.	1,9	1,9
Pb	35,1	44,6	41,1	39,6	94,5	105	18
Th	38,8	60,2	67,4	118	52,6	64,1	18
U	10,5	19,5	13,1	10,0	37,6	25,9	3,9
ΣREE	2089	1444	890	2755	3610	698	190

Примечание: * – по [27]; Н.д. – нет данных

Note: * – according to [27]; Н.д. – no data

Угленосные отложения. Угленосная толща эоцено-олигоценного возраста сложена серыми, зеленовато-серыми аргиллитами, алевролитами и песчаниками. Кроме того, в разрезе присутствуют мощные горизонты белых кварцевых песков и отдельные линзы гравелитов. В составе толщи на границе угленосных и надугольных отложений имеется горизонт туфов. Его возраст определен U-Pb методом (SHRIMP-II, АЦ ВСЕГЕИ) как поздний олигоцен (25±0,2 млн лет). Изотопный возраст

надугольных туфов хорошо согласуется с современными палеонтологическими данными [19, 29]

На месторождении выделяют от 4 до 7 угольных пластов следующей номенклатуры: Первый нижний (Iн), Первый верхний (Iв), Второй нижний (IIн), Второй верхний (IIв), Третий нижний (IIIн), Третий верхний (IIIв) и Четвертый (IVн). Угольные пласты верхней части разреза имеют малые мощности и в основном простое строение (рис. 2). Пласт Первый на большей части месторождения слитный, но в северо-восточной части разделяется на две части. Нижний пласт распространен только в северо-восточной части и выклинивается в районе центрального поднятия.

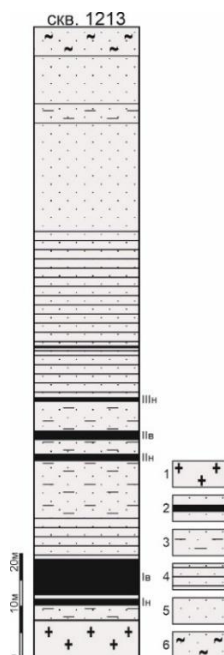


Рис. 2. Геологический разрез угленосных отложений по скважине 1213 на месторождении Спецугли (по [30]): 1 – граниты, 2 – пласты угля, 3 – алевриты, 4 – песчаники, 5 – песок, 6 – глина

Fig. 2. Geological section of the coal-bearing deposits in the well 1213 in the Spetsugli deposit (according to [30]): 1 – granites, 2 – coal seams, 3 – siltstones, 4 – sandstones, 5 – sand, 6 – clay

Отработка месторождения показала, что все металлоносные угольные пласты в районе центрального поднятия на месторождении Спецугли имеют «эрозивные окна». Фактически это возвышенный участок суши в палеоболоте-палеоозере в период накопления угленосных отложений. Согласно результатам разведочного бурения, нижний пласт имеет несколько таких «окон», привязанных к другим более мелким поднятиям [30].

Угли месторождения представлены бурыми гумусовыми углями марки 2Б [31]. Угли плотные, буровато-черного цвета, матовые, полуматовые, реже полублестящие. Средний показатель отражения витринита 0,39%. Согласно ГОСТ 25543-2013, они относятся к марке Б (бурые), группе 2Б, подгруппе 2БВ (второй бурый витринитовый) [32]. Угли месторождения средnezольные ($A^d=20\%$), с высоким выходом лету-

чих веществ (59 %), малосернистые (0,4 %), среднекалорийные (27,1 МДж/кг). Максимальная влагоемкость по пластопересечениям – от 23 до 48%. Содержание гуминовых кислот в сухой беззольной массе от 9 до 70 %, в среднем – 28 % [32].

Методика исследования

Исследование включало изучение вскрытого разрезом участка в центральной части германий-угольного месторождения, дополнительное опробование угольных пластов, углевмещающих пород, пород фундамента, подземных и поверхностных вод и их исследование современными аналитическими методами.

В 2018–2020 гг. выполнено детальное картирование и опробование разреза в нескольких сечениях. По каждому доступному для опробования угольному пласту в каждом сечении отобрано от 3 до 5 проб угля, а также пробы углевмещающих пород и внутрипластовых породных прослоев. На вскрытом в процессе отработки месторождения фундаменте изучено его строение, опробована кора выветривания гранитов, дайки андезитов и останец грейзенизированного гранита. Всего отобрано 80 проб угля и углевмещающих пород. Кроме того, опробованы поверхностные и дренажные воды из угольных пластов и из отстойника непосредственно в пределах разреза (10 проб). Схема опробования разреза приведена на рис. 3.



Рис. 3. Схема опробования углей, вмещающих пород и воды на угольном разрезе. (Источник фото – Google maps). 1 – участки опробования углей, углевмещающих пород и пород фундамента; 2 – места опробования вод; 3 – контур поверхности гранитного выступа

Fig. 3. Scheme of the sampling, host rocks and water in the coal mine. (Photo source – Google maps). 1 – coal sampling areas, coal-bearing rocks and foundation rocks; 2 – water sampling areas; 3 – surface contour of the granite ledge

Для сравнения небольшой объем опробования (27 проб) выполнен для угольных пластов, примыкающих к гранитному фундаменту, и самого фундамента на участке «Павловский-2», расположенном в 1,5–2,0 км северо-восточнее месторождения Спецугли.

Исследование вещественного состава выполнено с применением комплекса современных аналитических методов. Состав элементов-примесей изучен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7700x (Agilent Techn., США) в лаборатории аналитической химии Центра коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток). Содержание элементов в углях определялось с использованием двух методов пробоподготовки: с предварительным озолением и без озоления с химическим разложением [33]. Прямое определение в углях без предварительного озоления позволяет с высоким качеством определять содержание Ge, As, Sb, Tl и других летучих элементов. Содержание 29 элементов параллельно оценивалось также методом ИНАА. Анализ выполнен в ядерно-геохимической лаборатории МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ (г. Томск).

Содержание ртути определено методом атомно-абсорбционного анализа на спектрометре РА-915+ с использованием пакета программ RA915P (ПНД Ф 16.1:2.23-2000). Пробы анализировали с помощью пиролитической приставки ПИРО-915 (метод пиролиза).

Минеральный состав углей и горных пород изучался методами оптической микроскопии и рентгенофазовым анализом. Рентгенофазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser с реализацией съемки рентгенограмм в геометрии Брегга–Брентано. Минимальная объемная доля определяемого минерала – 1 %. Для расшифровки рентгенограмм применяются программные пакеты Eva и TOPAS на основе баз данных рентгеновской порошковой дифрактометрии PDF2 Международного центра дифракционных данных (ICDD, Denver, USA).

Микроминеральные фазы исследованы на сканирующем электронном микроскопе «Hitachi S-3400N» с приставкой для количественного элементного анализа «Bruker». Эта методика позволяет идентифицировать и фотографировать минеральные формы микронной и нанометровой размерности, определять их элементный состав.

Выполнен корреляционный анализ методом ранговой корреляции Спирмена. Выбранный комплекс аналитических методов позволяет выполнить полный комплекс исследований вещественного состава углей и горных пород.

Геохимические особенности германийносных углей и углевмещающих пород

В месторождении Спецугли, как и в большинстве известных германий-угольных месторождений, наряду с Ge еще полвека назад установлено аномально высокое содержание W и Be [10]. Позднее появилась информация об обогащении углей As и Sb [11]. При этом в наиболее ранних работах конкретных данных о содержании и распределении этих элементов в угленосных отложениях не сообщалось, а сами выводы базировались на результатах приближенно-количественного анализа. Уже в XXI в. в процессе ревизионного опробования углей месторождения установлены аномальные содержания в них Rb, Cs, U,

Th и REE [17, 34, 35], а также In, Sr, Ga, Zn, Cu, Ag, Tl и Mo [36].

С целью уточнения состава попутных элементов в рудах месторождения, изучения их ассоциаций и природы накопления было выполнено детальное опробование доступных для исследования верхних германийсодержащих угольных пластов (III_n, IV_n и V_n) в нескольких сечениях во вскрытой части разреза. Как видно из табл. 3, все угольные пласты характеризуются близким спектром основных элементов-примесей.

В целом для металлоносных углей месторождения характерны аномально высокие, превышающие в десятки и даже сотни раз средние содержания для бурых углей мира, концентрации Ge, Sb, Hg, W, Li, Be, Cs, и As. Несколько менее аномальны уровни накопления U, Mo, Y, Rb, средних и тяжелых лантаноидов, Zn и Ga.

Германий. Для изученных сечений исследуемого участка месторождения характерно экстремально высокое содержание Ge, превышающее средние оценки для пластов по данным разведочных работ и более поздние оценки по ограниченному количеству проб [7, 8, 14]. В целом они близки к опубликованной средней оценке по единичному сечению [16]. При этом подтвердилась тенденция, выраженная в снижении среднего содержания в пластах снизу вверх по разрезу [8]. Следует отметить, что эта тенденция не столь очевидна. Согласно другим данным, наоборот, содержание увеличивается снизу вверх [14, 16]. К тому же нужно учесть, что нами не опробован пласт I, залегающий в нижней части разреза.

Корреляционный анализ, выполненный методом ранговой корреляции Спирмена, показал значимую положительную связь Ge с рассматриваемой группой элементов-спутников. Наиболее высокие коэффициенты корреляции у Ge с Sb ($r=0,91$), Hg ($r=0,72$), As ($r=0,61$), Mo ($r=0,62$), W ($r=0,64$), U ($r=0,67$), Tl ($r=0,59$) и Na ($r=0,79$). Положительная невысокая, но значимая, выше критического значения, связь установлена для Li ($r=0,39$), Be ($r=0,50$), Cs ($r=0,39$), Ga ($r=0,46$), Y ($r=0,37$) и тяжелых лантаноидов (HREE) ($r=0,39-0,40$). При этом у большей части этих элементов отмечена положительная корреляция с зольностью. Этот факт связывает Ge с источником поступления данных элементов в угольный пласт, в качестве которого в данном случае выступают грейзенизированные граниты. Отрицательная корреляция с зольностью отмечена лишь только для W, а отсутствие корреляции (незначимая связь) – у Ge, As, Se, Be, Y, Mo и средних лантаноидов (MREE). Это свидетельствует о преимущественно аквагенном поступлении элементов в угольный пласт.

Распределение германия в месторождении. Выполненная в конце 60-х гг. XX в. оценка кондиционных запасов Ge показала, что 75,3 % их сосредоточены в пласте I при среднем содержании 348 г/т угля [30]. Это свидетельствует о том, что основное поступление металла происходило на ранних стадиях накопления угленосной толщи, либо разгрузка германийносных вод шла преимущественно в нижней части угленосного разреза.

Таблица 3. Среднее содержание основных элементов-примесей в углях германиеносных пластов месторождения Спецугли, г/т

Table 3. Average content of main trace elements in germaniferous coal seams of the Spetsugli deposit, ppm

Элемент Element	Пласт/Seam			Среднее для разреза Average for the section	Кларк для угля* Mean for the coals of the world*
	Пн	Пв	Пш		
Li	27,9	113	172	105	10±1
Be	50,2	55,6	57,0	54,4	1,2±0,1
Sc	5,1	6,6	3,5	5,3	4,1±0,2
V	40,6	63,4	22,7	45,3	22±2
Cr	19,7	24,4	11,6	19,4	15±1
Co	7,6	12,9	8,0	10,0	4,2±0,3
Ni	11,8	22,7	12,8	16,8	9,0±0,9
Cu	12,6	35,7	12,5	22,4	15±1
Zn	17,0	99,9	57,9	64,2	18±1
Ga	27,3	10,2	8,1	14,5	5,5±0,3
Ge	1676	1016	1173	1249	2,0±0,1
As	26,6	189	238	157	7,6±1,3
Se	1,7	2,6	3,5	2,6	1,0±0,15
Rb	71,6	31,7	30,7	42,8	10±0,9
Sr	116	79,2	103	96,5	120±10
Y	81,1	55,1	108,7	77,8	8,6±0,4
Zr	98,5	70,7	55,1	74,2	35±2
Nb	6,4	5,2	4,1	5,2	3,3±0,3
Mo	5,9	7,8	6,2	6,8	2,2±0,2
Ag	0,08	0,19	0,08	0,13	0,09±0,02
Cd	0,26	0,97	0,25	0,56	0,24±0,04
Sn	1,4	1,4	1,1	1,3	0,79±0,09
Sb	698	164	148	312	0,84±0,09
Cs	72,7	26,0	18,2	37,1	0,98±0,1
Ba	281	183	175	209	150±20
La	14,0	24,0	17,2	19,2	10±0,5
Ce	26,8	45,3	41,8	39,0	22±1
Pr	3,4	5,5	6,1	5,1	3,5±0,3
Nd	13,9	21,6	29,4	21,7	11±1
Sm	3,9	4,8	9,7	5,9	1,9±0,1
Eu	0,9	0,9	2,0	1,2	0,50±0,02
Gd	7,0	6,2	12,6	8,3	2,6±0,2
Tb	1,3	1,1	2,2	1,5	0,32±0,03
Dy	10,1	7,2	15,2	10,3	2,0±0,1
Ho	2,3	1,6	3,5	2,3	0,50±0,05
Er	6,8	4,4	11,1	7,0	0,85±0,08
Tm	1,0	0,6	1,8	1,1	0,31±0,02
Yb	5,8	3,6	11,0	6,4	1,0±0,05
Lu	0,9	0,5	1,8	1,0	0,19±0,02
Hf	2,4	1,8	1,5	1,9	1,2±0,1
Ta	0,4	0,3	0,3	0,35	0,26±0,03
W	276	239	246	252	1,2±0,2
Hg	0,78	3,01	3,37	2,47	0,10±0,01
Tl	0,6	0,6	0,5	0,5	0,68±0,07
Pb	7,0	17,6	8,3	11,9	6,6±0,4
Th	4,8	9,5	6,6	7,3	3,3±0,2
U	15,8	11,7	10,3	12,5	2,9±0,3
ΣREE	98,1	127,3	165,4	130,0	56,7
A ^d , %	39,9	28,5	25,3	30,8	

Примечание: * – по [37]; A^d – зольность.

Note: * – according to [37]; A^d – ash yield.

Другой важной особенностью распределения Ge по площади является субизометричная форма рудных тел. Рельеф фундамента в пределах месторождения на относительно локальном участке сильно изрезанный: мощность осадочных отложений колеблется от 320 до 42 м. В центре металлоносной площади находится наиболее высокое поднятие, формирующее «эрози-

онное окно» в угольных пластах. Площадное распределение Ge в угольных пластах имеет субизометричную концентрически-зональную форму вокруг этого выступа гранитного фундамента [7, 8, 11, 30, 38]. Характер распределения Ge по площади в пределах каждого пласта таков, что предполагает площадное поступление металла в угольный пласт по всему ореолу вокруг возвышенности (рис. 1). Такие формы рудных тел и ореолов Ge в угольных пластах в пределах месторождения позволяют заключить, что источник поступления Ge, W, Sb и других элементов-спутников находился в пределах куполовидного поднятия. При этом источник имел площадной, а не линейный характер, так как металлом обогащены угольные пласты непосредственно вокруг возвышенных участков фундамента с максимумом в пределах центрального выступа (рис. 1). Линейные зоны разгрузки, которые могли бы быть связаны с подновлением тектонических нарушений в зонах понижений рельефа [9, 11, 14, 17], на исследуемом участке отсутствуют. К тому же они не могут обеспечить такую форму рудных тел. Степень контрастности оруденения в углях в пределах рудного тела различна, что может быть обусловлено как неравномерностью распределения металлов в источнике, так и неравномерным переносом вещества водами в локальных участках.

Промышленная германиеносность во всех пластах имеет близкие контуры распространения в пространстве. Металлоносные участки в пластах расположены друг над другом, создавая ярусное строение месторождения. Площадные размеры металлоносных участков пластов сокращаются снизу вверх от 550 тыс. м² для пласта I до 250 тыс. м² для пласта Пш [14, 30]. Все металлоносные угли отчетливо тяготеют к наиболее контрастному поднятию в центре площади. При этом в пределах площади имеется несколько самостоятельных ореолов, приуроченных к другим поднятиям, но не имеющих промышленного значения из-за сравнительно невысокого содержания Ge. Характерно наличие во всех пластах с промышленным оруденением вплоть до Пш «эрозионных окон», представленных элювиальной корой выветривания гранитов. Пласты в пределах месторождения без таких «окон» не имеют промышленного оруденения, хотя и отличаются повышенным содержанием Ge (15 г/т для Пв и 11 г/т для IV) [30].

Важной характеристикой рудоносной площади является и более существенное обогащение углевещающих пород междупластий по сравнению с породами за пределами месторождения. Если за пределами месторождения содержание Ge в аргиллитах, алевролитах и песчаниках изменяется в интервале 1–3 г/т, то в границах месторождения от 4 до 156 г/т. При этом минимальные содержания приходится на более грубозернистые осадки.

В вертикальном профиле угольного пласта Ge распределен неоднотипно. На участках с невысоким содержанием (<50 г/т) его распределение либо подчиняется «закону Зильберминца» с обогащением приконтактных зон пласта, либо, чаще, его содержа-

ние последовательно уменьшается от приподошвенной к прикровельной зоне. В металлоносных углях ранее было отмечено обогащение центральной зоны пласта [7, 21]. Для золы угля в изученных нами сечениях с промышленной германиеносностью имеет место обогащение в центральной части угольного пласта для пластов Пв и Пн и последовательное увеличение содержания Ge от подошвы к кровле для пласта ПШн. Для золы угля в пределах отдельных сечений отчетливо просматривается отрицательная корреляция содержания Ge с зольностью.

Элементы-спутники германиевого оруденения

Как следует из средних оценок по пластам на исследуемом участке (табл. 3), для германиеносных углей месторождения характерно аномальное, превышающее в десятки и даже сотни раз среднее содержание для бурых углей мира, содержание Ge, Li, Be, Cs, As, Sb, Hg и W. Несколько менее аномальны уровни накопления U, Mo, Y, Rb, средних и тяжелых лантаноидов, Zn и Ga. Спектр сопутствующих элементов достаточно обширен и включает ассоциации, формирование которых в эндогенных условиях может быть обусловлено только разными процессами. Эндогенное оруденение такого типа должно быть полигенным-полихронным. Однако в гипергенезе их накопление может быть обусловлено единым процессом. В разрезе угленосных отложений отмечено последовательное снижение содержания от нижних пластов к верхним для Ge, Ga, Rb, Nb, Zr, Sn, Sb, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Tl, U и Th одновременно с уменьшением зольности. Вверх по разрезу отчетливо растет содержание Li, Be, As, Se, Hg, средних и тяжелых лантаноидов. Для золы угля тенденции несколько отличаются. Здесь отмечен отчетливый рост содержания снизу вверх Li, Be, As, Se, Sr, Y, W, Hg, Tl и лантаноидов. Содержание Ga, Sb, Cs отчетливо снижается. Тенденции изменения содержания других элементов в разрезе неоднозначны.

Редкие щелочи (Li, Rb, Cs). Обогащенность германиеносных углей месторождения Спецугли редкими щелочами (Rb и Cs) детально исследована на примере одной скважины В.В. Серединым [34]. К этим данным можно добавить такое же аномальное накопление здесь лития (табл. 3). Корреляционный анализ показал высокую ($r=0,76-0,87$) корреляционную связь содержания этих элементов в углях с зольностью. С другой стороны, они также связаны высокими корреляционными связями между собой и с основными породообразующими щелочными элементами (K и Na). Особенно высок уровень связи с калием. Для Rb коэффициент ранговой корреляции с K_2O составляет 0,98, для Cs – 0,88, для Li – 0,64. Высокие коэффициенты корреляции ($r=0,7-0,9$) установлены для этих элементов с SiO_2 и Al_2O_3 . Это обстоятельство позволяет рассматривать в качестве основного источника Li, Rb и Cs слюды, а также микроклин, широко распространенные в составе грейзенизированных гранитов вознесенского комплекса. Подтверждение тому – результаты анализа монофракции «биотита», отобранного из останца грейзенизированного гранита на месторождении «Спецугли» (табл. 4).

Таблица 4. Микроэлементный состав монофракции биотита, г/т

Table 4. Trace element composition of the biotite monofraction, ppm

Элемент Element	Содержание Content	Элемент Element	Содержание Content	Элемент Element	Содержание Content
Li	483	Zr	1089	Gd	503
Be	14,0	Nb	460	Tb	84,9
Sc	147	Mo	14,6	Dy	430
V	125	Ag*	2,0	Ho	78,8
Cr	21,0	Cd	1,6	Er	214
Co	131	Sn	86,0	Yb	201
Ni	21,8	Sb	96,1	Lu	31,1
Cu	15,3	Te	0,14	Hf	40,8
Zn	662	Cs	104	Ta	20,2
Ga	162	Ba	311	W	493
Ge	12,8	La	4111	Re	0,023
As	385	Ce	7253	Tl	45,8
Se	77,5	Pr	937	Pb	758
Rb	2189	Nd	2992	Th	203
Sr	94,9	Sm	695	U	670
Y	2568	Eu	32,9	ΣPЗЭ	17564

Название монофракции условно, так как в ней представлен как собственно биотит, так и новообразованные развитые по нему минеральные фазы: хлорит, мусковит и др. Как видно из этих данных, слюдястый агрегат чрезвычайно богат Rb (0,22 %), существенно обогащен Li (483 г/т) и Cs (104 г/т) и вполне может рассматриваться в качестве основного источника редких щелочей в германиеносных углях. Кроме того, значительная часть этих элементов может быть связана с полевыми шпатами и альбитом [34]. Полное или существенное разложение этих минералов насыщает растворы редкими щелочами и является источником сорбционного накопления Rb, Cs и Li в органическом веществе угля и на глинах.

Исследование форм нахождения показывает, что 62–66 % Rb и Li связаны с минеральным веществом угля, а примерно 1/3 связана с органическим веществом либо сорбирована на глинистом веществе. У Cs доля минеральной фазы несколько меньше, а у органической больше, но все же с отчетливым преобладанием Cs минерального. Второстепенное значение водорастворимых форм в обогащении углей редкими щелочами подтверждается и фактом низкого их содержания в угольных включениях (табл. 5).

При этом углефицированные древесные включения в песчаниках вблизи выхода фундамента несколько обогащены Li и Cs по сравнению с их аналогами на удалении от него. Это подтверждает важную роль гранитного выступа в накоплении в углях не только германия, но и других сопутствующих ему элементов. Углевмещающие породы вблизи гранитного выступа на месторождении Спецугли существенно богаче Rb и Cs по сравнению с таковыми на удаленном от него на 1,5 км угольном разрезе «Павловский 2». Это указывает, в первую очередь, на специфический состав области сноса и формирования этих отложений. Как отмечено, область сноса на месторождении Спецугли представлена калишпатизированными и грейзенизированными гранитами. Пласт ПШн, кроме того, аномально обогащен Li наряду с Y и

лантаноидами. Природа этого обогащения может быть связана с современными кислыми сульфатными водами, дренирующими через этот пласт. Эти воды аномально обогащены Li, Y, P3Э, Ge, Co, Ni, Zn, Rb, Cs, Sr, U, Al, Fe, и Mn. Формирование подобного типа кислых сульфатных вод, аномально обогащенных редкими щелочами, показано на примере разрушения W-Mo руд Забайкалья в зоне гипергенеза в настоящее время [39].

Таблица 5. Микроэлементный состав углефицированной древесины, г/т

Table 5. Trace element composition of the carbonised wood, ppm

Элемент Element	СУ-9*	СУ-80*	СУ-22**	Элемент Element	СУ-9*	СУ-80*	СУ-22**
Li	4,6	6,5	3,6	Cs	4,9	4,5	0,9
Be	10,0	10,0	1,6	Ba	467	344	70
Sc	1,70	0,69	3,1	La	3,3	2,2	6,7
V	200	174	14,1	Ce	6,8	4,8	15,2
Cr	27,4	25,5	42,1	Pr	0,86	0,63	1,66
Co	2,5	2,2	25,8	Nd	3,7	2,9	6,0
Ni	2,4	2,4	16,2	Sm	1,2	1,0	1,3
Cu	3,8	0,27	12,5	Eu	0,26	0,24	0,26
Zn	5,5	11,3	31,8	Gd	1,9	1,8	1,4
Ga	11,1	9,1	2,6	Tb	0,40	0,40	0,20
Ge	5306	7210	32	Dy	3,3	3,4	1,3
As	52	49	65	Ho	0,81	0,85	0,28
Se	0,7	0,4	1,1	Er	2,51	2,86	0,78
Rb	8,5	4,6	7,6	Tm	0,44	0,42	0,12
Sr	135	152	19	Yb	3,2	3,4	0,77
Y	18,5	15,3	7,8	Lu	0,47	0,52	0,11
Zr	144	129	108	Hf	1,18	0,85	1,17
Nb	42,3	39,9	4,1	Ta	0,08	0,04	0,18
Mo	90,1	99,2	28,1	W	489	724	3,1
Ag	0,23	0,05	0,26	Tl	4,2	6,1	0,09
Cd	0,16	0,27	0,29	Pb	4,4	5,2	7,0
Sn	0,57	0,15	1,5	Th	4,0	4,6	3,1
Sb	2714	3269	30,0	U	26,5	38,0	1,1

Примечание: * – пробы в песчаниках угленосной толщи вблизи фундамента; ** – проба в песчаниках над угленосной толщей.

Note: * – samples in the sandstones of the coal seam near the foundation; ** – samples in the sandstones above the coal seam.

Лантаноиды и иттрий. Германиеносные пласты существенно обогащены P3Э. Особенно аномальны они по содержанию Y, концентрация которого в золе угля в среднем в изученном сечении превышает 250 г/т, а в пласте IIIн составляет 430 г/т. В качестве источника, как и для группы редких щелочных элементов (Li, Rb, Cs), могут также рассматриваться грейзенизированные граниты фундамента, аномально обогащенные иттрием (табл. 2). В монофракции биотита из этих гранитов содержание Y превышает 0,25 % (табл. 4). Их же можно рассматривать и как источник лантаноидов в углях. К схожему выводу пришел В.В. Середин [35], изучивший распределение P3Э по двум скважинам, вскрывшим весь угленосный разрез на месторождении Спецугли. Он предположил кластогенную природу фонового накопления P3Э в углях месторождения и эпигенетическое концентрирование тяжелых

P3Э и Y в связи с поздним плиоцен-четвертичным гидротермальным процессом.

Как показали настоящие исследования, роль водных растворов в накоплении как тяжелых, так и легких P3Э достаточно велика. Характер нормированных графиков (рис. 4) закономерный и не несет следы проявления двух или более равнозначных, но не взаимосвязанных процессов. К тому же, дайки, с которыми связывалось проявление гидротермальной деятельности после формирования угольных пластов [35], имеют не неоген-четвертичный, а позднепермский возраст, значительно более ранний, чем возраст угленакопления. Характер нормированных графиков не уменьшает значения гранитов в накоплении как тяжелых, так и легких лантаноидов в углях. Граниты в фундаменте, подвергнутые кварц-полевошпатовому метасоматозу и грейзенизации, которые могут рассматриваться как основной источник P3Э в углях, отличаются аномально высокими содержаниями суммы лантаноидов (от 0,07 до 0,36 %) и Y (от 101 до 467 г/т) (табл. 2).

Аномальны по содержанию P3Э и дренирующие в настоящее время по германиеносным пластам водные растворы. Еще более аномальные содержания P3Э выявлены в современных кислых сульфатных водах зоны гипергенеза к востоку от исследуемой площади [40]. Одной из особенностей современных вод, дренирующих угольные пласты на месторождении, является наличие в них отрицательной Eu аномалии (Eu/Eu* = 0,6–0,7), указывающей на связь этих водных растворов с кислыми магматическими породами (рис. 4, e).

Изучены вертикальные разрезы угольных пластов в пределах рудоносной площади с аномально высоким содержанием Ge и за ее пределами с околорудным его содержанием. В германиеносных углях содержание P3Э в 1,5–2 раза выше. Однако из-за высокой зольности металлоносных углей зола оруденелых и безрудных разностей сопоставимы по содержанию как лантаноидов, так и иттрия. Лантан-иттербиевое отношение также отличается не существенно: в среднем 3,0 для германиеносных углей и 4,5 для углей с рядовым содержанием Ge вблизи рудного блока. Это позволяет говорить о едином источнике накопления P3Э в углях в пределах исследуемого участка. Таким, вероятно, является гидротермально измененный редкометалльный гранит выступа фундамента. При этом ведущая роль принадлежит не собственно гранитам, а наложенным на них гидротермально метасоматическим изменениям, связанным, по-видимому, с внедрением даек пермского возраста и последующим выветриванием. Роль этих процессов видна на примере углей из угледобывающего разреза «Павловский-2» в 1,5–2 км к северо-востоку от участка Спецугли (рис. 1). Здесь в углях, непосредственно налегающих на кору выветривания гранитов фундамента и обогащенных Ge на уровне 13–144 г/т, содержание суммы лантаноидов составляет 44–50 г/т, Y – 20–22 г/т. Непосредственно вблизи выветрелой дайки и над ней содержание суммы лантаноидов в перекрывающих углях составляет 61–214 г/т, Y – 46–361 г/т. Здесь же

аномально и содержание Ge (27–125 г/т), Hg (до 1,5 г/т), Mo (до 68 г/т) и W (22–63 г/т). Видна связь уровней накопления РЗЭ в углях с дайковым комплексом. Кора выветривания по аналогичной дайке в Спецуглях также богаче РЗЭ, чем таковая по гранитам на удалении от нее. Содержание Y в коре выветривания дайки и гранитов здесь составляет 236 и 178 г/т соответственно, а суммы лантаноидов – 682 и 208 г/т. Разница в содержании РЗЭ в гидротермально

измененных гранитах и в коре выветривания по ним весьма велика, что позволяет говорить о важной роли этих пород как источника лантаноидов и Y в углях месторождения Спецугли. Такое большое снижение их содержания в элювиальной коре выветривания по сравнению с исходным гранитом свидетельствует об относительно подвижной форме РЗЭ в граните и о выщелачивании их с участием водных растворов.

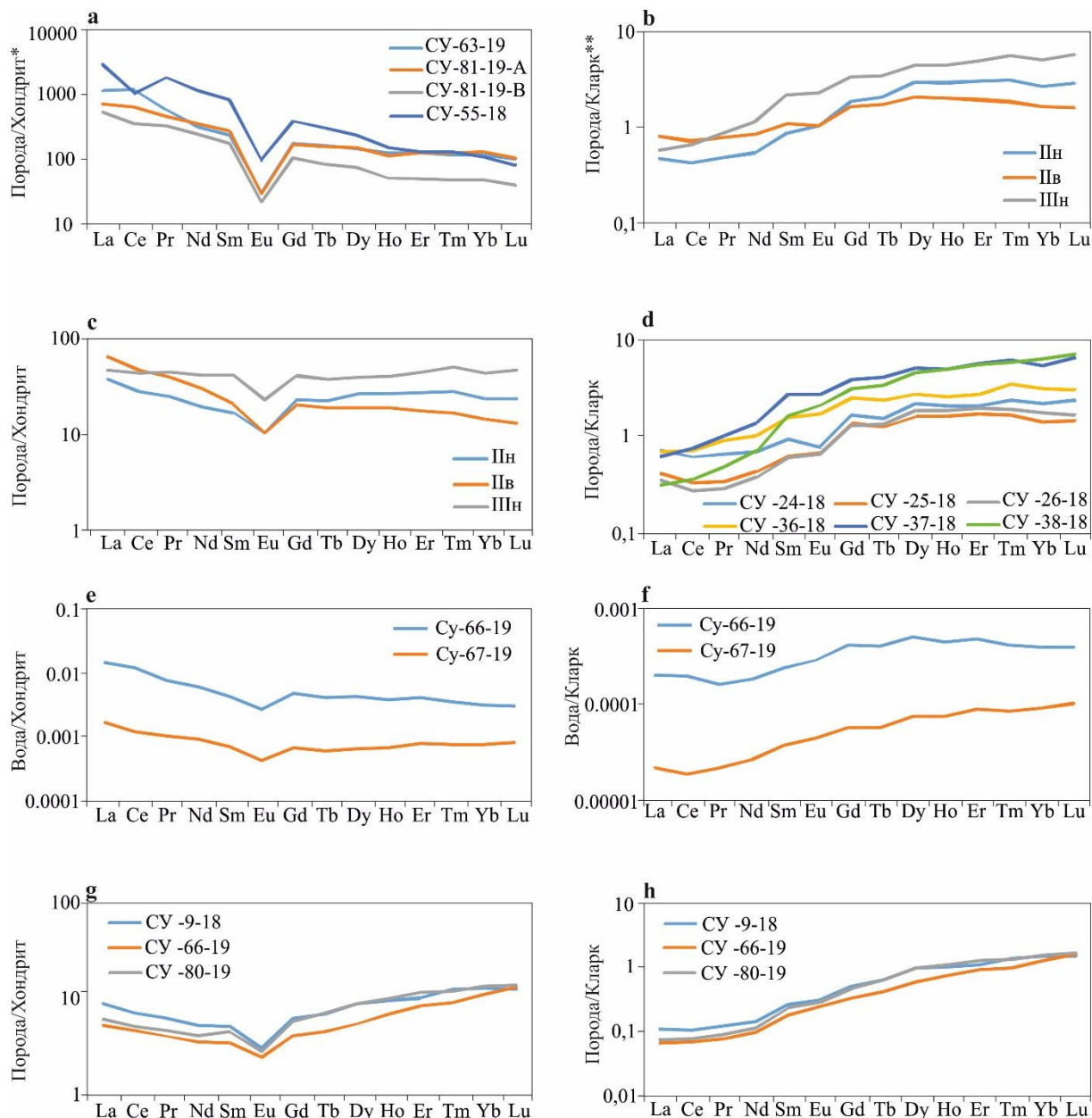


Рис. 4. Нормированные графики распределения РЗЭ в гранитах фундамента (а), угольных пластах (b, c), углях пласта IIIн (d), дренажных водах (e, f) и углефицированной древесине (g, h) месторождения Спецугли. Примечание: * – нормировано на хондрит по [41]; ** – нормировано на содержание в верхней континентальной коре по [41]

Fig. 4. Normalized graphs of REE distribution in the granites of the foundation (a), coal seams (b, c), coal seam IIIн (d), drainage water (e, f) and carbonized wood (g, h) of the Spetsugli deposit. Note: * – normalized for chondrite according to [41]; ** – normalized for the content in the upper continental crust according to [41]

На поступление РЗЭ в угольные пласты из коры выветривания гранитов указывает характер нормированных графиков распределения лантаноидов в углях (рис. 4, *b, c*). Здесь на обоих типах графиков и при нормировке на хондрит (рис. 4, *c*), и при нормировке на средний состав верхней континентальной земной коры (рис. 4, *b*) отчетливо просматривается Eu аномалия ($Eu/Eu^*=0,50-0,60$), типичная для пород, связанных с гранитоидами. Одновременно имеет место слабо выраженная Ce аномалия, которая характерна именно для зоны выветривания в результате окисления Ce до валентности 4+ и удаления его в процессе миграции лантаноидов. При этом в результате выветривания гранитов отмечено появление как положительной, так и отрицательной аномалии Ce (рис. 4, *a*).

Характер графиков также указывает на преимущественно гидрогенную природу накопления РЗЭ в углях (рис. 4, *b, d*). Здесь характерен H-тип распределения РЗЭ, указывающий на водный механизм их накопления в угольном пласте [42]. Иттриевые лантаноиды отличаются большей подвижностью в водных растворах, что и обусловило не только специфический характер нормированных графиков, но и пониженное по сравнению с гранитоидами фундамента La/Yb отношение. Если для гранитов и развитых по ним грейзенам оно колеблется от 8,1 до 48,3, то для углей – от 1,6 до 6,7, в среднем 3,0. Для промышленно германиеносных углей в границах рудного тела и углей за его пределами формы графика однотипны. При этом для рудных участков в целом характерен более крутой угол наклона графика, что, вероятно, обусловлено более значительным вкладом привнесенных в растворы РЗЭ.

Показателен в этом отношении пласт Шн. В нем наблюдается дренаж современных кислых сульфатных вод, обогащенных Ge, РЗЭ и редкими щелочными элементами. Как следует из табл. 3, угли пласта существенно обогащены РЗЭ на фоне других пластов, особенно значимо тяжелыми лантаноидами и иттрием. При этом на участке германиеносных углей соотношение легких и тяжелых лантаноидов существенно изменено в сторону тяжелых по сравнению с углями за пределами рудного участка (рис. 4, *d*). Повидимому, здесь имеет место дополнительное поступление с современными водами зоны гипергенеза и концентрирование в углях Ge и РЗЭ.

Отчетливо спектр поступающих с водными растворами РЗЭ можно наблюдать на примере углефицированной древесины, извлеченной из песчаников в границах рудного блока (рис. 4, *g, h*). В ископаемой древесине сколько-нибудь значимые содержания РЗЭ могут накопиться только из растворов. Согласно полученным данным, в древесине отмечается накопление всех лантаноидов при отчетливом преобладании тяжелых. Лантан-иттербиевое отношение в данном случае менее 1 (табл. 5). Здесь также сохраняется отрицательная Eu аномалия на уровне $Eu/Eu^*=0,54-0,56$.

Невысокая, но все же значимая связь Ge с тяжелыми и средними лантаноидами и Y на уровне $r=0,39-0,40$ позволяет связать их с единым первичным источником вещества, так же как и W.

Вольфрам. Вольфрам рассматривается как один из главных сопутствующих Ge элементов в германий-угольных месторождениях [9, 10, 17, 18]. Содержание W в углях в изученных сечениях (табл. 3) превышает средние оценки для углей мира более чем в 200 раз. При этом ореол распространения W в угольных пластах значительно шире, чем ореол распространения Ge. В углях с рядовым содержанием Ge вблизи месторождения, но за пределами рудных тел, отмечены такие же аномальные содержания W, что и в контуре германиевого оруденения. На соседнем разрезе «Павловский-2» в 1,5–2 км от месторождения Спецугли содержание W в целом низкое и только на участке поднятия фундамента в прикупольной части вблизи дайки андезитов отмечено наличие аномалий W (63 г/т) и Mo (68 г/т). Здесь же повышено содержание Hg (до 1,5 г/т) и Ge (до 125 г/т).

Очевидно, что содержание W в угольных пластах прямо связано с его наличием в области питания бассейна угленакопления. При исследовании вольфрамоносных углей Забайкалья и Монголии отмечено, что каким бы способом W не отлагался в углях, его источниками служили рудопроявления и месторождения обрамления угленосных впадин [43]. В Павловском месторождении вольфрамом богаты угли, контактирующие с вольфрамоносными метасоматически измененными гранитами. Отрицательная корреляция содержания W с зольностью и преимущественно органическая форма его нахождения [44] позволяют говорить о гидрогенном механизме его накопления в углях. Гидрогенный механизм формирования аномалий W предполагает нахождение источника на сравнительно небольшом расстоянии от места его отложения, так как в гипергенезе ореолы рассеяния его обычно не превышают по протяженности нескольких сотен метров [45]. Выявленные вблизи гранитного выступа редкие включения минеральных фаз вольфрама указывают на возможную роль грейзенизированных гранитов в качестве источника W в углях месторождения Спецугли. На возможность обогащения углей W за счет метасоматически измененных гранитов указывает и аномально обогащенная им фракция «биотита», полученная из грейзенизированного гранита (табл. 4). Сами граниты фундамента также в 5–10 раз обогащены W по сравнению со средними оценками для аналогичных пород (табл. 2). При этом следует учитывать, что в данном случае представлена только сохранившаяся корневая часть зоны грейзенизации и рудного тела. Не высокая, хотя и значимая корреляция содержания W и Ge объясняется отличием условий их миграции в водных растворах в процессе транспортировки из коры выветривания в угольный пласт [46].

Сурьма, ртуть и мышьяк. Сурьма отличается аномально высоким содержанием в углях месторождения. Ее концентрации в среднем для изученных пластов превышают кларковое значение для углей в 370 раз, а для пласта Шн – более чем в 800 раз. Содержание Sb отчетливо снижается вверх по разрезу аналогично изменению содержания Ge, что обеспечивает их высокую корреляционную связь ($r=0,90$). Эти

данные отличаются от ранее опубликованных сведений по распределению Sb по пластам в месторождении, полученных на основе изучения керн одной скважины [16].

Содержание Hg в германиеносных углях месторождения Спецугли также аномально (табл. 4), в среднем превышает угольный кларк в 25 раз, а в пласте Шн – более чем в 30 раз. В отличие от Sb, содержание Hg растет вверх по разрезу от 0,78 г/т в пласте Пн до 3,35 г/т в пласте Шн. В целом для энергетических углей Павловского месторождения характерны невысокие содержания Hg в пределах 100–200 мг/т. В то же время на участках угольных пластов, приуроченных к метасоматически измененным гранитам, ее концентрация повышается на порядок. В метасоматически измененных гранитах содержание ртути превышает 1 г/т. Ртуть, как и сурьма, показывает высокую корреляционную связь с Ge ($r=0,72$). При этом Hg показывает невысокую, но значимую корреляционную связь с зольностью ($r=0,34$). По-видимому, преобладает органическая форма нахождения Hg, но имеют место и минеральные ее фазы. В частности, выявлены отдельные обломки киновари микронного размера в углях вблизи контакта пласта с корой выветривания гранитов.

Мышьяк сильно обогащает германиеносные угли на фоне энергетических углей. Превышение содержания As в металлоносных углях над рядовыми примерно на порядок, а по сравнению с кларком для углей – в 20 раз. Содержание As, как и Hg, возрастает от нижних пластов к верхним (табл. 3). Мышьяк показывает значимые (выше критического уровня) связи с основной группой элементов-спутников Ge. Коэффициенты корреляции при этом ниже, чем у Sb и Hg. Наиболее высокий коэффициент ранговой корреляции у As с Hg ($r=0,77$), Ge, Mo, Sb, Tl ($r=0,53$).

Накопление в углях Sb, As и Hg происходит, вероятно, преимущественно из водных растворов. Об этом свидетельствует обогащение этими элементами угольных включений в углевмещающих песчаниках (табл. 5). Степень обогащения включений As существенно ниже, чем Sb и Hg. При этом всеми этими элементами обогащены только угли и угольные включения в границах рудного блока. Энергетические угли бедны ими.

Сурьма и мышьяк, наряду с W, Li, F, Be, Mo, Sn, Co, Cu, Zn, Pb и Ag, – наиболее характерные элементы для W-Sn-грейзенового типа эндогенного оруденения Приморья [47]. Эта ассоциация с характерной зональностью используется в качестве геохимического критерия при поисках такого оруденения. Из всех элементов-примесей Sb наиболее тесно связана с Ge в месторождении Спецугли ($r=0,91$).

Радиоактивные элементы (U, Th). Германиеносные угли в 3–5 раз богаче U и в 2–3 раза Th относительно среднего содержания в углях мира (табл. 3). Торий-урановое отношение менее 1, что указывает на избирательное накопление U, связанное с гидрогенным его поступлением в угольный пласт [48]. Накопление урана в углях месторождения отчетливо связано с наличием здесь в период формирования угленос-

ных отложений выступа фундамента, представленного высокорadioактивными гранитами (табл. 2). Угли, опробованные на удалении от центрального поднятия, отличаются существенно более низкими содержаниями U. Содержание Th в обоих случаях сопоставимо. Это хорошо согласуется с представлением о преимущественно гидрогенном механизме накопления U и кластогенном механизме накопления Th. Уран образует единую ассоциацию с Ge, Sb, Hg, As, Li, Rb, Cs, Be, Se и рядом других, преимущественно халькофильных, элементов. На аквагенную природу поступления части U в угольный пласт указывает и факт его существенного накопления в углефицированной древесине. При этом угольные включения в песчаниках из угленосной толщи обогащены U на порядок больше, чем включения из перекрывающих ее осадков (табл. 5). Одновременно отмечается более слабая, но значимая (выше критического значения) связь с Zr, Hf, Nb и PЗЭ ($r=0,3–0,4$). Отмечается также положительная связь с зольностью ($r=0,54$). Это указывает на двойственную природу накопления U в углях месторождения с преобладанием гидрогенного механизма.

Следует отметить еще один важный факт – наличие, по данным разведочных работ, U оруденения гидрогенного типа в основании угленосных отложений [30]. Рудные тела находятся либо на границе коры выветривания и перекрывающих углистых алевролитов, либо непосредственно в углистых алевролитах. Алевролиты также промышленно германиеносны, хотя беднее Ge, чем вышележащие угольные пласты. Этот факт согласуется с существенно более высокой подвижностью U в процессе выветривания в условиях окислительной среды, чем Ge. Согласно многочисленным исследованиям, потеря U, главным образом «подвижной» формы, происходит на ранних стадиях формирования коры выветривания. Как показали исследования, даже относительно «свежие» граниты при незначительном выветривании могут терять до 70 % U и более [49–52]. Более низкая миграционная способность Th в зоне гипергенеза по сравнению с U приводит к повышению торий-уранового отношения в измененной части гранитов и позволяет отслеживать формирование коры выветривания [53]. Формирование U оруденения происходит на самых ранних стадиях преобразования гранитов фундамента. Этим можно объяснить исключительную связь U оруденения с самыми нижними, соответственно, с самыми ранними по времени формирования осадочными отложениями Павловской впадины. Дальнейшее выветривание гранитов в условиях гумидного климата уже не сопровождалось сколько-нибудь значительным поступлением U в палеоболота. Остаточный U здесь уже представлен в основном в форме аксессуаров и поступал в угольный пласт преимущественно как механическая примесь. Этим объясняется не только относительно низкое его содержание в угольных пластах по сравнению с ожидаемым, исходя из аномальной радиоактивности гранитов выступа, но и возросшее торий-урановое отношение. Там, где происходит выветривание гранитов в современных условиях, формируются современные гипергенные аномалии U.

Однако такие аномалии в углях могут формироваться лишь вблизи области питания, так как восстановительная среда в угольном пласте резко ограничивает миграцию U в водах зоны гипергенеза. Положение месторождения Спецугли на удалении от обрамления Павловской впадины неблагоприятно для накопления U в угленосных отложениях после формирования угольных пластов и перекрытия осадками выступа гранитного фундамента. В соседнем разрезе «Павловский 2» вблизи границы с обрамлением, сложенным теми же гранитоидами вознесенского комплекса, выявлена аномалия с содержанием 0,23 % U. При зольности пробы 32,5 % это составит 0,70 % в золе угля. Урановая аномалия сопровождается накоплением Mo (127 г/т), W (118 г/т) и As (114 г/т). При этом, исходя из факта отсутствия радиоактивного равновесия в ряду распада ^{238}U в изученной пробе, можно заключить, что возраст аномалии U менее 1,7 млн лет [53].

Бериллий – один из типоморфных элементов Ge оруденения в углях. Он один из первых был отмечен как спутник Ge в германий-угольных месторождениях [10]. Содержание Be в германиеносных углях месторождения Спецугли достаточно выдержано по разрезу и составляет 54,4 г/т, что более чем в 40 раз выше его среднего содержания в углях мира. Угли за пределами рудного тела тоже существенно обогащены Be, но коэффициент обогащения вдвое меньше. Ореол Be, как и W, шире, чем германиевый ореол. Энергетические угли Павловского месторождения существенно беднее Be, чем угли месторождения Спецугли. Отчетливо просматривается связь обогащения бериллием с гранитным выступом.

Природа обогащения углей Be не ясна. Опробованный грейзенизированный гранит фундамента хотя и обогащен Be, но незначительно. В то же время пласты угля аномальны по его содержанию. Можно предположить, что бериллиеносные разности пород находились в верхней части выступа, в настоящее время уничтоженной эрозией. Отсутствие корреляции с зольностью предполагает гидрогенный механизм его накопления в углях. На это указывает и относительная обедненность бериллием вмещающих угольные пласты осадочных пород. С другой стороны, угольные включения в песчаниках при их аномальности в отношении Ge и других его элементов-спутников незначительно обогащены Be (табл. 5). Исследование форм его нахождения в углях показало, что от 30 до 40 % Be в металлоносных углях все же связано с органическим веществом гуминового ряда. Бериллий отличается значимой корреляционной связью с Ge, Li, Cs, W, U, P3Э, Y, Hg, Sb, As, а также Fe и Na.

Основные закономерности распределения германия и сопутствующих элементов

Несмотря на то, что Ge и все элементы-спутники Ge оруденения приурочены к гранитному выступу, характер их распределения отличается. Распределение Ge в месторождении существенно отличается от распределения W и Be [20]. Ореол W и Be шире, чем ореол Ge. Согласно опубликованным данным, лишь в

центральной части месторождения имеются блоки, где ореолы Ge, W и Be в той или иной мере совпадают [20]. Такой характер распределения элементов при отсутствии ярко выраженной зональности свидетельствует о независимом поступлении каждого из этих элементов в угольный пласт. В случае поступления элементов в едином растворе из термального источника обычно имеет место ярко выраженная зональность, обусловленная различной подвижностью элементов, и отчетливо видна их взаимная привязка к зоне разгрузки гидротерм. Например, она показана для торфов Налычевской депрессии на Камчатке, где ореолы отчетливо привязаны к зоне разгрузки гидротерм [9]. Попытка привязать ореолы распределения Ge, W и Be к тектоническим нарушениям, как следует из приведенных схем [20], не увенчалась успехом. К тому же вскрытие месторождения разрезом вплоть до фундамента не подтвердило наличия здесь сколько-нибудь значимых тектонических нарушений – возможных проводников гидротерм.

Обсуждение результатов и дискуссия

Выяснение источника и условий накопления Ge и сопутствующих ему элементов в углях и углистых породах месторождения Спецугли имеет большое научное и практическое значение, так как эти знания определяют выработку критериев и признаков для выявления подобного оруденения на других территориях. В настоящее время сосуществуют две модели формирования здесь такого оруденения: гидротермальная и гипергенная. Гидротермальная модель обосновывается разгрузкой гипотетических гидротерм, связанных с крупными тектоническими нарушениями в фундаменте с выходом в угленосные отложения в олигоцен-миоценовое время. Она получила наибольшее признание среди геологов с конца XX в. Ее привлекательность обусловлена автоматическим решением проблемы источника Ge в месторождении. В данной интерпретации источником являются гипотетические флюиды, привносящие Ge и характерные элементы-спутники в связи с вулканогенно-гидротермальными процессами в недрах [5, 10–15]. Проводниками таких флюидов являются крупные тектонические нарушения в фундаменте, возникающие или подновленные в период торфо-угленакопления. Проведенные эксплуатационные работы, вскрывшие значительную часть месторождения Спецугли, показали отсутствие каких-либо признаков гидротермальной деятельности в период после формирования коры выветривания по породам фундамента Павловской впадины. Следы гидротермальной деятельности выявлены лишь в связи со становлением гранитного массива вознесенского комплекса, слагающего фундамент, и в более поздний период в связи со становлением дайкового комплекса позднепермского возраста. В обоих случаях разрыв во времени между формированием гидротермально измененных пород (кварц-полевошпатовые метасоматиты и грейзены), связанного с ними редкометалльного оруденения и формированием германий-угольного оруденения составляет более 200 млн лет. На месторождении выяв-

лено одно мелкое постугольное тектоническое нарушение, но каких-либо следов гидротермальной деятельности в связи с ним не установлено. Да и само нарушение слишком локально. Здесь нет следов катаклаза и милонитизации, тектонических брекчий также не установлено. Содержание Ge и его спутников в зоне нарушения не повышено относительно других участков пласта. Не выявлено следов вулканической активности синхронной или субсинхронной угленакропленю (эоцен-олигоцен) как в пределах Павловской впадины, так и в ее обрамлении. Пепловые туфы, линзы которых выявлены над угленосной толщей, – это привнесенный пирокластический материал, и цирконы из них фиксируют возраст эксплозивных извержений на удалении от впадины. Таким образом, отсутствие каких-либо следов гидротермальной деятельности в пределах вскрытой части месторождения не позволяет рассматривать гидротермальную модель как рабочую.

Приводимые ранее доказательства гидротермальной природы германиевого оруденения такого типа ограничивались спецификой геохимической ассоциации Ge с W, Be, Sb и As. При этом отмечалось, что характерный набор элементов-спутников не может быть реализован с участием одного углекисло-азотного флюида из-за различия свойств элементов, формирующих ассоциацию [5]. Предполагалось, что формирование Ge–W и As–Hg–Sb ассоциаций элементов могло происходить из разных гидротермальных источников на разных стадиях рудообразования [5, 17]. Однако в месторождении Спецугли наиболее тесная связь выявлена между Ge и Sb ($r=0,91$), что предполагает их совместное отложение. К тому же многостадийность гидротермального рудообразования предполагает не только яркое проявление метасоматической зональности, но и многократное подновление тектонических зон для проникновения металлоносного флюида в верхние горизонты угленосной толщи, что вообще не установлено на изученном участке. Угленосные отложения практически не подвергнуты тектоническим деформациям и не содержат следов гидротермальной деятельности.

В некоторых работах приводились ссылки на наличие в отдельных горизонтах углевмещающих алевропесчаников микропрожилков карбоната, халцедона и хлорита [16, 17]. В качестве одного из критериев участия гидротермальных вод на примере месторождения Линканг (Китай) отмечено повышенное значение $\delta^{18}\text{O}$ [54]. Как установлено для Кузбасса, длительное взаимодействие содовых вод с углем и алюмосиликатными породами приводит не только к повышению минерализации, но и к существенному сдвигу изотопных отношений в сторону утяжеления $\delta^{18}\text{O}$ на 2–7 ‰ и $\delta^{13}\text{C}$ на 25,5–30,7 ‰ [55]. Содовые воды – наиболее распространенный тип вод в угольных бассейнах [56]. Высокая значимая корреляционная связь с Na у Ge ($r=0,79$), Sb ($r=0,90$), Hg ($r=0,73$), U ($r=0,70$), As ($r=0,62$) и других элементов-спутников германиевого оруденения, формирование редкоземельных карбонатов (бастнезит) в угольных пластах указывает на высокую вероятность участия содовых

вод в процессах перераспределения элементов в рудных телах. Гидротермы на месторождении Спецугли ранее связывались с базитовыми дайками кайнозойского возраста (интрузивные аналоги базальтов миоценового возраста), подсеченными скважинами в фундаменте [16, 35]. Как показали настоящие исследования, дайки с редкометалльной минерализацией имеют позднепермский возраст. По ним развита та же кора выветривания, что и по вмещающим их гранитам. Да и состав их, вероятно, не базитовый. Об этом свидетельствует характер графика нормированного на хондрит распределения РЗЭ с четко проявленным европиевым минимумом (рис. 5) ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0,20$), характерным для пород кислого состава. Для вмещающих дайки гранитов он ещё более контрастный ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0,13\text{--}0,16$).

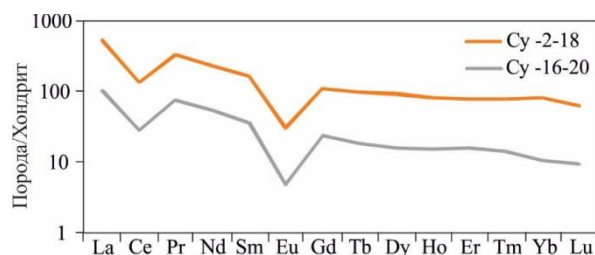


Рис. 5. Нормированные на хондрит по [41] графики распределения РЗЭ в выветрелых дайках фундамента участка Спецугли (СУ-2-18) и участка «Павловский-2» (СУ-16-20)

Fig. 5. Chondrite-normalized by [41] graphs of the REE distribution in the weathered foundation dikes of the Spetsugli (SU-2-18) and «Pavlovsky-2» (SU-16-20) areas

В ряде исследований признается, что источником Ge и попутных элементов, как в Спецуглях, так и в месторождении Линканг, являются породы фундамента угленосной впадины, но их поступление в угольный пласт обусловлено участием гидротермальных растворов [5, 14, 57, 58]. Следы гидротермальной деятельности неочевидны и представлены редкими новообразованиями сидерита, кальцита, хлорита и каолинита, формирование которых распространено и в условиях зоны гипергенеза без участия гидротерм. Связь редкометалльного оруденения с местными породами для месторождения Линканг доказывается также с использованием изотопных данных [58]. В данном случае отличие гидротермальной модели от классической гипергенной заключается только в участии в этом процессе термальных вод. Известно, что при отсутствии обогащенных Ge литологических комплексов пород даже при наличии вулканизма германиеносные термы не формируются [46]. Участие флюидов в процессах рудообразования всегда относительно легко распознается по наличию специфических минеральных ассоциаций, гидротермально-метасоматической зональности и текстурно-структурным особенностям. Ничего этого в пределах угленосного чехла на месторождении Спецугли не выявлено. Метасоматические процессы ярко проявлены в фундаменте Павловской впадины, в том числе

на участке Спецугли, где отчетливо картируется формация кварц-полевошпатовых матасоматитов и грейзенов. Но все эти гидротермально-метасоматические изменения происходили в период, предшествующий формированию коры выветривания в фундаменте, и являются доугольными. Следов посткоровых гидротермальных изменений пород фундамента во вскрытой части месторождения не установлено.

Еще в 1963 г. А.В. Костерин [59] заметил, что для углей Чихезского (Павловского) месторождения характерна очень контрастная отрицательная цериевая аномалия, и интерпретировал это как следствие окисления Се до четырехвалентного состояния и потери его либо в местах выноса или в процессе миграции. В любом случае РЗЭ претерпели этап окисления, прежде чем попали в угольный пласт. Это говорит о наличии коры выветривания по редкометалльным гранитам и дайкам как наиболее вероятном источнике РЗЭ в углях.

Как отмечено в многочисленных работах, вулканогенно-гидротермальные процессы отличаются специфичным поведением европия. Гидротермальные флюиды обычно обогащены Eu относительно трехвалентных РЗЭ [60–64]. На нормированных на хондрит графиках они дают отчетливые положительные аномалии. В некоторых случаях имеют место слабовыраженные отрицательные аномалии европия, которые связывают с процессом взаимодействия флюида с липаритами и дацитами [64]. Современные гидротермы не имеют и цериевого минимума. Слабо выраженная цериевая аномалия со временем формируется в процессе миграции гидротермальных флюидов в условиях зоны гипергенеза [61, 64]. Как видно из приведенных для месторождения Спецугли данных (рис. 4), во всех случаях для углей, углефицированной древесины из междупластий и дренирующих в германийносных пластах вод характерно наличие отчетливого европиевого минимума. В случае участия в этих процессах вод, связанных с базитовым магматизмом кайнозоя, имела бы место положительная аномалия Eu. Слабее проявлена отрицательная аномалия церия. Согласно исследованиям, распределение РЗЭ в аутигенных хемогенных и биогенных минералах имеет унаследованный характер, отражая их распределение в аквациях [65]. Все это свидетельствует о гипергенной природе накопления РЗЭ в углях месторождения за счет вмещающих их пород.

Из обобщенных данных известно, что в водах зоны гипергенеза вольфрамовых месторождений обнаруживается повышенное содержание весьма широкого комплекса редких и других элементов – W, Mo, Zn, Cu, Li, Rb, F, Sn, Hg, Sb, As [46, 66]. Спектр этих элементов в водах конкретных месторождений определяется минеральным составом руд месторождения и общей металлогенией региона. Полученные нами новые данные о составе останца грейзенизированных гранитов в фундаменте свидетельствуют, что эти породы могут рассматриваться в качестве источника большей части элементов из основной рудной ассоциации. Извлеченная из этих гранитов «биотитовая» фракция фактически представляет из себя редкоме-

талльный концентрат (табл. 4). Он аномально обогащен редкими щелочами (Li, Rb, Cs). Минеральное вещество этой фракции обогащено и другой группой элементов-примесей и может рассматриваться как источник в углях Zn, Ga, As, Y, Zr, Nb, Sn, Sb, лантаноидов, Tl, U и Th. Вклад этой фракции в общий баланс каждого элемента в углях различен, но в большинстве случаев, вероятно, значителен. Установлено, что большинство этих элементов содержится в ней в виде собственных микроминеральных фаз или входит в состав минералов в форме примесей. С этой фракцией связаны достаточно высокие концентрации W. Следует отметить, что изученная фракция извлечена из останца слабо грейзенизированного гранита. Исходя из особенностей зональности кварц-альбит-микроклиновых метасоматитов и грейзенов можно с уверенностью интерпретировать, что гипсометрически выше находились полнопроявленные грейзены, а возможно, и пегматиты, характерные для вознесенского комплекса [26], в настоящее время превращенные в каолиновую кору выветривания. Грейзены, по видимому, содержали W-Mo оруденение и обусловили обогащение углей W, Mo, Sn. На это указывает наличие в останце грейзенизированного гранита молибденита и наличие в углях вблизи гранитного выступа обломков шеелита микронного размера [22, 44]. Кроме того, в минеральной части угля пласта IIIн на участке непосредственного контакта с гранитным выступом помимо вторичного ангидрита (52–58 %) преобладает мусковит (17–20 %) и альбит (7–13 %).

Положительная значимая корреляционная связь германия в углях с W, Mo, редкими щелочами и Be позволяет рассматривать редкометалльные грейзены вознесенского комплекса в качестве основного источника Ge в углях месторождения Спецугли. Согласно исследованиям металлоносных грейзенов вознесенского комплекса в обрамлении и за пределами Павловской впадины, для них типично проявление топазовых разностей с содержанием топаза до 20 % [25]. Известно, что топазы отличаются аномально высоким содержанием Ge вплоть до 1500 г/т [38]. Аномально высокое содержание Sb и при этом тесная корреляционная связь Ge с Sb ($r=0,91$) позволяют предполагать наличие в источнике Ge-Sb минеральных фаз. К таким минералам относятся блеклые руды, типичные для грейзеновых W месторождений. В теннантите содержание Ge может достигать 0,5 %. Другие минеральные фазы (молибденит, сфалерит, халькопирит и др.), выявленные в составе грейзенизированных гранитов, также часто являются носителями аномально высокого Ge [38, 67]. В грейзенизированном граните из выступа фундамента на месторождении Спецугли выявлены сульфосоли, содержащие Sb и As. Помимо этого, Ge характеризуется высокой корреляционной связью с As, Hg, Cd, Ga, Y и тяжелыми лантаноидами. Вероятно, этот спектр элементов отражает формирование в породах фундамента гидротермального РЗЭ и сульфидного полиметалльного оруденения, связанного с дайковым комплексом поздней перми. Крупными проявлениями подобной минерализации являются расположенные к северо-

западу от месторождения Спецугли редкометалльные месторождения Вознесенского рудного района.

Гипергенная модель формирования руд месторождения Спецугли на основе имеющейся в настоящее время информации представляется наиболее обоснованной. В составе угля в угольных пластах установлены обломки касситерита, арсенопирита, топаза и киновари. Высокое содержание в углевмещающих песчаниках мусковита и серицита, микроклина, альбита, топаза и других характерных для грейзенов минеральных фаз (касситрита, шеелита) позволяет рассматривать в качестве потенциального источника Ge и W молибден-вольфрамовые грейзены. Наличие мелких кластогенных форм этих гидротермальных минералов указывает на формирование коры выветривания непосредственно в период накопления массы палеоторфяника. Устойчивость шеелита, вольфрамита и молибденита при выветривании в гумидном климате невелика, поэтому сохранность их минеральных фаз незначительна. Но W хорошо сорбируется органическим веществом торфа, образуя наиболее устойчивые соединения с гуминовыми кислотами и с лигнином. Важно отметить, что W является типоморфным элементом щелочных вод, формирующихся в кристаллических породах [46, 68]. В условиях щелочной среды он легко выщелачивается из шеелита и несколько хуже из вольфрамита. В кислой среде его подвижность ниже. Этим, вероятно, обусловлено наличие обедненных W железо-марганцевых корок непосредственно в коре выветривания и обогащенных им в угольных пластах вблизи коры выветривания. В первом случае в окислительных условиях вольфрамит легко разрушился, а щелочной раствор способствовал выносу вольфрама. В других условиях частично разложившийся вольфрамит с примесью гидроокислов Fe и Mn был перемещен в кислую или околонейтральную восстановительную среду палеоболота и был в ней законсервирован. Такие же фазы образуют Ge и Sb. Вольфрам в условиях зоны гипергенеза не отличается высокой подвижностью и, как правило, мигрирует на небольшие расстояния, не превышающие нескольких сотен метров [39, 45, 46]. Молибден, как более подвижный элемент в зоне гипергенеза, мигрирует более активно. Его следы выявлены И.Ю. Черыжовым на удалении 1,5 км от месторождения Спецугли в основании угленосной толщи разреза Павловский-2. Здесь установлено линзообразное тело, представленное молибденитом и развитым по нему ильземанитом. Аномальное содержание Mo отмечено также в отдельных пробах в золе нижних пластов месторождения. Аномалии Mo выявлены и в углях на контакте с корой выветривания гранита в пределах Павловского месторождения в 2 км к северу от Спецуглей.

Формирование коры выветривания, вероятно, происходило в основном на этапе формирования угленосных отложений. На это указывает наличие в основании угленосной толщи в углистых аргиллитах уранового оруденения [30]. Запасы руд незначительны, поэтому оно рассматривалось как забалансовое. Но сам факт наличия таких руд в составе подстилаю-

щих слабопроницаемых отложений свидетельствует о привносе U на стадии их накопления. Приуроченность их к возвышенностям в фундаменте свидетельствует о весьма вероятной их взаимосвязи с выветривающимися гранитами. Так как U обладает высокой подвижностью в зоне гипергенеза и способен выноситься на самых ранних стадиях выветривания гранита, в зрелых корах выветривания его крайне мало. Об этом, в частности, свидетельствует весьма низкое содержание его в коре выветривания гранитов фундамента, опробованных нами на двух разных участках Павловского месторождения. В обоих случаях его содержание не превышает 2 г/т. В то же время относительно свежий гранит, вскрытый в основании центрального поднятия на участке Спецугли, содержит 10–38 г/т урана. По радиогеохимической классификации такие граниты отнесены к группе редкометалльных высокорadioактивных гранитов.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о гидрогенном механизме формирования комплексного редкометалльного оруденения германий-угольного месторождения Спецугли в процессе формирования коры выветривания по грейзенизированным гранитам вознесенского комплекса без участия субсинхронных углеобразованию или постугольных гидротермальных флюидов. На это указывает состав оруденения, формы нахождения германия и сопутствующих элементов, формы рудных тел, минеральная и геохимическая зональность. Формированию месторождения способствовало наличие выступа гранитного фундамента в центре месторождения со специфическим редкометалльным оруденением, развитием по нему каолиновой коры выветривания и благоприятным гидрорежимом в период торфонакопления.

Заключение

Германий-угольное месторождение Спецугли отличается комплексным составом оруденения. Для металлоносных углей месторождения характерны аномально высокие, превышающие в десятки и даже сотни раз средние содержания для бурых углей мира, концентрации Ge, Sb, Hg, W, Li, Be, Cs, и As. Несколько менее аномальны уровни накопления U, Mo, Y, Rb, средних и тяжелых лантаноидов, Zr и Ga. В связи с этим месторождение может быть оценено как комплексное редкометалльно-угольное. Такой спектр элементов, существенно различающихся по своим свойствам, не может быть сформирован под влиянием одного гидротермального процесса. Такое оруденение может быть либо полигенно-полихронным, либо обусловлено гипергенными процессами.

Выполненный комплексный минералогический и геолого-структурный анализ особенностей состава и строения германий-угольного месторождения Спецугли позволяет пересмотреть принятую гидротермальную модель образования Ge оруденения в углях и обосновать предложенную ранее гипергенную модель. Полученные результаты хорошо согласуются с гидрогенной гипергенной моде-

лю образования комплексных германий-угольных месторождений, когда источником металлов являются породы фундамента, вмещающие угольные месторождения.

Образование германиевого и сопутствующего ему оруденения в месторождении Спецугли происходило под влиянием формирующейся коры выветривания по гидротермально-метасоматически измененному редкометалльному граниту Вознесенского комплекса, прорванному дайками позднепермского возраста. Редкометалльное оруденение отчетливо приурочено к выступу фундамента в центре месторождения, образуя концентрически-зональный ореол Ge и сопутствующих элементов вокруг него. Характер распределения Ge свидетельствует, что источник металла находился в пределах выступа. Граниты выступа фундамента под-

вергнуты гидротермально-метасоматическим изменениям с формированием кварц-альбит-микроклиновых метасоматитов и грейзенов, содержащих W-Mo и Hg-Sb-As минерализацию. Метасоматически измененные граниты и дайки подвергнуты поздним гипергенным изменениям с формированием каолиновой коры выветривания, с разрушением первичного эндогенного оруденения и выносом основных элементов в окружающие палеоторфяники. Оба типа эндогенного оруденения в гранитах и дайках проявились в аномальном накоплении W, Mo, Sb, Hg, As, Li, Rb, Cs, Be, U, Y, лантаноидов, Zn и Ga в германиеносных углях в эоцено-олигоценное время.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-17-00004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lincang superlarge germanium deposit in Yunnan province, China: sedimentation, diagenesis, hydrothermal process and mineralization / H. Zhuang, J. Lu, J. Fu, J. Liu // *Journal of China University of Geosciences*. – 1998. – V. 9 (2). – P. 129–136.
2. Germanium occurrence in Lincang superlarge deposit in Yunnan, China / H. Zhuang, J. Lu, J. Fu, J. Liu, C. Ren, D. Zou // *Science in China Series D: Earth Sciences*. – 1998. – V. 41. – P. 21–27.
3. Geochemistry and mineralogy of the Cretaceous Wulantuga high-germanium coal deposit in Shengli coal field, Inner Mongolia, Northeastern China / X. Zhuang, X. Querol, A. Alastuey, R. Juan, F. Plana, A. Lopez-Soler, G. Du, V.V. Martynov // *International Journal of Coal Geology*. – 2006. – V. 66. – P. 119–136.
4. Petrology, mineralogy, and geochemistry of the Ge-rich coal from the Wulantuga Ge ore deposit, Inner Mongolia, China: New data and genetic implications / S. Dai, X. Wang, V.V. Seredin, J.C. Hower, C.R. Ward, J.M.K. O'Keefe, W. Huang, T. Li, X. Li, H. Liu, W. Xue, L. Zhao // *International Journal of Coal Geology*. – 2012. – V. 90–91. – P. 72–99.
5. Elemental and mineralogical anomalies in the coal-hosted Ge ore deposit of Lincang, Yunnan, southwestern China: Key role of N₂-CO₂-mixed hydrothermal solutions / S. Dai, P. Wang, C.R. Ward, Y. Tang, X. Song, J. Jiang, J.C. Hower, T. Li, V.V. Seredin, N.J. Wagner, Y. Jiang, X. Wang, J. Liu // *International Journal of Coal Geology*. – 2015. – V. 152. – Part A. – P. 19–46.
6. Сапрыкин Ф.Я. Месторождения германия // *Рудные месторождения СССР. В 3-х т. / под ред. В.И. Смирнова. Изд. 2-е, перераб. и доп.* – М.: Недра, 1978. – Т. 3. – С. 464–471.
7. Редкие металлы в бурогольных месторождениях Приморья и их ресурсный потенциал / В.И. Вялов, А.И. Ларичев, Е.В. Кузеванова, А.Х. Богомолов, М.И. Гамов // *Региональная геология и металлогения*. – 2012. – № 51. – С. 96–105.
8. Вялов В.И., Олейникова Г.А., Наставкин А.В. Особенности распределения германия в углях Павловского месторождения // *Химия твердого топлива*. – 2020. – № 3. – С. 42–49.
9. Костин Ю.П., Мейтов Е.С. К генезису месторождений высокогерманиеносных углей и критериям их поисков // *Известия АН СССР. Серия геологическая*. – 1972. – № 1. – С. 112–119.
10. Костин Ю.П., Шарова И.Г., Бурьянов А.В. Закономерности распределения рассеянных элементов в углях одного германий-угольного месторождения // *Полезные ископаемые в осадочных толщах*. – М.: Наука, 1973. – С. 182–194.
11. Промышленные типы природных концентраций германия / В.В. Иванов, А.Я. Кац, Ю.П. Костин, Е.С. Мейтов, Е.Б. Соловьев. – М.: Недра, 1984. – 246 с.
12. Левицкий В.В., Седых А.К., Ульсямбаев Ш.Г. Германий-угольные месторождения Приморья // *Отечественная геология*. – 1994. – № 7. – С. 61–67.
13. Seredin V.V., Danilcheva J. Coal-hosted Ge deposits of the Russian Far East // *Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century* / Eds. A. Piestrinsky et al. – Lisse: Swets & Zeitlinger Publishers, 2001. – P. 89–92.
14. Седых А.К. Основные критерии поиска германий-угольных месторождений в приразломных впадинах зон активизации // *Геология угольных месторождений. Межвузовский научный тематический сборник*. – Екатеринбург: Изд-во Уральской государственной горно-геологической академии, 1999. – Вып. 9. – С. 302–311.
15. Petrological, geochemical, and mineralogical compositions of the low-Ge coals from the Shengli Coalfield, China: a comparative study with Ge-rich coals and a formation model for coal-hosted Ge ore deposit / S. Dai, J. Liu, C.R. Ward, J.C. Hower, P. Xie, Y. Jiang, M.M. Hood, J.M.K. O'Keefe, H. Song // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 71. – P. 318–349.
16. Середин В.В. Аномальные концентрации элементов-примесей в месторождении германия «Спецугли» (Павловское бурогольное месторождение, Южное Приморье). Сообщение 1. Сурьма // *Литология и полезные ископаемые*. – 2003. – № 2. – С. 183–191.
17. Середин В.В. Месторождения германия // *Крупные и суперкрупные рудные месторождения / под ред. Н.П. Лаврова, Д.В. Рундквиста*. – М.: ИГЕМ РАН, 2006. – Т. 3. – Кн. 2. – С. 707–736.
18. Seredin V.V., Finkelman R.B. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types // *International Journal of Coal Geology*. – 2008. – V. 76. – P. 253–289.
19. Павлюткин Б.И., Петренко Т.И., Чекрыжов И.Ю. Проблемы стратиграфии Павловского угольного поля (Приморье) // *Тихоокеанская геология*. – 2005. – Т. 24. – № 6. – С. 59–76.
20. Седых А.К. Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья (геологическое строение, минерация и геодинамика углегеоза). – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 248 с.
21. Кузеванова Е.М. Металлоносность углей кайнозойских бурогольных месторождений Приморья: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – СПб., 2014. – 26 с.
22. Арбузов С.И., Ильенко С.С., Чекрыжов И.Ю. Формы нахождения германия и вольфрама в германий-угольном месторождении Спецугли (Дальний Восток) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 60–77.
23. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000 (второе поколение). Листы L-53-XXXI и K-53-I - Вознесенская площадь. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016.
24. Руб М.Г., Руб А.К. Петрология редкометалльных гранитов Вознесенского рудного узла, Приморье // *Петрология*. – 1994. – Т. 2. – № 1. – С. 43–67.
25. Руб А.К., Руб М.Г. Редкометалльные граниты Приморья. – М.: ВИМС, 2006. – 86 с.
26. Кононец С.Н., Валитов М.Г., Изосов Л.А. Вознесенская гранит-риолитовая формация Приморья: проблемы геологии и металлогении // *Региональные проблемы*. – 2008. – № 10. – С. 55–63.
27. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // *Геохимия*. – 2003. – № 7. – С. 785–792.

28. Середин В.В. Редкоземельная минерализация в позднекайнозойских эксплозивных структурах (Ханкайский массив, Приморье) // Геология рудных месторождений. – 1998. – Т. 40. – № 5. – С. 403–418.
29. The plant biostratigraphy of the Cenozoic coal-bearing formations in Primorye, Russian Far East / V.I. Pavlyutkin, T.I. Petrenko, I.Y. Chekryzhov, V.P. Nechaev, T.A. Moore // International Journal of Coal Geology. – 2020. – V. 220. – Article number 103414.
30. Левицкий В.В., Иванов О.А. Подсчет запасов германия Павловского месторождения по состоянию на 01.12.1969 г. Т. 1. Геологоразведочный отчет. – Ярославский, 1969. – 350 с. Росгеолфонд, ЦФ, № 303740.
31. Петрологический атлас ископаемого органического вещества / В.И. Вялов, И.Б. Волкова, Г.А. Беленицкая, О.В. Петров, В.Н. Волков, Г.М. Волкова, М.В. Голицын, А.Б. Гуревич, В.М. Богомазов, А.И. Гинзбург, Л.Я. Кизильштейн, В.В. Гальчиков, А.П. Золотов, Г.А. Игнатьев, В.А. Косинский, В.Г. Коломенская, Т.Н. Молозина, Г.М. Парпарова, Н.В. Пронина, Г.В. Соколова, С.В. Щербакова. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. – 604 с.
32. Угольная база России. Т. V. Кн. 1. Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока (Хабаровский край, Амурская область, Приморский край, Еврейская АО). – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1997. – 371 с.
33. Аналитические подходы к количественному определению содержания химических элементов в углях и углистых породах с использованием методов ИСП МС и ИНАА / Н.В. Зарубина, М.Г. Блохин, Д.С. Остапенко, И.Ю. Чекрыжов, С.И. Арбузов., А.Ф. Судыко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 99–112.
34. Середин В.В. Аномальные концентрации элементов-примесей в месторождении германия «Спецугли» (Павловское бурое угольное месторождение, Южное Приморье). Сообщение 2. Рубидий и цезий // Литология и полезные ископаемые. – 2003. – № 3. – С. 279–287.
35. Середин В.В. Редкоземельные элементы в германиеносных пластах месторождения «Спецугли» (Приморье, Россия) // Геология рудных месторождений. – 2005. – Т. 47. – № 3. – С. 265–283.
36. Вялов В.И., Наставкин А.В., Шишов Е.П. Особенности распределения сопутствующих германию промышленно ценных микроэлементов в углях Павловского месторождения (участок «Спецугли») // Химия твердого топлива. – 2021. – № 1. – С. 17–28.
37. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: world average for trace element contents in black shales and coals // International Journal of Coal Geology. – 2009. – V. 78. – P. 135–148.
38. Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным редким металлам / В.В. Иванов, О.Е. Юшко-Захарова, Л.Ф. Борисенко, Л.Н. Овчинников. – М.: Недра, 1989. – 462 с.
39. Чечель Л.П. Распределение редких щелочных элементов в водах горнорудных объектов Восточного Забайкалья // Геоферные исследования. – 2020. – № 4. – С. 98–107.
40. The unique Abramovka REE-rich mineralization is a potential source of REE for the Pavlovsk coals deposit (Primorsky Krai, Russia) / I. Chekryzhov, I. Tarasenko, E. Vakh, S. Vysotsky // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – Article number 01007.
41. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. – Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985. – 312 p.
42. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium // International Journal of Coal Geology. – 2012. – V. 94. – P. 67–93.
43. Осокин П.В. О распределении элементов-примесей в углях Северной Монголии и Южного Забайкалья // Литология и полезные ископаемые. – 1993. – № 2. – С. 113–120.
44. Modes of occurrence of germanium and tungsten in the Spetsugli germanium ore field, Pavlovka brown coal deposit, Russian Far East / S.I. Arbutov, D.A. Spears, S.S. Ilenok, I.Y. Chekryzhov, V.P. Ivanov // Ore Geology Reviews. – 2021. – V. 132. – Article number 103986.
45. Крайнов С.Р., Капранов С.Д., Петрова Н.Г. Основные особенности геохимии вольфрама в подземных и поверхностных водах районов вольфрамовых месторождений // Геохимия. – 1965. – № 10. – С. 1234–1245.
46. Крайнов С.Н. Геохимия редких элементов в подземных водах. – М.: Недра, 1973. – 296 с.
47. Рудоконтролирующие факторы и оценка перспектив вольфрамоносности отдельных территорий центрального Сихотелия / Б.М. Шашорин, А.И. Макаров, Е.В. Матвеева, Д.Е. Выдрич // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 5. – С. 8–18.
48. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) / S.I. Arbutov, A.V. Volostnov, L.P. Rikhvanov, A.M. Mezhibor, S.S. Ilenok // International Journal of Coal Geology. – 2011. – V. 86. – P. 318–328.
49. Smellie J.A.T., Stuckless J.S. Element mobility studies of two drill-cores from the Göttemar Granite (Kråkemåla test site), southeast Sweden // Chemical Geology. – 1985. – V. 51. – P. 55–78.
50. Geochemical and petrological studies of a uraniumiferous granite from the Granite Mountains, Wyoming / J.S. Stuckless, C.M. Bunker, C.A. Bush, W.P. Doering, J.H. Scott // Journal of Research of the U.S. Geological Survey. – 1977. – V. 5. – P. 61–81.
51. Stuckless J.S., Nkomo I.T. Uranium-lead isotope systematics in uraniumiferous alkali-rich granites from the Granite Mountains, Wyoming: implications for uranium source rocks // Economic Geology. – 1978. – V. 73. – P. 427–441.
52. Stuckless J.S., Nkomo I.T. Preliminary investigations of U-Th-Pb systematics in uranium-bearing minerals from two granitic rocks from the Granite Mountains, Wyoming // Economic Geology. – 1980. – V. 75. – P. 289–295.
53. Титаева Н.А. Геохимия природных радиоактивных рядов распада. – М.: ГЕОС, 2005. – 226 с.
54. Geological and geochemical constraints on the origin of the giant Lincang coal seam-hosted germanium deposit, Yunnan, SW China: a review / R.-Z. Hu, H.-W. Qi, M.-F. Zhou, W.-C. Su, X.-W. Bi, J.-T. Peng, H. Zhong // Ore Geology Reviews. – 2009. – V. 36. – P. 221–234.
55. Лепокурова О.Е. Содовые подземные воды юга Кузбасса: изотопно-химические особенности и условия формирования // Геохимия. – 2018. – № 9. – С. 904–919.
56. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: compositions, types, and formation conditions // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 116. – Article number 104579.
57. Enrichment of germanium and associated arsenic and tungsten in coal and roll-front uranium deposits / B. Etschmann, W. Liu, K. Li, S. Dai, F. Reith, D. Falconer, G. Kerr, D. Paterson, D. Howard, P. Kappen, J. Wykes, J. Brugger // Chemical Geology. – 2017. – V. 463. – P. 29–49.
58. Strontium isotopes in high- and low-Ge coals from the Shengli Coalfield, Inner Mongolia, northern China: new indicators for Ge source / J. Liu, B.F. Spiro, S. Dai, D. French., I.T. Graham, X. Wang, L. Zhao, J. Zhao, R. Zeng // International Journal of Coal Geology. – 2021. – V. 233. – Article number 103643.
59. Костерин А.В., Королев Ф.Д., Кизюра В.Е. Редкие земли в Чихезском буроеугольном месторождении // Геохимия. – 1963. – № 7. – С. 594–595.
60. Haas J.R., Shock E.L., Sassani D.C. Rare earth elements in hydrothermal systems: Estimates of standard partial molal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – P. 4329–4350.
61. Hydrogeochemistry and rare earth element behavior in a volcanically acidified watershed in Patagonia, Argentina / C.H. Gammons, S.A. Wood, F. Pedrozo, J.C. Varecamp, B.J. Nelson, C.L. Shope, G. Baffico // Chemical Geology. – 2005. – V. 222. – P. 249–267.
62. Чудаева В.А., Чудаев О.В. Особенности накопления и фракционирования редкоземельных элементов в поверхностных водах Дальнего Востока в условиях природных и антропогенных аномалий // Геохимия. – 2011. – № 5. – С. 523–549.
63. Geochemical processes assessed by rare earth elements fractionation at «Laguna Verde» acidic-sulphate crater lake (Azufra volcano, Colombia) / C. Inguaggiato, V. Burbano, D. Rouwet, G. Garzon // Applied Geochemistry. – 2017. – V. 79. – P. 65–74.

64. Карпов Г.А., Николаева А.Г., Алехин Ю.В. Содержание и источники редкоземельных элементов в современных вулканических гидротермальных системах Камчатки // Петрология. – 2013. – Т. 21. – № 2. – С. 163–176.
65. Holser W.T. Evaluation of the application of rare-earth elements to paleoceanography // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology – 1997. – V. 132. – P. 309–323.
66. Замана Л.В., Чечель Л.П., Абрамова В.А. Гидрогеохимия зоны техногенеза рудных месторождений Восточного Забайкалья // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2018. – С. 39–46.
67. Bernstein L.R. Germanium geochemistry and mineralogy // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1985. – V. 49. – P. 2409–2422.
68. Крайнов С.Н., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические прикладные и экологические аспекты. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

Арбузов С.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чекрыжов И.Ю., научный сотрудник лаборатории геохимии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Ильенок С.С., кандидат геолого-минералогических наук, ассистент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Соктоев Б.Р., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Соболева Е.Е., ведущий инженер по охране окружающей среды, РУ «Новошахтинское» ООО «Приморскуголь».

UDC 553.493:550.42

NEW DATA ON GEOCHEMISTRY AND GENESIS OF THE SPETSUGLI GERMANIUM-COAL DEPOSIT (PRIMORSKY KRAI)

Sergey I. Arbuzov¹,
siarbuzov@mail.ru

Igor Yu. Chekryzhov²,
chekr2004@mail.ru

Sergey S. Ilenok¹,
ilenokss@tpu.ru

Bulat R. Soktoev¹,
bulatsoktoev@tpu.ru

Elena E. Soboleva³,
SobolevaEE@suek.ru

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

² Far East Geological Institute FEB RAS,
159, 100-leyita Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russia.

³ Novoshakhtinskoe surface mine office, OOO Primorskugol,
29, Tigrovaya street, 690090, Vladivostok, Russia.

The relevance of this research is conditioned by the need to develop predictive and prospecting criteria for identifying a strategically important type of germanium raw material – germanium-coal deposits.

The main aim is to study the geochemical features and conditions for the formation of complex rare-metal mineralization in coals of the Spetsugli deposit (Far East) and by this example develop a geological-geochemical model of the formation of deposits of similar type.

Objects: coal, coal-bearing rocks, underground waters and basement rocks of the germanium-coal deposit.

Methods: geological and geochemical sampling, inductively coupled plasma mass spectrometry, instrumental neutron activation analysis, scanning electron microscopy, optical microscopy, X-ray phase analysis, correlation analysis.

Results. New data on the geological structure and geochemistry of coals and coal-bearing rocks in the Spetsugli germanium-coal deposit in the Primorsky Krai were obtained. The complex polyelement composition of rare-metal mineralization in the deposit is explained. It is consistent with geochemistry and minerageny of basement rocks and the framing of the Pavlovsk depression. Anomalously high concentrations of Ge, Sb, Hg, W, Li, Be, Cs, and As are typical in metalliferous coals; they are tens and hundreds of times higher than the average content in lignite worldwide. The accumulation levels of U, Mo, Y, Rb, REE, Zn and Ga are somewhat less anomalous. The complex mineralogical-geochemical and geological-structural analysis of the composition and structure of the Spetsugli Ge-coal deposit made it possible to reevaluate the accepted hydrothermal model of Ge mineralization in coals. It also helped to validate the previously proposed hypergene model, which states that the sources of metals are basement rocks hosting coal deposits. The pre-Cenozoic age of endogenous rare-metal mineralization in granites of the basement was substantiated. The formation of Ge and accompanying mineralization in the Spetsugli deposit was influenced by the forming weathering crust over the rare-metal granite of the Voznesensky complex cut by dikes of the Late Permian age. The deposit is confined to a granite upland, forming a concentric-zonal halo of Ge and associated elements around it. Granites underwent hydrothermal and metasomatic alteration which resulted in quartz-albite-microcline metasomatites and greisens containing W-Mo and Hg-Sb-As mineralization. Rare-metal mineralization in coals is associated with the formation of kaolin weathering crust over granites, removal and redeposition of basic elements in the surrounding peat paleo-bogs in the Paleogene.

Key words:

Germanium-coal deposit, coal, geochemistry, rare elements, rare-metal mineralization, conditions of formation, hydrogenous model.

The research was carried out under the support of the grant of the Russian Science Foundation (Project no. 18-17-00004).

REFERENCES

1. Zhuang H., Lu J., Fu J., Liu J. Lincang superlarge germanium deposit in Yunnan province, China: sedimentation, diagenesis, hydrothermal process and mineralization. *Journal of China University of Geosciences*, 1998, vol. 9 (2), pp. 129–136.
2. Zhuang H., Lu J., Fu J., Liu J., Ren C., Zou D. Germanium occurrence in Lincang superlarge deposit in Yunnan, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1998, vol. 41, pp. 21–27.
3. Zhuang X., Querol X., Alastuey A., Juan R., Plana F., Lopez-Soler A., Du G., Martynov V.V. Geochemistry and mineralogy of the Cretaceous Wulantuga high-germanium coal deposit in Shengli coal field, Inner Mongolia, Northeastern China. *International Journal of Coal Geology*, 2006, vol. 66, pp. 119–136.
4. Dai S., Wang X., Seredin V.V., Hower J.C., Ward C.R., O'Keefe J.M.K., Huang W., Li T., Li X., Liu H., Xue W., Zhao L. Petrology, mineralogy, and geochemistry of the Ge-rich coal from the Wulantuga Ge ore deposit, Inner Mongolia, China: new data and genetic implications. *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 90–91, pp. 72–99.
5. Dai S., Wang P., Ward C.R., Tang Y., Song X., Jiang J., Hower J.C., Li T., Seredin V.V., Wagner N.J., Jiang Y., Wang X., Liu J.

- Elemental and mineralogical anomalies in the coal-hosted Ge ore deposit of Lincang, Yunnan, southwestern China: key role of N₂-CO₂-mixed hydrothermal solutions. *International Journal of Coal Geology*, 2015, vol. 152, P. A, pp. 19–46.
6. Saprykin F.Ya. Mestorozhdeniya germaniya [Germanium deposits]. *Rudnye mestorozhdeniya SSSR* [Ore deposits of USSR]. In 3 vol. Ed. by V.I. Smirnov. Moscow, Nedra Publ., 1978. Vol. 3, pp. 464–471.
 7. Vyalov V.I., Larichev A.I., Kuzevanova E.V., Bogomolov A.Kh., Gamov M.I. Rare metals in the brown coal deposits of Primorye and their resource potential. *Regional geology and metallogeny*, 2012, vol. 51, pp. 96–105. In Rus.
 8. Vyalov V.I., Oleinikova G.A., Nastavkin A.V. Distribution of germanium in coals of the Pavlovsk deposit. *Solid Fuel Chemistry*, 2020, vol. 54, pp. 163–169.
 9. Kostin Yu.P., Meitov E.S. K genezisu mestorozhdeniy vysokogermanienosnykh ugley i kriteriyam ikh poiskov [On the genesis of high-germanium coal deposits and the criteria for their forecast]. *Proceedings of USSR Academy of Sciences. Geology*, 1972, vol. 1, pp. 112–119.
 10. Kostin Yu.P., Sharova I.G., Buryanov A.V. Zakonomernosti raspredeleniya rasseyannykh elementov v uglyakh odnogo germaniy-ugolnogo mestorozhdeniya [Regularities of the scattered elements distribution in the coals of one germanium-coal deposit]. *Poleznye iskopaemye v osadochnykh tolschakh* [Mineral deposits in sedimentary strata]. Moscow, Nedra Publ., 1973. pp. 182–194.
 11. Ivanov V.V., Kats A.Ya., Kostin Yu.P., Meitov E.S., Solovyev E.B. *Promyshlennyye tipy prirodnykh kontsentratsiy germaniya* [Types of germanium industrial mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 246 p.
 12. Levitskiy V.V., Sedykh A.K., Ulsyambaev Sh.G. Germaniy-ugolnye mestorozhdeniya Primorya [Germanium-bearing coal deposits of Primorye]. *National Geology*, 1994, vol. 7, pp. 61–67.
 13. Seredin V.V., Danilcheva J. Coal-hosted Ge deposits of the Russian Far East. *Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century*. Ed. by A. Piestrynsky. Lisse, Swets & Zeitlinger Publishers, 2001. pp. 89–92.
 14. Sedykh A.K. Osnovnye kriterii poiska germaniy-ugolnykh mestorozhdeniy v prirazlomnykh vpadinakh zon aktivizatsii [Main forecast criteria for germanium-coal deposits in fault-line depressions of the activation zones]. *Geologiya ugolnykh mestorozhdeniy* [Coal deposits geology]. Ekaterinburg, Ural State Mining and Geological Academy Publ. House, 1999. Vol. 9, pp. 302–311.
 15. Dai S, Liu J., Ward C.R., Hower J.C., Xie P., Jiang Y., Hood M.M., O'Keefe J.M.K., Song H. Petrological, geochemical, and mineralogical compositions of the low-Ge coals from the Shengli Coalfield, China: a comparative study with Ge-rich coals and a formation model for coal-hosted Ge ore deposit. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 71, pp. 318–349.
 16. Seredin V.V. Anomalous trace elements contents in the Spetsugli germanium deposit (Pavlovsk brown coal deposit, Southern Primorye). P. 1. Stibium. *Lithology and Mineral Resources*, 2003, vol. 2, pp. 183–191. In Rus.
 17. Seredin V.V. Mestorozhdeniya germaniya [Germanium deposits]. *Krupnye i superkrupnye rudnye mestorozhdeniya* [Large and super-large ore deposits]. Eds. N.P. Laverov, D.V. Rundkvist. Moscow, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS Publ., 2006. Vol. 3, P. 2, pp. 707–736.
 18. Seredin V.V., Finkelman R.B. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types. *International Journal of Coal Geology*, 2008, vol. 76, pp. 253–289.
 19. Pavlyutkin B.I., Petrenko T.I., Chekryzhov I.Yu. The problems of the stratigraphy of the Pavlovka coal-field tertiary deposits, Primorye. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2005, vol. 24, no. 6, pp. 59–76. In Rus.
 20. Sedykh A.K. *Kaynozoykskie riftogenyye vpadiny Primorya (geologicheskoe stroenie, minerageniya i geodinamika uglegeneza)* [Cenozoic rift basins of Primorye (geological structure, mineralogy and geodynamics of coal formation)]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2008. 248 p.
 21. Kuzevanova E.M. *Metallonosnost ugley kaynozoykskikh burougolnykh mestorozhdeniy Primorya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Metal content in coals of Cenozoic brown coal deposits, Primorye. Cand. Diss. Abstract]. St. Petersburg, 2014. 26 p.
 22. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Chekryzhov I.Yu. Modes of occurrence of germanium and tungsten in the Spetsugli germanium ore field (Russian Far East). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 60–77. In Rus.
 23. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Mashtab 1:200000 (vtoroe pokolenie). Listy L-53-XXXI i K-53-I - Voznesenskaya ploshchad* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000 (second edition). Chart sheets L-53-XXXI and K-53-I – Vosnesenskaya area]. St. Petersburg, Cartographic enterprise of A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, 2016.
 24. Rub M.G., Rub A.K. Petrology of rare-metal granites of the Voznesensky ore node, Primorye. *Petrology*, 1994, vol. 2, no. 1, pp. 43–67. In Rus.
 25. Rub A.K., Rub M.G. *Redkometalnye granity Primorya* [Rare-metal granites of Primorye]. Moscow, All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky Publ. House, 2006. 86 p.
 26. Kononets S.N., Valitov M.G., Izosov L.A. Voznesenskaya granite-rhyolite formation of Primorye: problems of geology and metallogeny. *Regional problems*, 2008, no. 10, pp. 55–63. In Rus.
 27. Grigor'ev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust. *Geochemistry International*, 2003, vol. 41, no. 7, pp. 711–718.
 28. Seredin V.V. Rare earth mineralization in late Cenozoic explosion structures (Khankai massif, Primorskiy Krai, Russia). *Geology of Ore Deposits*, 1998, vol. 40, no. 5, pp. 357–371.
 29. Pavlyutkin B.I., Petrenko T.I., Chekryzhov I.Yu., Nechaev V.P., Moore T.A. The plant biostratigraphy of the Cenozoic coal-bearing formations in Primorye, Russian Far East. *International Journal of Coal Geology*, 2020, vol. 220, article number 103414.
 30. Levitskiy V.V., Ivanov O.A. *Podschet zapasov germaniya Pavlovskogo mestorozhdeniya po sostoyaniyu na 01.12.1969 g. T. 1. Geologorazvedochny otchet* [Germanium reserve assessment in Pavlovsk deposit as on 01.12.1969. Vol. 1. Geological survey report]. Yaroslavl, 1969. 350 p. Rosgeofond, TsF, No. 303740
 31. Vyalov V.I., Volkova I.B., Belenitskaya G.A., Petrov O.V., Volkov V.N., Volkova G.M., Golitsin M.V., Gurevich A.B., Bogomazov V.M., Ginzburg A.I., Kizilshstein L.Ya., Galchikov V.V., Zolotov A.P., Ignatiev G.A., Kosinsky V.A., Kolomenskaya V.G., Molozina T.N., Parparova G.M., Pronina N.V., Sokolova G.V., Scherbakova S.V. *Petrologicheskii atlas iskopaemogo organicheskogo veshchestva* [Petrological atlas of fossil organic matter of Russia]. St. Petersburg, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute Publ. House, 2006. 604 p.
 32. *Ugolnaya baza Rossii. T. V. Kn. 1. Ugolnye basseyny i mestorozhdeniya Dalnego Vostoka (Habarovskiy kray, Amurskaya oblast, Primorskiy kray, Evreyskaya AO)* [Coal base of Russia. Vol. V, P. 1. Coal basins and deposits of Far East (Khabarovsk Krai, Amur Oblast, Primorski Krai, Jewish Autonomous Oblast)]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1997. 371 p.
 33. Zarubina N.V., Blokhin M.G., Ostapenko D.S., Chekryzhov I.Yu., Arbuzov S.I., Sudyko A.F. Analytical approaches to the quantitative determination of the chemical elements concentrations in coals and carbonaceous rocks using ICP MS and INAA. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 99–112. In Rus.
 34. Seredin V.V. Anomalous trace elements contents in the Spetsugli germanium deposit (Pavlovsk brown coal deposit, Southern Primorye). P. 2. Rubidium and cesium. *Lithology and Mineral Resources*, 2003, vol. 3, pp. 279–287. In Rus.
 35. Seredin V.V. Rare earth elements in germanium-bearing coal seams of the Spetsugli deposit (Primor'e region, Russia). *Geology of Ore Deposits*, 2005, vol. 47, no. 3, pp. 238–255.
 36. Vyalov V.I., Nastavkin A.V., Shishov E.P. Distribution of industrially valuable trace elements associated with germanium in the coals of the Pavlovsk deposit (Spetsugli section). *Solid Fuel Chemistry*, 2021, vol. 55, pp. 14–25.
 37. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: world average for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 78, pp. 135–148.
 38. Ivanov V.V., Yushko-Zakharova O.E., Borisenko L.F., Ovchinnikov L.N. *Geologicheskii spravochnik po siderofilnyim i khalkofil-*

- nym redkim metallam* [Geological handbook of siderophilic and chalcophilic rare metals]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 462 p.
39. Chechel L.P. Distribution of rare alkaline elements in water mining objects of the Eastern Transbaikalia. *Geosphere Research*, 2020, vol. 4, pp. 98–107. In Rus.
 40. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1985. 312 p.
 41. Chekryzhov I., Tarasenko I., Vakh E., Vysotsky S. The unique Abramovka REE-rich mineralization is a potential source of REE for the Pavlovsk coals deposit (Primorsky Krai, Russia). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, Article number 01007.
 42. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 94, pp. 67–93.
 43. Osokin P.V. On the distribution of trace elements in the coals of Northern Mongolia and Southern Transbaikalia. *Lithology and Mineral Resources*, 1993, vol. 2, pp. 113–120. In Rus.
 44. Arbuzov S.I., Spears D.A., Ilenok S.S., Chekryzhov I.Y., Ivanov V.P. Modes of occurrence of germanium and tungsten in the Spetsugli germanium ore field, Pavlovka brown coal deposit, Russian Far East. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 132, Article number 103986.
 45. Kraynov S.R., Kapranov S.D., Petrova N.G. Osnovnye osobennosti geokhimii volframa v podzemnykh i poverkhnostnykh vodakh ruyonov volframovykh mestorozhdeniy [The main features of the tungsten geochemistry in underground and surface waters in areas of tungsten deposits]. *Geokhimiya*, 1965, no. 10, pp. 1234–1245.
 46. Kraynov S.R. *Geokhimiya redkikh elementov v podzemnykh vodakh* [Geochemistry of rare elements in groundwater]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 296 p.
 47. Shashorin B.N., Makarov A.I., Matveeva E.V., Vydrich D.E. Ore-controlling factors and estimation of wolframtones individual territories Central Sikhote-Alin. *Prospect and protection of mineral resources*, 2019, no. 5, pp. 8–18. In Rus.
 48. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Ilenok S.S. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia). *International Journal of Coal Geology*, 2011, vol. 86, pp. 318–328.
 49. Smellie J.A.T., Stuckless J.S. Element mobility studies of two drill-cores from the Göttemar Granite (Kråkemåla test site), south-east Sweden. *Chemical Geology*, 1985, vol. 51, pp. 55–78.
 50. Stuckless J.S., Bunker C.M., Bush C.A., Doering W.P., Scott J.H. Geochemical and petrological studies of a uraniferous granite from the Granite Mountains, Wyoming. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 1977, vol. 5, pp. 61–81.
 51. Stuckless J.S., Nkomo I.T. Uranium-lead isotope systematics in uraniferous alkali-rich granites from the Granite Mountains, Wyoming; implications for uranium source rocks. *Economic Geology*, 1978, vol. 73, pp. 427–441.
 52. Stuckless J.S., Nkomo I.T. Preliminary investigations of U-Th-Pb systematics in uranium-bearing minerals from two granitic rocks from the Granite Mountains, Wyoming. *Economic Geology*, 1980, vol. 75, pp. 289–295.
 53. Titaeva N.A. *Geokhimiya prirodnykh radioaktivnykh ryadov raspada* [Geochemistry of natural radioactive decay series]. Moscow, GEOS Publ., 2005. 226 p.
 54. Hu R.-Z., Qi H.-W., Zhou M.-F., Su W.-C., Bi X.-W., Peng J.-T., Zhong H. Geological and geochemical constraints on the origin of the giant Lincang coal seam-hosted germanium deposit, Yunnan, SW China: a review. *Ore Geology Reviews*, 2009, vol. 36, pp. 221–234.
 55. Lepokurova O.E. Sodic groundwaters in the Southern Kuznetsk basin: isotopic and chemical characteristics and genesis. *Geochemistry International*, 2018, vol. 56, no. 9, pp. 934–949.
 56. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 116, Article number 104579.
 57. Etschmann B., Liu W., Li K., Dai S., Reith F., Falconer D., Kerr G., Paterson D., Howard D., Kappen P., Wykes J., Brugger J. Enrichment of germanium and associated arsenic and tungsten in coal and roll-front uranium deposits. *Chemical Geology*, 2017, vol. 463, pp. 29–49.
 58. Liu J., Spiro B.F., Dai S., French D., Graham I.T., Wang X., Zhao L., Zhao J., Zeng R. Strontium isotopes in high- and low-Ge coals from the Shengli Coalfield, Inner Mongolia, northern China: New indicators for Ge source. *International Journal of Coal Geology*, 2021, vol. 233, Article number 103643.
 59. Kosterin A.V., Korolev F.D., Kizyura V.E. Redkie zemli v Chikhezskom burougolnom mestorozhdenii [Rare-earth elements in Chikhez brown coal deposit]. *Geokhimiya*, 1963, no. 7, pp. 594–595. In Rus.
 60. Haas J.R., Shock E.L., Sassani D.C. Rare earth elements in hydrothermal systems: Estimates of standard partial molal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, pp. 4329–4350.
 61. Gammons C.H., Wood S.A., Pedrozo F., Varecamp J.C., Nelson B.J., Shope C.L., Baffico G. Hydrogeochemistry and rare earth element behavior in a volcanically acidified watershed in Patagonia, Argentina. *Chemical Geology*, 2005, vol. 222, pp. 249–267.
 62. Chudaeva V.A., Chudaev O.V. Accumulation and fractionation of rare earth elements in surface waters of the Russian Far East under the conditions of natural and anthropogenic anomalies. *Geochemistry International*, 2011, vol. 49, no. 5, pp. 498–524.
 63. Inguaggiato C., Burbano V., Rouwet D., Garzon G. Geochemical processes assessed by rare earth elements fractionation at «Laguna Verde» acidic-sulphate crater lake (Azufzal volcano, Colombia). *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 79, pp. 65–74.
 64. Karpov G.A., Nikolaeva A.G., Alekhin Y.V. Abundances and sources of rare-earth elements in the modern volcanogenic hydrothermal systems of Kamchatka. *Petrology*, 2013, vol. 21, no. 2, pp. 145–157.
 65. Holser W.T. Evaluation of the application of rare-earth elements to paleoceanography. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, vol. 132, pp. 309–323.
 66. Zamana L.V., Chechel L.P., Abramova V.A. Hidrogeokhimiya zony tekhnogeneza rudnykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykalya [Hydrogeochemistry of the zone of technogenesis of ore deposits Eastern Transbaikalia]. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami. Materialy III Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Geological evolution of water-rock interaction. Proc. of III All-Russian scientific conference]. Ulan-Ude, Buryat Scientific Centre SB RAS Publ. House, 2018. pp. 39–46.
 67. Bernstein L.R. Germanium geochemistry and mineralogy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, vol. 49, pp. 2409–2422.
 68. Kraynov S.N., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of underground waters. Theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2012. 672 p.

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Sergey I. Arbuzov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Igor Yu. Chekryzhov, researcher, Far East Geological Institute FEB RAS.

Sergey S. Ilenok, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Bulat R. Soktoev, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena E. Soboleva, lead engineer for environmental protection, Novoshakhtinskoe surface mine office, OOO Primorskugol.

УДК 621.311.24

МОДЕЛЬ СКОРОСТИ ВЕТРА НА ОСНОВЕ ДРОБНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Давыдов Денис Юрьевич¹,
denisyudavydov@gmail.com

Обухов Сергей Геннадьевич¹,
serob99@mail.ru

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

Актуальной проблемой развития и повышения конкурентоспособности нефтегазовой отрасли является решение задачи надежного и эффективного электроснабжения технологических объектов новых месторождений и магистральных нефтегазопроводов, территориально удаленных от центральной электрической сети. Одним из эффективных способов решения данной проблемы является применение ветроэнергетических установок. Первоочередной задачей проектирования и технико-экономического обоснования применения ветроэнергетических установок является прогноз изменения скоростей ветра в месте установки электростанции. Стохастическая природа ветра и его большая изменчивость во времени и пространстве определяют высокую сложность данной задачи, для решения которой используют методы математического моделирования. Известные модели скорости ветра на основе цепей Маркова, авторегрессии и скользящего среднего не позволяют осуществлять варьирование шага моделирования, что ограничивает возможность их применения для имитационного моделирования режимов ветроэнергетических установок и энергетических систем на их основе. В статье предложена модель скорости ветра на основе стохастического дифференциального уравнения, устраняющая данный недостаток.

Цель: разработка модели скорости ветра на основе стохастического дифференциального уравнения дробного процесса Орнштейна–Уленбека с периодической функцией среднего значения, обеспечивающей моделирование статических и динамических режимов работы ветроэнергетической установки на различных временных интервалах.

Методы: математическое и компьютерное моделирование с использованием программной среды MatLab/Simulink.

Результаты. Предложенная модель, в отличие от известных моделей подобного типа, воспроизводит как суточные, так и сезонные вариации скорости ветра, а также долговременную корреляционную зависимость моделируемого процесса, что позволяет осуществлять моделирование рабочих режимов ветроэнергетических установок на различных временных интервалах с требуемой дискретизацией. Валидация модели выполнена с использованием данных климатических наблюдений скорости ветра из электронного архива Всероссийского института гидрометеорологической информации. Адекватность модели подтверждена хорошей степенью соответствия моделируемых траекторий скорости ветра с данными фактических наблюдений, зарегистрированных на 518 метеостанциях, расположенных на территории России.

Ключевые слова:

Ветроэнергетика, моделирование скорости ветра, стохастические дифференциальные уравнения, дробное броуновское движение, временные ряды.

Введение

В настоящее время большая часть бюджета РФ обеспечивается за счет доходов от продажи нефти и газа, что определяет ведущую роль нефтегазовой промышленности в социально-экономическом развитии страны. Для развития нефтегазовой отрасли необходимо освоение новых месторождений и строительство магистральных нефтегазопроводов, которые преимущественно располагаются в районах, удаленных от центральной электрической сети. Надежное и эффективное электроснабжение технологических объектов децентрализованных регионов является важной и актуальной задачей нефтегазовой промышленности, что определяет высокие требования к надежности систем электроснабжения. Известные стандартные проекты систем электроснабжения не всегда отвечают установленным требованиям надежности, что требует применения новых технических решений. Одним из таких решений является применение в системах электроснабжения ветроэнергетических установок (ВЭУ).

Положительный опыт применения оффшорных ветроэлектростанций для электроснабжения нефтя-

ных шельфовых месторождений приведен в работе [1], технология термической интенсификации добычи нефти, основанная на применении ВЭУ, описана в работе [2], высокая оценка перспектив применения ВЭУ для энергообеспечения объектов газовой промышленности получена в работах [3, 4]. Результаты проведенных исследований доказывают, что применение ВЭУ в системах электроснабжения технологических объектов нефтегазовой промышленности обеспечивает снижение энергоемкости и себестоимости добываемых георесурсов, а также повышает экологическую и энергетическую безопасность в районах децентрализованного энергоснабжения.

Для решения задач технико-экономического обоснования и проектирования энергетических систем с применением ВЭУ необходим достоверный прогноз изменения скоростей ветра на коротких и длительных временных интервалах. Стохастическая природа ветра и его большая изменчивость во времени и пространстве определяют высокую сложность данной задачи, для решения которой используют методы математического моделирования. Скорость ветра моделируется как стационарный стохастический процесс, характеристиками которого являются:

- функция плотности вероятности (Probability Density Function – PDF), описывающая статистическое распределение скоростей ветра. Данная характеристика используется в большинстве ветроэнергетических расчетов для оценки потенциальной выработки энергии;
- функция автокорреляции (Autocorrelation Function – ACF), характеризующая степень взаимосвязи между последовательными значениями временного ряда [5] и обеспечивающая повышение точности моделирования флуктуаций скорости ветра на коротких временных интервалах;
- нестационарные суточные и сезонные вариации [6], которые значительно влияют на производительность ВЭУ [7] и моделирование которых необходимо для прогнозирования выработки электроэнергии [8], анализа аэродинамического взаимодействия между ВЭУ, работающими в составе ветропарков [9], и согласования режимов работы основного генерирующего оборудования гибридных энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Дискретные модели временных рядов, к которым относятся модели авторегрессионного скользящего среднего, модели на основе цепей Маркова [10–12], имеют недостаток, связанный с тем, что не позволяют осуществлять варьирование шага моделирования. Это ограничение исключает возможность применения данных моделей для имитационного моделирования режимов ВЭУ и энергетических систем на их основе с высокой степенью временной дискретизации, что является необходимым условием для решения задач выбора состава генерирующего оборудования, анализа установившихся и переходных процессов проектируемых электроэнергетических систем.

В качестве альтернативы вышеперечисленным методам в настоящее время предложены модели на основе стохастических дифференциальных уравнений (Stochastic Differential Equations – SDE), которые позволяют масштабировать во времени моделируемый процесс с сохранением его статистических характеристик. Методы моделирования скорости ветра на основе данного подхода описаны в работах [13–15]. Модели [13, 14] позволяют синтезировать временной ряд скорости ветра с заданным статистическим распределением и экспоненциально затухающей автокорреляцией. Прогнозирование суточного цикла скорости ветра реализовано в модели [15], однако возможность моделирования месячных вариаций не предусмотрена. Кроме этого, в предложенных моделях стохастическая составляющая скорости ветра генерируется посредством SDE на основе винеровского процесса (случайных приращений), что не позволяет воспроизвести долговременную корреляционную зависимость, которая характерна для временных рядов метеорологических переменных [6].

Целью данной работы является разработка модели скорости ветра на основе стохастического дифференциального уравнения, обеспечивающей имитационное моделирование режимов работы ВЭУ на различ-

ных временных интервалах. Основой для построения такой модели послужила методика моделирования скорости ветра на основе SDE процесса Орнштейна–Уленбека [16], описанная в работах [13, 14]. Учитывая факт того, что временные ряды метеорологических переменных имеют признаки долговременной корреляционной зависимости и сезонные периодические составляющие, в качестве более подходящего решения предлагается использовать SDE процесс Орнштейна–Уленбека на основе дробного броуновского движения (Fractional Brownian Motion – FBM) и периодической функции среднего значения.

Описание методов и алгоритмов

Предложенный алгоритм моделирования траекторий скорости ветра состоит из трех этапов: калибровки модели (оценки параметров) на основе данных временного ряда долгосрочных наблюдений, численного моделирования траекторий скорости ветра и преобразования распределения полученной автокоррелированной последовательности в распределение, соответствующее данным реальных наблюдений. Блок-схема алгоритма моделирования приведена на рис. 1.

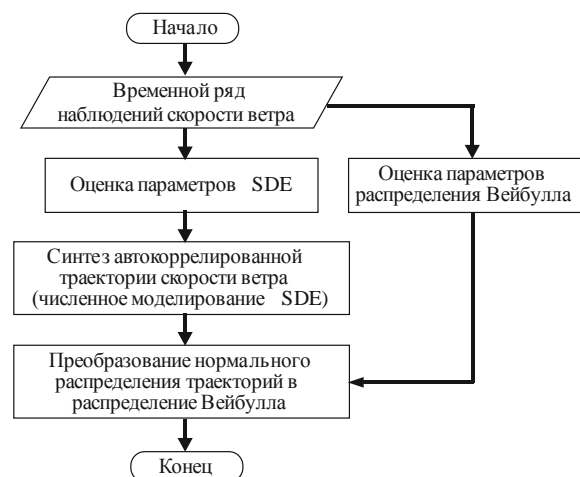


Рис. 1. Блок-схема алгоритма моделирования скорости ветра

Fig. 1. Wind speed simulation algorithm flowchart

Стохастическое дифференциальное уравнение дробного процесса Орнштейна–Уленбека может быть записано в следующей форме:

$$dX_t = \theta(\mu - X_t)dt + \sigma dW_t^H, \quad (1)$$

где X_t – мгновенное значение моделируемой переменной процесса в момент времени t ; θ – параметр скорости возврата к среднему (равновесному) уровню (μ); σ – параметр дисперсии приращений; W_t^H – дробное броуновское движение (FBM).

FBM представляет собой непрерывный центрированный гауссовский процесс со стационарными приращениями и ковариационной функцией следующего вида [17]:

$$E(W_t^H, W_s^H) = \frac{1}{2}(|s|^{2H} + |t|^{2H} - |t-s|^{2H}),$$

где s – шаг времени, предшествующий текущему шагу t ; $H \in (0,1)$ – показатель Херста, характеризующий степень самоподобия приращений и тип памяти процесса.

При $H=1/2$ ФВМ вырождается в стандартное броуновское движение, приращения которого независимы (Винеровский процесс), и в таком случае функция автокорреляции стохастического процесса, описываемого уравнением (1), представляет собой экспоненциально убывающую характеристику. Данный процесс является Марковским и не обладает свойством долгой памяти, что в свою очередь не позволяет воспроизвести характерную для временных рядов метеорологических данных долговременную корреляционную зависимость. При $H>1/2$ приращения имеют положительную зависимость. При $H>1/2$ приращения имеют вид степенной функции, что в большей степени соответствует АСФ временных рядов с долговременной корреляционной зависимостью.

В своей исходной форме уравнение процесса (1) позволяет смоделировать только стационарную стохастическую составляющую временного ряда с автокорреляционной зависимостью, скорость и характер затухания которой задаются параметрами H и $\theta > 0$.

Для моделирования нестационарной составляющей, обусловленной циклическими изменениями скорости ветра в течение суток, используется уравнение процесса (1) с периодической функцией среднего значения [18]:

$$y(t) = \alpha \cos\left(\frac{2\pi(t - t_{peak})}{24}\right), \quad (2)$$

$$dX_t = \left(\frac{dy(t)}{dt} + \theta[y(t) - X_t]\right) dt + \sigma dW_t^H, \quad (3)$$

где $y(t)$ – функция, моделирующая цикл изменения скорости ветра в момент времени (t) ; α – параметр амплитуды; t_{peak} – время суточного максимума скорости ветра.

В такой форме уравнение (3) описывает процесс X , отклоняющийся от детерминированной траектории циклически изменяющегося среднего уровня, определяемого в каждый момент времени функцией $y(t)$, и возвращающийся к нему со скоростью, пропорциональной отклонению.

Моделирование траекторий стохастического процесса, описываемого уравнением (3), выполняется с использованием схемы Эйлера–Маруямы, подходящей для численного моделирования SDE процессов с длительной памятью ($H \geq 1/2$) [19]. Схема дискретизации SDE (3) записывается следующим образом:

$$\hat{X}_{n+1} = \hat{X}_n + \left[dy(t_n) + \hat{\theta}(y(t_n) - \hat{X}_n) \right] \Delta t + \hat{\sigma}(W_{n+1}^H - W_n^H),$$

где Δt – шаг расчета; t – время моделирования; W^H – дробный гауссовский шум с показателем Херста ($H > 1/2$).

В процессе моделирования для генерирования дробного гауссовского шума $W^{(H>1/2)}$ используется метод циркулянтного вложения [20].

Реализации стохастического процесса будут иметь нормальное распределение, что не характерно для реальных данных наблюдений скорости ветра, статистическое распределение которых на практике чаще всего аппроксимируется двухпараметрическим распределением Вейбулла [21]. Основываясь на методике [13], для получения последовательности с заданным распределением применяется метод обратного преобразования:

$$V = F^{-1}[\Phi(X)],$$

где $\Phi(\cdot)$ – кумулятивная функция (Cumulative Distribution Function – CDF) нормального распределения; F^{-1} – обратная функция требуемого распределения.

Моделирование сезонной составляющей выполняется путем последовательного преобразования переменных сгенерированного ряда $X(t)$ в переменные распределения Вейбулла $V(t)$ с параметрами (c, k) , определенными для каждого месяца:

$$V(t) = c_s(t) [-\ln(1 - \Phi[X(t)])]^{1/k_s(t)},$$

где $V(t)$ – преобразованный процесс с заданным распределением; c_s, k_s – параметры масштаба и формы распределения Вейбулла, определенные для каждого месяца года ($s=1,2,\dots,12$).

Оценка параметров модели

В процессе калибровки модели требуется оценка следующих параметров: показателя Херста, параметра скорости возврата к среднему, дисперсии приращений, параметров амплитуды и времени суточного максимума скорости ветра, а также параметров распределения. Оценка параметров осуществляется по выборочным данным временного ряда наблюдений скорости ветра. На первом этапе выполняется оценка параметров модели распределения, для чего выборка исходных данных разделяется по месяцам на 12 групп, и для каждой группы определяются оценки параметров распределения Вейбулла.

Перед оценкой остальных параметров модели выполняется нормализация ряда выборочных данных таким образом, чтобы средневыборочное значение и дисперсия были эквивалентны математическому ожиданию и дисперсии стохастического процесса (т. е. $\mu=0, \sigma^2=1$). Кроме этого, из данных временного ряда устраняется сезонная (месячная) компонента.

Оценка показателя Херста

В данном исследовании для оценки показателя Херста использовался метод агрегированной дисперсии [22]. Выборочное множество данных $X=\{X_i, i \geq 1\}$ разделяется на блоки (k) с числом элементов (m) , и для каждого блока рассчитывается среднее значение:

$$X^{(m)}(k) = \frac{1}{m} \sum_{i=(k-1)m+1}^{km} X(i) \quad k=1,2,\dots,N/m,$$

где N – общее число элементов выборки.

Поскольку дисперсия дробного гауссовского шума равна $VarX^{(m)} = \sigma_0 m^\beta$ при $m \rightarrow \infty$, где $\beta = 2H - 2 < 0$, точечной оценкой $VarX^{(m)}$ является дисперсия выборки, ко-

торая рассчитывается для нескольких значений (m) следующим образом:

$$\overline{\text{Var}X^{(m)}} = \frac{1}{N/m} \sum_{k=1}^{N/m} (X^{(m)}(k))^2 - \left(\frac{1}{N/m} \sum_{k=1}^{N/m} X^{(m)}(k) \right)^2.$$

Расчетные значения (m) выбираются таким образом, чтобы точки $\log(m)$ на графике зависимости $\log(\overline{\text{Var}X^{(m)}})$ от $\log(m)$ были равноудалены друг от друга, т. е. $m_{i+1}/m_i=C$, где C – константа, зависящая от размера выборки и желаемого количества точек. Тогда зависимость $\log(\overline{\text{Var}X^{(m)}})$ от $\log(m)$ может быть аппроксимирована прямой, угол наклона которой равен (β) и оценка показателя Херста определена как

$$H = \frac{\beta + 2}{2}.$$

Оценка параметров SDE

Оценка параметра дисперсии (σ) стохастического процесса может быть вычислена по квадратической вариации выборочных данных временного ряда по следующей формуле [23]:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (X_{(i+1)} - X_i)^2}{(N-1)\Delta t^{2H}},$$

где $X_i, X_{(i+1)}$ – значения временного ряда на i -м и последующем шаге времени; Δt – интервал дискретизации выборки; H – оценка показателя Херста.

Поскольку скорость ветра можно рассматривать как стационарный процесс с долговременной зависимостью ($H>1/2$ и $\theta>0$), оценка параметра скорости возврата к среднему (θ) может быть получена из следующего выражения [24]:

$$\hat{\theta} = \left[\frac{1}{\hat{\sigma}^2 \hat{H} \Gamma(2\hat{H}) N \sum_{i=1}^N X_i^2} \right]^{\frac{1}{2H}},$$

где Γ – гамма-функция.

Оценка параметров периодической функции, моделирующей суточный ход скорости ветра

Вычисление параметров амплитуды и времени максимума суточного цикла скорости ветра осуществляется путем подгонки кривой функции (2) к точкам фактического суточного профиля (Diurnal Profile – DP), значения которых для каждого срока наблюдения вычисляются по следующей формуле:

$$DP(\tau) = \frac{1}{N/n_d} \cdot \sum_{i=0}^{(N/n_d)-1} X_{(i-n_d)+\tau}, \tau = 1, 2, \dots, n,$$

где N – число элементов выборки; n_d – число сроков наблюдения в течение суток; τ – порядковый номер срока наблюдения.

В ходе тестирования модели выявлена необходимость нормализации значений суточного профиля перед выполнением аппроксимации, что осуществляется следующим образом:

$$DP' = \frac{DP}{\left(\frac{\sigma_x}{\hat{\sigma}} - \frac{1}{2} \right)},$$

где σ_x – квадратичное отклонение выборочных данных.

Оценка адекватности модели

Алгоритм проверки адекватности моделирования состоит в оценке степени соответствия характеристик синтезированных и фактических данных временных рядов скорости ветра. В исследовании используются данные долгосрочных наблюдений скорости ветра, зарегистрированные на 518 метеостанциях России [25]. Временные ряды содержат данные восьмисрочных наблюдений, зафиксированных в стандартные синоптические сроки с интервалом времени в 3 часа. Карта расположения метеостанций показана на рис. 2.

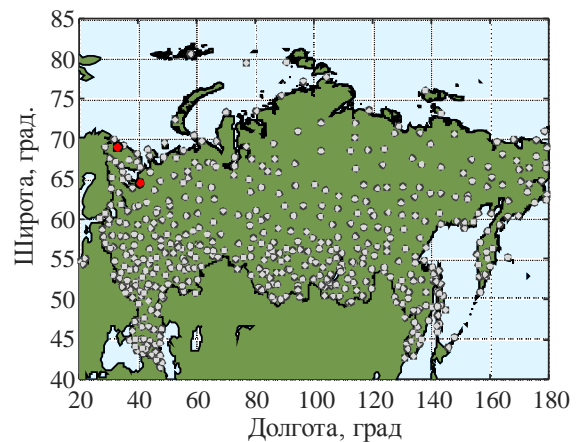


Рис. 2. Карта расположения метеостанций
 Fig. 2. Weather station location map

Оценки параметров модели определены для выборочных данных временных рядов скорости ветра каждой метеостанции, статистические распределения оценок параметров показаны на диаграмме, изображенной на рис. 3.

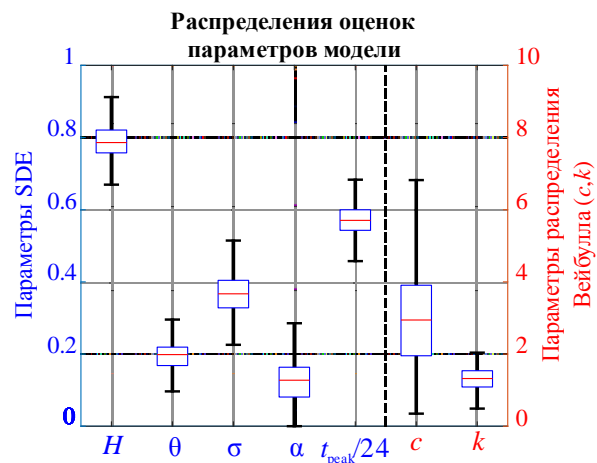


Рис. 3. Диаграмма распределения оценок параметров модели
 Fig. 3. Boxplot of model parameters estimates

Моделирование траектории скорости ветра выполнялось на временном интервале, равном 20 годам, с шагом дискретизации, равным исходному интервалу между наблюдениями ($\Delta t=3$ часа). Для синтезированных временных рядов скорости ветра рассчитаны коэффициенты последовательной автокорреляции между значениями, автокорреляции среднемесячных значений, суточные профили и гистограммы статистического распределения. Полученные характеристики сравниваются с характеристиками исходного временного ряда, и их степень соответствия определяется по величине коэффициента детерминации [26]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - f_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2},$$

где y_i – характеристика фактического временного ряда данных; f_i – характеристика синтезированного временного ряда.

Расчет относительной ошибки между оценками показателя Херста синтезированных (\hat{H}_y) и фактических (\hat{H}_x) временных рядов выполнен по формуле:

$$\delta \hat{H} = \frac{|\hat{H}_y - \hat{H}_x|}{\hat{H}_x} \cdot 100.$$

В ходе тестирования выполнено сравнение стандартной модели с независимыми приращениями ($H=1/2$) и модели на основе дробного процесса с долговременной корреляционной зависимостью ($H>1/2$). Для сравнения используется Байесовский информационный критерий (Bayesian information criterion – BIC) [27]:

$$BIC = -2\ln(L) + \ln(n)k,$$

где L – максимальное значение функции правдоподобия; k – количество оцененных параметров модели; n – число элементов временного ряда.

Результаты исследования

Далее в качестве примера приводятся результаты сравнения характеристик смоделированных траекторий SDE с характеристиками временных рядов фактических данных, зарегистрированных на метеостанциях Мурманска и Архангельска. Международные номера этих станций в списке Всемирной метеорологической организации, а также основные характеристики их месторасположения приведены в табл. 1.

На рис. 4 показаны автокоррелограммы выборочных данных скорости ветра оригинальных и синтезированных временных рядов с максимальным сдвигом по времени равным 120 часам. Можно видеть, что при моделировании скорости ветра посредством SDE процесса без долговременной зависимости ($H=1/2$)

ACF значений синтезированного временного ряда согласуется только с первым коэффициентом эмпирической ACF, а затем убывает практически до нулевого значения. В то же время ACF модели процесса с длительной памятью ($H>1/2$) имеет степенной характер убывания, в большей степени соответствующий эмпирической характеристике, что подтверждается высоким показателем коэффициента $R^2>90\%$.

Таблица 1. Основные сведения о метеостанциях

Table 1. General information about weather stations

Номер Number (ID)	Название Name	Широта, ° Latitude, °	Долгота, ° Longitude, °	Высота, м Elevation, m
22113	Мурманск Murmansk	68,97	33,05	57
22550	Архангельск Arkhangelsk	64,50	40,73	8

Периодические осцилляции автокорреляционных функций обусловлены наличием циклической (суточной) составляющей. На рис. 5 продемонстрированы суточные профили скорости ветра для каждого срока наблюдений, которые аппроксимированы аналитической функцией $y(t)$ (2). Можно видеть, что суточные профили, полученные посредством моделирования (Model), с достаточной точностью повторяют форму кривой данных траекторий и хорошо согласуются с эмпирическими данными, о чем свидетельствует высокий показатель коэффициента детерминации ($R^2>0,95$).

Автокоррелограммы среднемесячных значений скорости ветра, изображенные на рис. 6 отчетливо демонстрируют наличие повторяющейся сезонной компоненты. Наиболее значимая корреляция между летними и зимними периодами наблюдается на ACF данных метеостанции Мурманска. В то же время для данных метеостанции Архангельска данная связь носит менее выраженный характер. Результаты моделирования демонстрируют способность модели воспроизвести данную закономерность с приемлемой степенью точности ($R^2>70\%$).

На рис. 7 показаны гистограммы фактического распределения скорости ветра, аппроксимированного функцией распределения Вейбулла (Weibull), а также кривые плотности распределения вероятности синтезированных временных рядов (Model). Можно видеть, что используемый подход преобразования нормального распределения стохастического процесса в распределение Вейбулла позволяет получить последовательности, хорошо согласующиеся с распределением фактических данных.

Результаты оценки достоверности моделирования, проведенной по вышеописанной методике, для каждого из 518 временных рядов данных, используемых в исследовании, сведены в табл. 2.

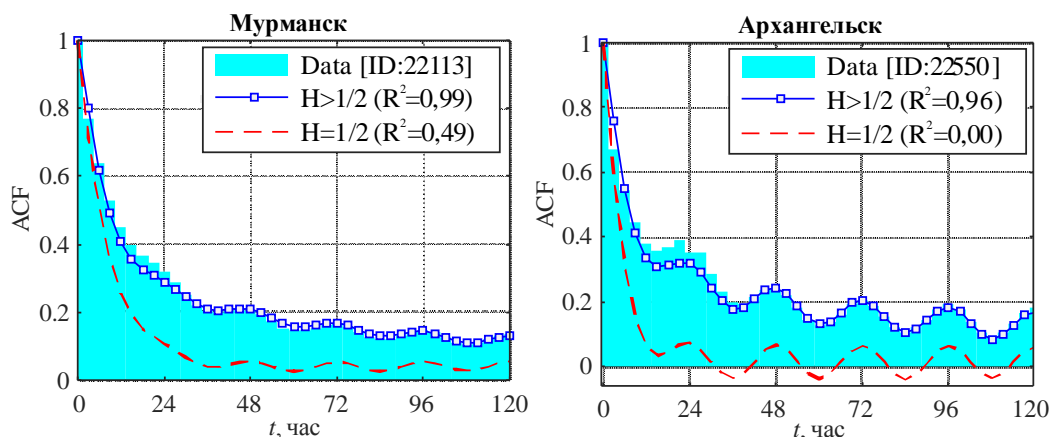


Рис. 4. Автокорреляция фактических и синтезированных временных рядов скорости ветра

Fig. 4. Autocorrelation of observed and simulated wind speed time series

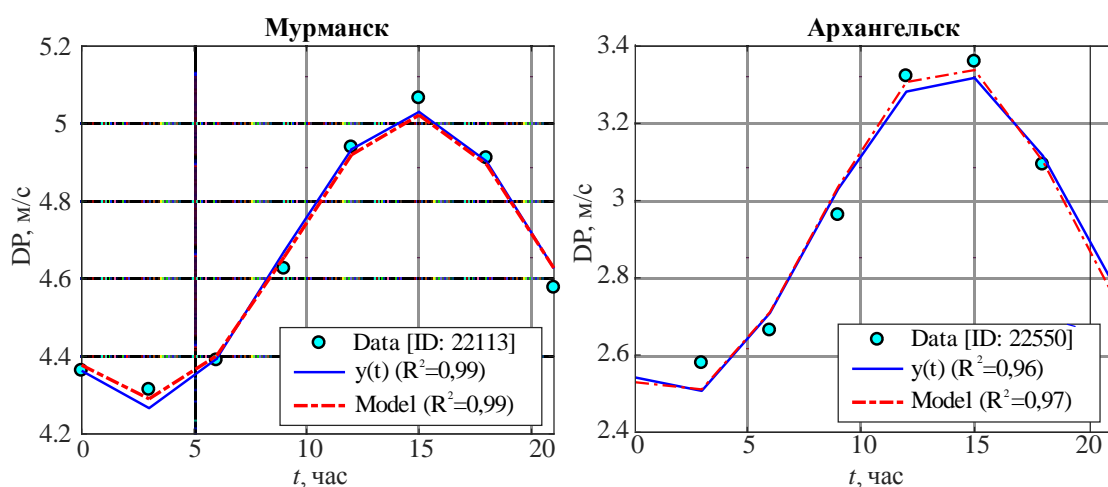


Рис. 5. Суточный профиль скорости ветра

Fig. 5. Wind speed diurnal profile

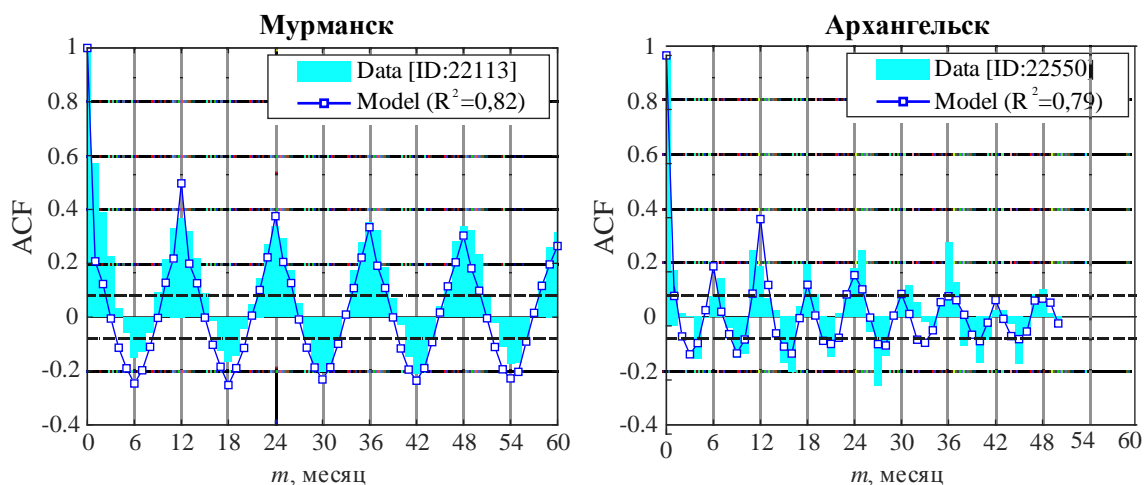


Рис. 6. Автокорреляция среднемесячных значений скорости ветра

Fig. 6. Autocorrelation of monthly-averaged wind speed

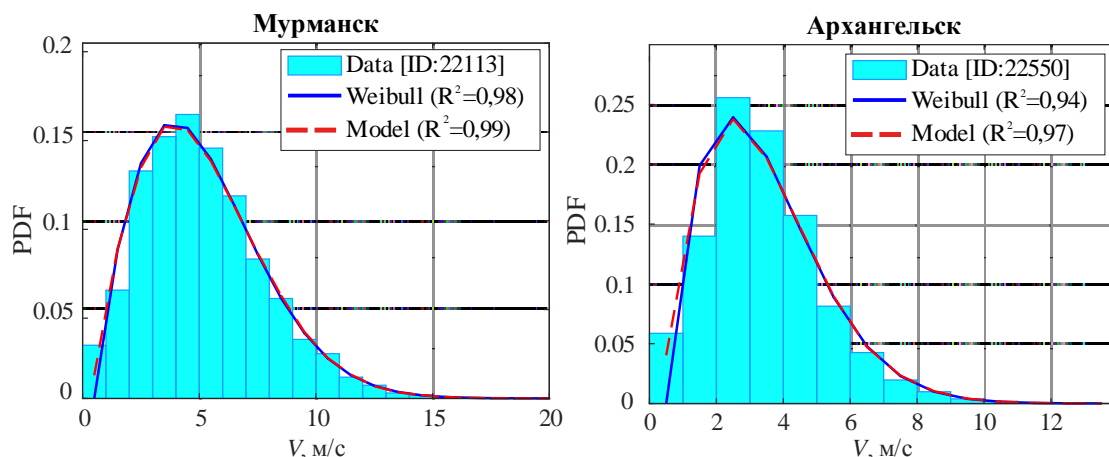


Рис. 7. Распределение фактических и смоделированных данных скорости ветра
 Fig. 7. Distributions of observed and simulated wind speed data

Таблица 2. Результаты сравнения моделей

Table 2. Model comparison results

Критерий Criterion	Стандартная модель Standard model ($H=1/2$)	Дробная модель Fractional model ($H>1/2$)
k	28	29
BIC	3,2267	3,2160
R^2 (ACF)	0,3190	0,9322
R^2 (DP)	0,9097	0,9160
R^2 (PDF)	0,9215	0,9217
$\delta \hat{H}$, %	10,042	1,3644

Исходя из того, что относительное качество модели определяется меньшим значением показателя BIC, можно сделать вывод, что вариант использования дробного стохастического процесса для моделирования динамики скорости ветра является более подходящим с точки зрения погрешности и количества параметров модели. Различия в показателях достоверности моделирования суточного профиля и статистического распределения для сравниваемых моделей несущественно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Choi Y., Lee C., Song J. Review of renewable energy technologies utilized in the oil and gas industry // International Journal of Renewable Energy Research. – 2017. – V. 7. – № 2. – P. 592–598.
- Бельский А.А., Клишко В.И. Интенсификация добычи нефти. Концепция теплового метода с применением автономных ветроэлектрических установок // Деловой журнал «Neftegaz.RU». – 2016. – № 1–2. – С. 38–41.
- Горюнов О.А., Назарова Ю.А. Перспективы применения ветроэнергетических установок для энергообеспечения объектов газовой промышленности в районах Крайнего Севера // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2015. – № 12. – С. 146–150.
- Васенин А.Б., Крюков О.В. Вопросы электропитания вдоль-трассовых объектов Единой системы газоснабжения России // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2020. – № 2 (44). – С. 181–192.
- Brett A.C., Tuller S.E. The autocorrelation of hourly wind speed observation // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1991. – V. 30. – № 6. – P. 823–833. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1991\)030<0823:TAOHWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1991)030<0823:TAOHWS>2.0.CO;2) (дата обращения: 15.03.2021).
- Fortuna L., Nunnari G., Nunnari S. Nonlinear modeling of solar radiation and wind speed time series. – Switzerland, Cham: Springer, 2016. – 98 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-38764-2> (дата обращения: 15.03.2021).

Заключение

Предложен метод моделирования скорости ветра на основе стохастического дифференциального уравнения дробного процесса Орнштейна–Уленбека с периодической функцией среднего. По сравнению с моделью процесса с некоррелированными приращениями, предложенная модель на основе дробного процесса, обладающего свойством длительной памяти, позволяет более достоверно смоделировать автокорреляционную зависимость, что характеризуется высоким показателем коэффициента детерминации, который в среднем составил $R^2=0,93$. Результаты анализа показали, что среднее значение отклонения оценки показателя Херста смоделированных временных рядов от фактических данных составило менее 2%. Реализация алгоритма моделирования выполнена в программной среде MATLAB. Практическое применение модели нацелено на ее использование в исследованиях режимов работы ветроэнергетических установок и электроэнергетических систем на их основе.

- Numerical investigations into the idealized diurnal cycle of atmospheric boundary layer and its impact on wind turbine's power performance / L. Tian, Y. Song, N. Zhao, W. Shen, T. Wang, C. Zhu // Renewable Energy. – 2020. – V. 145. – P. 419–427. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.038> (дата обращения: 15.03.2021).
- Baker R.W., Walker S.N., Wade J.E. Annual and seasonal variations in mean wind speed and wind turbine energy production // Solar Energy. – 1990. – V. 45. – № 5. – P. 285–289. URL: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90013-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90013-3) (дата обращения: 15.03.2021).
- Seasonal variability of offshore wind turbine wakes / W. Chanprasert, R. Sharma, J. Cater, S. Norris // 22nd Australasian Fluid Mechanics Conference AFMC2020. – Brisbane, 7–10 December 2020. URL: <https://doi.org/10.14264/d1247d1> (дата обращения: 15.03.2021).
- Ghofrani M., Alolayan M. Time series and renewable energy forecasting // Time Series Analysis and Applications / Ed. by N. Mohamadally. – IntechOpen, 2018. – P. 77–92. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.70845> (дата обращения: 15.03.2021).
- Bazonis I.K., Georgilakis P.S. Review of deterministic and probabilistic wind power forecasting: models, methods, and future research // Electricity. – 2021. – V. 2. – № 1. – P. 13–47. URL:

- <https://doi.org/10.3390/electricity2010002> (дата обращения: 15.03.2021).
12. Elwan A.A., Habibuddin M.H. Statistical approach for wind speed forecasting using Markov chain modelling as the probabilistic model // 2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA). – Singapore, 2019. – P. 177–182. URL: <http://doi.org/10.1109/ICPEA.2019.8818533> (дата обращения: 15.03.2021).
 13. Zárate-Miñano R., Anghel M., Milano F. Continuous wind speed models based on stochastic differential equations // Applied Energy. – 2013. – V. 104. – P. 42–49. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.064> (дата обращения: 15.03.2021).
 14. Arenas-López J.P., Badaoui M. The Ornstein–Uhlenbeck process for estimating wind power under a memoryless transformation // Energy. – 2020. – V. 213. – № 118842. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118842> (дата обращения: 15.03.2021).
 15. Short-term probabilistic forecasting of wind speed using stochastic differential equations / E.B. Iversen, J.M. Morales, J.K. Møller, H. Madsen // International Journal of Forecasting. – 2016. – V. 32. – № 3. – P. 981–990. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.03.001> (дата обращения: 15.03.2021).
 16. Ibe O.C. Markov processes for stochastic modeling. 2nd ed. – Elsevier: Academic Press, 2013. – 514 p. URL: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06106-6> (дата обращения: 15.03.2021).
 17. Stochastic calculus for fractional Brownian motion and applications / F. Biagini, Y. Hu, B. Øksendal, T. Zhang. – London: Springer, 2008. – 330 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-797-8> (дата обращения: 15.03.2021).
 18. Alaton P., Djehiche B., Stillberger D. On modelling and pricing weather derivatives // Applied Mathematical Finance. – 2002. – V. 9. – № 1. – P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1080/13504860210132897> (дата обращения: 15.03.2021).
 19. Lysy M., Pillai N.S. Statistical inference for stochastic differential equations with memory // arXiv.org. 2013. URL: <https://arxiv.org/abs/1307.1164v1> (дата обращения: 15.03.2021).
 20. Fast and exact synthesis for 1-D fractional Brownian motion and fractional Gaussian noises / E. Perrin, R. Harba, R. Jennane, I. Iribarren // IEEE Signal Processing letters. – 2002. – V. 9. – № 11. – P. 382–384. URL: <https://doi.org/10.1109/LSP.2002.805311> (дата обращения: 15.03.2021).
 21. Jung C., Schindler D. Wind speed distribution selection – a review of recent development and progress // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – V. 144. – 109290. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109290>
 22. Taqqu M.S., Teverovsky V., Willinger W. Estimators for long-range dependence: an empirical study // Fractals. – 1995. – V. 3. – № 4. – P. 785–798. URL: <https://doi.org/10.1142/S0218348X95000692> (дата обращения: 15.03.2021).
 23. Su Y., Wang Y. Parameter estimation for fractional diffusion process with discrete observations // Journal of function spaces. – 2019. – 9036285. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/9036285> (дата обращения: 15.03.2021).
 24. Xiao W., Zhang W., Xu W. Parameter estimation for fractional Ornstein–Uhlenbeck processes at discrete observation // Applied Mathematical Modelling. – 2011. – V. 35. – № 9. – P. 4196–4207. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.02.047> (дата обращения: 15.03.2021).
 25. Специализированные массивы для климатических исследований // Всероссийский научно исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). URL: <http://aisori-m.meteo.ru> (дата обращения: 15.03.2021).
 26. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. 2nd ed. – Burlington, MA, USA: Elsevier, Academic Press, 2006. – 648 p.
 27. Burnham K.P., Anderson D.R. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. 2nd ed. – New York: Springer, 2002. – 488 p. URL: <https://doi.org/10.1007/b97636> (дата обращения: 15.03.2021).

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

Давыдов Д.Ю., аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

UDC 621.311.24

WIND SPEED MODEL BASED ON FRACTIONAL STOCHASTIC PROCESS

Denis Y. Davydov¹,
denisyudavydov@gmail.com

Sergey G. Obukhov¹,
serob99@mail.ru

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

Relevance. The urgent task of the technical and economic development of the Northern and Eastern regions of Russia is to provide reliable and efficient power supply to consumers, geographically located in remote, hard-to-reach areas. The use of wind power plants is a promising way to solve this problem. The primary task of the design and feasibility study of the use of wind power plants is to predict changes in wind speeds at the site of the power plant installation. The stochastic nature of the wind and its spatiotemporal variability explain the high complexity of this problem, for the solution of which the methods of mathematical modeling are used. The known models of wind speed based on Markov chains, autoregressive moving-average and other discrete models do not allow varying the time step, which does not allow their use for simulation of operating modes of wind turbines and wind energy systems. The article proposes a model of wind speed based on the stochastic differential equation which eliminates this drawback.

The aim of the study is to construct wind speed model based on fractional Ornstein–Uhlenbeck process with a periodic long-term mean, which provides modeling of static and dynamic modes of operation of a wind power plant at different time intervals.

Methods: mathematical and computer modeling using Matlab/Simulink software environment.

Results. The proposed model, in contrast to the known SDE-based models, is able to produce autocorrelated wind speed trajectories with long-term dependence, daily and monthly variations to perform more detailed simulation of the operating modes of wind turbines at different time intervals with the required time step. The model was tested using the data of climatic observations of wind speed obtained from electronic archive of the All-Russian Institute of Hydrometeorological Information. The model adequacy was evaluated by comparing characteristics of simulated wind speed trajectories with actual observations collected at 518 weather stations located on territory of Russia.

Key words:

Wind energy, wind speed modeling, stochastic differential equations, fractional Brownian motion, time series.

REFERENCES

- Choi Y., Lee C., Song J. Review of Renewable Energy Technologies Utilized in the Oil and Gas Industry. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 592–598.
- Belskiy A.A., Klimko V.I. Oil production intensification. The concept of the thermal method with the use of autonomous wind power plants. *Delovoy zhurnal «Neftegaz.RU»*, 2016, no. 1–2, pp. 38–41. In Rus.
- Goryunov O.A., Nazarova Yu.A. Prospects for wind driven power plants application for power supply to the gas industry facilities in the Far North regions. *Territoriya «NEFTEGAZ»*, 2015, no. 12, pp. 146–150. In Rus.
- Vasenin A.B., Kryukov O.V. Voprosy elektropitaniya vdoltrassovykh obektov Edinoy sistemy gazosnabzheniya Rossii [Power supply issues for along-route facilities of the Unified Gas Supply System of Russia]. *Nauchno-tehnicheskii sbornik «Vesti gazovoy nauki»*, 2020, no. 2 (44), pp. 181–192.
- Brett A.C., Tuller S.E. The autocorrelation of hourly wind speed observation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1991, vol. 30, no. 6, pp. 823–833. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1991\)030<0823:TAOHWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1991)030<0823:TAOHWS>2.0.CO;2) (accessed 15 March 2021).
- Fortuna L., Nunnari G., Nunnari S. Nonlinear modeling of solar radiation and wind speed time series. Cham, Springer, 2016. 98 p. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-38764-2> (accessed 15 March 2021).
- Tian L., Song Y., Zhao N., Shen W., Wang T., Zhu C. Numerical investigations into the idealized diurnal cycle of atmospheric boundary layer and its impact on wind turbine's power performance. *Renewable Energy*, 2020, vol. 145, pp. 419–427. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.038>
- Baker R.W., Walker S.N., Wade J.E. Annual and seasonal variations in mean wind speed and wind turbine energy production. *Solar Energy*, 1990, vol. 45, no. 5, pp. 285–289. Available at: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90013-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90013-3)
- Chanprasert W., Sharma R., Cater J., Norris S. Seasonal variability of offshore wind turbine wakes. *22nd Australasian Fluid Mechanics Conference AFMC2020*. Brisbane, 2020, 7–10 December. Available at: <https://doi.org/10.14264/d1247d1> (accessed 15 March 2021).
- Ghofrani M., Alolayan M. Time series and renewable energy forecasting. *Time Series Analysis and Applications*. Ed. by N. Mohamudally. IntechOpen, 2018. pp. 77–92. Available at: <https://doi.org/10.5772/intechopen.70845> (accessed 15 March 2021).
- Bazonis I.K., Georgilakis P.S. Review of deterministic and probabilistic wind power forecasting: models, methods, and future research. *Electricity*, 2021, vol. 2, no. 1, pp. 13–47. Available at: <https://doi.org/10.3390/electricity2010002> (accessed 15 March 2021).
- Elwan A.A., Habibuddin M.H. Statistical approach for wind speed forecasting using Markov chain modelling as the probabilistic model. *2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*. Singapore, 2019. pp. 177–182. Available at: <http://doi.org/10.1109/ICPEA.2019.8818533> (accessed 15 March 2021).
- Zárate-Miñano R., Anghel M., Milano F. Continuous wind speed models based on stochastic differential equations. *Applied Energy*, 2013, vol. 104, pp. 42–49. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.064> (accessed 15 March 2021).
- Arenas-López J.P., Badaoui M. The Ornstein–Uhlenbeck process for estimating wind power under a memoryless transformation. *Energy*, 2020, vol. 213, no. 118842. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118842> (accessed 15 March 2021).
- Iversen E.B., Morales J.M., Møller J.K., Madsen H. Short-term probabilistic forecasting of wind speed using stochastic differential equations. *International Journal of Forecasting*, 2016, vol. 32, no. 3, pp. 981–990. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.03.001> (accessed 15 March 2021).
- Ibe O.C. *Markov processes for stochastic modeling*. 2nd ed. Elsevier, Academic Press, 2013. 514 p. Available at:

- <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06106-6> (accessed 15 March 2021).
17. Biagini F., Hu Y., Øksendal B., Zhang T. *Stochastic calculus for fractional Brownian motion and applications*. London, Springer, 2008. 330 p. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-797-8> (accessed 15 March 2021).
 18. Lysy M., Pillai N.S. *Statistical inference for stochastic differential equations with memory*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1307.1164v1> (accessed: 15 March 2021).
 19. Alaton P., Djehiche B., Stillberger D. On modelling and pricing weather derivatives. *Applied Mathematical Finance*, 2002, vol. 9, no. 1, pp. 1–20. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/13504860210132897> (accessed: 15 March 2021).
 20. Perrin E., Harba R., Jennane R., Iribarren I. Fast and exact synthesis for 1-D fractional Brownian motion and fractional Gaussian noises. *IEEE Signal Processing letters*, 2002, vol. 9, no. 11, pp. 382–384. Available at: <https://doi.org/10.1109/LSP.2002.805311> (accessed: 15 March 2021).
 21. Jung C., Schindler D. Wind speed distribution selection – a review of recent development and progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 114, 109290. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109290> (accessed: 15 March 2021).
 22. Taqqu M.S., Teverovsky V., Willinger W. Estimators for long-range dependence: an empirical study. *Fractals*, 1995, vol. 3, no. 4, pp. 785–798. Available at: <https://doi.org/10.1142/S0218348X95000692> (accessed: 15 March 2021).
 23. Su Y., Wang Y. Parameter estimation for fractional diffusion process with discrete observations. *Journal of function spaces*, 2019, 9036285. Available at: <https://doi.org/10.1155/2019/9036285>
 24. Xiao W., Zhang W., Xu W. Parameter estimation for fractional Ornstein–Uhlenbeck processes at discrete observation. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, vol. 35, no. 9, pp. 4196–4207. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.02.047> (accessed: 15 March 2021).
 25. *Specializirovannye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy. Vserossiyskiy nauchno issledovatel'skiy institut gidrometeorologicheskoy informatsii – Mirovoy tsentr damykh (VNIIGMI-MCD)* [Specialized arrays for climatic research. All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information (RIHMI-WDC)]. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru> (accessed 15 March 2021).
 26. Wilks D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 2nd ed. Burlington, MA, USA, Elsevier, 2006. 649 p.
 27. Burnham K.P., Anderson D.R. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*. 2nd ed. New York, Springer, 2002. 488 p. Available at: <https://doi.org/10.1007/b97636> (accessed 15 March 2021).

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Denis Y. Davydov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.
Sergey G. Obukhov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 624.131

ОЦЕНКА СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ Г. ТОМСКА

Строкова Людмила Александровна¹,
sla@tpu.ru

Леонова Анна Владимировна¹,
avleonova@tpu.ru

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

Актуальность. В настоящее время в г. Томске увеличивается площадь застройки, появляются новые микрорайоны на ранее незастроенных землях (например, на левобережье р. Томь), происходит перепланировка в сторону многофункциональной застройки центральной части города. Без учета факторов и закономерностей развития опасных природных и антропогенных процессов, знания динамики, механизмов, прогноза их развития, невозможно качественное развитие территории. Несмотря на тот факт, что проявления суффозии встречаются почти повсеместно, этот процесс остается одним из наименее изученных.

Цель: оценка суффозионной устойчивости грунтов в пределах г. Томска.

Методы. На первом этапе исследования выполнен анализ пространственных закономерностей, обуславливающих развитие суффозии с помощью составления тематических карт в ArcGIS. Было выбрано пять факторов: уклон поверхности, абсолютные отметки поверхности, геологическое строение территории, типы фильтрационных разрезов, расстояние до реки. Описана приуроченность проявлений суффозии по этим факторам. На втором этапе выполнена оценка суффозионной опасности 26 разновидностей песчаных и крупнообломочных грунтов по двум методикам ВНИИГ. Были определены: степень неоднородности гранулометрического состава, максимальный размер суффозионных частиц, степень суффозионности грунтов семи стратиграфо-генетических комплексов, распространенных на территории города.

Результаты работы и область их применения. Полученные данные по степени суффозионности песчаных и крупнообломочных грунтов рекомендуется использовать при проектировании инженерных сооружений, для контроля и оперативного управления состоянием геологической среды, при оценке стоимости земель городской территории, в учебной работе при преподавании дисциплины «Инженерная геодинамика».

Ключевые слова:

Суффозия, опасность, гранулометрический состав, пески, крупнообломочные грунты, степень неоднородности.

Введение

На территории г. Томска встречены проявления различных экзогенных геологических процессов, такие как оползни, овраги, суффозионные провалы, подтопление. Причины и факторы, влияющие на их развитие; условия и закономерности изучались томскими учеными: М.И. Кучиным, Л.А. Рождественской, Т.Я. Емельяновой, Н.В. Крепша, В.Е. Ольховатенко, Евсеевой Н.С. и др. [1–3]. В последние годы суффозия начинает привлекать более пристальное внимание инженеров-геологов в связи с резко возросшей техногенной активизацией процесса [4]. В своей монографии В.П. Хоменко приводит следующее определение процесса суффозии: «Разрушение и вынос потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс дисперсных и сцементированных обломочных горных пород, в том числе слагающих структурные элементы скальных массивов». Первое определение термина «суффозия» приводит А.П. Павлов, под которым «понималось механическое разрушение и растворение водопроницаемых пород подземными водами, сопровождающиеся выносом минерального вещества из этих пород» [5]. В настоящее время существует более 15 разных определений суффозии [6–17], которые можно разделить на две группы: включающие или исключаящие процесс растворения твердых компонентов горных пород. Эту двусмысленность можно объяснить как сложностью

самого процесса суффозии, так недостаточностью всеобъемлющих исследований. Часто исследования сосредоточены лишь одной стороне явления суффозии: либо химической, либо механической.

Суффозия приводит к появлению поверхностных и подземных эрозийных форм – проседанию вышележащей толщи и образованию западин – суффозионных воронок, блюдц, впадин, полостей, а также аккумулятивных форм – конусов выноса. Другим следствием суффозии может быть изменение гранулометрического состава пород как подверженных суффозии, так и являющихся фильтром для вынесенного материала, ухудшение прочностных и деформационных свойств [18–30].

Чаще всего суффозия наблюдается на территориях распространения лёссов и лёссовидных суглинков, в нижних частях склонов речных долин, по ходам роющих животных. Одним из необходимых условий суффозии является наличие в породе как крупных частиц, образующих неподвижный каркас, так и вымывающихся мелких. Вынос начинается лишь с определенных значений напора воды, ниже которых происходит только фильтрация [31–45].

Суффозионные провалы имеют как природное, так и техногенное происхождение. Большое значение имеет антропогенное воздействие, а именно – сброс сточных вод, что усиливает развитие данного процесса. Техногенная суффозия встречается в местах уте-

чек из водопроводных и канализационных сетей, барражного эффекта [40–50].

Суффозионные процессы на территории г. Томска, несомненно, существуют давно, но в последние годы их

проявления замечены не только специалистами, занимающимися их изучением, но и жителями города. Примеры развития суффозии заметны не только на проезжей части, перекрестках, но и на тротуарах (рис. 1).



Рис. 1. Суффозионные провалы: а, б) ул. Карпова, 2017; в) ул. Алтайская, 2018; г) ул. Пирогова, 2020; д) ул. Лебедева, 2015; е) пр. Ленина, 2014

Fig. 1. Suffusion failures: a, b) Karpov street, 2017; c) Altayskaya street, 2018; d) Pirogov street, 2020; e) Lebedev street, 2015; f) Lenin avenue, 2014

Особенно ярко этот процесс проявляет себя возле дома по адресу пр. Фрунзе, 128 (рис. 2). Жильцы этого дома в течение 5 лет наблюдают за ростом суффозионных воронок возле подъездов. Ими предприняты попытки засыпать образовавшиеся провалы, однако положительного результата эти попытки не дали. Суффозионный процесс продолжается, размеры воронок увеличиваются.

В соответствии с требованиями Стандарта комплексного развития территорий, отраслевых нормативных документов по инженерно-геологическим

изысканиям для строительства [51–53] необходимо изучение опасных геологических и техноприродных процессов, к которым относится и суффозия, составление прогноза их развития и активизации, разработка рекомендаций для принятия решений по инженерной защите территории от опасных процессов.

Целью данной работы является оценка суффозионной устойчивости грунтов в пределах г. Томска.

Общие сведения об объекте исследования. Город Томск расположен на границе Западно-Сибирской равнины и отрогов Кузнецкого Алатау. В Томске выделяют

следующие элементы речной долины: пойму р. Томи, террасы и водораздельные поверхности (рис. 3). Высотные отметки поверхности изменяются от 71 до 204 м. В геологическом строении территории принимают участие четвертичные, палеогеновые, меловые отложения, представленные дисперсными грунтами, и каменноугольные отложения, представленные глинистыми

сланцами. В тектоническом плане территория находится на стыке Западно-Сибирской эпигерцинской плиты и позднегерцинских структур Колывань-Томской складчатой зоны. В гидрогеологическом строении выделены четыре водоносных комплекса: четвертичных, палеогеновых, меловых отложений и трещиноватой водоносной зоны палеозойских отложений.



Рис. 2. Провалы возле дома на пр. Фрунзе, 128: а) общий вид двора; б) глубина провала 2015 (фото Небреева А.А. и Кучеренко Ф.И.); в, г) засыпанные провалы 2020 г.

Fig. 2. Sinkholes near the house in Frunze avenue, 128: а) general view of the yard; б) depth of the sinkhole in 2015 (photo by A.A. Nebreeva and F.I. Kucherenko); в, г) fill in sinkholes, 2020

Методика работ

Для оценки суффозии была подготовлена серия тематических карт факторов их обуславливающих. Исходными данными для картографических построений послужили: цифровая модель рельефа (ЦМР) – два смежных снимка SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) для г. Томска, загруженные с сайта USGS Earthexplorer, и производные из нее карты: уклонов и абсолютных отметок, построенные с помощью «ArcGIS Desktop»; карто-схема типов фильтрационных разрезов [54]; геологическая карта города 1:25000, карта распространения суффозионных провалов по наблюдениям авторов. Привязка растровых изображений в ГИС была произведена по рекам Томь, Ушайка, Большая и Малая Киргизки.

Уклон склона является основным параметром при оценке территории. Градиент уклона контролирует скорость подземного стока после выпадения атмосферных осадков, скорость поверхностного стока и

содержание влаги в грунтах. По мере повышения уклона напряжение сдвига в рыхлом почвенном покрове обычно также увеличивается. Исходный файл растрового формата был получен непосредственно из матрицы высот с помощью метода Хорна. Значения уклонов показаны на рис. 3, а.

Абсолютные отметки поверхности (рис. 3, б) – один из факторов, определяющих развитие суффозии, их изменения показывают направления выноса мелких песчаных частиц.

Фильтрационные разрезы (ФР). К.И. Кузевановым [54] построена карта типов фильтрационных разрезов по строению верхней пятнадцатиметровой грунтовой толщи, оцифрованная нами версия представлена на рис. 3, в. Отмечены зоны распространения слоев, склонных к развитию подтопления, а также зоны разгрузки подземных вод на склонах, в которых возможно развитие суффозии и оврагообразования.

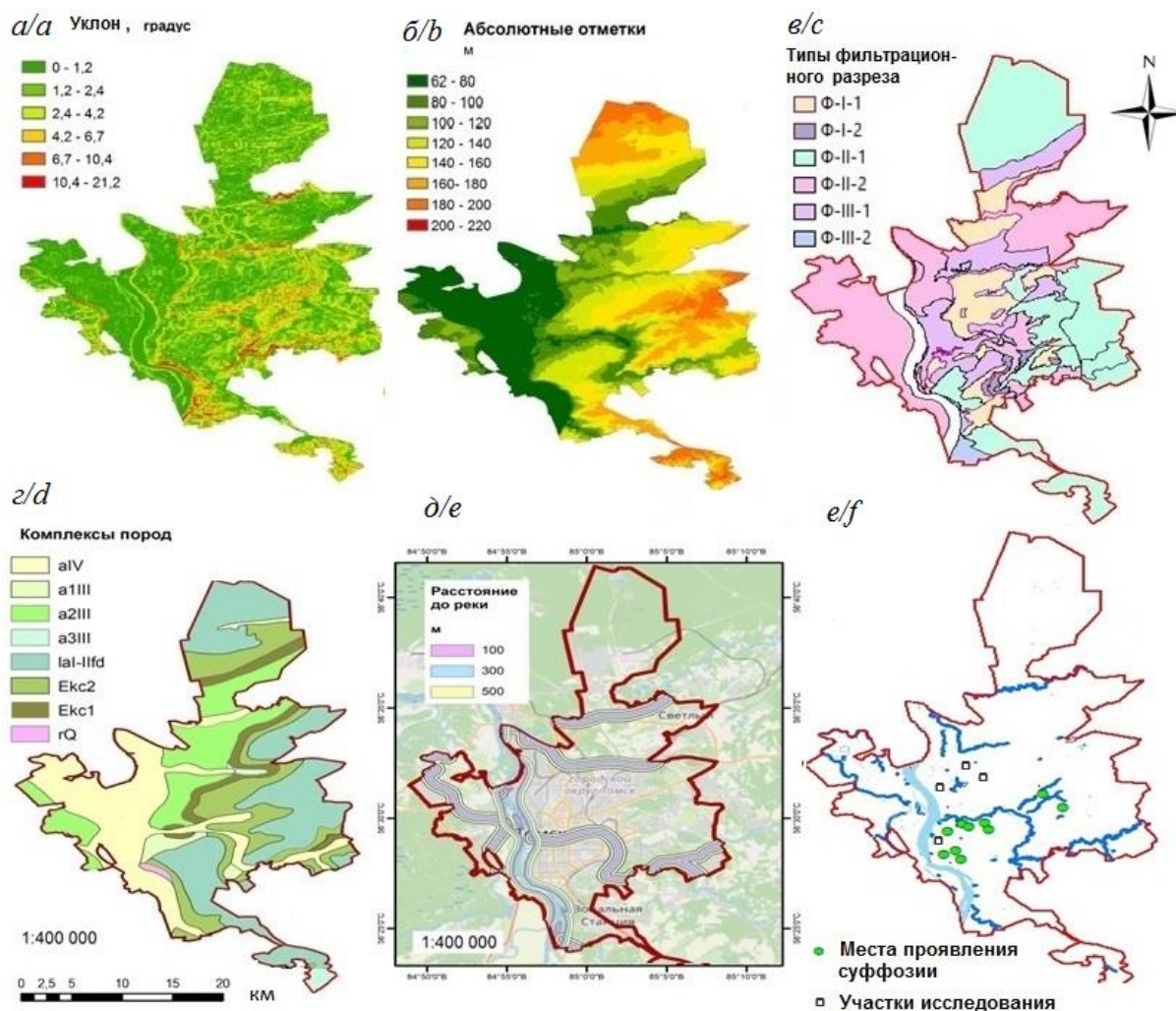


Рис. 3. Исходные слои для оценки суффозии
 Fig. 3. Data layers for suffusion assessment

Стратиграфо-генетические комплексы и состав пород (литология) – один из наиболее важных параметров при изучении опасных геологических процессов, поскольку разные литологические единицы имеют разную степень устойчивости к их развитию. Слой оцифрован по геологической карте города 1:25000 (рис. 3, г).

Расстояние до рек (рис. 3, д). Реки могут отрицательно влиять на стабильность склонов, размывая их или насыщая нижнюю часть при повышении уровня воды. Также важна взаимосвязь между поверхностными и грунтовыми водами.

Карта проявлений суффозии. В основе этого слоя использовались данные, собранные А.В. Леоновой в ходе маршрутных наблюдений и по новостным сообщениям в СМИ. Места вынесены с помощью инструмента «точка».

Имеющие тематические слои позволили описать локализацию проявлений суффозии по этим факторам. Так, места проявлений суффозии приурочены к площадкам с уклоном поверхности 2–4°, абсолютными отметками от 82 до 160 м, с разным геоморфологическим положением – на высокой пойме, второй и третьей надпойменных террасах и склонах водоразделов;

к двухслойным фильтрационным разрезам (Ф-II-1) с благоприятными условиями для разгрузки подземных вод на склонах; на расстоянии 300 и более метров от рек.

В настоящее время построить кондиционную карту суффозионной опасности не представилось возможным из-за малочисленности наблюдений о проявлениях суффозии. Пополнение базы данных о проявлениях суффозии позволит в дальнейшем установить пространственную корреляцию между участками суффозии и обуславливающими их факторами с помощью статистических моделей, на основе ГИС, как было сделано авторами для оврагов и оползней.

Оценка суффозионной опасности

Для оценки суффозионной устойчивости дисперсных несвязных грунтов были собраны данные по гранулометрическому анализу песков из скважин, пробуренных в 2005–2016 гг. различными организациями под строительство зданий, а также сведения из базы данных по Томскому Приобью [55]. Местоположение площадок показано на рис. 3, е. В разрезах встречено 26 слоев дисперсных несвязных грунтов, принадлежащих к семи стратиграфо-генетическим комплексам

(СГК): современным техногенным отложениям tIV, современным аллювиальным отложениям поймы aIV, верхнечетвертичным отложениям второй а²III и третьей а³III надпойменных террас, нижне-среднечетвертичным озерно-аллювиальным отложениям федосовской свиты IaI-IIfd, эоплейстоценовым озерно-аллювиальным отложениям кочковской свиты IaEкc и элювиальным образованиям мел-палеогеновой коры выветривания eK-Pg. Грунты представлены различными разновидностями по гранулометрическому составу (таблица) в соответствии с ГОСТ 25100-2020.

Многие исследователи (А.М. Дранников, В.С. Истомина, В.В. Пендин, С.В. Смолич и др.) считают, что суффозия развивается в породах, у которых степень неоднородности (C_u) гранулометрического состава больше 20, а гидравлический градиент больше 1. Проверка этого условия по выбранным площадкам показала, что среди 26 разновидностей дисперсных грунтов встречено 5 слоев, в которых $C_u > 20$. Для большей объективности было решено использовать и другие методы оценки суффозионности.

Вопросу оценки суффозионной устойчивости дисперсных несвязных грунтов много внимания уделялось во ВНИИГ им. В.Е. Веденеева [56–59]. При оценке суффозионной устойчивости грунтов мы использовали два способа, предложенных сотрудниками института гидротехники.

Первый способ. Согласно руководству [56], без ухудшения прочности грунта могут быть вынесены самые мелкие частицы, количество которых не превышает 3–5 % по массе, т. е. проверка суффозионной устойчивости песков осуществляется по условию:

$$\begin{aligned} d_{\max}^{ci} &\leq d_3 \dots d_5, \\ d_{\max}^{ci} &= 0,77d_{\max}^0, \end{aligned}$$

где d_{\max}^{ci} – максимальный размер частиц, которые могут быть вынесены фильтрационным потоком в результате суффозии; d_{\max}^0 – диаметр максимальных фильтрационных пор в грунте, определенный по формуле М.П. Павчича [14]:

$$d_{\max}^0 = 0,455k\sqrt[6]{C_u}e d_{17},$$

где k – коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте или коэффициент локальности суффозии:

$$\begin{aligned} k &= 1 + 0,05 C_u, \\ C_u &= d_{60}/d_{10}, \end{aligned}$$

где C_u – степень неоднородности грунта; $d_3, d_5, d_{10}, d_{17}, d_{60}$ – диаметр частиц соответственно 3, 5, 10, 17, 60 процентной обеспеченности (диаметры частиц, меньше которых в данном грунте содержится (по массе) соответственно 3, 5, 10, 17, 60 % частиц); e – коэффициент пористости.

Если условие не выполняется, то грунт считается суффозионным, из такого грунта могут выноситься все частицы с размером меньше или равным d_{\max}^{ci} .

Максимально возможный процент выноса суффозионных частиц можно определить по значению d_{\max}^{ci} на интегральной кривой гранулометрического состава. С.В. Щербаковым [59] предложен еще один параметр – степень суффозионности λ_1 , который позволяет количественно оценивать интенсивность суффозионной опасности:

$$\lambda_1 = d_3 \dots d_5 - d_{\max}^{ci}.$$

Им предложено по значению λ_1 различать грунты: несуффозионные (< 0), слабосуффозионные ($0 \dots 0,1$), среднесуффозионные ($0,1 \dots 0,2$), сильносуффозионные ($> 0,2$).

Второй способ. Критерий суффозионности записывается условием [57]

$$\frac{d_5}{d_{17}} \geq K_2,$$

где

$$K_2 = (0,32 + 0,16 \cdot C_u) \cdot \sqrt[6]{C_u} \cdot \frac{e}{1-e}.$$

Грунт считается несуффозионным, если условие выполняется. А.В. Шилова [60] вводит дополнительный параметр интенсивности суффозионной опасности – степень суффозионности λ_2 :

$$\lambda_2 = \frac{d_5}{d_{17}} - K_2.$$

По значению λ_2 предложено различать грунты: несуффозионные ($< -1,5$), слабосуффозионные ($-1,5 \dots 100$), среднесуффозионные ($100 \dots 200$), сильносуффозионные (> 200). Расчет суффозионной устойчивости проводился по усредненным данным в пределах инженерно-геологических элементов, выделенных на площадках. Результаты расчетов суффозионной устойчивости представлены в таблице.

Определены диаметры выносимых частичек из основных стратиграфо-генетических комплексов, распространенных на территории города, для галечниковых грунтов он составил 1,9 мм, для гравийных – 0,28...0,56 мм, для песков гравелистых – 0,17 мм, для средних – 0,04...0,06 мм, для мелких и пылеватых – 0,023 мм.

Расчеты суффозионной устойчивости, выполненные по методикам ВНИИГ, не подтвердили, что пять слоев со степенью неоднородности более 20, являются суффозионными. Из результатов, приведенных в таблице, следует, что встреченные в разрезах разности песчаных грунтов являются в основном потенциально суффозионно-устойчивыми, за исключением среднезернистых песков второй надпойменной террасы, пылеватых песков третьей террасы, пылеватых песков федосовской и кочковской свит, которые являются слабосуффозионными.

В дальнейшем следует привлечь больше данных по скважинам о гранулометрическом составе грунтов, т. к. большая часть инженерно-геологических скважин не вскрывает песчаные грунты в разрезе из-за их малой глубины.

Таблица. Оценка суффозионной устойчивости дисперсных несвязных грунтов

Table. Assessment of the suffosion stability of coarse-grained soils

СГК Formation	Тип Type	d ₃	d ₅	d ₁₀	d ₁₇	d ₆₀	e	Cu	d ⁰ _{max}	d ⁱ _{max}	λ ₁	K ₂	N	λ ₂
tIV	Насыпной Fill	0,007	0,011	0,037	0,069	0,833	0,66	22,5*	0,07	0,06	-0,05	12,79	0,16	-12,6
aIV	Пылеватый Silty	0,005	0,009	0,031	0,07	0,238	0,90	7,7	0,06	0,04	-0,03	19,57	0,13	-19,4
aIV	Мелкий Fine	0,009	0,015	0,044	0,06	0,185	0,67	4,2	0,03	0,02	-0,01	2,60	0,25	-2,3
aIV	Средний Medium	0,016	0,05	0,109	0,134	0,325	0,87	3,0	0,07	0,06	-0,01	6,40	0,37	-6,0
aIV	Средний Medium	0,005	0,008	0,025	0,063	0,265	0,87	10,6	0,06	0,04	-0,04	20,00	0,13	-19,9
aIV	Гравелистый Gravelly	0,005	0,008	0,028	0,072	1,598	0,87	57,1	0,22	0,17	-0,16	124,11	0,11	-124,0
aIV	Гравийный Gravel	0,019	0,031	0,105	0,366	2,206	0,87	21,0	0,49	0,38	-0,35	40,93	0,08	-40,8
aIV	Гравийный Gravel	0,024	0,035	0,092	0,291	1,086	0,87	11,8	0,28	0,21	-0,18	22,30	0,12	-22,2
aIV	Галечниковый Pebble	0,282	0,398	0,813	2,387	11,139	0,87	13,7	2,46	1,90	-1,50	26,01	0,17	-25,8
a2III	Пылеватый Silty	0,005	0,016	0,054	0,065	0,164	0,90	3,0	0,04	0,03	-0,01	8,73	0,25	-8,5
a2III	Мелкий Fine	0,009	0,028	0,063	0,094	0,19	0,86	3,0	0,05	0,04	-0,01	5,93	0,30	-5,6
a2III	Средний Medium	0,016	0,063	0,11	0,137	0,42	0,90	3,8	0,08	0,06	0,00	10,71	0,46	-10,3
a2III	Средний Medium	0,078	0,083	0,097	0,121	0,321	0,65	3,3	0,05	0,04	0,04	1,93	0,69	-1,2
a2III	Гравийный Gravel	0,072	0,091	0,165	0,294	5,579	0,86	33,8	0,56	0,43	-0,34	63,29	0,31	-63,0
a3III	Пылеватый Silty	0,04	0,01	0,051	0,06	0,147	0,48	2,9	0,02	0,01	0,00	0,85	0,17	-0,7
a3III	Мелкий Fine	0,005	0,008	0,022	0,054	0,144	0,66	6,5	0,03	0,02	-0,01	3,60	0,15	-3,4
laI-IIfd	Пылеватый Silty	0,005	0,013	0,051	0,057	0,11	0,68	2,2	0,02	0,02	0,00	1,61	0,23	-1,4
laI-IIfd	Мелкий Fine	0,006	0,01	0,043	0,059	0,155	0,68	3,6	0,03	0,02	-0,01	2,36	0,17	-2,2
laI-IIfd	Мелкий Fine	0,05	0,052	0,058	0,067	0,16	0,68	2,8	0,03	0,02	0,03	1,92	0,78	-1,1
laEkc	Пылеватый Silty	0,004	0,009	0,017	0,039	0,169	0,54	9,9	0,02	0,02	-0,01	3,24	0,23	-3,0
laEkc	Пылеватый Silty	0,013	0,04	0,066	0,099	0,215	0,51	3,3	0,03	0,02	0,02	1,04	0,40	-0,6
laEkc	Пылеватый Silty	0,004	0,007	0,018	0,051	0,163	0,59	9,1	0,03	0,02	-0,01	3,60	0,14	-3,5
laEkc	Пылеватый Silty	0,007	0,013	0,052	0,079	0,201	0,55	3,9	0,03	0,02	-0,01	1,44	0,16	-1,3
laEkc	Мелкий Fine	0,009	0,028	0,059	0,079	0,174	0,56	2,9	0,03	0,02	0,01	1,21	0,35	-0,9
laEkc	Мелкий Fine	0,005	0,016	0,054	0,063	0,165	0,56	3,1	0,02	0,02	0,00	1,24	0,25	-1,0
K-Pg	Щебенистый Crushed stone	0,01	0,016	0,061	0,362	7,482	0,49	122,7	1,28	0,99	-0,97	42,71	0,04	-42,7

*Заливкой отмечены суффозионные грунты.

*The cells with colored fill mark suffosion soils.

Выводы

1. В г. Томск получили развитие различные опасные геологические и инженерно-геологические процессы, затрудняющие повышение качества городской среды при формировании и преобразовании территории.
2. Особое значение для территории имеет наличие в разрезе дисперсных несвязных грунтов, склонных к суффозии. Одним из основных факторов развития суффозии является фильтрация подземных вод с необходимым для начала процесса напором

за счет утечек из водопроводных и канализационных сетей и «барражного эффекта». Определены диаметры выносимых частичек основных стратиграфо-генетических комплексов, распространенных на территории города.

3. Строительство и эксплуатация дорог и тротуаров на территориях, подверженных суффозионным процессам, должны вестись с обязательным соблюдением правил, а также с применением специальных защитных мер. Например, необходимо регулирование поверхностного стока дождевых и талых

вод, устройство дренажей, контроль состояния водонесущих коммуникаций и своевременный ремонт с целью недопущения утечек из них, предварительное уплотнение пород для уменьшения скорости фильтрации, гидроизоляция труб и прочее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ольховатенко В.Е., Рутман М.Г., Лазарев В.М. Опасные природные и техноприродные процессы на территории г. Томска и их влияние на устойчивость природно-технических систем. – Томск: Печатная мануфактура, 2005. – 152 с.
2. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2015 г. Информационный бюллетень, выпуск 12, АО «Томскгеомониторинг». – Томск: ООО «Д-принт», 2016. – 160 с.
3. Евсеева Н.С. География Томской области. Природные условия и ресурсы. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2001. – 223 с.
4. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. – М.: ГЕОС, 2003. – 216 с.
5. Павлов А.П. О рельефе равнин и его изменениях под влиянием работы подземных и поверхностных вод // Землеведение. – 1898. – Т. 5. – № 3–4. – С. 91–147.
6. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. – М: РУДН, 2017. – 328 с.
7. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. Инженерная геодинамика. – М.: КДУ, 2007. – 327 с.
8. Буренкова В.В., Буренков П.М. Отечественный опыт оценки фильтрационной прочности несвязных грунтов тела плотины и основания // Природобустройство. – 2020. – № 4. – С. 84–91.
9. Дранников А.М. Инженерная геология. – Киев: Госстройиздат, – 1964. – 256 с.
10. Дробинина Е.В., Катаев В.Н. Физические свойства песчаных и супесчаных грунтов покровной толщи в интегральной оценке суффозионной опасности территории в районах развития карбонатного карста // Геоинформатика. – 2017. – № 1. – С. 21–31.
11. Истомина В.С. Фильтрационная устойчивость грунтов. – М.: Госстройиздат, 1957. – 295 с.
12. Лаврусевич А.А., Хоменко В.П. Инженерная защита территорий, пораженных лесовым псевдокарстом // Вестник МГСУ. – 2012. – № 10. – С. 191–199.
13. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. – Л.: Недра, 1977. – 479 с.
14. Павлич М.П. Способ определения несущих способностей гранулометрических составов грунта // Известия ВНИИГ. – 1961. – Т. 68. – С. 197–202.
15. Оценка суффозионной опасности площадки АЭС и ее окрестностей. Опасные для строительства геологические процессы / В.П. Пендин, А.С. Гусельцев, И.К. Фоменко, О.В. Зеркаль, О.Н. Сироткина // Сб. матер. Междунар. сем., посвящ. 70-летию д.г.-м.н. В.П. Хоменко. – М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2019. – С. 22–29.
16. Смолич С.В., Смолич К.С. Количественная оценка суффозионной опасности песчаных грунтов // Сергеевские чтения. Научное обоснование актуализации нормативных документов инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий. – М.: Российский университет дружбы народов, 2010. – С. 176–181.
17. Хоменко В.П. Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. – М.: Наука, 1986. – 98 с.
18. Engemoen W.O., Redlinger C.G. Internal erosion incidents at Bureau of Reclamation dams // Managing our Water Retention Systems: Proc. of 29th USSD Annual Meeting and Conference. – Nashville, TN, April 20–24, 2009. – Denver, CO: U.S. Society on Dams, 2009. – P. 731–745.
19. Erosion in geomechanics applied to dams and levees / Ed. by S. Bonelli. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 388 p.
20. Fannin R.J., Slangen P. On the distinct phenomena of suffusion and suffosion // Géotechnique Letters. – 2014. – V. 4. – Iss. 4. – P. 289–294.
21. Glossary of geology / Eds. M. Gary, R. McAfee, Jr, C.L. Wolf, with a foreword by I. Campbell. – Washington, D.C.: American Geological Institute, 1972. – 52 p.
22. Hutchinson J.N. Damage to slopes produced by seepage erosion in sands // Landslides and mudflows: reports of Alma Ata International Seminar, October 1981. – Moscow: Centre of International Projects, GKNT, 1982. – P. 250–265.
23. Kälin M. Hydraulic piping – theoretical and experimental findings // Canadian geotechnical journal. – 1977. – V. 14. – № 1. – P. 107–124.
24. Skempton A.W. Landmarks in early soil mechanics // The measurement, selection, and use of design parameters in geotechnical engineering: Proc. of 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – Brighton, UK, September 1979. – London: British Geotechnical Society, 1979. – V. 5. – P. 1–26.
25. Ghorbanzadeh O., Feizizadeh B., Blaschke T. An interval matrix method used to optimize the decision matrix in AHP technique for land subsidence susceptibility mapping // Environmental Earth Sciences. – 2018. – V. 77. – Article number 584.
26. Landslide susceptibility mapping for Austria using geons and optimization with the Dempster-Shafer theory / T. Gudiyangada Nachappa, S. Tavakkoli Piralilou, O. Ghorbanzadeh, H. Shahabi, T. Blaschke // Applied Sciences. – 2019. – V. 9 (24). – Article number 5393.
27. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping / T. Gudiyangada Nachappa, S. Kienberger, S.R. Meena, D. Hölbling, T. Blaschke // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2020. – V. 11. – № 1. – P. 572–600.
28. Estimating the quality of landslide susceptibility models / F. Guzzetti, P. Reichenbach, F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Galli // Geomorphology. – 2006. – V. 81. – P. 166–184.
29. Ivanova E. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio and Analytic Hierarchy Process (AHP): comparative study of two areas in Bulgaria // Proc. of the International Conference Analysis and Management of Changing Risk for Natural Hazards. – Padua, Italy, 18–19 November 2014. – P. AP23-1–AP23-9.
30. Rasyid A.R., Bhandary N.P., Yatabe R. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia // Geoenvironmental Disasters. – 2016. – V. 3. – Article number 19.
31. Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: a case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China / Y.X. Zhang, H.X. Lan, L.P. Li, Y.M. Wu, J.H. Chen, N.M. Tian // Journal of Mountain Science. – 2020. – V. 17. – Article number 2.
32. Spatial distribution and susceptibility zoning of geohazards along the Silk Road, Xian-Lanzhou / J. Zhuang, J. Peng, X. Zhu, W. Li, P. Ma, T. Liu // Environmental Earth Sciences. – 2016. – V. 75. – Article number 711.
33. Lee S., Thalib J. A. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis // Environmental Geology. – 2005. – V. 47. – P. 982–990.
34. Linden A. Measuring diagnostic and predictive accuracy in disease management: an introduction to receiver operating characteristic (ROC) analysis // Journal of Evaluation in Clinical Practice. – 2006. – V. 12. – P.132–139.
35. Papin A.A., Sabin A.N. Simulation of the motion of a mixture of liquid and solid particles in porous media with regard to internal suffusion // Fluid Dynamics. – 2019. – V. 54 (4). – P. 520–534.
36. A transient backward erosion piping model based on laminar flow transport equations / M. Wewer, J.P. Aguilar-López, M. Kok, T. Bogaard // Computers and Geotechnics. – 2021. – V. 132. – № 103992.
37. A study of suffusion kinetics inspired from experimental data: comparison of three different approaches / A. Kodieh, R. Gelet, D. Marot, A.Z. Fino // Acta Geotechnica. – 2021. – V. 16 (2). – P. 347–365.

38. Kanitz M., Grabe J. The influence of the void fraction on the particle migration: a coupled computational fluid dynamics–discrete element method study about drag force correlations // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2021. – V. 45 (1). – P. 45–63.
39. Prasomsri J., Takahashi A. The role of fines on internal instability and its impact on undrained mechanical response of gap-graded soils // *Soils and Foundations*. – 2020. – V. 60 (6). – P. 1468–1488.
40. Строкова Л.А., Епифанова Е.А., Коржнева Т.Г. Численный анализ поведения основания опоры моста на старой железнодорожной линии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 125–139.
41. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Оценка деформаций исторического здания в Томске с помощью комплексного подхода, основанного на сочетании наземного лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 27–41.
42. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Анализ деформаций прожекторной мачты при помощи наземного лазерного сканирования и метода конечных элементов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 7–17.
43. Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского ГОК в Якутии / Л.А. Строкова, С.А. Дмитриева, Н.В. Осьмушкина, А.В. Осьмушкин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
44. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78 (8). – P. 5517–5530.
45. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности из-за извлечения подземных вод // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 6–17.
46. Строкова Л.А., Галеева Э.И., Леонова А.В. Районирование инженерно-геокриологических условий трассы трубопровода на Восточно-Мессояхском нефтегазоконденсатном месторождении // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 14–22.
47. Сахаровский А.В., Строкова Л.А., Определение устойчивости оползневого склона при проектировании моста через р. Пошнарку в Чувашии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 125–134.
48. Строкова Л.А., Надеждина Ю.Ю. Типизация инженерно-геологических условий территории трассы проектируемой железной дороги Элегест-Кызыл-Курагино // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 64–77.
49. Строкова Л.А., Ежкова А.В., Леонова А.В. Применение линейного анализа для оценки карстоопасности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 117–126.
50. Оценка инженерно-геокриологических условий Берегового нефтегазоконденсатного месторождения / Л.А. Строкова, Д.В. Пургина, Э.И. Галеева, А.Н. Курчатова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 6–19.
51. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. I. Общие правила производства работ. – М.: Госстрой России, 1997. – 47 с.
52. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. – М.: Минстрой России, 2016. – 49 с.
53. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. – М.: Минрегион России, 2012. – 65 с.
54. Покровский Д.С., Кузеванов К.И. Гидрогеологические проблемы строительного освоения территории Томска // *Обской вестник*. – 1999. – № 1–2. – С. 96–104.
55. Строкова Л.А. Инженерно-геологическое районирование территории Томского Приобья по степени устойчивости геологической среды к техногенной нагрузке: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1997. – 199 с.
56. Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость: П 49-90. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1991. – 94 с.
57. Рекомендации по проектированию переходных зон каменно-земляных плотин: П35-87. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1989. – 65 с.
58. Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. П 56-90. – СПб.: ВНИИГ, 1992. – 110 с.
59. Щербаков С.В. Прогнозирование устойчивости сооружений в зависимости от суффозионности грунтов // *Трофимуксовские чтения*. – Новосибирск: Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 2013. – С. 584–586.
60. Шилова А.В. Оценка суффозионной устойчивости и классифицирование грунтов на примере промплощадки // *Сергеевские чтения*. – М.: Российский университет дружбы народов, 2014. – С. 214–218.

Поступила 17.02.2021 г.

Информация об авторах

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

Леонова А.В., старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 624.131

ASSESSMENT OF SUFFOSION HAZARD ON THE TERRITORY OF TOMSK

Lyudmila A. Strokova¹,
sla@tpu.ru

Anna V. Leonova¹,
avleonova@tpu.ru

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

Relevance of the research. Currently, the city of Tomsk is increasing the area of development; new neighborhoods appear on previously undeveloped land (for example, on the left bank of the river Tom). There is a redevelopment and reconstruction of the central part of the city. It is impossible to develop the territory in a high-quality way without taking into account the dynamics, mechanisms, factors and patterns of development of dangerous natural and technological processes, the forecast of their development. Despite the fact that the manifestations of suffosion are almost ubiquitous, this process remains one of the least studied processes.

The main aim of the research is to assess the suffosion stability of soils within the city of Tomsk.

Methods. We performed the analysis of spatial patterns that determine the development of suffosion using thematic maps prepared in ArcGIS at the first stage of our research. We chose five factors: the slope of the surface, the elevation, the geological structure of the territory, the types of filtration sections, and the distance to the river. The article describes the location of suffosion manifestations on these maps. At the second stage, we performed the suffosion hazard assessment of 26 varieties of sandy and coarse-grained soils according to the VNIIG methods. We described the particle size distribution and determined the uniformity coefficient, maximum size of the particles prone to suffosion, and the degree of soil suffosion of seven stratigraphic-genetic systems, common in the city.

Results. We recommended using the obtained data on the degree of suffosion of sandy and coarse-grained soils in the design of engineering structures, in monitoring and operational management of the state of the geological environment, when assessing the value of urban land, in educational work when teaching the discipline «Engineering Geodynamics».

Key words:

Suffosion, danger, particle size distribution, sand, coarse-grained soils, uniformity coefficient.

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

REFERENCES

1. Olkhovatenko V.E., Rutman M.G., Lazarev V.M. *Opasnye prirodnye i tekhnoprirodnye protsessy na territorii g. Tomsk i ikh vliyaniye na ustoychivost prirodno-tekhnicheskikh sistem* [Dangerous natural and technological processes on the territory of Tomsk and their impact on the stability of natural and technical systems]. Tomsk, Pechatnaya manufaktura, 2005. 152 p.
2. *Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2015 g. Informatsionnyy byulleten, vypusk 12, AO «Tomskgeomonitring»* [State of the geological environment (subsurface) of the territory of the Siberian Federal District in 2015. Newsletter, Iss. 12, «Tomskgeomonitring»]. Tomsk, D-print Publ., 2016. 160 p.
3. Evseeva N.S. *Geografiya Tomskoy oblasti. Prirodnye usloviya i resursy* [Geography of the Tomsk region. Natural conditions and resources]. Tomsk, TSU Publ., 2001. 223 p.
4. Khomenko V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Regularities and forecasting of suffusion]. Moscow, GEOS Publ., 2003. 216 p.
5. Pavlov A.P. *O reliefe ravnin i ego izmeneniyakh pod vliyaniem raboty podzemnykh i poverkhnostnykh vod* [On the relief of the plains and its changes under the influence of the work of underground and surface waters]. *Zemlevedeniye*, 1898, vol. 5, no. 3–4, pp. 91–147.
6. Anikeev A.V. *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh rayonakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Collapse sinks and subsidences in karst areas: mechanisms, prediction, and risk estimation]. Moscow, RUDN Publ., 2017. 328 p.
7. Bondarik G.K., Pendin V.V., Yarg L.A. *Inzhenernaya geodinamika* [Engineering geodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2007. 327 p.
8. Burenkova V.V., Burenkov P.M. Domestic experience of assessing the filtration strength of non-cohesive soils of dam body and base. *Environmental engineering*, 2020, vol. 4, pp. 84–91. In Rus.
9. Drannikov A.M. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology]. Kiev, Gosstroyizdat Publ., 1964. 256 p.
10. Drobinina E.V., Kataev V.N. Physical properties of sandy and sandy loam overlying formation in integral suffosion assessment within the carbonate karst area. *Geoinformatika*, 2017, no. 1, pp. 21–31. In Rus.
11. Istomina V.S. *Filtratsionnaya ustoychivost gruntov* [Filtration stability of soils]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1957. 219 p.
12. Lavrusevich A.A., Khomenko V.P. Engineering protection of territories affected by loessial pseudoclast. *Bulletin of the MSU*, 2012, no. 10, pp. 191–199. In Rus.
13. Lomtadze V.D. *Inzhenernaya geologiya. Inzhenernaya geodinamika* [Engineering geology. Engineering geodynamics]. Leningrad, Nedra Publ., 1977. 479 p.
14. Pavchich M.P. Sposob opredeleniya nesuffuzionnykh granulometricheskikh sostavov grunta [Method for determining non-diffusion granulometric compositions of soil]. *Izvestiya VNIIG*, 1961, vol. 68, pp. 197–202.
15. Pendin V.V., Gusetsev A.S., Fomenko I.K., Zerkal O.V., Sirotkina O.N. Otsenka suffuzionnoi opasnosti ploshchadki AES i ee okrestnostei. Opasnye dlya stroitelstva geologicheskie protsessy [Assessment of suffusion hazard at a NPP site and its vicinity. Geological processes hazardous to construction]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnogo seminara, posvyashchennogo 70-letiyu V.P. Khomenko* [Proc. Intern. Workshop dedicated to the 70th birthday of Dr. Sci. V.P. Khomenko]. Moscow, MISI-MGSU Publ., 2019. pp. 22–29.
16. Smolich S.V., Smolich K.S. Kolichestvennaya otsenka suffuzionnoy opasnosti peschanykh gruntov [Quantitative assessment of the suffusion hazard of sandy soils]. *Sergeevskie Chteniya. Nauchnoe obosnovaniye aktualizatsii normativnykh dokumentov inzhenerno-geologicheskikh i inzhenerno-ekologicheskikh izyskaniy* [Sergeev Readings. Scientific substantiation of updating of normative documents of engineering-

- geological and engineering-ecological surveys]. Moscow, RUDN Publ., 2010. pp. 176–181.
17. Khomenko V.P. *Karstovo-suffozionnye protsessy i ikh prognoz* [Karst-suffusion processes and their prognosis]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 98 p.
 18. Engemoen W.O., Redlinger C.G. *Internal erosion incidents at Bureau of Reclamation dams. Managing our Water Retention Systems: Proc. of 29th USSD Annual Meeting and Conference*. Nashville, TN, April 20–24, 2009. Denver, CO, U.S. Society on Dams, 2009. pp. 731–745.
 19. *Erosion in geomechanics applied to dams and levees*. Ed. by S. Bonelli. Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2013. 388 p.
 20. Fannin R.J., Slangen P. On the distinct phenomena of suffusion and gulfusion. *Geotechnique Letters*, 2014, vol. 4, Iss. 4, pp. 289–294.
 21. *Glossary of geology*. Eds. M. Gary, R. McAfee Jr, C.L. Wolf. With a foreword by I. Campbell. Washington, D.C., American Geological Institute, 1972. 52 p.
 22. Hutchinson J.N. Damage to slopes produced by seepage erosion in sands. *Landslides and mudflows: reports of Alma Ata International Seminar*. October 1981. Moscow, Centre of International Projects, GKNT, 1982. pp. 250–265.
 23. Kälin M. Hydraulic piping – theoretical and experimental findings. *Canadian geotechnical journal*, 1977, vol. 14, no. 1, pp. 107–124.
 24. Skempton A.W. Landmarks in early soil mechanics. The measurement, selection, and use of design parameters in geotechnical engineering: *Proc. of 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Brighton, UK, September 1979. Vol. 5. London, British Geotechnical Society, 1979. pp. 1–26.
 25. Ghorbanzadeh O., Feizizadeh B., Blaschke T. An interval matrix method used to optimize the decision matrix in AHP technique for land subsidence susceptibility mapping. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, Article number 584.
 26. Gudiyangada Nachappa T., Tavakkoli Piralilou S., Ghorbanzadeh O., Shahabi H., Blaschke T. Landslide susceptibility mapping for Austria Using GEONS and optimization with the Dempster-Shafer Theory. *Applied Science*, 2019, vol. 9 (24), Article number 5393.
 27. Gudiyangada Nachappa T., Kienberger S., Meena S.R., Hölbling D., Blaschke T. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 572–600.
 28. Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 2006, vol. 81, pp. 166–184.
 29. Ivanova E. Landslide Susceptibility Mapping using Frequency Ratio and Analytic Hierarchy Process (AHP): Comparative study of two areas in Bulgaria. *Proceedings of the International Conference Analysis and Management of Changing Risk for Natural Hazards*. Padua, Italy, 18–19 November, 2014, pp. AP23-1–AP23-9.
 30. Rasyid A.R., Bhandary N.P., Yatabe R. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 2016, vol. 3, Article number 19.
 31. Zhang Y.X., Lan H.X., Li L.P., Wu Y.M., Chen J.H., Tian N.M. Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: A case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China. *Journal of Mountain Science*, 2020, vol. 17, Article number 2.
 32. Zhuang J., Peng J., Zhu X., Li W., Ma P., Liu T. Spatial distribution and susceptibility zoning of geohazards along the Silk Road, Xian-Lanzhou. *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75, Article number 711.
 33. Lee S., Thalib J. A. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 2005, vol. 47, pp. 982–990.
 34. Linden A. Measuring diagnostic and predictive accuracy in disease management: An introduction to receiver operating characteristic (ROC) analysis. *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 2006, vol. 12, pp. 132–139.
 35. Papin A.A., Sibin A.N. Simulation of the motion of a mixture of liquid and solid particles in porous media with regard to internal suffusion. *Fluid Dynamics*, 2019, vol. 54, no. 4, pp. 520–534
 36. Wewer M., Aguilar-López J.P., Kok M., Bogaard T. A transient backward erosion piping model based on laminar flow transport equations. *Computers and Geotechnics*, 2021, vol. 132, no. 103992
 37. Kodieh A., Gelet, R., Marot D., Fino A.Z. A study of suffusion kinetics inspired from experimental data: comparison of three different approaches. *Acta Geotechnica*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 347–365.
 38. Kanitz M., Grabe J. The influence of the void fraction on the particle migration: a coupled computational fluid dynamics–discrete element method study about drag force correlations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2021, vol. 45, no. 1, pp. 45–63.
 39. Prasomsri J., Takahashi A. The role of fines on internal instability and its impact on undrained mechanical response of gap-graded soils. *Soils and Foundations*, 2020, vol. 60, no. 6, pp. 1468–1488.
 40. Stroková L.A., Epifanova E.A., Korzhneva T.G. Numerical analysis of bridge foundation behaviour on the old railway line. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 125–139. In Rus.
 41. Epifanova E.A., Stroková L.A. Evaluation of deformation of a historic building in Tomsk by an Integrated Approach Based on Terrestrial Laser Scanner and Finite Element Modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 27–41. In Rus.
 42. Epifanova E.A., Stroková L.A. Numerical analysis of deformations of the lighting mast by ground laser scanning and finite elements method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 7–17. In Rus.
 43. Stroková L. Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 8, pp. 5517–5530.
 44. Stroková L.A., Dmitrieva S.A. Osmushkina N.V., Osmushkin A.V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 175–185. In Rus.
 45. Phi H.T., Stroková L.A. Classification of soil types for Hanoi (Vietnam) when studying land subsidence at groundwater extraction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 6–17. In Rus.
 46. Stroková L.A., Galeeva E.I., Leonova A.V. Zoning of engineering-geocryological conditions of the pipelines on Vostochno-Messoyakhskoye field oil and gas condensate field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 14–22. In Rus.
 47. Saharovskiy A.V. Stroková L.A. Determining landslide slope stability when designing a bridge over the river Poshnarka in the Chuvash Republic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 125–134. In Rus.
 48. Stroková L.A. Nadezhkina Yu.Yu. Typification of engineering and geological conditions of the territory of the route of the projected railway Elegest-Kyzyl-Kuragino. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 64–77. In Rus.
 49. Stroková L.A., Ezhkova A.V., Leonova A.V. The application of lineament analysis to assess the karst hazard in the design of the main gas pipeline in South Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 117–126. In Rus.
 50. Stroková L.A., Purgina D.V., Galeeva E.I., Kurchatova A.N. Evaluation of engineering-geocryological conditions of the Beregovoye oil and gas condensate field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 6–19. In Rus.
 51. SP 11-105-97. *Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva. Ch. I. Obshchie pravila proizvodstva rabot* [Engineering and geological surveys for construction. P. I. General rules for the production of works]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 1997. 47 p.
 52. SP 115.13330.2011. *Geofizika opasnykh prirodnykh vozdeystviy* [Geophysics of dangerous natural impacts]. Moscow, Ministry of Russia Publ., 2016. 49 p.

53. SP 116.13330.2012. *Inzhenernaya zashchita territoriy, zdaniy i sooruzheniy ot opasnykh geologicheskikh protsessov* [Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes]. Moscow, N.M. Gersevanov Research Institute of Regional Development Publ., 2012. 60 p.
54. Pokrovsky D.S., Kuzevanov K.I. *Gidrogeologicheskie problemy stroitel'nogo osvoeniya territorii Tomsk* [Hydrogeological problems of construction development of the territory of Tomsk]. *Obskoy vestnik*, 1999, vol. 1–2, pp. 96–104. In Rus.
55. Strokova L.A. *Inzhenerno-geologicheskoe rayonirovanie territorii Tomskogo Priobya po stepeni ustoychivosti geologicheskoy sredy k tekhnogennoy nagruzke*. Dis. Kand. nauk [Engineering-geological zoning of the territory of the Tomsk Ob region according to the degree of stability of the geological environment to the anthropogenic load. Cand. Diss.]. Tomsk, 1997. 199 p.
56. *Rekomendatsii po metodike laboratornykh ispytaniy gruntov na vodopronitsaemost i suffuzionnyu ustoychivost* [Recommendations on the methodology of laboratory tests of soils for water permeability and suffusion resistance]. P. 49–90. Leningrad, VNIIG named after B.E. Vedenev Publ., 1991. 94 p.
57. *Rekomendatsii po proektirovaniyu perekhodnykh zon kamennozemlyanykh plotin* [Recommendations for the design of transition zones of stone-earth dams]. P.35–87. Leningrad, VNIIG named after B.E. Vedenev Publ., 1989. 65 p.
58. *Rekomendatsii po proektirovaniyu obratnykh filtrov gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Recommendations for the design of reverse filters of hydraulic structures]. P. 56–90. St. Petersburg, VNIIG Publ., 1992. 110 p.
59. Shcherbakov S.V. *Predicting the stability of structures depending on the soil suffusion. Trofimukovskie chteniya* [Trofimuk readings]. Novosibirsk, September 8-14, 2013. Novosibirsk, IPGG SB RAS Publ., 2013. pp. 584–586.
60. Shilova A.V. *Otsenka suffuzionnoy ustoychivosti i klassifitsirovanie gruntov na primere prompleshchadki* [Evaluation of suffusion stability and classification of soils on the example of an industrial site]. *Sergeevskie chteniya* [Sergeev readings]. Moscow, RUDN Publ., 2014. pp. 214–218.

Received: 17 February 2021.

Information about the authors

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

Anna V. Leonova, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.24.051.64

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА ТИПА PDC

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,
sovair@bk.ru

Лиу Баочанг²,
liubc@jlu.edu.cn

Чжаоран Чен²,
564825155@qq.com

Петенев Павел Геннадьевич¹,
pavel-whait@mail.ru

Попова Марина Сергеевна¹,
alleniram83@mail.ru

Головченко Антон Евгеньевич¹,
antong77@yandex.ru

¹ Сибирский федеральный университет,
Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

² Университет Цзилинь,
Китай, 130061, г. Чанчунь, ул. Химинжу, 938.

Актуальность. Требования к буровому породоразрушающему инструменту заключаются в обеспечении высокой механической скорости, ресурса, широкой области применения и небольших материальных затрат на его приобретение. Иными словами, буровой инструмент должен быть прочным, износостойким и изготовлен из относительно недорогого материала. Достижения в области синтеза поликристаллического алмаза и изготовления из него резцов высокой прочности значительно расширили возможности производителей бурового инструмента. Синтетический сверхтвердый материал стали применять при изготовлении режущих элементов и всей рабочей части породоразрушающего инструмента. Новшества материаловедения позволили производить резцы типа PDC разной формы, размеров, прочности, что особо актуально при создании долот, коронок и буровых головок с комбинированным вооружением. Как известно, состав и условия спекания композита влияют на свойства получаемой заготовки резца PDC. Изменяя прочностные параметры и геометрию расположения режущих элементов PDC с учетом области применения инструмента, можно добиться наилучшего эффекта разрушения горной породы. Таким образом, при создании нового бурового породоразрушающего инструмента актуальным является объединение знаний и умений в области химии, материаловедения и конструирования, что приведет к получению перспективного породоразрушающего инструмента.

Цель: определить направления совершенствования бурового инструмента типа PDC, а именно возможности материаловедения в области спекания сверхтвердого материала PDC, преимущества применения композита различного состава при проектировании новых конструкций бурового инструмента типа PDC.

Объекты: состав материала, процесс спекания и получаемые свойства резцов PDC, конструктивные особенности бурового инструмента PDC.

Методы: аналитические исследования, эксперимент, анализ.

Результаты. Изменение состава композита позволяет регулировать прочностные свойства получаемого резца PDC. Добавление такого материала, как графен, повышает прочностные, тепло- и электропроводные свойства резца PDC. Объединение возможностей материаловедения и опыта конструирования позволяет добиться положительных результатов в области разработки нового перспективного породоразрушающего инструмента.

Ключевые слова:

Породоразрушающий инструмент, сверхтвердые материалы, поликристаллический алмаз, синтез, прочность, резец PDC, графен.

Введение

Приоритетным направлением в развитии технических средств бурения является совершенствование породоразрушающего инструмента. Многие достижения в этой области связаны с использованием современных сверхтвердых материалов, созданием новых композиционных материалов, разработкой конструкций бурового инструмента с комбинированным вооружением [1–12].

В настоящее время наибольшие объемы бурения различного назначения связаны с использованием породоразрушающего инструмента типа PDC (*polycrystalline diamonds cutters*). Ресурс такого инструмента в зависимости от геологических условий может достигать несколько сотен и более метров, а механическая скорость бурения в среднем составляет около 20–40 м/ч.

Резец PDC получается путем спекания порошка поликристаллического алмаза на подложке в услови-

ях очень высоких температур и давления (метод *HTHP* (*high-temperature, high-pressure*)). Для повышения прочностных характеристик и ускорения процесса спекания в порошок поликристаллического алмаза добавляется катализатор из металла VIII группы (железо, кобальт, никель). К примеру, расплавленный в условиях высокой температуры и высокого давления (*HTHP*) кобальт катализирует частицы алмаза, поверхность которых графитизируется в процессе спекания. При растворении и осаждении алмаза между его частицами находится кобальт в жидком состоянии. Зерна алмаза соединяются друг с другом, в то время как кобальт мигрирует с образованием D-D связи между ними [13, 14]. Однако под воздействием высокого давления частицы алмаза постепенно разрушаются, и большинство этих фрагментированных частиц остается в своих исходных состояниях. Таким образом, они не могут заполнить образовавшиеся промежутки между крупными зернами [15]. Кроме того, границы зерен разрушенных алмазных частиц не могут быть заполнены связкой [16, 17]. Образовавшиеся пустоты между алмазами негативно сказываются на прочности, ресурсе резца и работе инструмента в целом.

Современное разнообразие материальной базы позволяет решить ряд проблем, связанных со снижением прочностных и других свойств композитных материалов. Известно, что для улучшения характеристик керамических материалов используется материал графен [18–20]. Он представляет собой гибкий, пластичный материал. Преимущественным свойством графена является возможность образования пленки на границе трения, что способствует хорошему эффекту самосмазки многокомпонентного материала. Присутствие графена вызывает рассредоточение напряжения сдвига в поверхностном слое, что приводит к пластической деформации на изнашиваемой границе раздела [21]. Поэтому графен часто добавляется в композит для достижения желаемого эффекта упрочнения [22–26].

Не стоит забывать и том, что графен является модификацией углерода, который также является химической основой синтетического поликристаллического алмаза. Именно поэтому данный материал выбран

для рассмотрения в качестве составляющего элемента поликристаллического алмазного резца.

Материалы и метод исследования

С целью исследования влияния состава композита на свойства получаемого из него резца PDC предложено провести сравнительный анализ образцов, спеченных из композита с добавлением графена и без него.

Для равномерного распределения фазы связки и полноценного заполнения пустот в материале при создании резцов PDC с добавкой графена в составе композита предложено использовать поликристаллические синтетические алмазы различного размера. Гранулометрический состав алмазного порошка выглядел следующим образом: размер основных частиц – 30–50 мкм, размер сырых микронных частиц – 4–8 мкм и размер мелких микронных частиц 1–2 мкм. При этом их весовое соотношение $W_{30-50}:W_{4-8}:W_{1-2}$ соответственно составило 70:15:15. В качестве связующего элемента принят порошок кобальта (C_o). В качестве подложки использован карбид вольфрама WC-16. Путем ультразвукового диспергирования к графену, толщиной 6–8 нм и шириной 5 мкм, добавлен поливинилпирролидон.

Смешивание алмазного порошка (85–95 мас. %), порошка кобальта (4–10 мас. %) и графена (0,05–0,3 мас. %) осуществлялось шаровой мельницей в течение 8 ч. После полного испарения спирта смешанный порошок обрабатывался в вакуумной печи при давлении $3,0 \times 10^{-3}$ Па и температуре 1000 °С в течение 6 ч для удаления примесей. После вакуумной обработки смесь помещалась в графитовую капсулу, а затем подвергалась высокотемпературной обработке под давлением в 5–6 ГПа и при температуре 1350–1600 °С.

Полученные образцы материала подверглись сканирующей электронной микроскопии (*SEM*-сканированию) (рис. 1, *a, b*). Как видно на рис. 1, во время спекания графен обволакивает поверхность алмазных частиц с образованием пленки на границе раздела фаз трения. В результате графен заполнил образовавшиеся промежутки между частицами алмаза и уменьшил сопротивление трения между ними, тем самым увеличивая компактность материала.

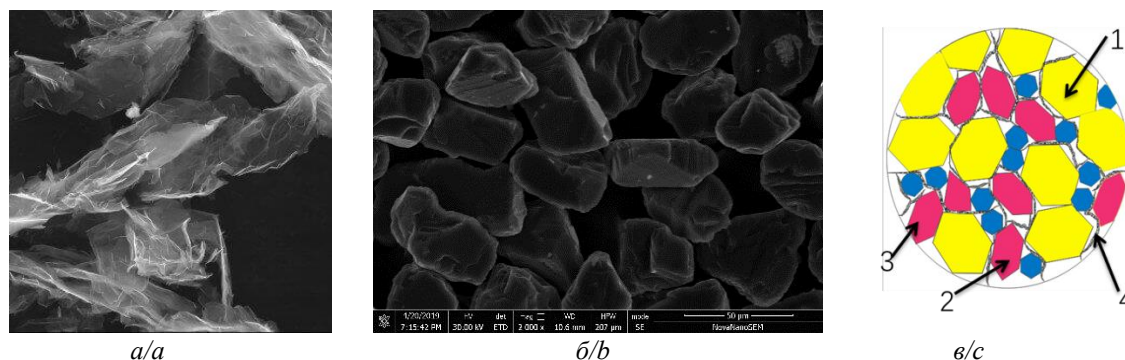


Рис. 1. Снимки SEM-сканирования композиционного материала: а) графен; б) алмаз; в) схема состава спеченного композита с добавкой графена: 1 – алмазы размером 30–50 мкм, 2 – 4–8 мкм, 3 – 1–2 мкм, 4 – графен

Fig. 1. SEM micrographs: a) graphene; b) diamond; c) size distribution of diamond particles and graphene: 1 – 30–50 μm , 2 – 4–8 μm ; 3 – 1–2 μm ; 4 – graphene

Полученная стабильность и компактность материала может послужить повышению прочности и износостойкости резца PDC.

На основе разработанного материала удалось изготовить резцы цилиндрической формы высотой 10 мм и диаметром 27 мм (рис. 2).



Рис. 2. Образец PDC-графена
 Fig. 2. PDC-graphene sample

Анализ

Для сравнительного анализа проведена серия лабораторных исследований свойств полученных образцов резца PDC. Условия температуры, давления и процесса спекания всех образцов приняты аналогично изготов-

лению серийно-выпускаемого резца PDC. Одна группа образцов содержала графен и кобальт без дополнительных добавок (Graphene-Co), а другая группа содержала только графит и кобальт (Graphite-Co).

Для выявления связующего состояния в образцах проведено SEM-сканирование, результаты которого (рис. 3) показали, что в образце Graphite-Co образовались кристаллы алмазов (рис. 3, а), а в образце Graphene-Co монокристаллы алмаза не были обнаружены (рис. 3, б).

С целью определения структурного состава образцы подверглись рентгеноструктурному (XRD) и комбинационному анализу. Результаты XRD-исследования (рис. 4, а) показывают, что после высокотемпературного воздействия графен сохранил свои свойства в образце Graphene-Co.

Спектроскопия комбинационного рассеяния графита и графена до и после спекания HPHT (рис. 4, б) подтверждает, что графит в спекном образце Graphene-Co преобразовался в кристаллы алмаза (розовый пик при 1332 см^{-1} указывает на пик алмазообразования, синий пик означает, что графен сохранил свои свойства после спекания HPHT).

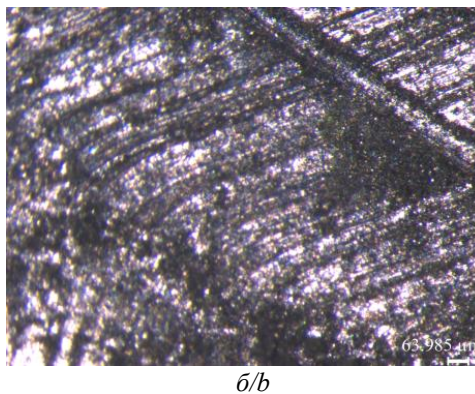
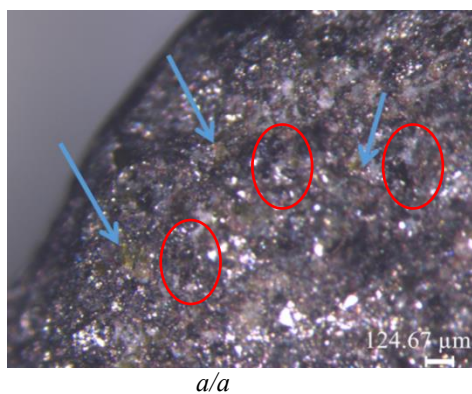


Рис. 3. Результаты спекания материала при 6 ГПа и 1500 °С: а) образец Graphite-Co (кристаллы алмаза указаны стрелками); б) образец Graphene-Co

Fig. 3. a) diamond crystals (indicated by arrows) in the Graphite-Co sample at 6 GPa and 1500 °C; b) no diamond single crystals in the Graphene-Co sample at 6 GPa and 1500 °C

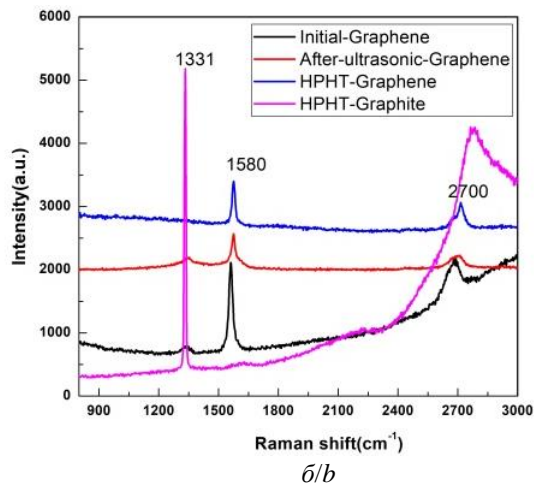
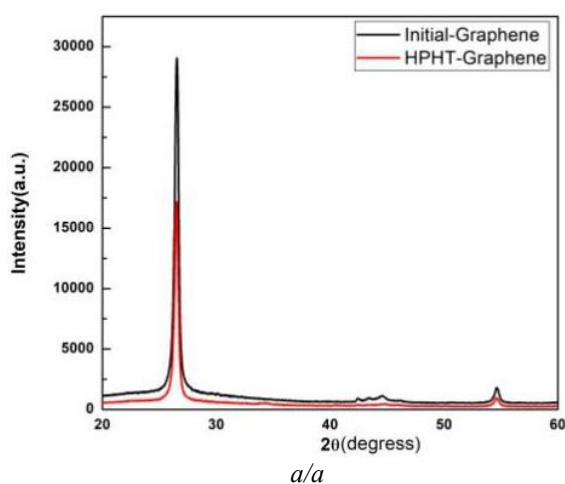


Рис. 4. Сравнительный анализ результатов исследования образцов Graphene-Co и Graphite-Co: а) XRD-спектры; б) спектроскопия комбинационного рассеяния графита и графена до и после спекания HPHT

Fig. 4. XRD (a) and Raman (b) spectra of graphite and graphene before and after HPHT sintering

Спеченный образец PDC, содержащий графен (PDC-G), в основном состоит из алмаза, кобальта и карбида вольфрама. Проведенный XRD-анализ показал, что пиковое значение кристаллообразования алмазов в образце PDC-G было более резким, чем в образце PDC без графена. Этот результат указывает на лучшую кристаллизацию алмаза в PDC-G. Более того, в образце PDC-G в пределах текущего разрешения графитовая фаза отсутствует, что указывает на то, что PDC-G был изготовлен в стабильной зоне кристаллообразования алмазов. При этом в процессе спекания в образце PDC-G графитизации не происходит, т. е. образец представляет собой чистый поликристаллический алмаз.

По уравнению (1) [27] можно определить связь между полученными спектрами комбинационного рассеяния и остаточными напряжениями в образце. Результаты расчетов показывают, что добавление некоторого количества графена значительно снижает интенсивность остаточных напряжений в PDC-G (рис. 5). Интенсивность сжимающего напряжения, возникшего в середине поверхности PDC, постепенно уменьшается от центра к краям. Более того, на левой и правой краях резца PDC-G созданное напряжение сжатия изменилось на напряжение растяжения.

$$\sigma = [v_0 - v(\text{см}^{-1})] / 2,88, \quad (1)$$

где σ – остаточное напряжение (МПа); $v_0 = 1332 \text{ см}^{-1}$; v – экспериментальный рамановский сдвиг в образце PDC (см^{-1}).

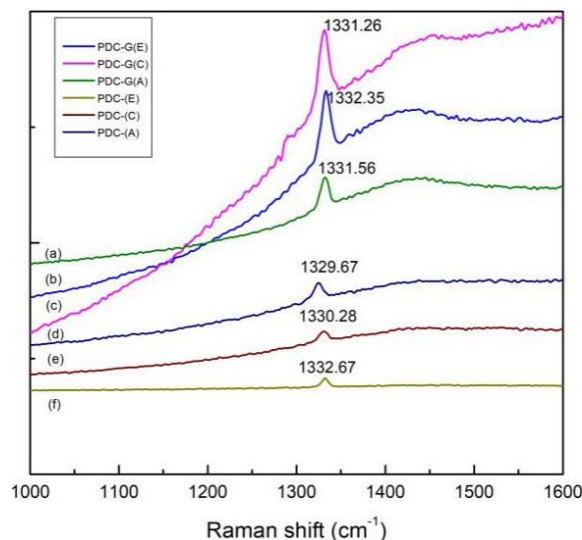


Рис. 5. Спектроскопия комбинационного рассеяния резцов PDC и PDC-G в крайних точках

Fig. 5. Raman shifts in PDC and PDC-G samples at extreme points

SEM-сканирование (рис. 6) показывает, что граница раздела поликристаллического алмаза, спеченного с графеном, была более плотной по сравнению с границей раздела PDC без графена, при этом распределение частиц по размерам (15–20 мкм) было более равномерным [28].

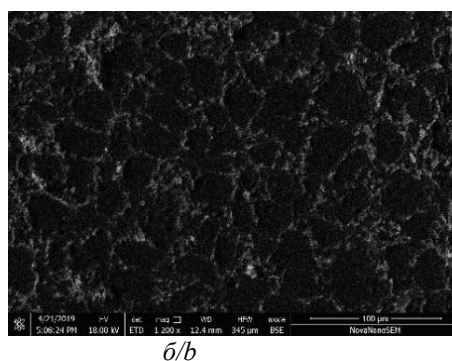
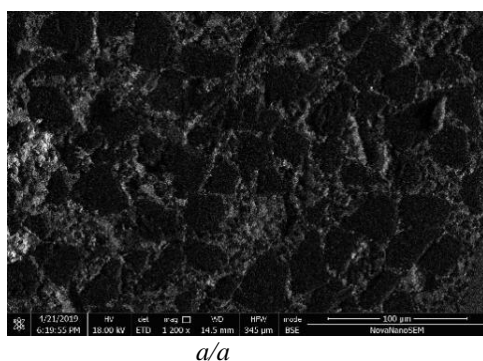


Рис. 6. Кадры SEM-сканирования: а) резцы PDC; б) резцы PDC-G
 Fig. 6. SEM images of PDC (a) and PDC-G samples (b)

Учитывая, что при спекании композита графен сохранил свои свойства, можно предположить, что он обеспечивает хорошую электро- и теплопроводность спеченного образца PDC.

С целью определения электропроводности графена в экспериментальных образцах использован четырехзондовый метод измерения [29]. Постоянный ток «I» пропускался через два внешних датчика, при этом между этими двумя датчиками потенциометром измерялось падение напряжения «V». Согласно уравнению (2) измеренные ток «I» и напряжение «V» были преобразованы в значения сопротивления.

$$\rho_0 = \frac{V}{I} C, \quad (2)$$

$$\text{где } C = \frac{20\pi}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} - \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3} \dots}$$

Результаты исследования показали, что по сравнению с PDC без графена электропроводность PDC-G была улучшена примерно в 42 раза (рис. 7).

Для любого алмазного инструмента актуальным является вопрос теплопроводности.

Теплопроводность образцов PDC и PDC-G рассчитывалась по уравнению (3) [10, 29, 30]:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (3)$$

где a – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность.

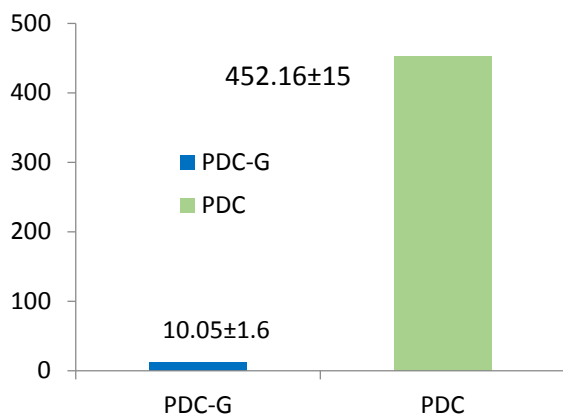


Рис. 7. Электропроводность резцов PDC и резцов PDC-G
 Fig. 7. Electrical conductivity of PDC and PDC-G cutters

Результаты исследования теплопроводности показали, что с повышением температуры более выражено увеличение теплопроводности резцов PDC-G (рис. 8). А при достижении температуры значений в 500 K коэффициент теплопроводности PDC-G (с оптимальным содержанием графена) увеличился примерно на 60 %, что еще раз подчеркивает преимущество использования графена при изготовлении резцов PDC.

При всех вышеперечисленных достоинствах резцов PDC-G не стоит забывать, что при проектировании бурового инструмента предпочтение во многом отдается механическим характеристикам резцов (прочность, износостойкость).

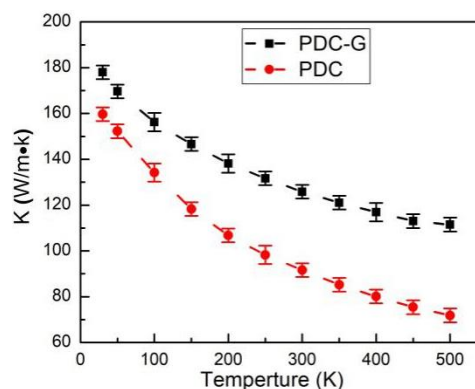


Рис. 8. Теплопроводность резцов PDC и резцов PDC-G
 Fig. 8. Thermal conductances of PDC and PDC-G cutters

Для более детального исследования механических свойств экспериментальных образцов PDC-G применены два метода проверки износостойкости: с использованием шлифовального круга из карбида кремния и с использованием вертикального токарно-револьверного станка (метод VTL) (сухой тест). Полученные в результате испытаний законы износостойкости по двум методам совпадают.

Согласно первому методу, при содержании графена 0,1 мас. % он равномерно распределялся по поверхности алмазных частиц и по сравнению с PDC без графена твердость и износостойкость PDC-G с добавлением 0,1 мас. % графена были улучшены на 75 и 33 % соответственно (рис. 9).

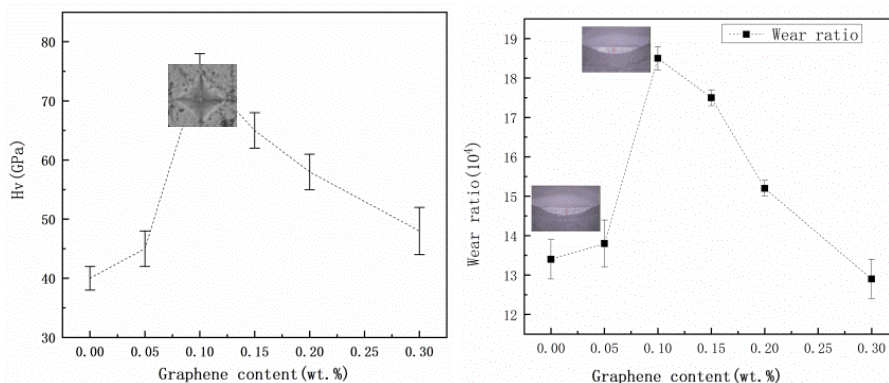


Рис. 9. Механические свойства резцов PDC-G с различным содержанием графена
 Fig. 9. Mechanical properties of PDC-G cutters with different graphene contents

По второму методу, когда шлифовальная часть PDC невелика, степень износа составляет около 16 миллионов. Эксперимент показал, что по мере расширения шлифовальной горловины степень износа уменьшается. Коэффициент износа PDC, упрочненного графеном, согласно измерениям, – около 1,78 миллиона, а коэффициент износа PDC – около 1,49 миллиона. Таким образом, по сравнению с обычным PDC износостойкость PDC с добавлением графена была увеличена на 18 % (рис. 10).

Выводы и заключения

Таким образом, изменение состава композиционного материала может существенно повлиять на

свойства и, как следствие, улучшить работу резца PDC, изготовленного из этого материала.

Так, внедрение одного лишь графена при неизменных условиях спекания резцов PDC приводит к улучшению электропроводности примерно в 42 раза, повышению на 60 % теплопроводности, улучшению твердости и износостойкости резца на 75 и 33 % соответственно.

На сегодняшний день графен является не единственным представителем материалов, обладающих комплексом положительных качеств. К примеру, более перспективным, чем графен, ученые считают борфен, который по сравнению с графеном при меньшей толщине обладает большей прочностью. Подоб-

ных материалов достаточно, и опыт применения их впечатляет. При изготовлении чувствительного к повышенным температурам алмазного инструмента особый интерес вызывает материал аэрогель, обладающий свойством высокой теплоизоляции. Полезной добавкой к композитным материалам может послужить прозрачный алюминий, прочность которого превышает прочность стали в три раза.

дающий свойством высокой теплоизоляции. Полезной добавкой к композитным материалам может послужить прозрачный алюминий, прочность которого превышает прочность стали в три раза.

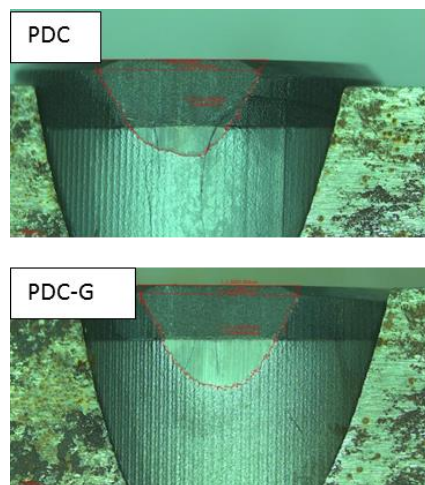
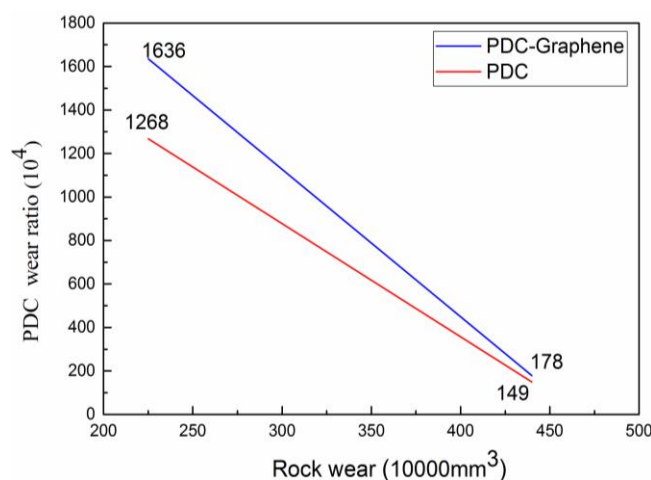


Рис. 10. Степень износа PDC и PDC-graphene по методу VTL
Fig. 10. VTL test wear ratio of PDC and PDC-graphene

Необходимость комбинированного вооружения – результат опыта разработки бурового инструмента, охватывающего расширенную область применения [1, 30]. При изменении концентрации того или иного вещества (железо, кобальт, никель, графен, медь и т. д.) в составе композиционного материала появляется возможность регулировать свойства получаемых резцов PDC, не изменяя их геометрических параметров. Удобная цилиндрическая форма PDC позволяет проектировать инструмент с максимальной динамизацией резцов, к примеру, так как это применено в долотах ONIX [4].

шимися резцами (рис. 11, а). Конструкция такой коронки не только способствует равномерному разрушению кольцевого забоя, но и увеличивает ресурс инструмента за счет равномерного износа режущей грани резцов PDC. Предложенная геометрия породоразрушающей части инструмента вполне позволяет размещать на дисках 1 и 2 комбинированное вооружение, что дает возможность расширить область применения бурового инструмента. В качестве резцов, размещенных на дисках, могут выступать материалы различной формы и качества, например, крупные синтетические алмазы, напыление поликристаллического алмазного порошка, резцы PDC различного качества и т. д. Пример возможного вооружения показан на рис. 11, б.

Учитывая такие преимущества резцов PDC, в Сибирском федеральном университете была разработана буровая коронка (патент РФ № 2715574) с вращаю-

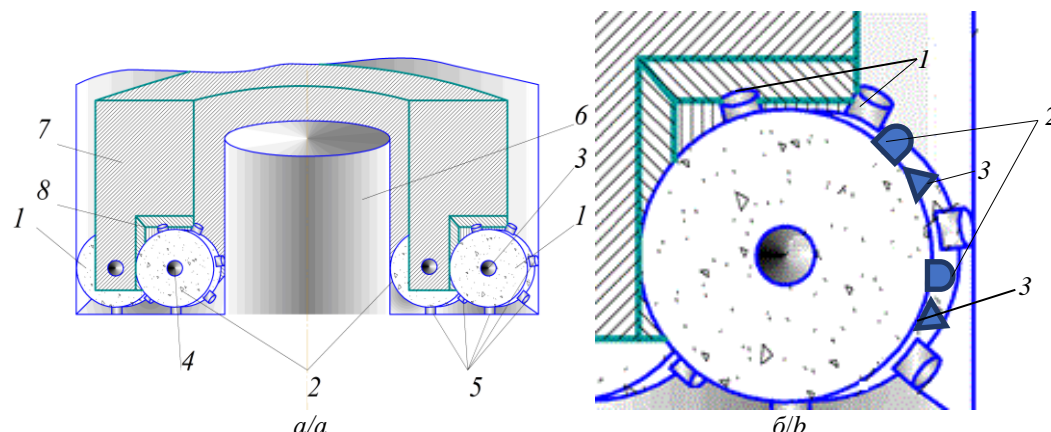


Рис. 11. Конструкция коронки с вращающимися резцами PDC: а) общий вид в разрезе (1 – скважинообразующие диски; 2 – кernoобразующие диски; 3, 4 – оси вращения; 5 – резцы PDC; 6 – керна; 7 – матрица; 8 – окно) [31]; б) пример конструкции кernoобразующих и скважинообразующих дисков с комбинированным вооружением (1 – резцы PDC; 2 – крупный синтетический алмаз; 3 – резец Tripax)

Fig. 11. Rotating incisor crown design PDC: а) general sectional view (1 – downhole discs; 2 – core discs; 3, 4 – axis of rotation; 5 – cutter PDC; 6 – core; 7 – matrix; 8 – gap) [31]; б) example of the design of core-forming and well-forming discs with combined cutting (1 – cutter PDC; 2 – large synthetic diamond; 3 – cutter Tripax)

Таким образом, применяя возможности материаловедения и опыт конструирования, можно добиться больших успехов в изготовлении бурового оборудования. К направлениям совершенствования инструмента типа PDC следует отнести: повышение свойств износостойкости, прочности и температуропроводности и, как следствие, работоспособности.

При этом особое внимание следует уделять:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессон А., Берр Б., Диллард С. Новый взгляд на режущие элементы буровых долот // Нефтегазовое обозрение. – 2002. – № 2. – С. 26–30.
2. Буренков Н.Н., Третьяк А.А., Чихоткин А.В. Режущая часть долота PDC: оптимизация геометрических параметров // Oil and Gas Journal Russia. – 2013. – № 5. – С. 56–58.
3. 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.
4. Бакиев Р.Т., Пятницкий А.С. Применение PDC долот ONYX при бурении карбонатных и солевых отложений Ярактинского НГКМ в Иркутской области // Инженерная практика. – 2011. – № 10. – С. 8–9.
5. Formation of pure polycrystalline diamond by direct conversion of graphite at high pressure and high temperature / T. Irifune, A. Kurio, S. Sakamoto, T. Inoue, H. Sumiya, K.-I. Funakoshi // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2004. – № 143–144. – P. 593–600.
6. Effect of removing internal residual metallic phases on wear resistance of polycrystalline diamond compacts, International / C. Liu, Z. Kou, D. He, Y. Chen, K. Wang, B. Hui, R. Zhang, Y. Wang // Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2012. – V. 31. – P. 187–191.
7. Belnap D., Griffio A. Homogeneous and structured PCD/WC-Co materials for drilling // Diamond and Related Materials. – 2004. – V. 13. – № 10. – P. 1914–1922.
8. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // Measurement. – 2018. – V. 121. – P. 344–354.
9. Guo D.Q., Hou C. Development of PDC drill bits for MWD directional drilling in underground coal mine // Procedia Earth and Planetary Science. – 2011. – V. 3. – P. 440–445.
10. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – V. 45. – P. 147–152.
11. Cutter layout optimization for reduction of lateral force on PDC bit using Kriging and particle swarm optimization methods / Y. Ma, Z. Huang, Q. Li, Y. Zhou, S. Peng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 163. – P. 359–370.
12. A study on PDC drill bits quality / M. Yahiaoui, L. Gerbaud, J.Y. Paris, J. Denape, A. Dourfaye // Wear. – 2013. – № 298–299. – P. 32–41.
13. Boland J.N., Li X.S. Microstructural characterisation and wear behaviour of diamond composite materials // Materials. – 2010. – V. 3. – № 2. – P. 1390–1419.
14. Polycrystalline diamond compact with enhanced thermal stability / S. Liu, L. Han, Y. Zou, P. Zhu, B. Liu // Journal of Materials Science & Technology. – 2017. – V. 33. – № 11. – P. 1386–1391.
15. Microstructure and properties of diamond/SiC composites prepared by tape-casting and chemical vapor infiltration process / Y. Liu, C. Hu, W. Feng, J. Men, L. Cheng, L. Zhang // Journal of the European Ceramic Society. – 2014. – V. 34. – № 15. – P. 3489–3498.
16. Approach to controllable tribological properties of sintered polycrystalline diamond compact through annealing treatment / J. Li, W. Yue, W. Qin, C. Wang // Carbon. – 2017. – V. 116. – P. 103–112.
17. Gu J., Huang K. Role of cobalt of polycrystalline diamond compact (PDC) in drilling process // Diamond and Related Materials. – 2016. – V. 66. – P. 98–101.
18. Graphene reinforced metal and ceramic matrix composites: a review / A. Nieto, A. Bisht, D. Lahiri, C. Zhang, A. Agarwal // International Materials Reviews. – 2016. – V. 62. – № 35. – P. 241–302.
19. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite / Z. Pan, L. He, L. Qiu, A.H. Korayem, G. Li, J.W. Zhu, F. Collins, D. Li, W.H. Duan, M.C. Wang // Cement and Concrete Composites. – 2015. – № 58. – P. 140–147.
20. Yazyev O.V., Chen Y.P. Polycrystalline graphene and other two-dimensional materials // Nature nanotechnology. – 2014. – V. 9. – № 10. – P. 755–760.
21. The beneficial effect of graphene nanofillers on the tribological performance of ceramics / M. Belmonte, C. Ramirez, J. González-Julian, J. Schneider, P. Miranzo, M.I. Osendi // Carbon. – 2013. – № 61. – P. 431–435.
22. Shin J.-H., Hong S.-H. Fabrication and properties of reduced graphene oxide reinforced yttria-stabilized zirconia composite ceramics // Journal of the European Ceramic Society. – 2014. – V. 34. – № 5. – P. 1297–1302.
23. Llorente J., Belmonte M. Friction and wear behaviour of silicon carbide/graphene composites under isooctane lubrication // Journal of the European Ceramic Society. – 2018. – V. 38. – № 10. – P. 3441–3446.
24. Miranzo P., Belmonte M., Osendi M.I. From bulk to cellular structures: a review on ceramic/graphene filler composites // Journal of the European Ceramic Society. – 2017. – V. 37. – № 12. – P. 3649–3672.
25. Tribological performance under dry sliding conditions of graphene/silicon carbide composites / J. Llorente, B. Román-Manso, P. Miranzo, M. Belmonte // Journal of the European Ceramic Society. – 2016. – V. 36. – № 3. – P. 429–435.
26. Фазовые превращения n-слойных графенов в алмаз при высоких давлениях и температурах / А.А. Шульженко, Л. Яворская, А.Н. Соколов, В. Гаргин, Н. Белявина // Журнал сверхтвердых материалов. – 2017. – V. 39. – № 2. – С. 75–82.
27. Residual stresses in sintered diamond-cobalt composites / H.A. Crostack, U. Selvadurai-Lassl, W. Tillmann, M. Gathen, C. Kronholz, T. Wroblewski, A. Rothkirch // Materials Science Forum. – 2006. – № 524–525. – P. 787–792.
28. Effect of diamond content on microstructure and properties of diamond/SiC composites prepared by tape-casting and CVI process / Y. Liu, C. Hu, J. Men, W. Feng, L. Cheng, L. Zhang // Journal of the European Ceramic Society. – 2015. – V. 35. – № 8. – P. 2233–2242.
29. Yamashita M., Nishii T., Mizutani H. Resistivity measurement by dual-configuration four-probe method // Japanese Journal of Applied Physics 42. – 2003. – P. 1. – № 2A. – P. 695–699.
30. Case study. Kymera hybrid drill bit improves steerability and increases ROP 41 % // Baker Hughes. 2020. URL: <https://www.bakerhughes.com/case-study/kymera-hybrid-drill-bit-improves-steerability-and-increases-rop-41> (дата обращения 04.04.2021).
31. Буровая коронка: пат. 2715574 Рос. Федерация. заявл. 22.10.2019; опубл. 02.03.2020. – Бюл. № 7. – 6 с.

Поступила 19.04.2021 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.

Лиу Баочанг, профессор геоинженерии кафедры разведки и бурения, Университет Цзилинь, Китай.

Чжаоран Чен, аспирант кафедры разведки и бурения, Университет Цзилинь.

Петенев П.Г., кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Попова М.С., кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Головченко А.Е., ассистент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

UDC 622.24.051.64

MODERN TRENDS IN DEVELOPMENT OF PDC-TYPE DRILLING TOOLS

Vyacheslav V. Neskoromnykh¹,
sovair@bk.ru

Liu Baochang²,
liubc@jlu.edu.cn

Zhaoran Chen²,
564825155@qq.com

Pavel G. Petenev¹,
pavel-whait@mail.ru

Marina S. Popova¹,
alleniram83@mail.ru

Anton E. Golovchenko¹,
antong77@yandex.ru

¹ Siberian Federal University,
95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

² Jilin University,
938, Ximinzhu str., Changchun, 130026, China.

Relevance. Requirements for rock cutting tools are to ensure high mechanical speed, resource, wide range of application and low material costs for its purchase. In other words, the drilling tool must be durable, wear-resistant, and made of relatively inexpensive material. Advances in the synthesis of polycrystalline diamond and the manufacture of high-strength cutters from it have significantly expanded the capabilities of drilling tool manufacturers. Synthetic superhard material began to be used in the manufacture of cutting elements and the entire working part of rock cutting tools. Innovations in materials science have made it possible to produce PDC cutters of various shapes, sizes, strengths, which is especially important when creating bits, crowns and drill heads with combined weapons. As is known, the composition and sintering conditions of the composite affect the properties of the resulting PDC cutter blank. By changing the strength parameters and the geometry of the PDC cutting elements, taking into account the field of application of the tool, you can achieve the best effect of rock breaking. Thus, when creating a new drilling rock cutting tool, it is relevant to combine knowledge and skills in the field of chemistry, materials science and design, which will lead to obtaining a promising rock cutting tool.

The aim of the research is to determine the directions of improving the PDC-type drilling tool, namely, the possibilities of materials science in the field of sintering of superhard PDC material, the advantages of using a composite of various structure in the engineering of new designs of PDC-type drilling tools.

Objects: composition of material, sintering process and obtained properties of PDC cutters, design features of PDC drilling tools.

Methods: analytical research, experiment, analysis.

Results. Changing the structure of the composite allows you to adjust the strength properties of the resulting PDC cutter. Addition of such a material as graphene increases the strength, thermal and electrical conductive properties of PDC cutter. Combining the capabilities of materials science and design experience makes it possible to achieve positive results in the development of a new promising rock cutting tool.

Key words:

Rock cutting tool, superhard materials, polycrystalline diamond, synthesis, strength, PDC cutter, grapheme.

REFERENCES

- Besson A., Burr B., Dillard S. Reinventing Drill Bit Cutters. *Oil and Gas Review*, 2002, no. 2, pp. 26–30.
- Burenkov N.N., Tretyak A.A., Chikhotkin A.V. PDC bit cutter: geometric optimization. *Oil and Gas Journal Russia*, 2013, no. 5, pp. 56–58. In Rus.
- 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.
- Bakiev R.T., Pyatnitsky A.S. Primenenie PDC dolot ONYX pri burenii karbonatnykh i solevykh otlozheniy Yaraktsinskogo NGKM v Irkutskoy oblasti [Application of PDC bits ONYX when drilling carbonate and salt deposits of the Yarakta oil and gas condensate field in the Irkutsk region]. *Inzhenernaya praktika*, 2011, no. 10, pp. 8–9.
- Irifune T., Kurio A., Sakamoto S., Inoue T., Sumiya H., Funakoshi K.-I. Formation of pure polycrystalline diamond by direct conversion of graphite at high pressure and high temperature. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, no. 143–144, pp. 593–600.
- Liu C., Kou Z., He D., Chen Y., Wang K., Hui B., Zhang R., Wang Y. Effect of removing internal residual metallic phases on wear resistance of polycrystalline diamond compacts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, no. 31, pp. 187–191.
- Belnap D., Griffo A. Homogeneous and structured PCD/WC-Co materials for drilling. *Diamond and Related Materials*, 2004, no. 13 (10), pp. 1914–1922.
- Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, no. 121, pp. 344–354.
- Guo D.Q., Hou C. Development of PDC Drill Bits for MWD Directional Drilling in Underground Coal Mine. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2011, no. 3, pp. 440–445.
- Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-

- state, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, no. 45, pp. 147–152.
11. Ma Y., Huang Z., Li Q., Zhou Y., Peng S. Cutter layout optimization for reduction of lateral force on PDC bit using Kriging and particle swarm optimization methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 163, pp. 359–370.
 12. Yahiaoui M., Gerbaud L., Paris J.Y., Denape J., Dourfaye A. A study on PDC drill bits quality. *Wear*, 2013, no. 298–299, pp. 32–41.
 13. Boland J.N., Li X.S. Microstructural characterisation and wear behaviour of diamond composite materials. *Materials*, 2010, no. 3 (2), pp. 1390–1419.
 14. Liu S., Han L., Zou Y., Zhu P., Liu B. Polycrystalline diamond compact with enhanced thermal stability. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, vol. 33, no. 11, pp. 1386–1391.
 15. Liu Y., Hu C., Feng W., Men J., Cheng L., Zhang L. Microstructure and properties of diamond/SiC composites prepared by tape-casting and chemical vapor infiltration process. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, no. 15, pp. 3489–3498.
 16. Li J., Yue W., Qin W., Wang C. Approach to controllable tribological properties of sintered polycrystalline diamond compact through annealing treatment. *Carbon*, 2017, no. 116, pp. 103–112.
 17. Gu J., Huang K. Role of cobalt of polycrystalline diamond compact (PDC) in drilling process. *Diamond and Related Materials*, 2016, no. 66, pp. 98–101.
 18. Nieto A., Bisht A., Lahiri D., Zhang C., Agarwal A. Graphene reinforced metal and ceramic matrix composites: a review. *International Materials Reviews*, 2016, 62, no. 5, pp. 241–302.
 19. Pan Z., He L., Qiu L., Korayem A.H., Li G., Zhu J.W., Collins F., Li D., Duan W.H., Wang M.C. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. *Cement and Concrete Composites*, 2015, no. 58, pp. 140–147.
 20. Yazyev O.V., Chen Y.P. Polycrystalline graphene and other two-dimensional materials. *Nature nanotechnology*, 2014, vol. 9, no. 10, pp. 755–760.
 21. Belmonte M., Ramírez C., González-Julián J., Schneider J., Miranzo P., Osendi M.I. The beneficial effect of graphene nanofillers on the tribological performance of ceramics. *Carbon*, 2013, no. 61, pp. 431–435.
 22. Shin J.-H., Hong S.-H. Fabrication and properties of reduced graphene oxide reinforced yttria-stabilized zirconia composite ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, no. 5, pp. 1297–1302.
 23. Llorente J., Belmonte M. Friction and wear behaviour of silicon carbide/graphene composites under isooctane lubrication. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38, no. 10, pp. 3441–3446.
 24. Miranzo P., Belmonte M., Osendi M.I. From bulk to cellular structures: a review on ceramic/graphene filler composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, vol. 12, no. 37, pp. 3649–3672.
 25. Llorente J., Román-Manso B., Miranzo P., Belmonte M. Tribological performance under dry sliding conditions of graphene/silicon carbide composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, vol. 3, no. 36, pp. 429–435.
 26. Shulzhenko A.A., Yaworskaya L., Sokolov A.N., Gargin V.G., Belyavina N.N. Phase transformations of n-layer graphenes into diamond at high pressures and temperatures. *Journal of Superhard Materials*, 2017, vol. 39, no. 2, pp. 75–82. In Rus.
 27. Crostack H.A., Selvadurai-Lassl U., Tillmann W., Gathen M., Kronholz C., Wroblewski T., Rothkirch A. Residual stresses in sintered diamond-cobalt composites. *Materials Science Forum*, 2006, no. 524–525, pp. 787–792.
 28. Liu Y., Hu C., Men J., Feng W., Cheng L., Zhang L. Effect of diamond content on microstructure and properties of diamond/SiC composites prepared by tape-casting and CVI process. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, no. 35 (8), pp. 2233–2242.
 29. Yamashita M., Nishii T., Mizutani H. Resistivity measurement by dual-configuration four-probe method. *Japanese Journal of Applied Physics* 42, 2003, P. 1, no. 2A, pp. 695–699.
 30. Case study. Kymera hybrid drill bit improves steerability and increases ROP 41 %. *Baker Hughes*. 2020. Available at: <https://www.bakerhughes.com/case-study/kymera-hybrid-drill-bit-improves-steerability-and-increases-rop-41> (accessed 4 April 2021).
 31. Neskoromnykh V.V., Vakhromeev A.G., Popova M.S., Bovin K.A., Kasintsev D.I., Parakhonko E.V. *Burovaya koronka* [Drill bit]. Patent RF 2715574, 2020.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskoromnykh, Dr. Sc., professor, head of the department of technology and equipment of investigation, Siberian Federal University.

Liu Baochang, professor, Jilin University.

Zhaoran Chen, PhD student, Jilin University.

Pavel G. Petenev, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Marina S. Popova, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Anton E. Golovchenko, assistant, Siberian Federal University.

УДК 504.61:532.5426:536.252

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКИХ СРЕД В СИСТЕМЕ КАНАЛОВ С УЧАСТКАМИ СОЕДИНЕНИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

Фатьянов Дмитрий Сергеевич¹,
dsf5@tpu.ru

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

Актуальность исследования определяется необходимостью анализа особенностей рабочего процесса в аппаратах с соединениями произвольной геометрии, объединяющих/разделяющих течения вязких сред с целью точного и тщательного прогноза нештатных ситуаций их функционирования из-за выраженных тепловых и динамических нагрузок, обусловленных эффектами отрыва, перемешивания, влияния противодавления, эволюции структуры сложного сдвигового неизотермического внутреннего течения при контакте со стенками; потребностью обоснованного выбора с учетом возможностей современной вычислительной техники наиболее естественного подхода исследования пространственного и неустановившегося характера течений в указанных технических системах.

Цель: определить проблемы современного уровня исследования течений в каналах Т-образной формы, являющихся одним из главных элементов технического оборудования в нефтегазовой отрасли; установить ценность имеющихся результатов экспериментального и теоретического анализа сложных сдвиговых потоков для совершенствования методик, способствующих повышению эксплуатационно-конструкционного уровня функционирования устройств при высоких динамических и тепловых нагрузках; определить данные для верификации моделей, способных с большей достоверностью прогнозировать особенности течений и теплопереноса в трубах; выдать рекомендации в практику расчета надежности устройств с Т-образными секциями.

Методы: комплексные теоретические и экспериментальные методы анализа гидродинамики и теплообмена при вязкостно-инерционных ламинарных и турбулентных течениях углеводородных капельных и газообразных вязких сред во внутренних системах с Т-соединениями магистрали и патрубка.

Результаты. Выполнен критический обзор современных данных, методов моделирования и моделей исследований процессов гидродинамики и теплообмена при смешении капельных и газообразных потоков в элементах трубопроводных сетей в широком диапазоне изменений режимных и геометрических параметров (Т-соединения, симметричное/несимметричное расширение, $Re=10^2...10^7$, $M<0,3...0,7$). Исследованы особенности, формирующие структуру течений в отдельных элементах оборудования, используемого в нефтегазовой промышленности (обвязки крановых узлов). Установлено, что закругление углов соединения способно уменьшить потери энергии в патрубке-отводе на 10–20 %. Проанализированы детали изменений структуры вихрей методами визуализации/бесконтактной регистрации. Приведена классификация структур, полезная при формулировке краевых задач в математическом моделировании процессов в нефтегазовом оборудовании. Отмечается, что использование пристеночных функций для моделирования течений в Т-переходах способно приводить к ошибочной оценке уровня пульсаций температурного и динамического полей в областях стенки. Подчеркнуто, что разделение течений, рост энергонапряженности в локальных участках соединения чувствительны к характеру конвективно-диффузионного взаимодействия процессов переноса импульса, тепла, механизм отрыва, присоединения, локального ускорения/торможения, турбулизации потока в пристеночных областях. Эти особенности вполне успешно могут быть предсказаны современными моделями, учитывающими специфику течений с неоднородной анизотропной турбулентностью. В заключение даны рекомендации по прогнозу локальных и интегральных свойств течений с перемешиванием, а также отмечены проблемы, имеющие фундаментально-прикладное значение, составляющие предмет перспективных исследований.

Ключевые слова:

Каналы, Т-соединения, течения, турбулентность, неизотермичность, модели, методы, моделирование, структура, закономерности.

Введение

Уровень развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) промышленно развитой страны напрямую зависит от степени оптимизации многочисленных технологических процессов, формирующих и поддерживающих работу оборудования трубопроводных систем и резервуарных парков. Выработка решений по эффективному управлению этими системами требует постоянного контроля и прогноза возможных экстремальных режимов, связанных с внештатными ситуациями: перекрытием, остановом/запуском движения рабочей среды по трубопроводу; изменением термодинамических параметров

потока при загруженности системы, соответствующей сезонности потребления; учетом климатических особенностей окружающей внешней среды. Наиболее распространенным конструктивным элементом технических устройств данного назначения являются короткие и/или протяженные участки труб с произвольной геометрической формой поперечного сечения, включающие сочленения с областями расширения, сужения, поворота. К этим объектам предъявляют особые требования, способствующие увеличению их надежности и долговечности при работе во внештатных и аварийных ситуациях. Так, например, на объектах газотранспортной сети, эксплуатируемой ПАО

«Газпром», было замечено, что при заполнении участков газопровода иногда наблюдается разогрев элементов обвязки крановых узлов до недопустимых температур, что, в свою очередь, приводит к оплавлению внешней изоляции трубопровода, нарушению герметичности запорно-регулирующей арматуры. Результатом может стать необходимость проведения ремонтных работ с заменой элементов кранового узла и стравливанием в атмосферу природного газа из участка трубопровода, расположенного между двумя линейными крановыми узлами со средней протяженностью такого участка порядка 30 км, что может привести к экономическим потерям, исчисляемым десятками миллионов рублей [1]. Конструктивно устройства, обеспечивающие работу процессов транспорта природного сырья, представляют собой сложную систему каналов и сочленений с участками различного диаметра, поворотными и тупиковыми зонами с размещенным в них измерительным и управляющим оборудованием. Изучение процессов, происходящих при течении среды в рабочих органах такой системы, позволит: уяснить особенности подобных явлений; установить закономерности интегрального влияния конфигурации элементов, режимов транспорта, их комбинаций на эволюцию гидро- и термодинамических процессов; определить механизмы переноса импульса, тепла и массы, обостряющие аварийные ситуации. Учитывая нетривиальный характер движения рабочего потока (природного сырья), развития возмущений, а также многомерность и многопараметричность процессов гидродинамики и тепломассопереноса в узле конструкции, как части рассматриваемой открытой термодинамической системы типа «внешняя среда – поверхность элемента оборудования – рабочее тело», вполне естественным является изучение переноса импульса, тепла и массы в углеводородных средах методами математического и численного моделирования с прикладной и фундаментальной точек зрения.

Численное решение таких нелинейных задач весьма актуально для широкого круга технических приложений в нефтегазовой гидродинамике, все еще испытывающих большой дефицит данных изменений локальных свойств рабочего потока, которые можно было бы привлечь для обоснования вопросов валидации используемой математической модели и верификации результатов расчета энергонапряженных элементов.

В связи с этим в данной работе поставлена цель: *определить* проблемы современного уровня исследования течений в каналах Т-образной формы, формирующих картину смешения потоков в элементах обвязки кранового узла; *установить* ценность имеющихся результатов экспериментального и теоретического анализа сложных сдвиговых потоков для совершенствования методик, способствующих повышению функционирования нефтегазового оборудования при высоких динамических и тепловых нагрузках; *определить* данные для верификации моделей, способных с большей достоверностью прогнозировать особенности течений и тепломассопереноса в трубах;

выдать рекомендации в практику расчета течений в трубопроводах с Т-образными секциями.

Экспериментальные исследования течений в каналах Т-образной формы

Плохопрогнозируемые процессы турбулентного конвективно-диффузионного перемешивания и разделения потоков в Т-образных соединениях являются известными проблемами исследований течений в трубопроводных системах (начиная от вентиляционных шахт, трубопроводов тепловых электростанций, систем транспорта углеводородного сырья и заканчивая трубопроводами атомных станций), осложненных пульсациями температуры, давления, состава смесей, ростом усталостных напряжений, а также термической деградацией и разрушением материала внутренней стенки [2]. Чтобы корректно оценить вероятность возникновения недопустимых дефектов на всех Т-образных соединениях в трубопроводной системе и, соответственно, оптимизировать циклы технического обслуживания, необходимо: *изучить* особенности изменений локальной структуры потока (температуру, скорость и давление на стенку в области перемешивания/разделения); *исследовать* механизмы и эффекты, ответственные за колебания температуры, давления, изменения локальных свойств вихревого течения.

Первоначально такие задачи интересовали экспериментаторов в случаях смешения/разделения потоков из основной магистрали и подводящего патрубка с Т-образным соединением [3] и включали визуализацию структуры течения, измерения полей скоростей, температуры с использованием методов контактной и бесконтактной регистрации в рамках термоанемометрического анализа, оптических волокон, а также лазерной доплеровской велосиметрии (LDV/PIV Systems). Эти результаты позволили обнаружить специфические явления в волновых течениях, существование в потоках обширных рециркуляционных областей, характеризующихся взаимосвязанными эффектами отрыва/присоединения, интенсификации прямоочных и закрученных возвратных движений, изменений масштабов и форм вихревых структур, режимов течений, затрудняющих их комплексное моделирование.

В [4] выполнено экспериментальное и численное исследование в рамках современных подходов (прямого численного моделирования) течений в Т-образном соединении при $Re=2000...36000$ с целью выяснения влияния тепловых и динамических условий входящих потоков на интенсивность смешения, и обнаружено, что сильная термическая стратификация существенно подавляет турбулентные пульсации. Результаты детального моделирования показывают, что особенности температурных колебаний обусловлены существованием в потоке крупномасштабных структур, образующихся в процессе смешения в области узла соединения (рис. 1). Заметим, что неизотермическое течение в прямоугольном канале с Т-соединением также рассматривалось в экспериментах Дж. де Тилли и Дж.М. Соузы [5]. Результаты позволили сформулировать зависимость эффективности

охлаждения потока от числа Рейнольдса (в режимах с $Re=6500...19500$) с учетом изменений скорости зарождения крупномасштабных вихревых структур на границе раздела основного и подводящегося потоков (рис. 2). Х. Камиде и соавторы [6] предприняли детальное изучение течения в Т-соединениях с круглым поперечным сечением и сформулировали зависимость для прогноза процесса смешения посредством связи от отношения импульсов основного потока и подводящейся к нему струи. М. Хирота с соавторами

[7] также провели экспериментальный анализ динамики потоков в каналах прямоугольного сечения с Т-переходниками и оценили особенности влияния колебаний сдвигового слоя, формирующегося в области между поперечным потоком и набегающей струей, на эффективность перемешивания. Подобные задачи при экспериментальном исследовании конвективно-диффузионного смешения потоков в условиях термической стратификации в Т-образных соединениях также представлены в [8–10].

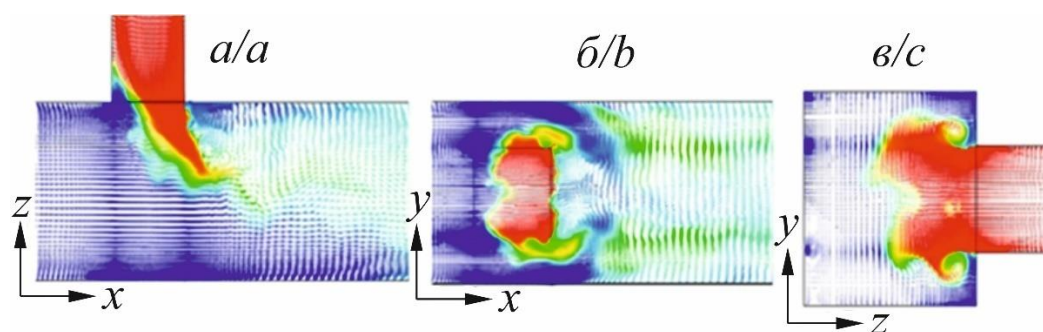


Рис. 1. Структура течения в канале сложной геометрии в рамках прямого численного моделирования. Векторные поля актуальных значений скорости и температуры в выделенных плоскостях: а) Ozx ; б) Oxy ; в) Oyz . Результаты отвечают данным [4]

Fig. 1. Flow structure in the complex geometry channel at direct numerical simulation. Vector fields of velocity and temperature instantaneous values at the cross-sections: а) Ozx ; б) Oxy ; в) Oyz . Results are consistent with the data [4]

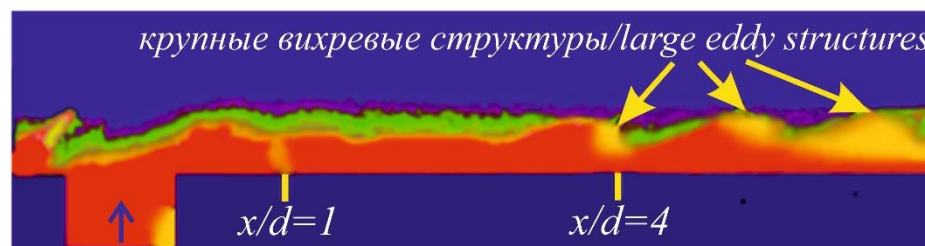


Рис. 2. Визуализация течения при $Re=13000$ в канале с Т-соединением. Результаты отвечают данным [5]

Fig. 2. Flow visualization at $Re=13000$ in channel with T-junction. Results are consistent with the data [5]

К. Уолкер и М. Шимано провели измерения характеристик смешивающихся потоков жидкости в Т-образном соединении (в диапазоне $Re=8700...52600$), используя датчики с проволочной сеткой [11]. Благодаря высокому пространственному и временному разрешению датчиков результатами данного исследования сформирована база новых данных, позволяющая проводить качественную верификацию и валидацию инженерных моделей, активно используемых в расчетах гидродинамики с привлечением популярных кодов. Стоит отметить, что в [11] изучены стохастические колебания и механизмы смешения динамического и температурного полей в широком диапазоне частот. Информация о локальных свойствах вихревого течения и его масштабах, эффективности диффузионного смешения была получена с учетом одно- и двухточечных корреляций пульсационных величин рабочей среды.

С.М. Хоссейни и соавторы в [12] рассматривали конфигурацию канала с Т-образным соединением с 90° отводом, расположенным выше по течению от тройника. Заметим, что подобная модель была использована

как конструктивный прототип части трубопроводов на реакторе «Феникс» с целью проанализировать явление теплового смешения. Полученные данные о температуре и скорости течения продемонстрировали сильное влияние 90° изгиба, а также соотношения импульсов между основной скоростью и скоростью потока, подводящегося через Т-соединение на механизмы перемешивания жидкости в диапазоне изменений чисел Рейнольдса $Re=33000...150000$. Основываясь на эксперименте, Хоссейни провел классификацию структур смешения по поведению подводящейся струи, разделяя их на четыре типа: *пристенная* струя (рис. 3, а), характерная для ситуаций, когда скорость основного потока значительно выше скорости потока подводящегося; *повторно присоединенная* струя (рис. 3, б) с характерными зонами отрыва и присоединения потока; *поворотная* струя (рис. 3, в), образующаяся, когда импульсы основного и подводящегося потока близки по своим значениям; *падающая* струя (рис. 3, г), возникающая в случае, если скорость подводящегося потока намного превышает скорость основного, в результате чего подводящийся поток

может достичь противоположной стенки основного канала. Подобная классификация предлагалась также по результатам исследований [6] (рис. 4), что демонстрирует стабильность генерируемых процессов и механизмов переноса импульса в данных условиях.

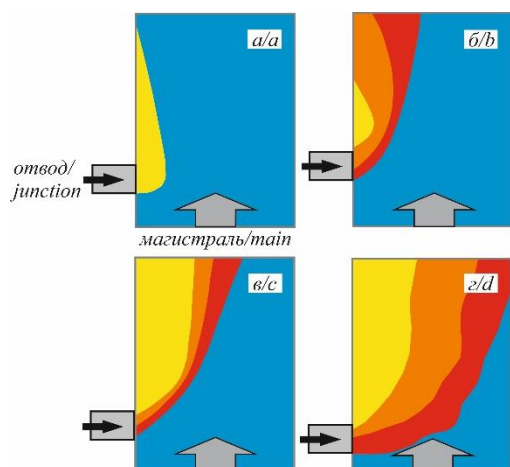


Рис. 3. Картины течения при введении подводящейся струи: а) пристенная; б) повторно присоединенная; в) поворотная; г) падающая. Результаты соответствуют данным [12]. Для наглядности динамики взаимодействующих струй цветом выделены контуры областей с характерной локальной интенсивностью процесса смешения и их границы взаимодействия

Fig. 3. Flow patterns when the jet is introduced: a) wall; b) re-attached; c) turn; d) impinging. Results are consistent with the data [12]. To illustrate the dynamics of the interacting jets, the color outlines of the areas with the characteristic local intensity of the mixing process and their interaction boundaries are highlighted

Следует отметить, что довольно тщательный эксперимент по изучению смешивающихся в Т-образном соединении жидкостных потоков, в котором анализировались распределения полей осредненных и пуль-

сационных составляющих векторов скоростей и температуры, был выполнен шведской компанией Vattenfall (рис. 5) [13]. Данные, полученные в ходе этого эксперимента, часто использовались в качестве контрольных для валидации инженерных моделей турбулентности. Чувствительность процессов к особенностям течений определялась условиями, в которых между ответвлением/соединением и основными трубами тройника/магистраль поддерживался постоянный температурный напор ($\Delta T \approx 15$ К).

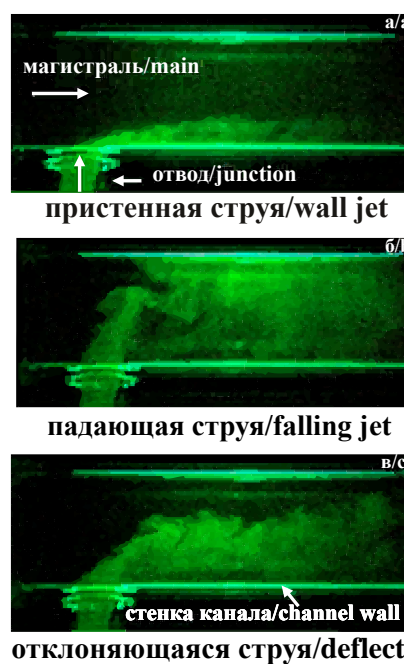


Рис. 4. Структура течения в Т-образном канале: а) пристенная струя; б) падающая струя; в) отклоняющаяся струя. Результаты соответствуют [6]

Fig. 4. Flow structure in the T-formed channel: a) wall jet; b) falling jet; c) deflecting jet. Results are consistent with the data [6]

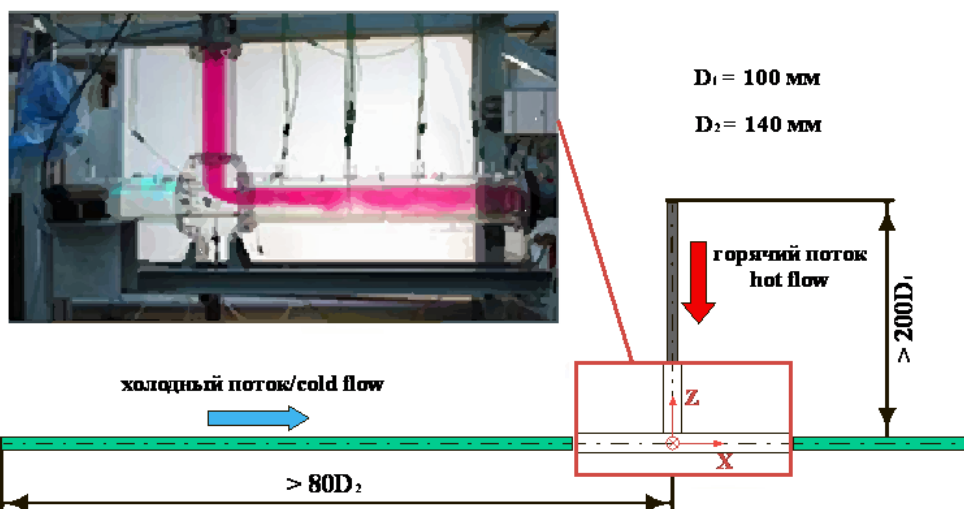


Рис. 5. Эксперимент компании Vattenfall по данным [13]
Fig. 5. Vattenfall experiment according to the data [13]

Разъединяющиеся потоки в Т-образном соединении исследовались при ламинарном и турбулентном режимах течений. Так, например, экспериментальный анализ ламинарного потока, разделяющегося в Т-соединении, выполнен Д. Липшем [14] с использованием лазерного доплеровского анемометра (LDV System), фокусировался на уяснении характера влияния числа Рейнольдса и массового расхода на поле скоростей, а также на интегральные параметры течения (локальное напряжение сдвига и гидравлическое сопротивление). Данные опыта подтверждают наличие отрывных зон как в основной магистрали соединения, так и в отводном патрубке (например, рис. 6). Также в [14] проведено численное моделирование течения в соединении. Его результаты показали вполне удовлетворительное соответствие данным опыта в подобных условиях.

Механизмы процессов переноса, определяющие разделяющиеся турбулентные потоки в Т-образном соединении, рассматривались в [15, 16]. Так, Сьерра Эспиноза в [15] выполнил комплексное экспериментально-теоретическое и численное исследование турбулентной структуры воды на выходе из ответвления тройника. Н. Коста в [16] исследовал влияние формы сочленения каналов (острых и закругленных углов в Т-образном соединении) на изменение поля давления и потерь энергии при течении ньютоновской вязкой жидкости. Было обнаружено, что геометрия секций с закруглением углов уменьшает потери энергии в трубке/отводе на 10–20 %, а также увеличивает в нем степень турбулизации рабочего течения. Важно отметить, что в данных условиях влияние формы соединения на эволюцию потока в магистральном канале пренебрежимо мало.

Таким образом, полный и общий анализ экспериментальных данных, иллюстрирующих поведение параметров и структуры вязкого течения в Т-соединениях, характерных для объектов газотранспортной сети, показывает, что для прогноза с достаточной степенью надежности гидродинамики в неизотермических турбулентных течениях углеводородных сред инженерам-исследователям будет требоваться адаптированная для данных условий модель гидродинамической турбулентности. Желание предсказать в узле соединения истинный характер развития течения с перемешиванием, природу возникновения, изменений крупномасштабных турбулентных структур потребует оценок реальных возможностей используемых моделей турбулентности проникать в узкие пространственные области высоких градиентов. В связи с этим целесообразно остановиться на деталях теоретического описания многомерных сдвиговых течений с большими градиентами искомых функций, выраженной деформацией, нелинейностью изменений физических свойств, методах и подходах, часто используемых в инженерных приложениях.

Численное моделирование течений в каналах Т-образной формы

Известно [17–21], что с точки зрения численного анализа прогноз гидродинамики и теплообмена при тур-

булентном неизотермическом течении в Т-образном соединении осложнен необходимостью корректного описания динамики специфических вихревых структур в условиях существования областей отрыва, присоединения, рециркуляции. Это предъявляет повышенные требования к выбору подходов и моделей определения коэффициентов молярного переноса импульса и теплоты. Поскольку различные методы вычислительной гидродинамики способны давать результаты конкретного метода в зависимости от указанных факторов (самих моделей течения, схем дискретизации, разрешения вычислительной сетки и т. д.) [18], целесообразно выполнение серий исследований, в которых расчетные данные требуется тестировать со своими экспериментальными аналогами с целью выяснения степени достоверности теоретических результатов.

Публикации последних лет указывают, что наиболее интересные оценки способности кодов вычислительной гидродинамики предсказывать турбулентное перемешивание в Т-образных соединениях представлены в замечаниях [19]. Так, в данном исследовании результаты численного моделирования указанных течений рядом специалистов сравнивались с данными измерений [13] полей скорости и температуры ниже по течению от Т-образного соединения. Расчеты представлены с использованием популярных кодов FLUENT, ANSYS-CFX, STAR-CCM+, OpenFOAM, а также оригинальных авторских программ на разностных сетках с высокой степенью разрешения (порядок числа ячеек $\sim 2,80 \cdot 10^5 \dots 7,05 \cdot 10^7$). Заметим, что при моделировании процессов турбулентного переноса использовались: моментный метод, метод крупных вихрей и прямое численное моделирование. Такие исследования показали, что предпочтительнее выглядят в сравнении с данными экспериментов результаты расчетов по методу крупных вихрей. Причем в расчетах поля скорости вполне надежен моментный подход, в котором $k\omega$ -модель [17–21] и ее последние модификации к переходным явлениям (Shear Stress Transport (SST)) весьма популярны в классе двухпараметрических замыканий, а также направление с использованием современных идей гибридного моделирования, позволяющего обойти сложности прогноза низкорейнольдсовой турбулентности методом крупных вихрей за счет комбинаций с RANS моделями, где особенно перспективна методология отсоединенных вихрей (detached-eddy simulation (DES)) в комбинации с SST $k\omega$ -моделью. Возможности других версий моделей высшего порядка RANS метода в расчетах потоков в каналах сложной геометрии отмечались также в [20].

Из приведенных выше результатов ясно, что создание методик расчета двух- и трехмерных эллиптических сдвиговых течений по моделям с широким диапазоном ее реализации является весьма затруднительным с точки зрения возможностей ПЭВМ и стоимости расчетов. Поэтому на практике стремятся использовать численные схемы с замыканиями определяющих уравнений движения по моделям RANS метода с эффективными двухпараметрическими опор-

ными базами. Такой подход, хотя и непригоден при расчетах потоков с выраженной неоднородной анизотропной структурой, характерной для рассматриваемых геометрических конфигураций, с принимаемой погрешностью может служить источником контроля процессов в исследуемом течении с Т-соединениями.

Преимущества прогноза структуры течений в элементах оборудования современными теориями

Заметим, что обращение к методам прямого численного моделирования для уяснения сути эффектов смешения в Т-образном соединении в зависимости от изменений термодинамических параметров (актуальных значений скорости, температуры, давления), описывающих состояние входящих в трубопровод потоков в рамках отдельных упрощений, было предпринято Н. Фукушима с соавторами в 2003 г. [4]. Это представляется вполне обоснованным, учитывая известные преимущества данного подхода перед другими методами моделирования сложных сдвиговых потоков [21]. Детальному изучению эволюции пространственной турбулентной структуры неизоотермического потока и теплообмена в Т-соединениях в условиях смешения горизонтального магистрального капельного течения с более холодным и набегающим сверху вертикальным потоком жидкости посвящено исследование М. Георгиоу и М. Папалександриса [22]. Такое моделирование гидродинамики и теплообмена в условиях жидкостно-жидкостного смешения показывает, что адвективно-диффузионные механизмы теплового процесса и изменения турбулентности локализованы в области взаимодействия сдвиговых слоев, которые формируются в окрестностях углов входа вертикальной струи. Эти слои достаточно быстро группируются в многочисленные дорожки структур с разномасштабными вихрями. Большинство из них

распадаются на небольшие вихри и переносятся основным потоком в нижнюю по направлению движения зону трубопровода. По мере того как слои сдвига распространяются вдоль по течению, они успевают взаимодействовать с окружающим потоком и в конечном итоге сливаются, что интенсифицирует механизмы смешения, молекулярной и молярной диффузии тепла и импульса (рис. 6). Анализ бюджета турбулентной кинетической энергии (например, [17]) также подтверждает доминирующую роль этих сдвиговых слоев в генерации и переносе турбулентности. Другой важной особенностью потока является то, что рециркуляционный вихрь приводит к появлению эффекта Вентури, который создает благоприятный градиент давления и условия для ускорения как основного потока, так и входящей через соединение струи.

Весьма ценно для практики, что в [22] результаты расчета по прямому моделированию отмечены сравнениями с ранее полученными авторами результатами моделирования крупных вихрей без привлечения техники пристеночных функций [23]. Анализ показывает, что такой подход обеспечивает удовлетворительные прогнозы для пространственного изменения статистических моментов первого и второго порядка пульсационных величин потока. Следует отметить, что в этом случае наиболее заметно несоответствие деталей прогноза эволюции вихревых структур. Так, метод больших вихрей дает не вполне точные распределения для моментов второго порядка пульсаций поля скорости в области интенсивного генерирования турбулентности, в частности, в зоне рециркуляции. Однако выявленные отличия не следует считать принципиальными для отказа от метода, учитывая значительную экономию вычислительных ресурсов.

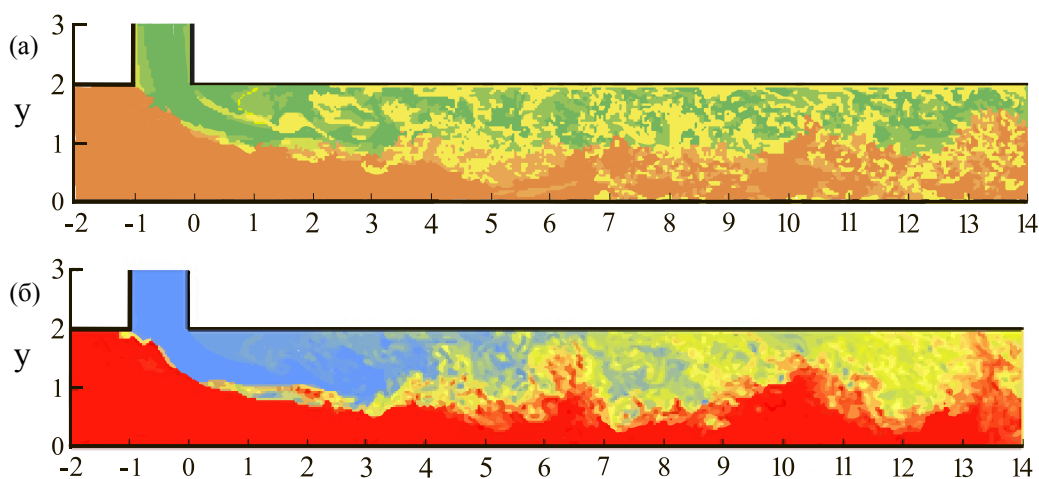


Рис. 6. Эволюция турбулентной неизоотермической структуры течения в трубопроводе: а) вихревая картина; б) тепловая картина. Результаты отвечают данным [22]

Fig. 6. Evolution of the turbulent non-isothermal structure of flow in the pipeline: a) vortex picture; б) thermal picture. The results are consistent with the data [22]

Таким образом, выполненный анализ проблем прогноза течений в Т-соединениях в рамках современных подходов показывает, что большинство исследований рассматриваемых процессов (гомогенных,

гетерогенных смесей) в рамках прямого моделирования требует серьезных вычислительных затрат, что обоснованно заставляет искать пути их решения по моделям (RANS метода), в том числе в нестационар-

ной формулировке (URANS), по методу больших вихрей, а также методу моделирования отсоединенных вихрей (детали, например, в [24–29]).

Также представленные выше сведения по визуализации и численному эксперименту указывают на необходимость корректного учета моделями эволюции упорядоченных крупномасштабных структур внутри плоских турбулентных слоев при перемешивании. Видно, что в Т-соединениях подобные образования выражены особенно в условиях движения потоков с низкими числами Рейнольдса, Маха, Ричардсона и т. д. Тогда их исследование может представлять самостоятельный интерес при выяснении вопроса о механизмах транспорта данных структур как части остаточных эффектов переходного процесса при смешении потоков вязких сред.

Некоторый анализ имеющихся данных об особенностях процессов и структуры течений в отдельных элементах специального оборудования для ТЭК, нефтегазовой и химико-технологической отраслей промышленности (в частности, с Т-, U- соединениями, обвязки крановых узлов и т. п.) показывает [1, 30–38], что течение «выстраивается» вокруг некоторой системы вихрей со специфической формой, зависящей от времени и динамики течения на границах слоя перемешивания. На основе этих представлений следует сделать вывод, что упорядоченное движение в организованных пространственных вихрях может выступать определяющими процессами, генерирующими перемешивание турбулентных слоев. Поэтому их структура и характер взаимодействия должны рассматриваться в качестве существенных аспектов для перспективных экспериментальных и численных исследований смешения и гидродинамики в узлах соединений НГО.

Возможности передовых инженерных технологий

Одним из первых успешных прогнозов течений в Т-образном канале на основе больших вихрей было исследование Л. Ху и М.С. Казими [2]. После чего подобные работы были проведены Дж. Ли [39], С. Кун [40], Т. Лу [41]. Однако во всех этих исследованиях использовались довольно грубые сетки.

Дальнейшие усложнения задачи, связанные с потребностью учета изменений различных типов характерных движений, интенсивных, полностью трехмерных при смешении вязких потоков в каналах с соединениями и их расчетов на более мощных ПЭВМ, выявили проблемы описания особых зон низкорейнольдсового течения и заставили искать компромисса между затратами на численную реализацию модели и тенденцией к увеличению плотности узлов сетки в расчетной области. Например, А. Заковиц и М. Михеску [42] выполнили моделирование крупномасштабных структур в Т-соединениях с круглым и прямоугольным сечениями с использованием сеток высокого разрешения при числах Рейнольдса порядка 10000. Установлено, что в подобных конфигурациях сдвиговой слой, формируемый между магистральным потоком и подводящей струей, становится чувствительным к возникновению колебательных эффектов

уже при числах Струхала $Sh \sim O(10^\circ)$, характерных для нестационарных течений. Отметим, что в [43, 44] также обращено внимание на подобные эффекты при попытке исследований в рамках метода крупных вихрей на сетках высокого разрешения процессов смешения, соответствующих экспериментальному анализу течений [9].

Задача уяснения гидродинамических особенностей смешения также определила круг проблем моделирования неизотермических течений, оценки степени влияния переменности теплофизических свойств смеси. Заметим, что предварительно большой цикл исследований касался случаев течений со слабой неизотермичностью (процессов при небольших значениях температурных напоров). И отдельные данные численных исследований турбулентного теплообмена в каналах (например, [45, 46]) показали, что тепловые процессы и изменения полей температуры, скорости способны играть существенную (и нередко определяющую) роль при формировании слоев смешения, мод неустойчивости, генерирования вихревой структуры потока, чувствительной к начальным условиям. Справедливости ради отметим, что информации об эволюции течения, когда температура действует как активный скаляр смешения, всё еще недостаточно. Полемика по этим вопросам продолжается, является конструктивной и дружественной и позволяет констатировать (например, [47–53]) следующее.

Так, П. Силавам с сотрудниками [47] дополнительно исследовали процесс неизотермического смешения потоков с высокими температурными напорами порядка $\Delta T = (117 \dots 125)^\circ\text{K}$, а данные Р. Говарда и Е. Серра [48] позволили констатировать, что моделирование на основе крупных вихрей вполне экономично с привлечением технологий пристеночных функций. В то же время известно [49], что такой подход не вполне корректен при прогнозах сложных сдвиговых течений в Т-образных каналах, что обусловлено значительным отклонением профилей скорости вблизи стенки от его универсального закона. На это указывают свидетельства (например, [50, 51]) того, что пристеночные функции неэффективны в областях отрыва и, как правило, в областях с отрицательными или положительными градиентами давления. Кроме того, С. Джайараду и Е. Комен [52] отмечают, что из-за того факта, что пристеночные функции основаны на стационарных уравнениях пограничного слоя, на их основе численные решения для соединений не дают удовлетворительных результатов при прогнозировании поведения флуктуирующих величин и, следовательно, привлечение аппарата пристеночных функций подчеркивает спорность и некорректность технологии. Р. Танстол в [53] также показал, что использование пристеночных функций для моделирования течений в Т-переходниках приводит к ошибочной оценке уровня пульсаций температурного и динамического полей в областях стенки. Учет этих обстоятельств показывает, что в последнее время все больше проводится исследований низкорейнольдсовых потоков у стенок с помощью метода больших вихрей

без пристеночных функций. Так, в [54] было выполнено исследование течения в канале с Т-переходом и изогнутым отводом, расположенным выше по течению при числах Рейнольдса порядка 100000. Показано, что наличие отвода приводит к образованию вихрей Дина, которые играют важную роль в процессе перемешивания двух потоков. М. Джорджиу и М. Папалександрис [50] представили расчет слабосжимаемого потока и предсказали наличие дополнительных областей со вторичными рециркуляционными эффектами, которые образуются вблизи присоединения подводящегося потока к магистральному движению. Отдельные сведения по анализу этих процессов иллюстрируют результаты данных по сравнению рас-

четов методами прямого моделирования и крупных вихрей (например, рис. 7, 8) радиальных полей осредненной и пульсационной скоростей в некоторых выделенных по длине сечениях трубопровода. Заметим, что в [23] также проанализировано неизотермическое турбулентное течение газожидкостных потоков в Т-соединениях и исследована роль температуры в качестве активного скаляра. Из анализа результатов, представленных на рис. 7, 8, в целом следует, что данные крупномасштабного моделирования без использования пристеночных функций достаточно близки к соответствующим результатам прямого численного подхода.

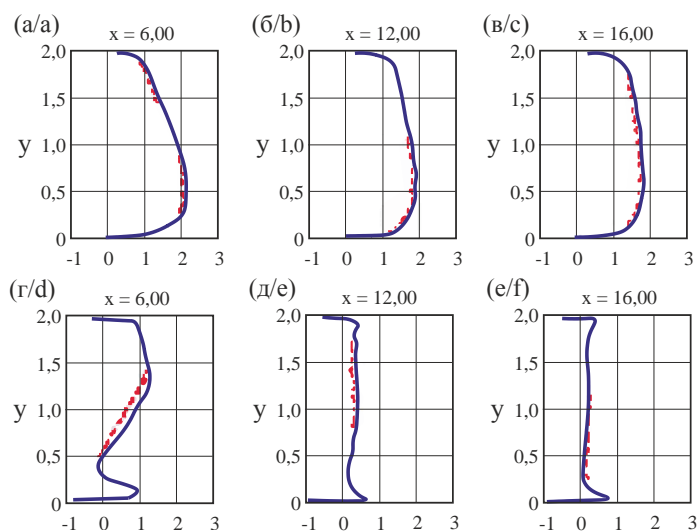


Рис. 7. Радиальные распределения осредненной и пульсационной скоростей в соответствующих выделенных по длине сечениях трубопровода. Сравнение рассчитанных профилей по методу крупных вихрей (пунктирная линия) и прямого численного моделирования (сплошная линия) отвечает случаям: а, б, в) осредненной скорости; г, д, е) пульсационной компоненты скорости. Результаты соответствуют данным [50]

Fig. 7. Radial distributions of averaged and pulsated velocities in the corresponding distanced sections of the pipeline. Comparison of calculated profiles by large eddy simulation (dotted line) and direct numerical simulation (solid line) corresponds to cases: a, b, c) averaged velocity; d, e, f) pulsated velocity. The results are consistent with the data [50]

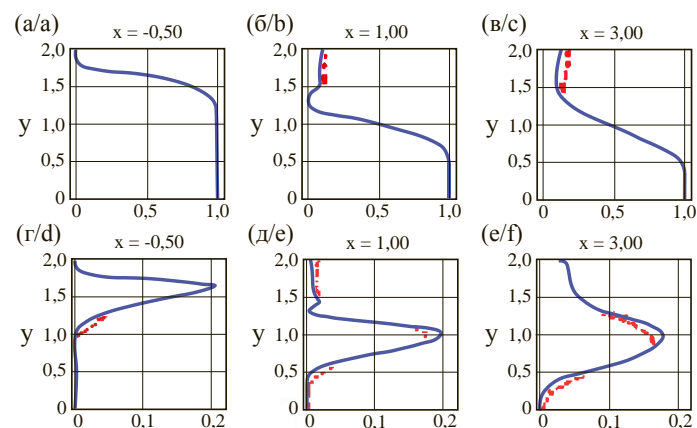


Рис. 8. Радиальные распределения осредненной и пульсационной температуры в выделенных по длине сечения трубопровода, рассчитанные по методу крупных вихрей (пунктирная линия) и прямому численному моделированию (сплошная линия): а, б, в) осредненная температура; г-е) пульсационная температура. Результаты соответствуют данным [50]

Fig. 8. Radial distributions of averaged and pulsated temperature in the distanced by the length of the section of the pipeline, calculated by large eddy simulation (dotted line) and direct numerical simulation (solid line): a, b, c) averaged temperature; d-f) pulsated temperature. The results are consistent with the data [50]

Ресурсоэффективные технологии расчета смешивающихся внутренних течений

В связи с тем, что повсеместное применение LES подхода в инженерных расчетах гидродинамики пространственных течений в каналах со сложной геометрией подводных патрубков ограничено вычислительными мощностями, дополнительный импульс получили исследования течений в рамках менее энергозатратных технологий. В этом отношении интересны результаты исследований разделяющихся турбулентных потоков в Т-образном соединении, представленные, например, в [15]. Здесь численные эксперименты эволюции процессов переноса при изменении турбулентной структуры потока воды на выходе из ответвления тройника выполнены *in situ* при $Re=126000$ с привлечением инженерных моделей турбулентности RANS метода: *standard $k\epsilon$* [55], *RNG $k\epsilon$* [56] и модели напряжений Рейнольдса (RSM) [20, 57]. Расчеты указывают, что имеется несоответствие между прогнозами и измерениями в области. Кроме того, предсказания не воспроизводили область отрыва обратного потока, которая наблюдалась в эксперименте.

Исследования [58] на основе моделей, использующих нестационарную формулировку определяющих уравнений, осредненных по Рейнольдсу (URANS), таких как *$k\omega$ -SST* [59] и *$k\omega$ -BSL* [60], *RSM- $k\epsilon/k\omega/kL$* [61, 49], ясно показывают их способность к удовлетворительному расчету турбулентного перемешивания изотермического потока вязкой каплевой среды в Т-переходах. В то время как точность прогнозирования перемешивания жидкости в неизомермических условиях в Т-переходниках все еще остается недостаточной. Это приводит к заключению, что для расчета таких потоков необходимо привлекать современные вихревые модели, а также некоторые гибридные схемы (LES/DES/SAS) для формулировки эффективной модели адаптивного масштаба (SAS – scale-adaptive simulation) [58].

Включение реологического фактора в детали моделирования процессов перемешивания вязких углеводородных систем потребовало уяснения специфики их внутреннего течения. Так, в [62] представлено численное решение разделяющихся изотермических ламинарных и турбулентных течений ньютоновской и неньютоновской жидкостей в Т-образных каналах с двумя выходами на основе явной алгебраической модели напряжений Рейнольдса (EARSМ [63, 64, 21]). Учитывается, что каналы имеют постоянное квадратное или круглое поперечное сечение. Результаты показали, что EARSМ модель достаточно эффективна [63, 64] в прогнозе изменений структуры потока с неоднородной анизотропной турбулентности и способна реагировать на эффекты, генерирующие вторичные токи в каналах с нетривиальной формой поперечного сечения.

Т. Хехне [65] использовал *$k\omega$ -SST* модель турбулентности [59] и пришел к выводу, что получение реалистичных данных о процессах в неизомермическом перемешивании в Т-соединении весьма грубо в сравнении с моделями полных уравнений для тензора напряжений Рейнольдса – RSM) [57, 51, 49]. Заметим,

что в [66, 67] также утверждается, что моделирование течений в Т-образном соединении по феноменологическим динамическим и скалярным (тепловым и диффузионным) двухпараметрическим моделям (связанным с RANS/URANS методом) будет сопряжено со сложностями установления удовлетворительного соответствия процессов их экспериментальным аналогам в силу невозможности корректного описания уровней изменений пульсаций скоростного и температурного полей в рассматриваемых геометрических конфигурациях.

Для преодоления указанных выше проблем в моделировании неизотермических течений Дж. Фенгом [66] применялась надежная, по его мнению, URANS модель второго поколения. Оценивалась эффективность подхода на основе структурной гибридной турбулентности (STRUCT) (например, [68]) для моделирования неизотермического смешения в Т-образном соединении. Рассчитанные значения распределений скорости и температуры в области смешения сравнивались с результатами других моделей, а также данными прямого моделирования (рис. 9, 10). Результаты данного исследования на основе STRUCT модели позволяют утверждать, что в целом имеется хорошее согласие расчетов с данными расчетов по методу крупных вихрей (LES) и прямого моделирования (DNS). В то же время в отношении деталей использования URANS моделей следует отметить [66], что использование STRUCT метода позволяет точно определять области с высокими значениями температурных колебаний. Модель успешно фиксирует динамику низкочастотных вихрей. Однако она ограничена в прогнозировании характерных частот больших турбулентных вихрей в области неполного перемешивания. В целом можно заключить, что STRUCT модель демонстрирует значительные перспективы в описании неизотермических перемешивающихся течений, а также корректна при прогнозах эволюции структуры течения потоков на грубых сетках. В частности, из рис. 9 следует, что модели успешно реагируют на изменение параметров в зонах с экстремальными значениями, характерных для смешения сдвиговых слоев.

Д.Г. Канг [67] выполнил моделирование сложных течений с использованием подхода отсоединенных вихрей (DES), который представляет собой гибридную модель турбулентности, сочетающую метод, в котором применяются идеи осреднения определяющих уравнений по Рейнольдсу (RANS) с элементами метода моделирования крупных вихрей (LES) (например, [69, 70]). Результаты показывают, что модель имеет преимущества с точки зрения вычислительных затрат на ее реализацию. Однако вопросы ее применимости в инженерных расчетах требуют дополнительного обоснования на классе подобных течений и составляют предмет перспективных исследований. В [67] выполнен анализ данных, полученных с использованием DES, в сравнении с ранее упомянутым экспериментом о неизотермическом течении в канале с Т-образным соединением [13], в том числе и в целях оценки работоспособности модели в широких условиях течений. Так, оказалось, что значения

осредненных и пульсационных величин поля скорости в целом хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Однако уровень турбулентности, описываемый пульсациями поля скорости, часто оказывается заниженным. Также расчеты теплового осредненного и пульсационного полей показали, что результаты в целом также были в хорошем со-

гласии с экспериментом, но в области разделения потоков наблюдались значительные отклонения расчетной (осредненной) температуры от соответствующей измеренной. Это позволяет утверждать, что в слое смешения и в мелкомасштабных и низкорейнольдсовых областях прогнозируемое пульсационное течение не развивается полностью.

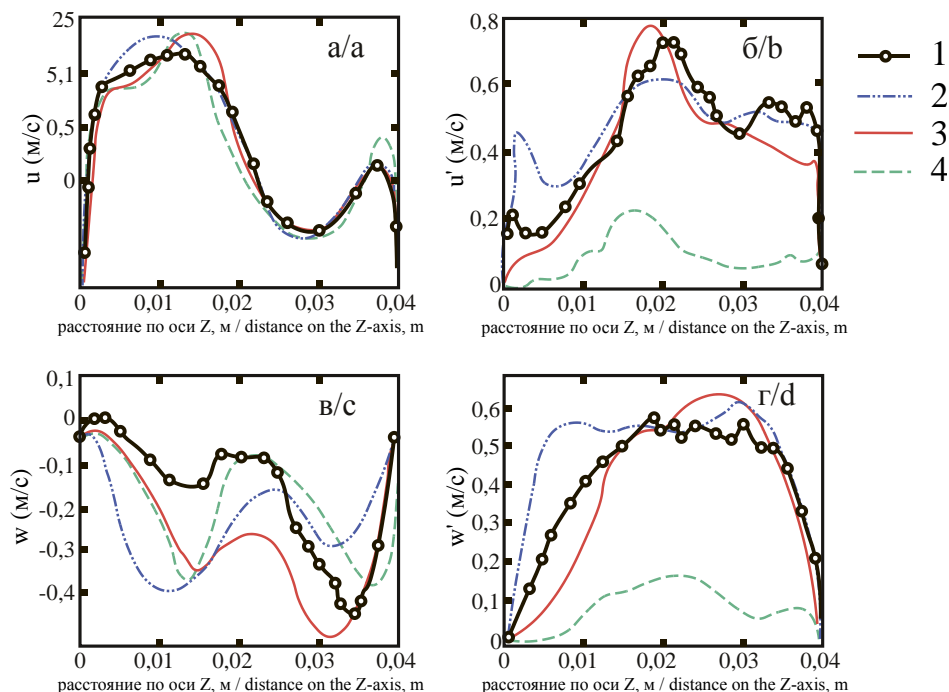


Рис. 9. Радиальные распределения осредненной (а, в), пульсационной (осевой (б)) и тангенциальной (г) составляющих вектора скорости, рассчитанных различными методами (1 – DNS, 2 – LES, 3 – STRUCT, 4 – URANS). Результаты соответствуют данным [66]

Fig. 9. Radial distributions of the averaged (a, c), pulsed (axis (b)) and tangential (d) components of the velocity vector, calculated at different methods (1 – DNS, 2 – LES, 3 – STRUCT, 4 – URANS). The results are consistent with the data [66]

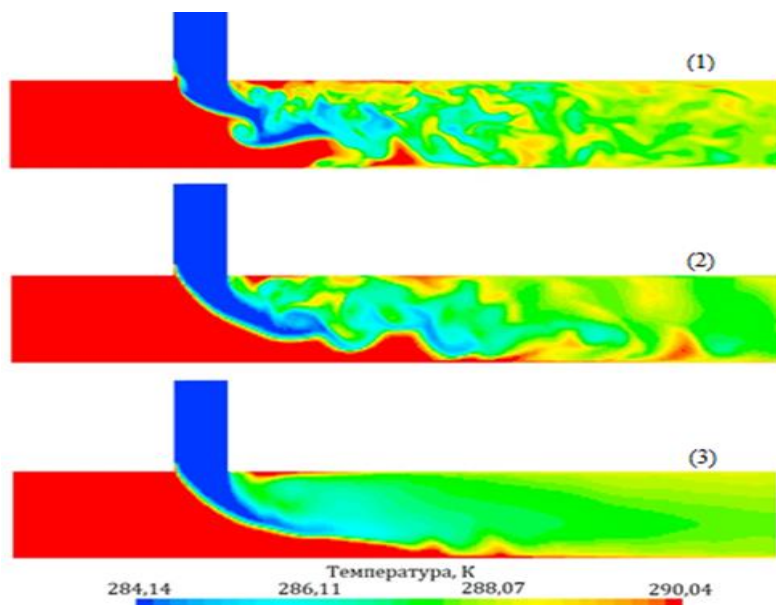


Рис. 10. Распределения актуальных значений температурного поля в канале с T-соединением (1 – LES, 2 – STRUCT, 3 – URANS). Результаты соответствуют данным [66]

Fig. 10. Distributions of temperature in a channel with the T-connection (1 – LES, 2 – STRUCT, 3 – URANS). Results are consistent with the data [66]

Преимущества моментного подхода (RANS) и его опорных двухпараметрических баз

Многие процессы перемешивания УВ потоков в закрытых элементах НГО требуют комплексного анализа изменений поля давления и его осевого градиента, находящихся в неразрывной и взаимной зависимости с самим процессом течения и тепло- и массопереноса. Особенности интенсификаций последних при переменных тепло- и реофизических свойствах смешивающихся потоков могут вызывать явления, неблагоприятные для функционирования оборудования, например, серьезную перестройку течения при появлении областей с $\frac{\partial P}{\partial x} > 0$ из-за формирования периферийных и центральных зон циркуляционного течения, которых на практике следует избегать [20, 71]. Тенденция к рециркуляциям может быть охарактеризована значениями таких параметров, как полный массовый расход в устройстве (Q), интеграл давления – импульса (Ω), а также их комбинациями:

$$Q = \int_f \rho U df, \quad \Omega = \int_f (P + \rho U^2) df.$$

Поэтому в рассматриваемых процессах вопрос корректного описания структуры пульсационного течения УВ сред в каналах с соединениями, ответственного за механизмы диффузионного перемешивания, взаимодействия с пульсациями поля давления, а также перераспределения напряжений за счет давления, весьма важен при выборе подхода и моделей инженерного расчета. С этой точки зрения полезны заключения об опыте исследования сложных сдвиговых внутренних течений и перспективах RANS/LES/DNS подхода [20, 57, 72]. В силу выше сказанного, представленная характеристика уровней моделирования турбулентного переноса при течениях вязких сред в системах с соединениями достаточно ценна в инженерных расчетах, т. к. детально информирует о степени идеализации физической картины и круге проблем для точного прогноза особенностей внутренних течений углеводородных сред как гомогенных, так и гетерогенных смесей, осложненных неизотермичностью, нестационарностью, переменностью теплофизических свойств, массовыми силами, реофизическими и фазовыми трансформациями. Главная сложность расчета таких систем связана с моделированием членов типа источника в уравнении диссипации (ϵ), процессов деформации за счет давления [49, 73]. Современные результаты расчетов и экспериментов рассматриваемых течений показывают, что моделирование многомасштабности вихрей в рамках RANS подхода с замыканиями типа $k-\omega/\epsilon$ нетривиальное дело: постановка проблемы требует включения краевой задачи с реальными значениями всего спектра осредненных и пульсационных параметров процесса. Этот вопрос достаточно подробно обсуждается в [49, 71–74], где приведены сведения о сложностях и ограничениях применения RANS- ω/ϵ моделей второго порядка в расчетах сложных пото-

ков. Несмотря на указанные сложности, отметим принципиальное основание, заставляющее обращаться в расчетах сложных сдвиговых течений к многопараметрическим моделям второго порядка для напряжений Рейнольдса и удельных турбулентных скалярных потоков (тепла и массы). Так, при исследовании турбулентной природы рассматриваемых течений почти всегда предпочтителен подход с непосредственным расчетом напряжений и потоков по транспортным уравнениям и kL -опорной базой из уравнений для кинетической энергии турбулентности (k) и ее интегрального масштаба энергосодержащих вихрей (L). Краткая формулировка RANS- kL модели, а также детали ее замыканий для гомогенной среды приведены в [20, 75].

Особенности эволюции динамической структуры с эффектами отрыва при входе магистрального потока в секции переменного (скачок) поперечного сечения и точности расчета интенсивности течения в рециркуляционных зонах иллюстрируют данные рис. 11, 12. Видно, что используемая вычислительная технология вполне успешна для контроля процессов в энергонапряженных областях соединений с особенностями изменений поверхности стенки трубопровода.

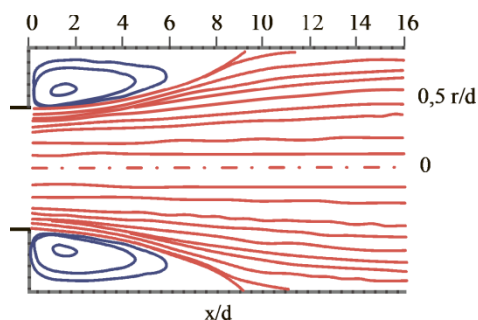


Рис. 11. Семейство рассчитанных линий тока при течении капельной среды в трубопроводе переменного поперечного сечения (уступ). Данные отвечают случаю: $h/R=0,5$, $Re=211,1$. Картина соответствует данным режима [76]

Fig. 11. Set of calculated flow lines during the drip media in the pipeline of variable cross-section (ledge). The data respond to the case: $h/R=0,5$, $Re=211,1$. The picture corresponds to the data of the regime [76]

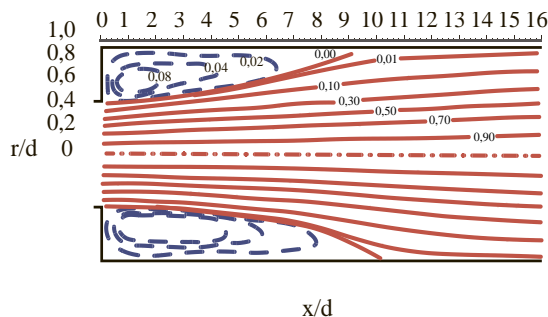


Рис. 12. Семейство линий тока жидкости в трубе при течении через уступ. Эксперимент при $h/R=0,5$, $Re=211,1$, линии уровня – данные [76]

Fig. 12. Set of lines of liquid flow in the pipe when moving through the ledge. Experiment corresponds $h/R=0,5$, $Re=211,1$, the flow lines are data [76]

Отдельные результаты расчета локальных и интегральных параметров течения УВ ньютоновской капельной вязкой жидкости в Т-соединении иллюстрируют данные, представленные на рис. 13 (сопротивления трения по поверхности узла) и рис. 14 (безразмерной величины интегрального масштаба энергосодержащих вихрей) [17].

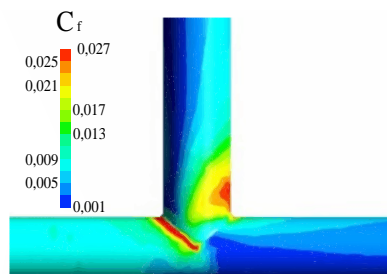


Рис. 13. Картина изменений сопротивления трения (C_f) по поверхности Т-соединения ($Re=10^5$) [17, 18]

Fig. 13. Picture of coefficient friction (C_f) changes on the T-junction surface ($Re=10^5$) [17, 18]

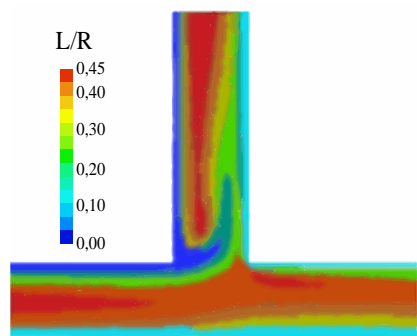


Рис. 14. Изменения интегрального масштаба (L/R) турбулентности по поверхности Т-соединения ($Re=10^5$) [17, 18]

Fig. 14. Changes of the integral scale (L/R) of turbulence on the T-junction surface ($Re=10^5$) [17, 18]

Из рис. 13, 14 видно, что процесс разделения течения из основной магистрали в патрубок приводит к неоднородной картине энергонапряженности по поверхности соединения. Последнее связано со сложным характером конвективно-диффузионного взаимодействия процессов переноса импульса в локальных областях пристеночного течения, отрывом и присоединением, ускорением и торможением потока в пристеночных областях, а также с изменением интенсивности турбулентности по рабочему пространству соединения. В таких условиях предъявляются повышенные требования к модели и ее способности учитывать ламинарно-турбулентные эффекты. Отдельные результаты изменения структуры течения и теплообмена в капельной несжимаемой вязкой среде при ее течения в канале с несимметричным входом, представленные на рис. 15, 16, позволяют судить о высокой степени достоверности прогноза переходных процессов. Это позволяет надеяться на адекватность эволюции сопротивления по поверхности соединения и рекомендовать подход к исследованию функционирования оборудования в трубопроводах с Т-соединениями.

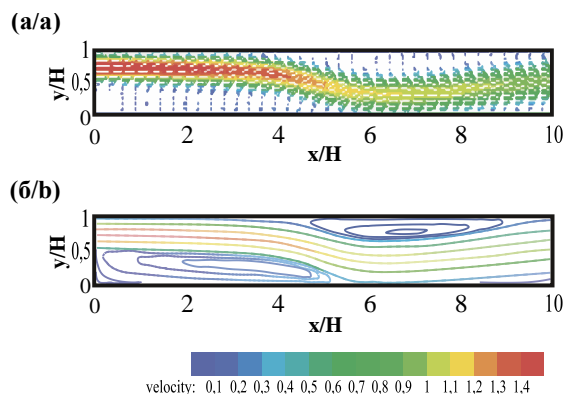


Рис. 15. Распределение значений векторного поля скорости (а) сверху и линий тока (б) снизу при течении жидкости в канале с несимметричным расширением. Высота уступа $h/H=0,5$ ($Re=880$)

Fig. 15. Distribution of the values of the vector velocity field (a) top and flow lines (b) bottom when the fluid flows in the channel with asymmetrical expansion. The height of the ledge is $h/H=0,5$ ($Re=880$)

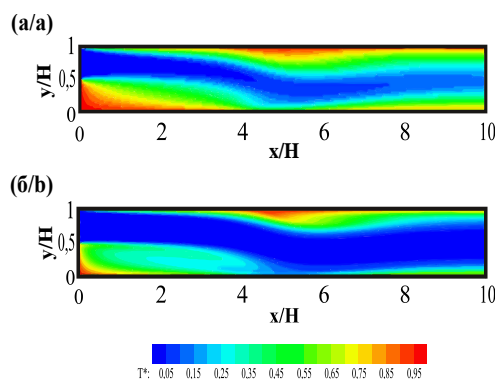


Рис. 16. Распределение значений безразмерного температурного поля $T^*=(T-T_{in})/(T_w-T_{in})$ для течения воздуха (а) сверху и воды (б) снизу по каналу с несимметричным расширением ($Re=640$)

Fig. 16. Distribution of the values of the dimensionless temperature field: $T^*=(T-T_{in})/(T_w-T_{in})$ for air flow (a) top and water (b) bottom through a channel with asymmetrical expansion ($Re=640$)

Таким образом, данные исследования вязких течений УВ сред, осложненных неизомеричностью, переменностью теплофизических свойств, в НГО с соединениями показывают, что почти отсутствуют экспериментальные сведения об изменениях характеристик турбулентности, полей скорости, температуры, состава смесей в конкретном узле соединения. В настоящий момент недостаток такого рода информации следует считать *неблагоприятным фактом*, препятствующим созданию инженерных моделей и методик прогноза аварийных процессов в соответствующих технических системах. Несмотря на это, представленная в работе информация о механизмах и эффектах смешения весьма полезна, т. к. способна дать обоснованные заключения о: *проблемах* подходов и их моделей к точному прогнозу процессов в Т-соединениях; перспективных *разработках* инженерных методов их эффективного расчета с целью увеличения надежности функционирования элементов газотранспортной сети.

Заключение

Представленные результаты показывают, что разработка современной техники и новых технологий, повышение надежности и долговечности эксплуатации НГО требуют увеличения точности их теплогидравлического расчета. Особенно это актуально для элементов устройств, включающих соединения сложной формы поверхности стенки и проходного сечения в области контакта основной магистрали газотранспортной системы и подводящих патрубков. Процессы течения в данных элементах осложнены специфическими эффектами, обусловленными перемешиванием потоков природного сырья при их слиянии/разделении в магистрали в широком диапазоне изменений режимов движения и теплообмена, реофизических свойств, состава смесей, характера действия внешних сил и т. д. Поэтому цель данной работы касалась уяснения особенностей смешения, установления закономерностей изменений гидродинамической и тепловой турбулентной структуры потоков в Т-образных соединениях, выработке представлений о моделях расчета и точности прогноза размеров энергонапряженных зон и интенсивности сопротивления и теплообмена, а также способах управления нагрузками.

Установлено, что комбинации параметров расхода, геометрических размеров и теплофизических свойств почти всегда способствуют возникновению турбулентных процессов в элементах газотранспортной сети, отличающихся: интенсивностью перераспределения кинетической и тепловой энергии за счет эффектов прямого и обратного перехода (реламинаризации); завихрением, перемешиванием фаз; стратификацией по плотности. Видно, что в практике инженерных расчетов актуальны сведения по систематизации знаний о эволюции вихревых течений по пространству узла соединения. Подчеркивается, что *концепция оценки* современных методов и моделей расчета внутренних течений в соединениях, результаты, привлекаемые для моделирования процессов смешения и обобщения указанных режимов на более широкий класс течений в условиях: *противоположности* направлений вынужденного течения и вектора термомгравитационных сил (течение охлаждаемой жидкости снизу вверх по магистрали или нагреваемой жидкости сверху вниз); *ламинаризации* при воздействии различных факторов (диссипации, устойчивой стратификации, ускорения, вращения, нагрева, инъекции/отсоса), представляется *обоснованной* особенно при принятии решений о выборе модели и метода расчета. В силу того, что последние с разной степенью точности способны прогнозировать особенности течений в соединениях, важными являются системные сведения о прогнозах локальных и интегральных свойств течений с перемешиванием. С этой точки зрения результаты данной работы имеют следующее *практическое* значение.

1. Характер изменения динамической и тепловой структуры течений в каналах Т-образной формы показывает (например, рис. 13), что на начальном гидродинамическом участке неравномерность

распределения касательных напряжений по периметру узла соединения выражена и возрастает от сечения непосредственного соединения патрубка, а затем с удалением от него снижается до значений стабилизации течения. Эти особенности определяются процессами взаимодействия вихрей со стенками тройника (рис. 14) и механизмами, формирующими неоднородную турбулентную структуру в областях стенок и ядра течения (рис. 1–10), где существует движение организованных структур. Важно отметить, что в моделировании таких эффектов стоит с *осторожностью* относиться к прогнозам, выполненным по моделям, включающим понятие «скалярной» турбулентной вязкости. В условиях существования анизотропной структуры турбулентности в Т-соединениях расчет многомасштабности течения (рис. 7–9, 14) следует проводить по моделям высшего порядка (например, RANS- kL/kw , LES/DNS-подходам).

2. Анализ особенностей процессов в рециркуляционных зонах, их интенсивности (например, рис. 6, 9–12, 14–16) показывает, что спектр распределений динамических параметров в их центральных и периферийных областях хорошо согласуется с имеющимися экспериментами [21] и данными [61–64]. Установлено, что максимальное значение скорости, направленной против основного течения, сосредоточено в вихрях при $x/H < 10$, где H – высота уступа. Обнаружено, что в турбулентных режимах максимальные значения реинольдсовых напряжений наблюдаются в областях, где поперечный градиент аксиальной скорости стремится к максимальным значениям в зоне, близкой к разделяющей линии тока, причем ниже по течению зона с экстремальными напряжениями отклоняется вверх. Также результаты указывают, что пиковые значения напряжений имеются в слое смешения и они сначала возрастают с увеличением расстояния вниз по течению. Далее при достижении максимума перед зоной повторного присоединения потока наблюдается тенденция к их уменьшению.

Таким образом, детальный анализ процессов в «тонкой» структуре течения показывает, что в слое смешения осевая компонента пульсаций вектора скорости доминирует в сравнении с соответствующей радиальной и азимутальной компонентами. Причем при присоединении, когда продольная скорость деформации выражена, вблизи поверхности наблюдается увеличение уровня пульсаций радиальной и азимутальной компонент вектора скорости. Характер распределений кинетической энергии турбулентности, интегрального масштаба энергосодержащих вихрей в представленных областях соединений позволяет заключить, что, несмотря на уменьшение их интенсивности в слоях смешения, они остаются в большей части рециркуляционных областей существенной составляющей, способствующей генерации турбулентности. Поэтому требуются эффективные методы расчета *диффузионных механизмов*, определяющих по-

ведение этих величин, чувствительных к изменению анизотропной структуры.

3. С целью получения дополнительной информации о точках отрыва и корректности их прогноза в соединениях целесообразно иметь контрольные экспериментальные данные эволюции углеводородных структур в широком диапазоне изменений поля температуры, давления. В частности, так как сдвиговой слой смещения (между ядром потока и рециркуляционной зоной) развивается по криволинейным траекториям, для подтверждения наблюдаемых в расчетах специфических изменений *локальных свойств* вихревого течения в отрывной и рециркуляционной областях будут востребованы современные методы бесконтактной регистрации (лазерная велосимметрия), фиксирующие детали пространственных изменений компонент полного тензора напряжений Рейнольдса, корреляций пульсаций поля скорости и скаляра потоков скалярной субстанции. Эти данные составляют предмет для *понимания, прогнозирования, развития и проверки* математических моделей турбулентности RANS подходом, а также моделированием крупных вихрей. Стоит заметить, что последний обладает большим потенциалом в исследованиях закономерностей интегральных параметров сложных вихревых течений в Т-соединениях произвольной формы поперечного сечения, таких как размер, форма, интенсивность

циркуляционных зон, а также при изучении разнообразных вторичных течений, возбуждаемых давлением, нетривиальным характером распределений нормальных рейнольдсовых напряжений.

4. Применительно к задачам НГО результаты позволяют отметить, что представление о сути процессов в технических системах осложнено необходимостью задания реальных краевых условий: поля кинетической энергии и масштаба турбулентности, напряжений Рейнольдса. Последние либо отсутствуют, либо сформулированы не должным образом, что ограничивает возможности численного моделирования. Например, существует значительный разброс этих данных даже для отдельной реализации. В этом смысле сведения о механизмах процессов переноса, формирующих физику сдвиговых анизотропных потоков в соединениях: *порождении* энергии осредненным и пульсационным движением, *диффузии* турбулентности, *перераспределения* за счет корреляций пульсаций давления со скоростями деформаций и *диссипации*, необходимо корректно описывать и представлять в безразмерном виде. Это позволит минимизировать использование модельных констант при анализе более общих явлений, осуществить разумное обобщение модели и продемонстрировать надежность методов исследования течений с отрывом и смешением потоков в рабочих элементах нефтегазового оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парфенов Д.В. Предупреждение нагрева элементов крановых узлов при заполнении газом участков магистральных газопроводов: дис. ... канд. техн. наук. – Ухта, 2018. – 189 с.
2. Hu L., Kazimi M.S. LES benchmark study of high cycle temperature fluctuations caused by thermal striping in a mixing tee // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2006. – V. 27. – P. 54–64.
3. Characterization of thermal striping in liquid sodium with optical fiber sensors / M. Weathered, J. Rein, M. Anderson, P. Brooks, B. Coddington // *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*. – 2017. – V. 3. – P. 041003-1–041003-9.
4. Numerical and experimental study on turbulent thermal mixing in a T-junction flow / N. Fukushima, K. Fukagata, N. Kasagi, H. Noguchi, K. Tanimoto // *The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*. – Big Island of Hawaii, Hawaii, 2003. – P. 16–20.
5. De Tilly A., Sousa J. An experimental study of heat transfer in a two dimensional T-junction operating at a low momentum flux ratio // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – V. 51. – № 3. – P. 941–947.
6. Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping / H. Kamide, M. Igarashi, S. Kawashima, N. Kimura, K. Hayashi // *Nuclear Engineering and Design*. – 2009. – V. 239. – № 1. – P. 58–67.
7. Experimental study on turbulent mixing process in cross-flow type T-junction / M. Hirota, E. Mohri, H. Asano, H. Goto // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2010. – V. 31. – № 5. – P. 776–784.
8. Thermal mixing in T-junctions / V.S. Naik-Nimbalkar, A.W. Patwardhan, I Banerjee., G. Padmakumar, G. Vaidyanathan // *Chemical Engineering Science*. – 2010. – V. 65. – № 22. – P. 5901–5911.
9. Kuschewski M., Kulecovic R., Laurien E. Experimental setup for the investigation of fluid – structure interactions in a T-junction // *Nuclear Engineering and Design*. – 2013. – V. 264. – P. 223–230.
10. Lin C.H., Chen M.S., Ferng Y.M. Investigating thermal mixing and reverse flow characteristics in a T-junction by way of experiments // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 99. – P. 1171–1182.
11. Investigations on mixing phenomena in single-phase flow in a T-junction geometry / C. Walker, M. Simiano, R. Zboray, H.M. Prasser // *Nuclear Engineering and Design*. – 2009. – V. 239. – № 1. – P. 116–126.
12. Hosseini S.M., Yuki K., Hashizume H. Classification of turbulent jets in a T-junction area with a 90-deg bend upstream // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – V. 51. – P. 2444–2454.
13. Westin J., Veber P., Andersson L. High-cycle thermal fatigue in mixing tees. Large - eddy simulations compared to a new validation experiment // *Proc. of the 16th International Conference on Nuclear Engineering*. – Orlando, Florida, 2008. – P. 515–525.
14. Measurement and calculations of laminar flow in a ninety degree bifurcation / D. Liepsch, S. Moravee, A.K. Rastogi, N.S. Vlachos // *Journal of Biomechanics*. – 1982. – V. 15. – P. 473–485.
15. Sierra-Espinosa F.Z., Bates C.J., O'Doherty T. Turbulent flow in a 90° pipe junction. P. 2: Reverse flow at the branch exit // *Computers and Fluids*. – 2000. – V. 29. – P. 215–233.
16. Costa N.P., Maia R., Proenca M.F. Edge effects on the flow characteristics in a 90 deg tee junction // *Journal of Fluids Engineering*. – 2006. – V. 128. – № 6. – P. 1204–1217.
17. Альгинов Р.А. Численное моделирование закономерностей течения вязких сред в трубопроводах с соединениями сложной формы: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2014. – 119 с.
18. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Specific aspect of turbulent flow separation in nodes and junctions of pipelines // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – V. 21. – P. 1–5.
19. Smith B., Mahaffy J., Angele K. A CFD benchmarking exercise based on flow mixing in a T-junction // *Nuclear Engineering and Design*. – 2013. – V. 264. – P. 80–88.
20. Харламов С.Н., Фатьянов Д.С. Исследование структуры турбулентного течения природного сырья в трубопроводах с секцией переменного по длине поперечного сечения конфузоро-

- диффузорного типа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 53–67.
21. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Томский государственный университет, 2001. – 448 с.
 22. Georgiou M., Papalexandris M. V. Direct numerical simulation of turbulent heat transfer in a T-junction // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2018. – V. 845. – P. 581–614.
 23. Georgiou M., Papalexandris M.V. Turbulent mixing in T-junctions: the role of the temperature as an active scalar // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – V. 117. – P. 793–809.
 24. Progress in hybrid RANS-LES modelling // 7th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods / Eds. Y. Hoarau, Sh.-Hui Peng, D. Schwamborn, A.J. Revell, Ch. Mockett. – Berlin, Germany, 17–19 September, 2018. – Cham, Switzerland: Springer International Publ., 2020. – 412 p.
 25. Rodriguez S. Applied computational fluid dynamics and turbulence modeling: practical tools, tips and techniques. – Cham, Switzerland: Springer International Publ., 2019. – 306 p.
 26. Turbulence and interactions // Proc. of the TI 2018 Conference / Eds. M. Deville, Ch. Calvin, V. Couaillier, M. de La Llave Plata, J.-L. Estivalèzes, Th. Hiệp Lê, St. Vincent. – Les Trois-Îlets, Martinique, France, June 25–29, 2018. – Cham, Switzerland: Springer International Publ., 2021. – 218 p.
 27. Sengupta T.K., Bhaumik S. DNS of wall-bounded turbulent flows: a first principle approach. – Singapore: Springer, 2019. – 358 p.
 28. Eckert M. The turbulence problem: a persistent riddle in historical perspective. – Cham, Switzerland: Springer International Publ., 2019. – 107 p.
 29. Philipp T.L., Nguyen J.C., Uribe I.A., Laurence D.R. A dual-grid hybrid RANS/LES model for under-resolved near-wall regions and its application to heated and separating flows // *Flow, turbulence and combustion*. – 2020. – V. 104. – P. 835–859.
 30. Gavioli Y.S., Aibe V.Y., Loureiro J.B.R. Gas-liquid flow through an inclined T-junction with a vertical-upward branch // *Flow, turbulence and combustion*. – 2019. – V. 103. – P. 1011–1037.
 31. Azzopardi B.J., Smith P.A. Two-phase flow split at T-junctions: effect of side arm orientation and downstream geometry // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1992. – V. 18. – P. 861–875.
 32. Baker G. Separation and control of gas-liquid flows at horizontal T-junctions: PhD Thesis. – Nottingham, 2003. – 315 p.
 33. Transient effects in gas-liquid phase separation at a pair of T-junctions / G. Baker, W.W. Clark, B.J. Azzopardi, J.A. Wilson // *Chemical Engineering and Science*. – 2008. – V. 63. – P. 968–976.
 34. Penmarcha V.R., Ashton P.J., Shoam O. Two-phase flow splitting at a T-junction with an inclined branch arm // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1996. – V. 22. – № 6. – P. 1105–1122.
 35. Azzopardi B. Measurements and observations of the split of annular flow at a vertical T-junction // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1988. – V. 14. – P. 701–710.
 36. A T-junction device allowing for two simultaneous orthogonal views: application to bubble formation and break-up / D. Caprini, G. Sinibaldi, L. Marino, C.M. Casciola // *Microfluidics and Nanofluidics*. – 2018. – V. 22. – № 85. – P. 1–16.
 37. Azzopardi B.J. Phase separation at T-junctions // *Multiphase Science and Technology*. – 2000. – V. 11. – P. 223–329.
 38. Paes P.L.K., Yuan Xuan. Numerical investigation of turbulent kinetic energy dynamics in chemically-reacting homogeneous turbulence // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2018. – V. 101. – P. 775–794.
 39. Numerical analysis of thermal striping induced high cycle thermal fatigue in a mixing tee / J.I. Lee, L.-W. Ho, P. Saha, M.S. Kazimi // *Nuclear Engineering and Design*. – 2009. – V. 239. – № 5. – P. 833–839.
 40. Computational study of conjugate heat transfer in T-junctions / S. Kuhn, O. Brailard, B. Niceno, H.M. Prasser // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – V. 240. – № 6. – P. 1548–1557.
 41. Large-eddy simulations (LES) of temperature fluctuations in a mixing tee with/without a porous medium / T. Lu, P.X. Jiang, Z.J. Gou, Y.W. Zhang, H. Li // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – V. 53. – P. 4458–4466.
 42. Sakowitz A., Mihaescu M., Fuchs L. Turbulent flow mechanisms in mixing T-junctions by large eddy simulations // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2014. – V. 45. – P. 135–146.
 43. Large eddy simulation studies on the influence of turbulent inlet conditions on the flow behavior in a mixing tee / P. Gauder, P.K. Selvam, R. Kulecovic, E. Laurien // *Nuclear Engineering and Design*. – 2016. – V. 298. – P. 51–63.
 44. T-junction cross-flow mixing with thermally driven density stratification / J. Kickhofel, H.M. Prasser, P.K. Selvam, E. Lauren, R. Kulecovic // *Nuclear Engineering and Design*. – 2016. – V. 309. – P. 23–39.
 45. Lessani B., Zainali A. Numerical investigation of stably stratified turbulent channel flow under non-Boussinesq conditions // *Journal of Turbulence*. – 2009. – V. 10. – P. 1–25.
 46. Zonta F., Onorato M., Soldati A. Turbulence and internal waves in stably stratified channel flow with temperature-dependent fluid properties // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2012. – V. 697. – P. 175–203.
 47. Selvam P.K., Kulecovic R., Lairien E. Large eddy simulation on thermal mixing of fluids in a T-junction with conjugate heat transfer // *Nuclear Engineering and Design*. – 2015. – V. 284. – P. 238–246.
 48. Howard R.J., Serre E., Large-eddy simulation in a mixing tee junction: high order turbulent statistics analysis // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2015. – V. 51. – P. 65–77.
 49. Prospects of RANS models with multiparameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface / S.N. Kharlamov, V.Yu. Kim, S.I. Silvestrov, R.A. Alginov, S.A. Pavlov // The 6th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010). – Harbin, China, August 22–24, 2011. – V. 2. – P. 787–791.
 50. Georgiou M., Papalexandris M.V. Numerical study of turbulent flow in a rectangular T-junction // *Physics of fluids*. – 2017. – V. 29. – № 6. – P. 065106-1–065106-17.
 51. Kharlamov S.N., Islyamov I.Sh. Optimization of the liquid hydrocarbons pipeline transport with using a vortex effect and inductive heating of metallic additives // The Proc. of the 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2012). – Tomsk, Russia, September 21–24, 2012. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357803.
 52. Jayaraju S., Komen E., Baglietto E. Suitability of wall-functions in large eddy simulation for thermal fatigue in a T-junction // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – V. 240. – № 10. – P. 2544–2554.
 53. Benchmarking LES with wallfunctions and RANS for fatigue problems in thermal-hydraulics systems / R. Tunstall, D. Laurence, R. Prosser, A. Skillen // *Nuclear Engineering and Design*. – 2016. – V. 308. – P. 170–181.
 54. Large eddy simulation of a T-junction with upstream elbow: the role of dean vortices in thermal fatigue / R. Tunstall, D. Laurence, R. Prosser, A. Skillen // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 107. – P. 672–680.
 55. Launder B.E., Sharma B.I. Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc // *Letters in Heat and Mass Transfer*. – 1974. – V. 1. – № 2. – P. 131–138.
 56. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique / V. Yakhot, S.A. Orszag, S. Thangam, T.B. Gatski, C.G. Speziale // *Physics of Fluids*. – 1992. – Ser. A. – V. 4. – № 7. – P. 1510–1520.
 57. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I. Numerical modelling of a vortical investigation of heat transfer in fields of centrifugal mass forces in elements of the power equipment with a curvilinear wall // The 5th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010). – Ulsan, Korea, October, 13–15, 2010. – P. 105–109.
 58. Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX / Th. Frank, C. Lifante, H.-M. Prasser, F. Menter // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – V. 240. – P. 2313–2328.
 59. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. – 1994. – V. 32. – № 8. – P. 1598–1605.
 60. Menter F.R. Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows // *NASA TM*. – 1992. – V. 10. – № 103975. – P. 1–35.

61. Speziale C.G., Sarkar S., Gatski T.B. Modeling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1991. – V. 227. – P. 245–272.
62. Numerical simulations of flow through channels with T-junction / L. Beneš, P. Louda, K. Kozel, R. Keslerova, J. Štigler // *Applied Mathematics and Computation*. – 2013. – V. 219. – P. 7225–7235.
63. Craft T.J., Launder B.E., Suga K. Development and application of the cubic eddy-viscosity model of turbulence // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 1996. – V. 17. – P. 108–115.
64. Naji H., Mompean G., Yahyaoui O.El. Evaluation of explicit algebraic stress models using direct numerical simulations // *Journal of Turbulence*. – 2004. – № 5. – P. 38–63.
65. Höhne T. Scale resolved simulations of the OECD/NEA-Vattenfall T-junction benchmark // *Nuclear Engineering and Design*. – 2014. – V. 269. – P. 149–154.
66. Feng J., Frahi T., Baglietto E. Structure-based URANS simulation of thermal mixing in T-junctions // *Nuclear engineering and design*. – 2018. – V. 340. – P. 275–299.
67. Kang D.G., Na H., Lee C.Y. Detached eddy simulation of turbulent and thermal mixing in a T-junction // *Annals of Nuclear Energy*. – 2019. – V. 124. – P. 245–256.
68. Lenci G.A. Methodology based on local resolution of turbulent structures for effective modeling of unsteady flows: Ph.D. Thesis. – Massachusetts, 2016. – 200 p.
69. Madabhushi R.K., Vanka S.P. Large-eddy simulation of turbulence-driven secondary flow in a square duct // *Physics of Fluids*. – 1991. – Ser. A. – V. 3. – № 11. – P. 2734–2745.
70. Vasquez M.S., Métais O. Large eddy simulation of the turbulent flow through a square duct // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2002. – V. 453. – P. 201–238.
71. Jean Piquet. *Turbulent Flows: Models and Physics*. – Berlin: Springer – Verlag Heidelberg, 1999. – 762 p.
72. Bayode Owolabi. *Characterisation of turbulent duct flows: experiments and direct numerical simulations*. – Cham, Switzerland: Springer International Publ., 2019. – 141 p.
73. *Theories of Turbulence* / Eds. M. Oberlack, F.H. Buss. – Wien: Springer-Verlag, 2002. – 373 p.
74. Sagaut P., Cambon C. *Homogeneous turbulence dynamics*. – Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. – 897 p.
75. Kharlamov S.N. Heat and mass transfer in facilities with a moving piston // *Heat transfer research*. – 2007. – V. 38. – № 3. – P. 233–243.
76. Hammad K.J., Ötügen M.V., Arik E.B. A PIV study of the laminar axisymmetric sudden expansion flow // *Experiments in Fluids*. – 1999. – № 26. – P. 266–272.

Поступила 01.03.2021 г.

Информация об авторах

Харламов С.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Фатьянов Д.С., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC504.61:532.5426:536.252

SIMULATION OF VISCOUS MEDIA SPATIAL FLOWS IN THE SYSTEM OF CHANNELS WITH SECTIONS OF COMPLEX FORM JUNCTIONS

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

Dmitriy S. Fatyanov¹,
dsf5@tpu.ru

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

Relevance of the research is determined by the need to analyze the features of the workflow in machines with junctions of arbitrary geometry, combining/separating the flows of viscous media, in order to accurately and carefully predict the contingencies of their functioning due to the expressed thermal and dynamic loads caused by the effects of separation, detachment, pressure, the evolution of the structure of complex, shear, non-isothermal internal flows when at contact with the wall; reasonable choice, taking into account the possibilities of modern computing technology, the most natural approach of studying the spatial and unsteady nature of flows in these technical systems.

The aim of this paper is to understand the problems of the modern level of research of flows in T-shaped channels, which are one of the main elements of technical equipment in the oil and gas industry; to establish the value of the existing results of experimental and theoretical analysis of complex shear flows in order to improve methods that contribute to an increase in the operational and structural level of the devices under high dynamic and thermal loads; to define the data for verification of models capable of more reliably predicting features of currents and heat and mass transfer in pipes; to give recommendations to the practice of calculating reliability of devices with T-shaped sections.

Methodology: complex theoretical and experimental methods of analysis of hydrodynamics and heat and mass transfer at viscous-inertial laminar and turbulent flows of hydrocarbon drop and gaseous viscous media in internal systems with T-connections of the main and branch pipe.

Results. The authors have carried out a critical review of modern data, modeling methods and models of studies of hydrodynamics and heat exchange processes when mixing drip and gaseous flows in elements of pipeline networks in a wide range of changes in mode and geometric parameters (T-connections, symmetrical/asymmetric expansion, $Re=10^2 \dots 10^7$, $M<0,3 \dots 0,7$). The paper presents the features that form the structure of currents in individual elements of equipment used in the oil and gas industry (crane assembly bindings). It was found that rounding of connection angles can reduce energy loss in branch pipe by 10–20 %. Details of vortex structure changes were analyzed by visualization/contactless recording methods. A classification of structures useful in formulating edge problems in mathematical modeling of processes at the Petroleum and Gas Devices is given. It is noted that the use of wall functions for modeling flows in T-connections can lead to an erroneous assessment of the level of pulsations of temperature and dynamic fields in wall regions. It is emphasized that the disengagement of flows, the growth of energy stress in local sections of the connection are sensitive to the nature of convective-diffusion interaction of momentum, heat transfer processes, separation, connection, local acceleration/braking mechanisms, turbulization of flow in wall regions. These features can be successfully predicted by modern models that take into account the specifics of flows with heterogeneous anisotropic turbulence. In conclusion, recommendations are given on prediction of local and integral properties of mixed flows, as well as problems having fundamental and applied significance that make up the subject of promising research.

Key words:

Channels, T-junctions, streams, turbulence, non-isothermicity, models, methods, modeling, structure, regularities.

REFERENCES

1. Parfenov D.V. *Preduprezhdenie nagreva elementov kranovykh uzlov pri zapolnenii gazom uchastkov magistra'nykh gazoprovodov*. Diss. Kand. nauk [Prevention of heating of crane components while filling sections of main gas pipelines with gas. Cand.e Diss.]. Ukhta, 2018. 189 p.
2. Hu L., Kazimi M.S. LES benchmark study of high cycle temperature fluctuations caused by thermal striping in a mixing tee. *International journal of heat and fluid flow*, 2006, vol. 27, pp. 54–64.
3. Weathered M., Rein J., Anderson M., Brooks P., Coddington B. Characterization of thermal striping in liquid sodium with optical fiber sensors. *Journal of nuclear engineering and radiation science*, 2017, vol. 3, pp. 041003-1–041003-9.
4. Fukushima N., Fukagata K., Kasagi N., Noguchi H., Tanimoto K. Numerical and experimental study on turbulent thermal mixing in a T-junction flow. *The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*. Big Island of Hawaii, Hawaii, 2003. pp. 16–20.
5. De Tilly A., Sousa J. An experimental study of heat transfer in a twodimensional T-junction operating at a low momentum flux ratio. *International journal of heat and mass transfer*, 2008, vol. 51, no. 3, pp. 941–947.
6. Kamide H., Igarashi M., Kawashima S., Kimura N., Hayashi K. Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping. *Nuclear engineering and design*, 2009, vol. 239, no. 1, pp. 58–67.
7. Hirota M., Mohri E., Asano H., Goto H. Experimental study on turbulent mixing process in cross-flow type T-junction. *International journal of heat and fluid flow*, 2010, vol. 31, no. 5, pp. 776–784.
8. Naik-Nimbalkar V.S., Patwardhan A.W., Banerjee I., Padmakumar G., Vaidyanathan G. Thermal mixing in T-junctions. *Chemical engineering science*, 2010, vol. 65, no. 22, pp. 5901–5911.
9. Kuschewski M., Kulecovic R., Laurien E. Experimental setup for the investigation of fluid – structure interactions in a T-junction. *Nuclear engineering and design*, 2013, vol. 264, pp. 223–230.
10. Lin C.H., Chen M.S., Ferng Y.M. Investigating thermal mixing and reverse flow characteristics in a T-junction by way of experiments. *Applied thermal engineering*, 2016, vol. 99, pp. 1171–1182.
11. Walker C., Simiano M., Zboray R., Prasser H.M. Investigations on mixing phenomena in single-phase flow in a T-junction geometry. *Nuclear engineering and design*, 2009, vol. 239, no. 1, pp. 116–126.

12. Hosseini S.M., Yuki K., Hashizume H. Classification of turbulent jets in a T-junction area with a 90-deg bend upstream. *International journal of heat and mass transfer*, 2008, vol. 51, pp. 2444–2454.
13. Westin J., Veber P., Andersson L. High-cycle thermal fatigue in mixing tees. Large - eddy simulations compared to a new validation experiment. *Proc. of the 16th International Conference on Nuclear Engineering*. Orlando, 2008. pp. 515–525.
14. Liesch D., Moravej S., Rastogi A.K., Vlachos N.S. Measurement and calculations of laminar flow in a ninety degree bifurcation. *Journal of biomechanics*, 1982, vol. 15, pp. 473–485.
15. Sierra-Espinosa F.Z., Bates C.J., O'Doherty T. Turbulent flow in a 90° pipe junction. P. 2: Reverse flow at the branch exit. *Computers and fluids*, 2000, vol. 29, pp. 215–233.
16. Costa N.P., Maia R., Proenca M.F. Edge effects on the flow characteristics in a 90 deg tee junction. *Journal of fluids engineering*, 2006, vol. 128, no. 6, pp. 1204–1217.
17. Alginov R.A. *Chislennoe modelirovanie zakonomernostey techeniy vyazkikh sred v truboprovodakh s soedineniyami slozhnoy formy*. Diss. Kand. nauk [Numerical modeling of patterns of the flow of viscous media in pipelines with complex form junctions. Cand. Diss.]. Tomsk, 2014. 119 p.
18. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Specific aspect of turbulent flow separation in nodes and junctions of pipelines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–5.
19. Smith B., Mahaffy J., Angele K. A CFD benchmarking exercise based on flow mixing in a T-junction. *Nuclear engineering and design*, 2013, vol. 264, pp. 80–88.
20. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Investigation of natural raw materials turbulent flow structure in pipelines at confuser-diffuser section. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 53–67. In Rus.
21. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. *Matematicheskie modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentnosti vo vnutrennikh techeniyakh* [Mathematical models of inhomogeneous anisotropic turbulence at the internal flows]. Tomsk, Tomsk State University of Publ. House, 2001. 448 p.
22. Georgiou M., Papalexandris M.V. Direct numerical simulation of turbulent heat transfer in a T-junction. *Journal of fluid mechanics*, 2018, vol. 845, pp. 581–614.
23. Georgiou M., Papalexandris M.V. Turbulent mixing in T-junctions: the role of the temperature as an active scalar. *International journal of heat and mass transfer*, 2017, vol. 117, pp. 793–809.
24. Progress in hybrid RANS-LES modelling. *7th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods*. Eds. Y. Hoarau, Sh.-Hui Peng, D. Schwamborn, A.J. Revell, Ch. Mockett. Berlin, Germany, 17–19 September, 2018. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2020. 412 p.
25. Rodriguez S. *Applied computational fluid dynamics and turbulence modeling: practical tools, tips and techniques*. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2019. 306 p.
26. Turbulence and interactions. *Proc. of the TI 2018 Conference*. Eds. M. Deville, Ch. Calvin, V. Couaillier, M. de La Llave Plata, J.-L. Estivalèzes, Th. Hiệp Lê, S. Vincent. Les Trois-Îlets, Martinique, France, June 25–29, 2018. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2021. 218 p.
27. Sengupta T.K., Bhaumik S. *DNS of wall-bounded turbulent flows: a first principle approach*. Cham, Switzerland, Springer Singapore, 2019. 358 p.
28. Eckert M. *The turbulence problem: a persistent riddle in historical perspective*. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2019. 107 p.
29. Philipp T.L., Nguyen J.C., Uribe I.A., Laurence D.R. A dual-grid hybrid RANS/LES model for under-resolved near-wall regions and its application to heated and separating flows. *Flow, turbulence and combustion*, 2020, vol. 104, pp. 835–859.
30. Gavioli Y.S., Aibe V.Y., Loureiro J.B.R. Gas-liquid flow through an inclined T-junction with a vertical-upward branch. *Flow, turbulence and combustion*, 2019, vol. 103, pp. 1011–1037.
31. Azzopardi B.J., Smith P.A. Two-phase flow split at T-junctions: effect of side arm orientation and downstream geometry. *International journal of multiphase flow*, 1992, vol. 18, pp. 861–875.
32. Baker G. *Separation and control of gas-liquid flows at horizontal T-junctions*. PhD Thesis. Nottingham, 2003. 315 p.
33. Baker G., Clark W.W., Azzopardi B.J., Wilson J.A. Transient effects in gas-liquid phase separation at a pair of T-junctions. *Chemical engineering and science*, 2008, vol. 63, pp. 968–976.
34. Penmatcha V.R., Ashton P.J., Shoam O. Two-phase flow splitting at a T-junction with an inclined branch arm. *International journal of multiphase flow*, 1996, vol. 22, no. 6, pp. 1105–1122.
35. Azzopardi B. Measurements and observations of the split of annular flow at a vertical T-junction. *International journal of multiphase flow*, 1988, vol. 14, pp. 701–710.
36. Caprini D., Sinibaldi G., Marino L., Casciola C.M.A. T-junction device allowing for two simultaneous orthogonal views: application to bubble formation and break-up. *Microfluidics and nanofluids*, 2018, vol. 22, no. 85, pp. 1–16.
37. Azzopardi B.J. Phase separation at T-junctions. *Multiphase science and technology*, 2000, vol. 11, pp. 223–329.
38. Paes P.L.K., Yuan Xuan. Numerical investigation of turbulent kinetic energy dynamics in chemically-reacting homogeneous turbulence. *Flow, turbulence and combustion*, 2018, vol. 101, pp. 775–794.
39. Lee J.I., Ho L.-W., Saha P., Kazimi M.S. Numerical analysis of thermal striping induced high cycle thermal fatigue in a mixing tee. *Nuclear engineering and design*, 2009, vol. 239, no. 5, pp. 833–839.
40. Kuhn S., Braillard O., Niceno B., Prasser H.M. Computational study of conjugate heat transfer in T-junctions. *Nuclear engineering and design*, 2010, vol. 240, no. 6, pp. 1548–1557.
41. Lu T., Jiang P.X., Gou Z.J., Zhang Y.W., Li H. Large-eddy simulations (LES) of temperature fluctuations in a mixing tee with/without a porous medium. *International journal of heat and mass transfer*, 2010, vol. 53, pp. 4458–4466.
42. Sakowitz A., Mihaescu M., Fuchs L. Turbulent flow mechanisms in mixing T-junctions by large eddy simulations. *International journal of heat and fluid flow*, 2014, vol. 45, pp. 135–146.
43. Gauder P., Selvam P.K., Kulecovic R., Laurien E. Large eddy simulation studies on the influence of turbulent inlet conditions on the flow behavior in a mixing tee. *Nuclear engineering and design*, 2016, vol. 298, pp. 51–63.
44. Kickhofel J., Prasser H.M., Selvam P.K., Lauren E., Kulenovic R. T-junction cross-flow mixing with thermally driven density stratification. *Nuclear engineering and design*, 2016, vol. 309, pp. 23–39.
45. Lessani B., Zainali A. Numerical investigation of stably stratified turbulent channel flow under non-Boussinesq conditions. *Journal of turbulence*, 2009, vol. 10, pp. 1–25.
46. Zonta F., Onorato M., Soldati A. Turbulence and internal waves in stably stratified channel flow with temperature-dependent fluid properties. *Journal of fluid mechanics*, 2012, vol. 697, pp. 175–203.
47. Selavam P.K., Kulenovic R., Lairien E. Large eddy simulation on thermal mixing of fluids in a T-junction with conjugate heat transfer. *Nuclear engineering and design*, 2015, vol. 284, pp. 238–246.
48. Howard R.J., Serre E. Large-eddy simulation in a mixing tee junction: highorder turbulent statistics analysis. *International journal of heat and fluid flow*, 2015, vol. 51, pp. 65–77.
49. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A. Prospects of RANS models with multiparameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface. *The 6th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. August Harbin, China, 22–24, 2011. Vol. 2, pp. 787–791.
50. Georgiou M., Papalexandris M.V. Numerical study of turbulent flow in a rectangular T-junction. *Physics of fluids*, 2017, vol. 29, no. 6, pp. 065106-1–065106-17.
51. Kharlamov S.N., Islyamov I. Sh. Optimization of the liquid hydrocarbons pipeline transport with using a vortex effect and inductive heating of metallic additives. *The Proc. of the 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2012)*. Tomsk, Russia, September 21–24, 2012. pp. 1–6. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357803.
52. Jayaraju S., Komen E., Baglietto E. Suitability of wall-functions in large eddy simulation for thermal fatigue in a T-junction. *Nuclear engineering and design*, 2010, vol. 240, no. 10, pp. 2544–2554.
53. Tunstall R., Laurence D., Prosser R., Skillen A. Benchmarking LES with wallfunctions and RANS for fatigue problems in thermal-hydraulics systems. *Nuclear engineering and design*, 2016, vol. 308, pp. 170–181.

54. Tunstall R., Laurence D., Prosee R., Skillen A. Large eddy simulation of a T-junction with upstream elbow: the role of dean vortices in thermal fatigue. *Applied thermal engineering*, 2016, vol. 107, pp. 672–680.
55. Launder B.E., Sharma B.I. Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in heat and mass transfer*, 1974, vol. 1, no. 2, pp. 131–138.
56. Yakhot V., Orszag S.A., Thangam S., Gatski T.B., Speziale C.G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of fluids*, 1992, ser. A, vol. 4, no. 7, pp. 1510–1520.
57. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I. Numerical modelling of a vortical investigation of heat transfer in fields of centrifugal mass forces in elements of the power equipment with a curvilinear wall. *The 5th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Ulsan, Korea, October, 13–15, 2010. pp. 105–109.
58. Frank Th., Lifante C., Prasser H.-M., Menter F. Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX. *Nuclear engineering and design*, 2010, vol. 240, pp. 2313–2328.
59. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
60. Menter F.R. Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows. *NASA TM*, 1992, vol. 10, no. 103975, pp. 1–35.
61. Speziale C.G., Sarkar S., Gatski T.B. Modeling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach. *Journal of fluid mechanics*, 1991, vol. 227, pp. 245–272.
62. Beneš L., Louda P., Kozel K., Keslerova R., Štigler J. Numerical simulations of flow through channels with T-junction. *Applied mathematics and computation*, 2013, vol. 219, pp. 7225–7235.
63. Craft T.J., Launder B.E., Suga K. Development and application of the cubic eddy-viscosity model of turbulence. *International journal of heat and fluid flow*, 1996, vol. 17, pp. 108–115.
64. Naji H., Mompean G., Yahyaoui O. El. Evaluation of explicit algebraic stress models using direct numerical simulations. *Journal of turbulence*, 2004, no. 5, pp. 38–63.
65. Höhne T. Scale resolved simulations of the OECD/NEA-Vattenfall T-junction benchmark. *Nuclear engineering and design*, 2014, vol. 269, pp. 149–154.
66. Feng J., Frahi T., Baglietto E. Structure-based URANS simulation of thermal mixing in T-junctions. *Nuclear engineering and design*, 2018, vol. 340, pp. 275–299.
67. Kang D.G., Na H., Lee C.Y. Detached eddy simulation of turbulent and thermal mixing in a T-junction. *Annals of nuclear energy*, 2019, vol. 124, pp. 245–256.
68. Lenci G.A. *Methodology based on local resolution of turbulent structures for effective modeling of unsteady flows*. Ph.D. Thesis. Massachusetts, 2016. 200 p.
69. Madabhushi R.K., Vanka S.P. Large-eddy simulation of turbulence-driven secondary flow in a square duct. *Physics of fluids*, 1991, ser. A, vol. 3, no. 11, pp. 2734–2745.
70. Vasquez M.S., Métais O. Large eddy simulation of the turbulent flow through a heath square duct. *Journal of fluid mechanics*, 2002, vol. 453, pp. 201–238.
71. Piquet J. *Turbulent Flows: Models and Physics*. Berlin, Springer-Verlag, 1999. 762 p.
72. Bayode Owolabi. *Characterisation of turbulent duct flows: experiments and direct numerical simulations*. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2019. 141 p.
73. *Theories of Turbulence*. Eds. M. Oberlack, F.H. Buss. Wien, Springer-Verlag, 2002. 373 p.
74. Sagaut P., Cambon C. *Homogeneous Turbulence Dynamics*. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2018. 897 p.
75. Kharlamov S.N. Heat and mass transfer in facilities with a moving piston. *Heat transfer research*, 2007, vol. 38, no. 3, pp. 233–243.
76. Hammad K.J., Ötügen M.V., Arik E.B. A PIV study of the laminar axisymmetric sudden expansion flow. *Experiments in fluids*, 1999, no. 26, pp. 266–272.

Received: 1 March 2021.

Information about the authors

Sergey N. Kharlamov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitriy S. Fatyanov, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.984

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТРЕХМЕРНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАК МЕТОДА ИЗУЧЕНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ И ГАЗА

Закревский Константин Евгеньевич¹,
Geo-Model@yandex.ru

Попов Виктор Львович²,
vlp14788@gmail.com

¹ ПАО «НК «Роснефть»,
Россия, 117997, г. Москва, Софийская набережная, 26/1.

² АО «ТомскНИПИнефть»,
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

Актуальность исследования обусловлена широким применением геологического моделирования как метода изучения залежей нефти и газа. В настоящее время согласно методическим указаниям все проектные документы на разработку нефтегазовых месторождений должны выполняться на трехмерных геолого-технологических моделях.

Цель: определить основные этапы развития метода геологического моделирования и рассмотреть основные программные пакеты для геологического моделирования с целью установления их основных преимуществ и недостатков.

Объекты: геологическое моделирование как метод изучения месторождений в нефтегазовой геологии.

Методы: компиляция опубликованной литературы и интернет источников по теме истории методов геологического моделирования и программных пакетов геологического моделирования.

Результаты. Определены, впервые скомпилированы в единую работу и описаны основные этапы развития геологического моделирования как метода исследования нефтегазовой геологии. Первый этап в становлении геологического моделирования – заложение предпосылок его возникновения, которые заключались в осознании необходимости использования математического аппарата для описания природных геологических систем. Следующий этап, в ходе которого появилась новая наука – математическая геология – и её отрасль, называемая геостатистикой, пришелся на 1950–1970-е гг. К концу 1970-х гг. геостатистика добилась значительных успехов и был разработан математический аппарат для анализа и моделирования свойств в двумерном представлении. В 1980-х гг. появилось собственно трехмерное геологическое моделирование и активно развивались методы построения моделей и их использования для решения производственных задач. Основные исследовательские работы, касающиеся геологического моделирования, в этот период проводились в трех центрах геостатистики – в Стенфордском университете, в Парижском институте нефти и в Норвегии, в компании «NorskHydro». Следующим этапом можно назвать появление и внедрение в массовое использование коммерческих пакетов для трехмерного моделирования, таких как «Irap RMS», «Petrel», «Stratamodel» и многих других. Этот этап охватывает 1990-е и 2000-е гг. К его окончанию были разработаны большинство современных методов геологического моделирования и заложен тренд на интеграцию в геомодели результатов гидродинамических, сейсмических, геомеханических, тектонических и др. методов изучения нефтегазовых пластов, флюидов и разработки месторождений. С 2018 г. в ПАО «НК «Роснефть» ведется разработка корпоративного пакета для геологического моделирования «РН-Геосим», в этом пакете учтены все преимущества других пакетов и последние тенденции в области геологического моделирования.

Ключевые слова:

Методы нефтегазовой геологии, геологическое моделирование, пакеты геологического моделирования, история геологического моделирования, РН-Геосим.

Введение

В геологии нефти и газа в последние десятилетия геологическое моделирование стало одним из главных методов изучения месторождений. Если обратиться к статистике использования ключевых слов в статьях, опубликованных на портале общества инженеров нефтяников SPE [1], то в начале 1980-х гг. словосочетание «geological modeling» (геологическое моделирование) встречалось примерно в 50 % работ по геологии нефти и газа, к 2000 г. это число выросло примерно до 80 %, а с 2015 г. оно превышает 100 % (рис. 1). Таким образом, в настоящее время не только все работы по геологии нефтегазовых месторождений так или иначе затрагивают вопросы геологического моделирования, но есть опубликованные работы, которые рассматривают геологические модели в отрыве от геологии как таковой, например, касающиеся гео-

логически обоснованной адаптации динамических моделей. Следует отметить, что на портале OnePetro [1] собраны статьи, в первую очередь касающиеся вопросов геологии и разработки месторождений и в меньшей степени – вопросов поисков месторождений и анализа неопределенностей и рисков при оценке районов поисковых работ, и в настоящее время геологические модели все активнее используются на всех этапах разведки и эксплуатации месторождений [2–6].

Современные трехмерные геологические модели нефтегазовых месторождений представляют собой детальные трехмерные двойники месторождений, которые включают в себя результаты комплексных исследований всех геологических аспектов месторождений: данные геофизических исследований скважин; данные о геологии и седиментологии отложений, сла-

гающих залежь; данные палеонтологических, минералогических, литологических исследований каменного материала; результаты интерпретации данных сейсморазведки; в том числе и аналогов, и многие другие. Тем не менее первые численные геологические модели выдающегося советского геолога А.Б.

Вистелиуса, построенные в 1948–1949 гг. [7, 8], были одномерными и при помощи цепей Маркова воспроизводили только ритмичный характер литологии осадочных толщ. С тех пор геологическое моделирование прошло несколько этапов, которые рассмотрены в дальнейших разделах.

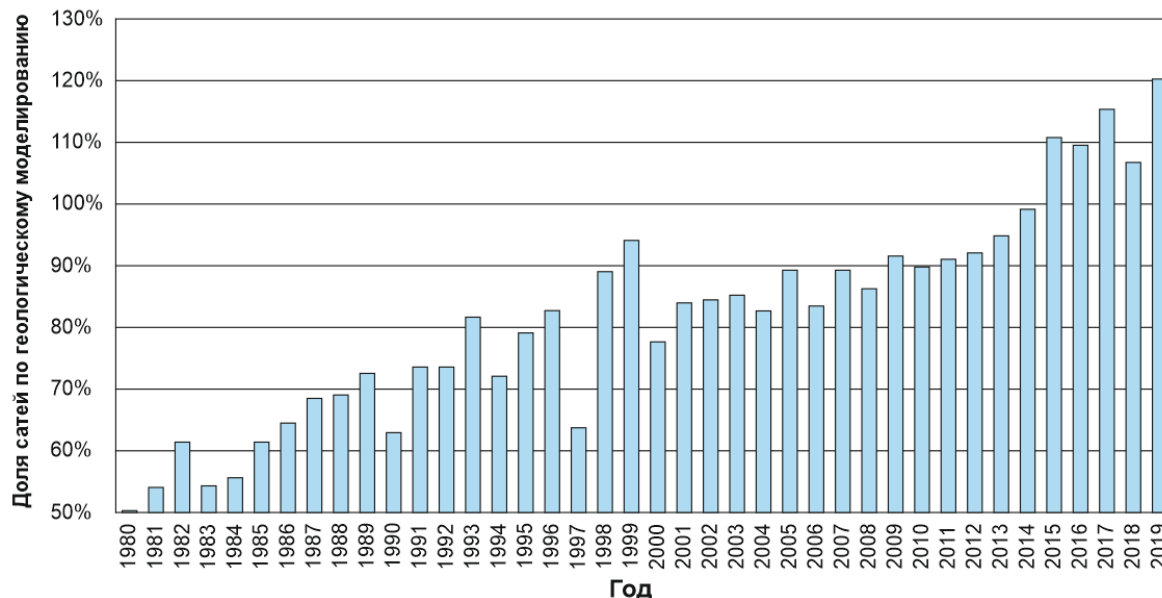


Рис. 1. Доля встречаемости словосочетания «geological model» в статьях по геологии нефти и газа на портале общества инженеров нефтяников [1]

Fig. 1. Fraction of papers containing word combination «geological modeling» of total geology papers on web portal of Society of Petroleum Engineers [1]

Формирование основ геологического моделирования (до 1980-х гг.)

Г.В. Лейбниц в 1680 г. предложил теорию образования Земли из огненно-жидкого изначального состояния. В последующие 100 лет эта теория активно развивалась в работах множества ученых, что стало свидетельством появления геологии как самостоятельной науки. Долгое время развитие научной геологии проходило только в рамках описательной парадигмы в силу ограничений, накладываемых религиозными догматами на интерпретацию результатов непосредственных наблюдений. Описательная парадигма господствовала в науках о земле до конца XIX в. и во многих отношениях сохранила свое влияние и в настоящее время.

Накопление значительного количества описаний геологических объектов и необходимость их систематизации и интерпретации привели к переходу к дедуктивной геологической парадигме. Как следствие – для полноты понимания геологических процессов и объектов возникла необходимость обращения к достижениям физики, химии, термодинамики, математики и других точных наук. На рубеже XIX–XX вв. в сфере внимания исследователей оказалось много геологических проблем, которые имели генетический характер: происхождение эрратических валунов, латеральная аккреция, ликвационное образование горных пород, происхождение нефти и др. [9], что и привело к постепенному вытеснению описательной пара-

дигмы из наук о земле. В это время целью геологии, равно как и других наук, становится, в соответствии со взглядом концепцией Де Бюффона [10], описание объекта, объяснение его происхождения и изучение истории развития.

С начала XX в. наблюдается интеграция знаний, технологий и методов точных наук в геологические дисциплины. По-видимому, одним из первых геологов, которые подняли вопрос важности количественного учета геологических признаков, был Э. Рейер [11]. Позднее эти идеи развивались в работах А. Харкера [12], Дж. Ричардсона [13], Ф.Ю. Левинсона-Лессинга [14] и У. Крамбейна [15]. Таким образом, в начале 1940-х гг. возникла необходимость в появлении науки, которая при помощи математических методов будет описывать природные геологические системы [9].

Основоположником новой отрасли наук о земле, названной математической геологией, можно назвать выдающегося советского геолога XX в. Андрея Борисовича Вистелиуса [16, 17]. В его работах конца 1940-х гг. сформулированы основные проблемы, решением которых эта новая наука и призвана заниматься. В 1948–1949 гг. были опубликованы работы А.Б. Вистелиуса [8, 16], в которых на основе цепей Маркова решались вопросы одномерного моделирования процессов осадконакопления и обработки данных литологии. Эти работы можно назвать первыми математическими геологическими моделями, поло-

жившими начало использованию геологических моделей для описания природных объектов [17].

Вслед за этим началось интенсивное развитие точных методов в геологии. Так, в 1960-х гг. сформировался особый раздел математической геологии, называемый геостатистикой, который занимается изучением взаимоотношения случайных величин в пространстве и проблемой их интерполяции, экстраполяции и анализа. В 1962 г. вышла в свет книга Ж. Матерона «Основы прикладной геостатистики» [18], заложившая основы геостатистики как самостоятельной научной отрасли. В 1968 г. книга была издана на русском языке. Предложенный Ж. Матероном способ описания пространственной изменчивости случайных величин посредством вариограмм стал основой всех распространенных методов линейной геостатистики. Эта базовая система уравнений пространственной регрессии с ковариационной функцией была названа «кригингом» в честь геолога Д.Г. Криге, служившего инженером на золоторудном месторождении Витвотерсранд и решавшего задачи подсчета запасов [19].

В 60–70-х гг. XX в. развитие геостатистики было сосредоточено в двух научных центрах – в Стенфордском университете и в центре геостатистики в Париже. В 1970-е гг. силами таких исследователей, как А. Журнела, Ч. Хужбрегтс, П. Делфинер, Ж. Чилеса и некоторых других, были разработаны новые методы нелинейной геостатистики, и развитие науки продолжилось [20]. Однако, как отмечает сам Ж. Матерон, в те годы были существенные проблемы, которые мешали развитию геологического моделирования и его внедрению в исследование реальных геологических объектов [21]. Одна из главных трудностей заключалась в слабом междисциплинарном взаимодействии геологов и математиков, что существенно замедляло развитие геостатистики. Так, математики, располагая всем необходимым исследовательским инструментарием (случайной функцией и пр.), предпочитали избегать его применения к реальным геологическим объектам. Сложность и неоднородность реальных природных объектов не позволяла понимать их природу без специальных знаний геологии и смежных дисциплин. В свою очередь, геологи, понимающие строение залежей полезных ископаемых и проблемы, связанные с их изучением, находили абстрактные статистические модели избыточно сложными для понимания. Такого рода препятствия для развития геологического моделирования и геостатистики были в конце концов преодолены при помощи развития вычислительной техники и программных пакетов, которые производили сложные математические расчеты и позволяли геологам их использовать. При этом применение аппарата геостатистики дополнялось интуитивным пониманием строения и свойств природных объектов [21].

К концу 1970-х гг. геостатистика достигла существенных успехов в применении для двумерного моделирования и картирования свойств в залежах, и в последней четверти XX в. достижения этой науки успешно применялись в нефтяной геологии [22]. Од-

ним из главных методов интерполяции пространственных данных стал кригинг и его производные.

Появление трехмерного геологического моделирования и его внедрение в нефтегазовую геологию (1980-е и ранние 1990-е гг.)

Событием, ознаменовавшим начало следующего этапа развития геологического моделирования, можно назвать появление работы Е. Делхома и Д. Гианессини [23] по исследованию месторождения Hassi-Messaoud в Алжире. В этой работе представлены результаты исследования, названного авторами «описанием глубинной структуры коллекторов» («in depth description of the sandstone reservoir anatomy»), но, по сути, являвшегося первым описанным в науке опытом пространственного геологического моделирования [22].

На основе описания взаимоотношений и характеристик пород была создана концепция индивидуализированных седиментологических единиц, которая и была положена в основу модели. Авторы выделили три главных литотипа: коллектор хорошего качества, слагающий песчаные тела, которые находились в объеме коллектора худшего качества, представленного более мелкозернистыми песчаниками, они были объединены для целей моделирования. Толща коллекторов вмещала в себя глинистые пропластки, которые имели прерывистый характер (рис. 2). Результаты исследований были объединены в компьютерной геологической модели, которая представляла собой набор вертикальных сечений пласта с распределенными в нём вышеуказанными литотипами. Основой для модели послужили интерпретация параметров глинистых пропластков по результатам геофизических исследований скважин и результаты изучения геологических разрезов, выходящих на поверхность. При помощи построенной геологической модели проводилось изучение характера заводнения залежей, влияния геологических параметров на поведение пластового давления и появления зон выделения свободного газа.

Эта работа вызвала интерес у многих исследователей, и, как следствие, в начале 1980-х гг. сформировались три главных научных центра геомоделирования [24]: Стенфордский центр прогноза месторождений SCRF (Stanford center for reservoir forecasting), который был основан под руководством А. Журнела и К. Дойча, Центр геостатистики во Французском институте нефти (IFP) и Центр геологического моделирования под руководством Х. Халдорсена и Х. Омре в норвежской компании NorskHydro.

Дальнейшая история геологического моделирования тесно связана с развитием программных пакетов для построения 3D моделей. Наиболее значимые из этих пакетов рассмотрены далее (пакеты для 2D моделирования в данной статье не рассматривались).

С начала 1980-х гг. во французском институте нефти разрабатывались программные пакеты «BluePack 3D» и «HereSim 3D», предназначенные для геологического моделирования и решения прикладных задач нефтяной геологии. «BluePack 3D» – это программа, разработанная как интерактивный пакет,

предназначенный для работы с данными большого объема (например, сейсмическими профилями) и для проведения геостатистического анализа этих данных [25, 26]. Непосредственно для создания моделей

предназначался пакет «HereSim 3D», в котором была возможность литофициального и петрофизического моделирования и встроенный гидродинамический симулятор (рис. 3) [27].

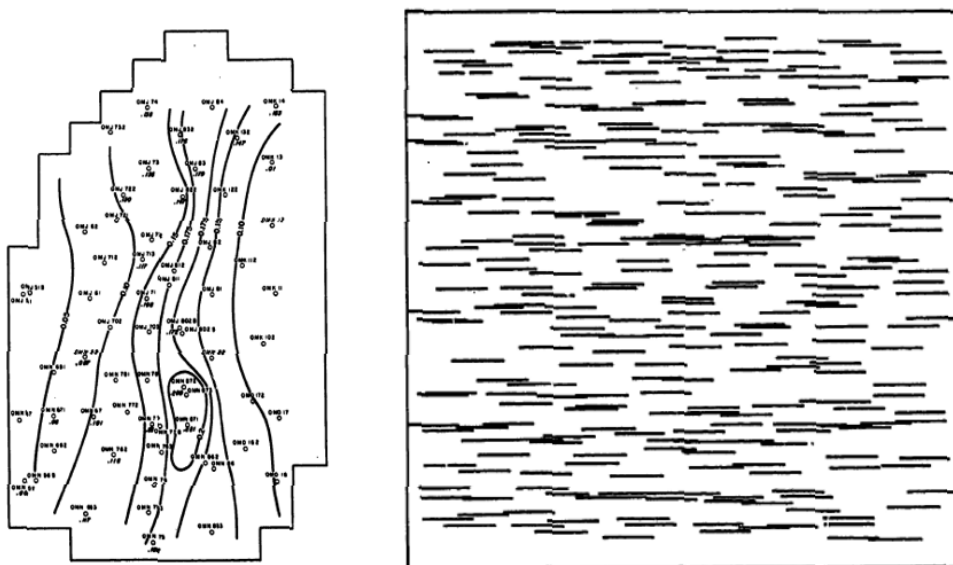


Рис. 2. Карта месторождений с выбранными сечениями для моделирования (слева) и результат компьютерного моделирования глинистых пропластков в сечении (справа). Заимствовано в [23]

Fig. 2. Reservoir map with intersections (left) and intersection example of shale layers model (right). From [23]

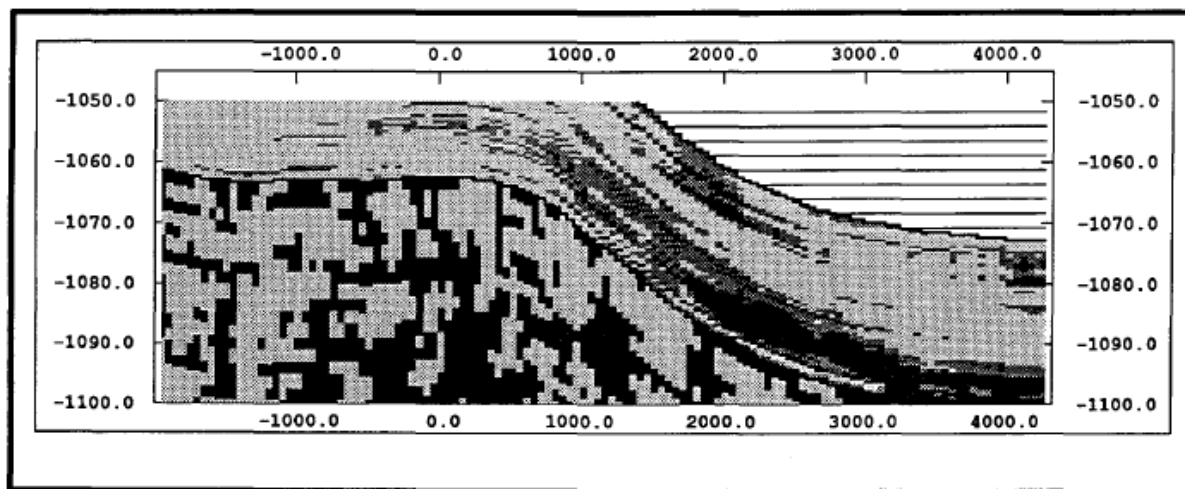


Рис. 3. Пример вертикальной секции литофаций геологической модели, построенной в программном пакете «HereSim 3D» (1990 г.) [27]

Fig. 3. Example of the vertical lithofacies section in geology model built in «HereSim 3D» package (1990) [27]

В центре Стенфордского университета под руководством А. Журнела и К. Дойча были разработаны методы стохастического и детерминистического моделирования на основе геостатистики. Большой вклад Стенфордского центра в геологическое моделирование заключается в создании бесплатной и открытой библиотеки «GSLIB», при помощи которой любой специалист имеет возможность решать производственные задачи, не обладая экспертными знаниями в геостатистике. Библиотека «GSLIB» создавалась в Стенфордском университете на протяжении 12 лет и была опубликована в 1992 г. Она охватывает все области геостатистики, такие как количественная оцен-

ка изменчивости (вариограммы), алгоритмы линейной геостатистики (кригинг), стохастические алгоритмы [28, 29].

Специалисты норвежского центра геологического моделирования в то же время под руководством Хеннинга Омре достигли больших успехов в разработке и применении методов объектного моделирования (рис. 4) и методов анализа неопределенностей [30–32]. Их работы были основаны на изучении месторождений формации BRENT, образованных в флювиальных условиях осадконакопления, для которых объектные методы моделирования подходили оптимально [4, 33].

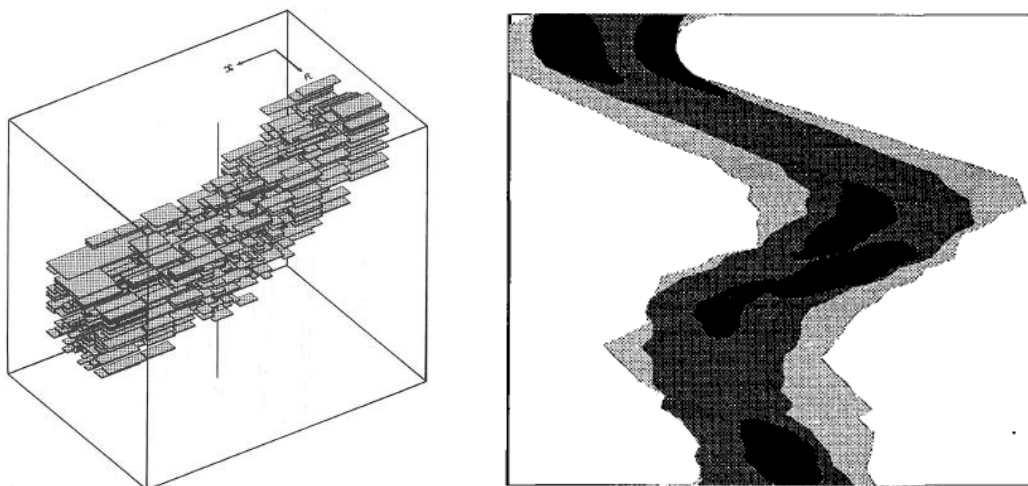


Рис. 4. Моделирование трехмерного распределения пропластков глин в пласте (слева) [30], объектная модель мультифациальных флювиальных отложений [31]

Fig. 4. 3D shale distribution model in reservoir (left) [30]. Object multifacies model of fluvial system [31]

Таким образом, к концу 1980-х и началу 1990-х гг. были заложены теоретические и практические основы массового использования трехмерных геологических моделей в нефтегазовой геологии, которое началось в 90-х гг. XX в. [17]. Первые пакеты геологического моделирования не предназначались для работы на персональных компьютерах и поэтому были сложны в использовании при решении производственных задач геологов-нефтяников. Тогда уже появились программные пакеты геологического трехмерного моделирования, такие как «Stratamodel», «STORM» (алгоритмы которого впоследствии были интегрированы в ПО «Irap RMS»), «GOCAD» и другие, которые стали драйверами создания геологических моделей. Они будут рассмотрены в следующем разделе.

Становление и развитие геологического моделирования как основы для изучения и оценки залежей нефти и газа (конец 1990-х и 2000-е гг.)

Дальнейшее развитие геологического моделирования неразрывно связывается с разработкой и улучшением коммерческих программных пакетов. Это стало возможным по нескольким причинам [2]:

- были разработаны теоретические основы математических принципов и алгоритмов, использующихся при построении трехмерных геологических моделей;
- были достигнуты существенные успехи в смежных областях – в обработке и интерпретации 3D сейсморазведки, а также в развитии принципов сиквенс-стратиграфии;
- увеличилась производительность рабочих станций и персональных компьютеров, позволяющая выполнять сложные математические расчёты за разумное время; кроме того, разработчики ПО для геологического моделирования постепенно конвертировали свои пакеты и делали возможным их использование на персональных компьютерах и в доступных для пользователей операционных системах;

- появились успешные коммерческие программы, которые обеспечивали процесс построения трехмерных моделей (анализ данных, стратиграфическая корреляция, визуализация и др.);
- был накоплен большой объем данных и опыт построения двумерных моделей в рамках подсчётов запасов, проектирования разработки, поисков и разведки месторождений нефти и газа.

Пионерами в создании полноценных программных пакетов можно назвать несколько организаций: консорциум «gOcad», «STRATAMODEL inc», «Landmark Graphics», «Radian», «Zycor», «Dynamic Graphics», «CGG-Petrosystems», «Geomath», «Geomatic», «Intera» и некоторые другие [34]. Впоследствии появились и другие продукты, в том числе и отечественные (рис. 5).

Первоначально пакеты для геологического моделирования требовали больших вычислительных мощностей и работали под управлением операционных систем семейства «UNIX» на вычислительных станциях большой мощности. Лишь к концу 1990-х гг. геологическое моделирование стало массово доступным в наиболее распространенной операционной системе «Microsoft Windows» и на рабочих станциях, которые использовались в нефтяных компаниях.

Одной из первых программ для геологического моделирования стал выпущенный в 1988 г. программный пакет «STRATAMODEL» [35]. Это была система для построения трехмерных геологических ячеистых моделей. Геологические модели, построенные в первых версиях ПО «STRATAMODEL», уже позволяли решать многие производственные задачи нефтяной отрасли [35]:

- подсчёт запасов углеводородов и вычисление комплексных атрибутов по ячейкам со сложными математическими и логическими операциями;
- обобщение данных по различным месторождениям и залежам;
- планирование уплотняющего и эксплуатационного бурения;

- проектирование и планирование применения методов улучшения нефтеотдачи;
- поиск и разведка новых залежей;
- получение основы для гидродинамического моделирования.

Для воспроизведения природных систем в «STRATAMODEL» была разработана геостратиграфическая ячеистая модель, которая отличалась от традиционной на тот момент регулярной ячеистой модели (рис. 6).

1988-2000 гг.	2000-2010 гг.	2010-2020 гг.
STRATAMODEL, GOCAD, FLOWGRID, RML, STORM, Irap RMS, HERESIM, EARTHVISION, PANTERRA, PETREL, GEOQUEST, FRACMAN	GEOCAP, JOA-JEWEL (JEWELSUITE), IGEOSS, DECISION SPACE, CMG-BUILDER, DV-GEO/ (GEOPLAT PRO-G), EUCLID, ПК НЕДРА	NAVIGATOR GEOLOGY DESIGNER, PH-ГЕОСИМ, АРТТЕО

Рис. 5. Хронология появления значимых пакетов геологического моделирования. Синим цветом выделены отечественные разработки (заимствовано из [5] с дополнениями)

Fig. 5. Significant packages for geology modelling occurrence chronology. Russian packages are blue. From [5] with additions

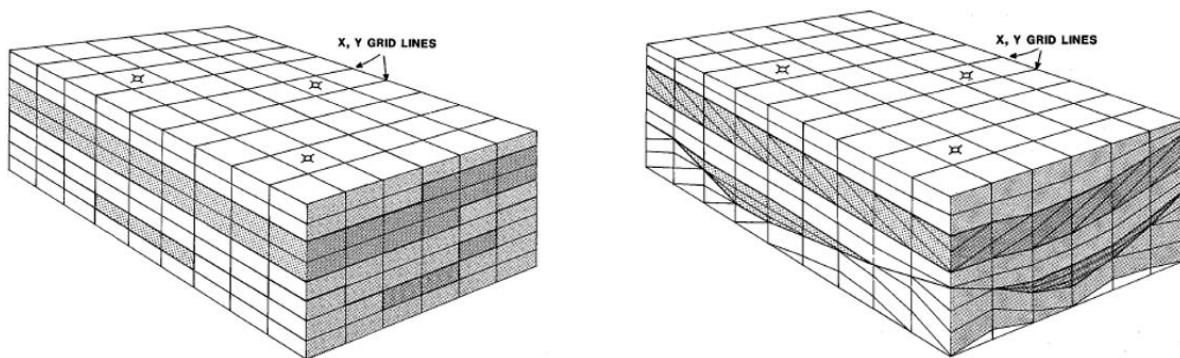


Рис. 6. Слева регулярная ячеистая модель, справа геостратиграфическая ячеистая модель в ПО «STRATAMODEL» (1988 г.). Заимствовано в [35]

Fig. 6. Orthogonal cellular model (left) and stratigraphic geocellular model (right) in geology package «STRATAMODEL» (1988). From [35]

Основные особенности геостратиграфической модели заключаются в возможности воспроизводить внутреннее геологическое строение пластов, которое позволяет использовать методы геостатистики для моделирования распределения свойств в пространстве и последующего гидродинамического моделирования.

Приблизительно в то же время (1993 г.) появился программный пакет «STORM» от норвежской компании Odin AS [36]. А в 1995 г. с использованием этих разработок компания «Geomatic AS» выпустила первый коммерческий интегрированный пакет для трехмерного геологического моделирования и визуализации – «Irap RMS» [37]. Первая коммерческая версия 5.0 позволяла строить стохастические трехмерные геологические модели нефтегазовых залежей для подсчета запасов и расчета профилей добычи скважин. Эти геомодели строились на основе данных геологического изучения обнажений, данных ГИС и их

интерпретации в скважинах, представлений о геологическом строении пластов, результатов испытаний и гидродинамических исследований скважин и других необходимых данных, которые представлялись в цифровом формате [36]. В 1997 г. компанией «Smedvig Technologies», которая возникла в результате поглощения и слияния компаний «Odin AS» и «Geomatic AS», в «Irap RMS» была интегрирована функциональность ПО «STORM», а именно стохастическая фациальная модель, стохастическое моделирование пространственных распределений ФЕС и технология «Rescaling».

Отличительной особенностью «Irap RMS» стали углубленная работа с объектными моделями и анализ неопределенностей на основе стохастических моделей. Кроме того, возможность построения многоуровневой иерархической структуры позволила в одной геологической модели объединять детерминистический и стохастический подходы, что стало мощ-

ным инструментом для изучения и оценки нефтегазовых залежей [38, 39]. Объектные модели были разработаны для более детального моделирования флювиальных отложений и опробованы на многих месторождениях Северного моря, оператором которых была компания «Statoil».

В 1999 г. в результате слияния двух крупных компаний – «Smedvig Technologies AS» и «Multi-Fluid ASA» – образовались компания и бренд «Rohar», которая активно продолжила развитие программного обеспечения для геологического и гидродинамического моделирования. В 2000 г. была выпущена версия «Igar RMS» 6.0, в которой помимо других улучшений были интегрированы менеджер графов моделирования и модуль проектирования траекторий скважин [37]. В 2003 г. были созданы модули для анализа неопределенностей и интегрированный гидродинамический симулятор («RMS Uncertainty» и «RMS Flowsim»). Поддержка моделирования трещиноватости появилась в версии 8 в 2006 г., а в 2008 г. реализована технология локального обновления стохастических моделей. В 2011 г. вышла обновленная версия пакета с сокращенным названием «RMS» и новыми возможностями по работе с 3D и 4D сейсмическими данными. А в 2012 г. путем интеграции технологии «GRAVA» был добавлен функционал для сейсмической инверсии. В декабре 2016 г. вышло ПО «RMS» версии 10, в которой была добавлена возможность автоматизации «Big Loop» для построения интегрированных моделей.

В настоящее время ПО «RMS» является одной из самых популярных программ для геологического моделирования в мире.

В 1996 г. группа специалистов, участвовавших в создании пакета «Igar RMS», выделилась в компанию «Technoguide», которая в 1998 г. выпустила первую версию своего пакета для геологического моделирования для операционной системы «Microsoft Windows» под названием «Petrel». Отличительной особенностью этого пакета была удачная реализация геометрии угловой точки, которая позволяла строить каркас сложных геологических моделей с учетом особенностей осадконакопления и с хорошей на тот момент визуализацией данных. Это, а также доступность пакета для работы в среде «Microsoft Windows» было основной причиной, благодаря которой пакет «Petrel» сразу обрел большую популярность, и в 2002 г. компания «Technoguide» была куплена компанией «Schlumberger» [40].

Во второй версии 2002 г. появился новый менеджер графов моделирования, который был очень прост в использовании и оптимально подходил для работы специалистам-геологам, не имевшим навыков программирования. В 2004 г. были внедрены модули для многовариантного моделирования и построения графов моделирования. В 2005 г. появилась его расширенная версия для анализа неопределенностей и оценки рисков. Построение модели трещиноватости появилось в версии «Petrel» 2007 г. [41], а в 2009 г. был внедрен модуль многоточечной статистики [40]. Одним из важных преимуществ ранних версий

«Petrel» являлась возможность интерпретации данных сейсморазведки и проведения атрибутивного анализа непосредственно в геологическом проекте без применения стороннего или специализированного ПО. К 2008 г. уже была реализована возможность структурной интерпретации, выделения разломов и расчета порядка 40 сейсмических атрибутов.

Поддержка инжиниринга пласта в виде модулей «Petrel RE» впервые была внедрена в версии «Petrel 2003SE», в которой были встроены поддержка симулятора линий тока «Front Sim» и модуль анализа проницаемости разломов «Flo Grid», а в 2004 г. появилась возможность интеграции с гидродинамическим симулятором «ECL» (впоследствии переименованным в «ECLIPSE»). В дальнейшем, до 2010 г., появились возможности для адаптации моделей на историю разработки и оценки неопределенностей с учетом результатов гидродинамического моделирования. В целом к 2010 г. программный пакет «Petrel» объединил в себе все доступные на тот момент функции по интерпретации сейсмических данных, построению геологических моделей терригенных и трещиноватых коллекторов, а также загрузку и использование гидродинамического моделирования. После 2010 г. развитие «Petrel» и других программ для моделирования идет по пути интеграции геологического, геомеханического, гидродинамического и бассейнового моделирования [40, 42, 43].

Из других программных пакетов, которые у геологов-нефтяников не пользуются широкой популярностью, но остаются востребованными, можно назвать «gOcad», изначально созданный одноименным консорциумом, «Jewel Suite», «Decision Space».

Программный продукт «gOcad» создавался с конца 1980-х гг. [44] и предназначался для моделирования как рудных, так и нефтегазовых месторождений. В дальнейшем он был объединен с программным продуктом «SKUA» компании «Paradigm» и сейчас развивается под названием «GOCAD SKUA».

Программный комплекс «JEWEL» от компании «JOA» появился в середине 2000-х гг. В дальнейшем его разработку продолжила компания «Baker Hughes» под названием «Jewel Suite». Отличительной особенностью этого пакета можно назвать технологию «tri-mesh», которая позволяет создавать каркасы моделей со сложной разломной и солянокупольной тектоникой, а также возможность совмещения с пакетом геомеханического моделирования «Jewel Suite Geomechanics». Другим полноценным программным комплексом для геологического моделирования является пакет «Decision Space», создание которого началось в середине 2000-х гг. компанией «Halliburton». Первоначально он имел ограниченный функционал, и только в 2010-х гг. появились необходимые модули для создания полноценных 3D моделей. В настоящее время пакеты «Jewel Suite» и «Decision Space» используются внутри указанных компаний для построения трехмерных геологических моделей нефтегазовых залежей.

Дополнительно следует отметить программный пакет «Fracman» компании «Golden». Этот пакет раз-

рабатывался как узкоспециализированный для создания геологических моделей трещиноватых коллекторов и изначально предназначался для нужд гидрогеологии. Однако отличная проработка функционала, необходимого для моделирования дискретных сеток трещин (defined fracture network, DFN), нашла применение и для нефтегазовых месторождений [45], особенно во времена, когда другие пакеты не имели собственных модулей для создания моделей трещиноватости.

Отечественные пакеты геологического моделирования

Интересна судьба отечественных разработок в области геологического моделирования. Из них следует упомянуть: 1) разработанные в г. Тюмени «Euclid-3», «PanTerra» и ПК «Недра»; 2) созданный в Центральной геофизической экспедиции пакет «DV-Geo», который в настоящее время развивается под названием «Geoplat Pro-G»; 3) сравнительно новый модуль геологического моделирования пакета «tNavigator» от компании RFD, названный «Дизайнер геологии»; 4) создаваемый корпоративный пакет для геомоделирования компании Роснефть «РН-Геосим».

Программная платформа «PanTerra» была создана в ОАО «СибНИИИМП» в г. Тюмени. Разработка началась в 1993 г. Патент зарегистрирован на ОАО «СибНИИИМП», в нем указаны 5 авторов: Ш.К. Раемгулов, С.В. Соколов, А.А. Аристов, В. Кондрашев и А.И. Филиппов. В 1995 г. вышла первая рабочая версия на платформе «Paradox». В 1998–1999 гг. начался переход на систему «SQL» – так называемая «PanTerra-II». Указанная СУБД использовалась помимо «СибНИИИМП» в некоторых других научно-исследовательских институтах: «РНЦ» («Лукойл»), «СургутНИПИнефть», а также в «ТюмГНГУ». До 2013 г. данная версия СУБД активно использовалась в ОАО «СибНИИИМП», но с ликвидацией института активное использование практически прекратилось. В настоящее время СУБД «PanTerra-II» продолжает использоваться и развиваться в Тюменском Индустриальном Университете, где работает один из ее авторов.

ПК «Euclid-3» был создан в ООО «Сибтехнефть» также в г. Тюмени в конце 1990-х гг. Программа обладала функционалом для создания и визуализации трехмерных геологических моделей и их экспорта для гидродинамического моделирования. ПК «Euclid-3» использовался в ООО «Лукойл-Инжиниринг» и ООО «Недра-Консалт».

Ещё один пакет, созданный в г. Тюмени, назывался ПК «Недра». Он был разработан группой авторов под руководством кандидата технических наук А.Ю. Батурина [46] в начале 2000-х гг. Этот пакет состоял из набора модулей, необходимых для построения геологических моделей: картопостроения, анализа и обработки результатов интерпретации ГИС, расчёта и операций с кубами параметров, ремасштабирования сетки и выгрузки графических материалов. В 2007 г. права на ПК «Недра» были переданы в АО «Сургутнефтегаз». В настоящее время программный комплекс фактически не развивается, но его отдель-

ные элементы вошли в состав пакета «Техсхема», который предназначен для гидродинамического моделирования. С 2003 г. с использованием ПК «Недра» были построены трехмерные модели более 50 месторождений Западной Сибири, Ненецкого автономного округа и Республики Якутия, в том числе Федоровского, Рогожниковского, Талаканского и др.

С конца 1990-х гг. самостоятельные работы по созданию пакета для геологического моделирования велись также в АО «Центральная геофизическая экспедиция» (ЦГЭ). Пакет получил название «DV-Geo», и с его помощью производилось построение геологических моделей различных месторождений по проектам, выполняемым АО «ЦГЭ». В частности, с использованием этого пакета была построена единая геологическая модель уникального Самотлорского месторождения, включающая в себя более 16 тысяч скважин. С 2015 г. развитие этого пакета идет под названием «Geoplat Pro-G» в компании «Грид Поинт Дайнамикс». В этом программном продукте реализован полный функционал, необходимый для построения трехмерных геологических моделей и подсчёта запасов [47]. В настоящее время «Geoplat Pro-G» используется в ряде компаний для построения геологических моделей и активно продолжает развиваться.

С 2012 г. в компании ООО «Rock Flow Dynamics» (RFD) ведутся работы по созданию модуля для геологического моделирования на основе платформы «tNavigator» под названием «Дизайнер геологии». Первая версия модуля вышла в 2013 г. Последние версии этого пакета обладают полным функционалом для построения трехмерных геологических моделей со сложными сетками и имеют глубокую интеграцию с гидродинамическим симулятором «tNavigator». В настоящее время проект очень активно развивается и включает в себя помимо распространённых методов построения моделей и некоторые оригинальные, например, перспективный алгоритм «Amazonas» на основе машинного обучения.

В целом отечественные пакеты для геологического моделирования по отношению к зарубежным аналогам имеют вторичный характер и копируют их функционал с доработками и изменениями, необходимыми для работы с учетом Российских требований и сложившихся традиций. Однако в области экспертизы трехмерных геолого-гидродинамических моделей отечественные разработчики программного обеспечения опережают зарубежные программные продукты. В середине 2000-х гг. появились отечественные пакеты для экспертизы моделей, самые известные из которых – ПК «АТЛАС-Экспертиза» и ПК «Сфера. Ассистент», который изначально создавался под названием ПК «Траст», а также «TimeZYX». Последний пакет в настоящее время практически не используется, а созданный ООО «Тюменский институт нефти и газа» ПК «АТЛАС-Экспертиза» пользуется популярностью в нефтегазовых компаниях для проведения экспертизы геолого-гидродинамических моделей и продолжает активно развиваться. Полный функционал интегрированных в ПО пакетов для экспертизы, который позволяет проводить автоматизированный анализ

качества геолого-гидродинамических моделей, в зарубежных пакетах пока недостаточно реализован [48].

С 2018 г. в ООО «РН-БашНИПНефть» с участием авторов данной статьи ведется разработка корпоративного программного пакета для геологического моделирования компании ПАО «НК «Роснефть» «РН-Геосим». Настоящий исторический обзор подготовлен в ходе работы над этим программным продуктом для того, чтобы проанализировать причины успехов и неудач, допущенных при разработке и развитии существующих программных продуктов, и учесть их в перспективном отечественном программном пакете для геомоделирования. Таким образом, «РН-Геосим» ориентирован в первую очередь на решение проблем, встречающихся в реальном процессе построения геологических моделей в нефтяных компаниях, таких как объединение программных пакетов моделирования в универсальные комплексы, автоматизация процессов построения моделей при помощи графов моделирования, многопользовательская работа и развитие систем интеллектуальной поддержки [3]. Версия «РН-Геосим 1.0» выпущена в конце 2020 г. и уже имеет весь необходимый инструментарий для построения трехмерных геологических моделей, в том числе основанный и на оригинальных методах и алгоритмах, таких как спектральное моделирование и др. Из существенных отличий «РН-Геосим» от существующих пакетов стоит отметить наличие тесной интеграции с другими корпоративными продуктами, такими как «РН-КИН», «РН-КИМ», а также ориентированность алгоритмов импорта, экспорта и обработки данных на отечественные требования и задачи.

Заключение

Геологическое моделирование за последние 70 лет прошло несколько этапов развития от простейших одномерных моделей осадочных толщ до комплексных геолого-гидродинамических моделей резервуаров, учитывающих все доступные для описания аспекты строения и изменчивости свойств горных пород, флюидов, напряженного состояния и строения

резервуаров. Первая одномерная геологическая модель ритмических толщ была построена советским геологом А.Б. Вистелиусом в 1948–1949 гг., а в 1978 г. была построена первая трехмерная геологическая модель Алжирского месторождения Hassi-Messaoud. В 1990-х гг. с появлением пакетов для трехмерного геологического моделирования началось активное внедрение геомodelей в научную и производственную деятельность в нефтяной геологии. В это время были разработаны основные методические подходы к построению моделей, определены этапы и стадии их построения. В 2000-х гг. геологическое моделирование стало основным инструментом геологов для исследования и оценки залежей нефти и газа вместе с переходом программных пакетов на персональные компьютеры. В этот период развитие шло по пути интеграции геомodelей с сейсмическими данными, разработки методов многоточечной статистики, моделирования трещиноватости, повышения удобства инструментов и улучшения визуализации данных. Кроме того, в 2000-х гг. геологические модели в виде основы для гидродинамических расчетов стали широко использоваться для проектирования разработки месторождений. В настоящее время в процесс построения геомodelей активно внедряются модули для бассейнового, тектонического, геомеханического моделирования, и активно ведутся исследования по улучшению интегрированных проектов за счёт использования комплексных геолого-гидродинамических моделей. Самыми последними трендами в пакетах геомоделирования стали нововведения, связанные с технологиями машинного обучения, облачного хранения данных и многопользовательских режимов.

Авторы выражают глубокую признательность специалистам, которые помогли в написании и редакции текста настоящей статьи и внесли большое количество ценных замечаний и уточнений, которые позволили существенно улучшить результат работы: Владимиру Анатольевичу Аксарину, Леониду Евгеньевичу Шмарьяну, Анатолию Владимировичу Рыбникову, Наталье Валентиновне Калашиковой и Юлии Викторовне Литвиненко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The SPE online library of technical literature for the oil and gas industry. URL: <https://onepetro.org> (дата обращения 05.09.2020).
2. Закревский К.Е.: Геологическое 3D моделирование. – М.: Изд-во «Маска», 2009. – 376 с.
3. К вопросу о перспективах создания корпоративного программного обеспечения геологического моделирования / М.И. Саакян, К.Е. Закревский, А.Е. Лепилин, Ч.Р. Ахметов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 11. – С. 50–54.
4. Cosentino L. Integrated reservoir studies. – Paris: Editions Technip, 2001. – 310 p.
5. Perrin M., Rainaud J.-M.: Shared earth modeling. Knowledge driven solutions for building and managing subsurface 3D geological model. – Paris: Editions Technip, 2013. – 399 p.
6. Predictive geologic and geomechanical models for pad development in the Delaware basin. URTEC-2020-3309-MS / R. McIntyre, J. Gaines, S. Gardner, M. Mediani, C. Hammerquist, X. Li, M. Paryani, N. Umholtz // SPE/AAPG/SEG Unconventional resources technology conference, 2020. URL: <https://onepetro.org/conference-paper/URTEC-2020-3309-MS> (дата обращения 05.09.2020).
7. Вистелиус А.Б. Простейшие задачи математической обработки в литологии и пути их решения // Литологический сборник ВНИГРИ. – 1948. – № 1. – С. 125–130.
8. Вистелиус А.Б. К вопросу о механизме слоеобразования // Докл. АН СССР. – 1949. – Т. 65. – № 2. – С. 191–194.
9. Вистелиус А.Б. Основы математической геологии (определение предмета, изложение аппарата). – Л.: Наука, 1980. – 389 с.
10. Leclerc J.L. Histoire Naturelle, generale et particuliere. V. I, II. – Aux DeuxPons. Sanson a. Compagnie, 1785. – 332 p.
11. Reyer E. Beitrage zur Physik der Eruptionen und der Eruptivgesteine. – Vienna, 1877. – 225 p.
12. Harker A. The natural history of igneous rocks. – London: Methuen a. Co, 1909. – 384 p.
13. Richardson W.A., Sneesby G. The frequency distribution of igneous rocks // Miner. Magaz. a. Journ. Miner. Soc. – 1922. – V. 19. – № 97 – P. 190–207.
14. Левинсон-Лессинг Ф.Ю. О пределах и подразделениях семейства андезитов // Вестн. Геол. ком. – 1924. – № 6. – С. 723–735.
15. Krumbain W.C. The probable error of sampling sediments for mechanical analysis // Amer. J. Sci. – 1934. – V. 227. – № 159. – P. 204–214.

16. Merriam D.F. Andrei Borisovich Vistelius: a dominant figure in 20th Century mathematical geology // Natural resources research. – 2001. – V. 10. – № 4. – P. 297–304.
17. Dubrule O., Damsleth E. Achievements and challenges in petroleum geostatistics // Petroleum Geoscience. – 2001. – V. 07. – P. 1–7.
18. Matheron G. Traite de geostatistique applique. – Paris: Editions Technip, 1962. – 409 p.
19. Krige D. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand // Journal of the Chemistry, Metallurgy and Mining Society of South Africa. – 1952. – № 8. – P. 119–139.
20. Merriam D.F., Davic J.C. Geologic modeling and simulation of sedimentary systems. – New York: Springer-science+business media, 2001. – 351 p.
21. Matheron G., Kleingeld W.J., The evolution of geostatistics // 20th international symposium on the application of computers and mathematics in the mineral industries. – Johannesburg, 1987. – V. 3. – P. 9–12.
22. Dubrule O. Geostatistics for seismic data integration in earth models. – Tulsa: European association of geoscientists and engineers, 2003. – 281 p.
23. Delhomme E., Giannesini J. New reservoir description techniques improve simulation results in Hass-Messaoud field Algeria. SPE 8435 // 54th SPE Annual Technical conference and Exhibition. – Dallas, USA, 1979. URL: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-8435> (дата обращения 05.05.2020).
24. Dubrule O. Geostatistics in petroleum geology. – Houston: American Association of Petroleum Geologists, 1998. – 250 p.
25. Renard R.D. Bluepack 3-D and its use in the petroleum industry // 5th SPE petroleum computer conference. – Denver, USA, 1990. – P. 197–204.
26. 3D reservoir visualization. SPE 22301-PA / B. Van, J. Pajon, P. Joseph, J.M. Chautru // SPE petroleum computer conference. – Dallas, USA, 1991. – P. 1310–1314.
27. Touffait Y., Beucher H. A 3D integrated structure for computer-aided reservoir characterization. SPE 20348 // 5th SPE petroleum computer conference. – Denver, USA, 1990. – P. 171–180.
28. Deutsch C.V., Journel A.G. GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide. – Oxford: Oxford University Press, 1997. – 369 p.
29. Deutsch C.V. Geostatistical reservoir modeling. – Oxford: Oxford University Press, 2002. – 376 p.
30. Haldorsen H.H. Stochastic modeling of underground reservoir facies (SMURF). SPE 16751 // 62nd SPE annual technical conference and exhibition. – Dallas, USA, 1987. – P. 575–589.
31. Egeland T., Georgsen F. Multifacies modeling of fluvial reservoirs. SPE 26502 // 68th SPE annual technical conference and exhibition. – Houston, USA, 1993. – P. 863–872.
32. An integrated approach to prediction of hydrocarbon in place and recoverable reserve with uncertainty measures. SPE 24276 / P. Abrahamsen, T. Egeland, O. Lia, H. Omre // SPE European petroleum computer conference. – Norway, 1992. – P. 151–161.
33. The geometry of fluvial channel bodies: empirical characterization and implications for object-based models of the subsurface / L. Colombero, N.P. Mountney, G. Medici, L. Jared West // AAPG bulletin. – 2019. – V. 103. – № 4. – P. 905–929.
34. Xinghe Y., Shengli L., Shumli L. Clastic hydrocarbon reservoir sedimentology. – Cham: Springer international publishing, 2018. – 712 p.
35. Swanson D.C. A new geological volume computer modeling system for reservoir description. SPE 17579 // SPE international meeting. – Tianjin, China, 1988. – P. 293–302.
36. STORM: integrated 3D stochastic reservoir modeling tool for geologists and reservoir engineers. SPE- 27563-PA / R.B. Bratvold, L. Holden et al. // SPE computer applications conference. – Aberdeen, United Kingdom, 1995. – P. 58–67.
37. История компании Roxar. URL: <http://roxar.ru/about-us/history/> (дата обращения 10.05.2020).
38. Damsleth E., Omre H. Geostatistical approaches in reservoir evaluation. SPE 37681-JPT // Technology today series conference. – Wollongong, Australia, 1997. – P. 498–501.
39. Wietzerbin L.J. Parametrization of complex 3D heterogeneities: a new CAD approach. SPE 26423 // SPE Annual technical conference and exhibition. – Houston, USA, 1993. – P. 11–18.
40. Petrel 20 years. URL: <https://books.google.ru/books?id=GWN9DwAAQBAJ> (дата обращения 10.05.2020).
41. Schlumberger Petrel 2007.1.2 Deployment guide. URL: <https://docgo.net/petrel-2007-1-2-deployment-guide> (Дата обращения 10.05.2020)
42. When effective integration drives the development: a successful case history. SPE-197900-MS / E. Spelta, V. Caronni, G. Carrasquero, M. Catanzaro, M. Rossi, R.L. Tagliamonte, A. Valdistorlo // Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference. – Abu Dhabi, UAE, 2019. URL: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-197900-MS> (дата обращения 05.09.2020).
43. Geological modeling in structurally complex settings using a depositional space and cut-cell unstructured grids. SPE-183960-MS / A. Levannier, A. Chabbert, M. Neumaier, A. Benabbou, T. Viard, L. Mace, S. Santoshini, F. Lepage, E. Malvesin, T. Laverne, C. Daly, C. Buchholz, Y. Wang // SPE middle east oil & gas show and conference. – Manama Kingdom of Bahrain, 2017. URL: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-183960-MS> (дата обращения 05.09.2020).
44. Mallet J.L, Jacquemin P., Cheimanoff N. GOCAD project: geometric modeling of complex geological surfaces // 1989 SEG annual meeting. – Dallas, USA, 1989. – P. 27–30.
45. Wang C.J., Vecchiarelli A. A geostatistical approach to modelling DFN. ARMA-2019-0376 // 53rd U.S. Rock mechanics/geomechanics symposium. – New York, USA, 2019. URL: <https://onepetro.org/conference-paper/ARMA-2019-0376> (дата обращения 05.05.2020).
46. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте № 2002610757.
47. Перепечкин М.В. Технология построения геологических моделей по геолого-геофизическим данным в программном комплексе DV-Geo: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2007. – 22 с.
48. Новый адаптивный подход к геолого-гидродинамическому моделированию длительно разрабатываемых месторождений и залежей / Е.Н. Тараскин, И.С. Гутман, С.А. Руднев, А.З. Захарян, С.О. Урсегов // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 12. – С. 78–83.

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

Закревский К.Е., кандидат геолого-минералогических наук, старший менеджер-эксперт по геологическому моделированию ПАО «НК «Роснефть».

Попов В.Л., начальник отдела геологического моделирования АО «ТомскНИПИнефть».

UDC 553.984

THE HISTORY OF DEVELOPMENT OF 3D GEOLOGY MODELING AS A METHOD FOR STUDYING OIL AND GAS RESERVOIRS

Konstantin E. Zakrevskiy¹,
geo-model@yandex.ru

Viktor L. Popov²,
vlp14788@gmail.com

¹ Rosneft Oil Company,
26/1, Sofiyskaya embankment, Moscow, 117997, Russia.

² JSC «TomskNIPIneft»,
72, Mira avenue, Tomsk, 634026, Russia.

The relevance of the research is caused by the widespread application of geology models to study oil and gas reservoirs. At present time, by the government regulations in Russia, all field development projects must be done with geology and simulation models.

The main aim of the research is to study and describe evolution of 3D geomodeling as a main method of oil and gas geology. Commonly used geology modeling packages history and features were revealed in order to determine industry interests and trends, advantages and drawbacks of existing software.

Object of the research is 3D geology modeling as a method to study oil and gas reservoirs.

Methods: study and compilation of the published papers and internet sources on the topic of geology modeling and appropriate software evolution.

Results. The paper describes the main steps of 3D geology modeling evolution and the existing software for geology models creation. There are four stages of geology modeling history. First stage is related to recognition of importance of math modeling to describe geology systems. The second stage took part in 1950–1970-s and lay occurrence of such branch of science as mathematical geology and its branch – geostatistics. In early 1980-s first 3D reservoir models were created and used for oil and gas pools study. It inferred active development of geomodeling and occurrence of first software to reservoir modeling in 1980-s. In early 1990-s geology modeling started to enter industry and many geologists used it to study and evaluate oil and gas reservoirs. During 1990-s and 2000-s most of commonly used geomodeling methods and procedures were developed. At present time there is a trend in geomodeling to integrate all geoscience data into one project which should include geology, seismic, simulation, geomechanics and other aspects of reservoir study. Since 2018 the corporate software for geology modeling is created in Rosneft oil company. All determined advantages and new methods are integrated or going to be integrated into new geomodeling package «RN-Geosim».

Key words:

Petroleum geology methods, geology modeling, geomodeling software, geology modeling evolution, RN-Geosim.

The authors greatly appreciate the thoughtful comments and suggestions of Vladimir A. Aksarin, Leonid E. Shmaryan, Anatoliy V. Ribnikov, Natalya V. Kalashnikova and Yulia V. Litvinenko.

REFERENCES

1. *The SPE online library of technical literature for the oil and gas industry.* Available at: <https://onepetro.org> (accessed 5 September 2020).
2. Zakrevskiy K.E. *Geologicheskoe 3D modelirovanie* [Geology 3D modelling]. Moscow, Maska Publ., 2009. 376 p.
3. Saakyan M.I., Zakrevskiy K.E., Gazizov R.K., Lepilin A.E., Ryzhikov E.A. The prospects of corporate geological modeling software creation. *Oil industry*, 2019, no. 11, pp. 50–54. In Rus.
4. Cosentino L. *Integrated reservoir studies.* Paris, Editions Technip, 2001. 310 p.
5. Perrin M., Rainaud J.-M.: *Shared earth modeling. Knowledge driven solutions for building and managing subsurface 3D geological model.* Paris, Editions Technip, 2013. 399 p.
6. McIntyre R., Gaines J., Gardner S., Mediani M., Hammerquist C., Li X., Paryani M., Umholtz N. Predictive geologic and geomechanical models for pad development in the Delaware basin. URTEC-2020-3309-MS. *SPE/AAPG/SEG Unconventional resources technology conference.* Virtual, 2020. Available at: <https://onepetro.org/conference-paper/URTEC-2020-3309-MS> (accessed 5 September 2020).
7. Vistelius A.B. Prosteyschie zadachi matematicheskoy obrabotki v litologii i puti ikh resheniya [Simple tasks of mathematical processing in lithology and their solutions]. *Litologicheskii sbornik VNIIGRI*, 1948, no. 1, pp. 125–130.
8. Vistelius A.B. On the question of layers occurrence. *Doklady AN SSSR*, 1949, vol. 65, no. 2, pp. 191–194. In Rus.
9. Vistelius A.B. *Osnovy matematicheskoy geologii (opredelenie predmeta, izlozhenie apparata)* [The mathematical geology basics (study definition, apparatus description)]. Leningrad, Nauka Publ., 1980. 389 p.
10. Leclerc J.L. *Histoire Naturelle, generale et particuliere. V. I, II* [Natural History, General and Particular]. Aux DeuxPonts. Sanson a. Compagnie, 1785. 332 p.
11. Reyer E. *Beitrage zur Physik der Eruptionen und der Eruptivgesteine* [Contributions to the physics of volcanic and igneous rocks]. Vienna, 1877. 225 p.
12. Harker A. *The Natural History of Igneous Rocks.* London, Methuen a. Co, 1909. 384 p.
13. Richardson W.A., Sneesby G. The frequency distribution of igneous rocks. *Miner. Magaz. a. Journ. Miner. Soc.*, 1922, vol. 19, no. 97, pp. 190–207.
14. Levinson-Lessing F.U. O predelakh i podrazdeleniyakh semeystva andezitov [About limits and division of the andesite family]. *Vestnik geologicheskogo komiteta*, 1924, no 6, pp. 723–735.
15. Krumbein W.C. The probable error of sampling sediments for mechanical analysis. *Amer. J. Sci.*, 1934, vol. 227, no. 159, pp. 204–214.
16. Merriam D.F. Andrei Borisovich Vistelius: a dominant figure in 20th Century mathematical geology. *Natural resources research*, 2001, vol. 10, no. 4, pp. 297–304.

17. Dubrule O., Damsleth E. Achievements and challenges in petroleum geostatistics. *Petroleum Geoscience*, 2001, vol. 07, pp. 1–7.
18. Matérn G. *Traite de géostatistique appliquée* [Geostatistics application fundamentals]. Paris, Editions Technip, 1962. 409 p.
19. Krige D. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemistry, Metallurgy and Mining Society of South Africa*, 1952, no. 8, pp. 119–139.
20. Merriam D.F., Davic J.C. *Geologic modeling and simulation of sedimentary systems*. New York, Springer-science+business media, 2001. 351 p.
21. Matheron G., Kleingeld W.J. The evolution of geostatistics. *20th international symposium on the application of computers and mathematics in the mineral industries*. Johannesburg, 1987. Vol. 3, pp. 9–12.
22. Dubrule O. *Geostatistics for seismic data integration in earth models*. Tulsa, European association of geoscientists and engineers, 2003. 281 p.
23. Delhomme E., Giannesini J. New reservoir description techniques improve simulation results in Hass-Messaoud field Algeria. SPE 8435. *54th SPE Annual Technical conference and Exhibition*. Dallas, USA, 1979. Available at: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-8435> (accessed 5 May 2020).
24. Dubrule O. *Geostatistics in petroleum geology*. Houston, American Association of Petroleum Geologists, 1998. 250 p.
25. Renard R.D. Bluepack 3-D and its use in the petroleum industry. *5th SPE petroleum computer conference*. Denver, USA, 1990, pp. 197–204.
26. Van B., Pajon J., Joseph P., Chautru J.M. 3D reservoir visualization. SPE 22301-PA. *SPE petroleum computer conference*. Dallas, USA, 1991. pp. 1310–1314.
27. Touffait Y., Beucher H. A 3D integrated structure for computer-aided reservoir characterization. SPE 20348. *5th SPE petroleum computer conference*. Denver, USA, 1990. pp. 171–180.
28. Deutsch C.V., Journel A.G. *GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford, Oxford University Press, 1997. 369 p.
29. Deutsch C.V. *Geostatistical Reservoir modeling*. Oxford, Oxford University Press, 2002. 376 p.
30. Haldorsen H.H. Stochastic modeling of underground reservoir facies (SMURF). SPE 16751. *62nd SPE annual technical conference and exhibition*. Dallas, USA, 1987. pp. 575–589.
31. Egeland T., Georgsen F. Multifacies modeling of fluvial reservoirs. SPE 26502. *68th SPE annual technical conference and exhibition*. Houston, USA, 1993. pp. 863–872.
32. Abrahamsen P., Egeland T., Lia O., Omre H. An integrated approach to prediction of hydrocarbon in place and recoverable reserve with uncertainty measures. SPE 24276. *SPE European petroleum computer conference*. Norway, 1992. pp. 151–161.
33. Colombera L., Mounney N.P., Medici G., Jared West L. The geometry of fluvial channel bodies: Empirical characterization and implications for object-based models of the subsurface. *AAPG bulletin*, 2019. Vol. 103, no. 4, pp. 905–929.
34. Xinghe Y., Shengli L., Shumli L. *Clastic hydrocarbon reservoir sedimentology*. Cham, Springer international publishing, 2018. 712 p.
35. Swanson D.C. A new geological volume computer modeling system for reservoir description. SPE 17579. *SPE international meeting*. Tianjin, China, 1988. pp. 293–302.
36. Bratvold R.B., Holden L. STORM: Integrated 3D Stochastic Reservoir Modeling Tool for Geologists and Reservoir Engineers. SPE-27563-PA. *SPE computer applications conference*. Aberdeen, United Kingdom, 1995. pp. 58–67.
37. *Istoriya kompanii Roxar* [Roxar company history]. Available at: <http://roxar.ru/about-us/history/> (accessed 10 May 2020). In Rus.
38. Damsleth E., Omre H. Geostatistical approaches in reservoir evaluation. SPE 37681-JPT. *Technology today series conference*. Wollongong, Australia, 1997. pp. 498–501.
39. Wietzerbin L.J. Parametrization of complex 3D heterogeneities: a new CAD approach. SPE 26423. *SPE Annual technical conference and exhibition*. Houston, USA, 1993. pp. 11–18.
40. Petrel 20 years. Available at: <https://books.google.ru/books?id=GWN9DwAAQBAJ> (accessed 10 May 2020).
41. *Schlumberger Petrel 2007.1.2 Deployment guide*. Available at: <https://docgo.net/petrel-2007-1-2-deployment-guide> (accessed 10 May 2020).
42. Spelta E., Caronni V., Carrasquero G., Catanzaro M., Rossi M., Tagliamonte R.L., Valdistorlo A. When effective integration drives the development: a successful case history. SPE-197900-MS. *Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference*. Abu Dhabi, UAE, 2019. Available at: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-197900-MS> (accessed 5 September 2020).
43. Levannier A., Chabbert A., Neumaier M., Benabbou A., Viard T., Mace L., Santoshini S., Lepage F., Malvesin E., Laverne T., Daly C., Buchholz C., Wang Y. Geological modeling in structurally complex settings using a depositional space and cut-cell unstructured grids. SPE-183960-MS. *SPE middle east oil & gas show and conference*. Manama Kingdom of Bahrain, 2017. Available at: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-183960-MS> (accessed 5 September 2020).
44. Mallet J.L., Jacquemin P., Cheimanoff N. GOCAD Project: geometric modeling of complex geological surfaces. *1989 SEG annual meeting*. Dallas, USA, 1989. pp. 27–30.
45. Wang C.J., Vecchiarelli A. A geostatistical approach to modelling DFN. ARMA-2019-0376. *53rd U.S. Rock mechanics/geomechanics symposium*. New York, USA, 2019. Available at: <https://onepetro.org/conference-paper/ARMA-2019-0376> (accessed 5 September 2020).
46. *Svidetelstvo o registratsii programmy dlya EVM v Rospatente № 2002610757* [Software registration certificate in Rospatent no. 2002610757].
47. Perepechkin M.V. *Tekhnologiya postroeniya geologicheskikh modeley po geologo-geofizicheskim dannym v programnom komplekse DV-Geo*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geology models creation technology on the basis of geology-geophysics data in DV-Geo software package. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2007. 22 p.
48. Taraskin E.N., Gutman I.S., Rudnev S.A., Zakharian A.Z., Ursegov S.O. New adaptive approach to geological and hydrodynamic modeling of fields and reservoirs with long production history. *Oil industry*, 2017, no. 12, pp. 78–83. In Rus.

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Konstantin E. Zakrevskiy, Cand. Sc., manager-expert, Rosneft oil company.
Viktor L. Popov, head of the department, JSC «TomskNIPIneft».

УДК 622.276

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ СТОЙКИХ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Лекомцев Александр Викторович¹,
alex.lekومتsev@mail.ru

Мордвинов Виктор Антонович¹,
mva44@bk.ru

Дворецкас Ромас Вальдасович¹,
dvoretiskas@mail.ru

Степаненко Иван Борисович¹,
stepanenko2403@gmail.com

Баканеев Виталий Сергеевич¹,
Vitaly.Bakaneev@lp.lukoil.com

Силичев Максим Алексеевич¹,
silichev.maxim@mail.ru

Корнилов Константин Витальевич¹,
kornilov.neft@yandex.ru

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

Актуальность. Подготовка продукции добывающих скважин до требований 1 группы качества товарной нефти в Пермском крае с каждым годом становится все более актуальным вопросом. Большинство эксплуатационных объектов находятся на завершающих стадиях разработки и характеризуются высокой обводненностью скважинной продукции, что в дальнейшем при сборе и промышленной подготовке приводит к образованию водонефтяных эмульсий. Стойкие водонефтяные эмульсии плохо подвергаются разрушению при подготовке их традиционными методами, такими как термическое и термохимическое гравитационное отстаивание. Данные методы подготовки просты в практическом применении, но не всегда обеспечивают требуемый результат. В связи с этим актуальной задачей является поиск и практическое применение новых технологий подготовки углеводородного сырья, которые могут применяться как отдельно от традиционных методов, так и в совокупности с ними. Таким методом является ультразвуковое воздействие.

Цель: провести оценку эффективности ультразвукового воздействия при разрушении стойких водонефтяных эмульсий, подобрать оптимальные параметры ультразвукового воздействия.

Объект: водонефтяная эмульсия с резервуара водоподготовки на установке промышленной подготовки нефти, которая расположена на территории Пермского края (Россия).

Методы: определение основных технологических показателей эффективности ультразвукового воздействия, проведение опытно-промышленных испытаний, построение ключевых графиков и зависимостей.

Результаты. Показан опыт применения ультразвукового воздействия, отмечена высокая эффективность разрушения стойких водонефтяных эмульсий по сравнению с традиционными методами. Авторами работы проведены опытно-промышленные испытания на мобильной установке подготовки скважинной продукции с применением ультразвукового воздействия на стойкие водонефтяные эмульсии, произведена оценка технологического эффекта и разработаны рекомендации по практическому применению предложенного комплексного метода. Научная новизна работы заключается в определении параметров эффективного процесса разрушения конкретного типа стойких водонефтяных эмульсий при совмещении термохимического и импульсного ультразвукового воздействия в докавитационном режиме. Установлена возможность снижения дозировки реагента-деэмульгатора в комбинации с ультразвуковым воздействием до 50 г/т. Показано снижение эффективности разрушения стойких водонефтяных эмульсий при комплексном воздействии на эмульсию низкой (менее 4 %) обводненности. Показано, что работа импульсной ультразвуковой системы на режиме работа–пауза 95/5 является оптимальной.

Ключевые слова:

Промышленная подготовка нефти, опытно-промышленные испытания, обезвоживание водонефтяной эмульсии, мобильная установка подготовки скважинной продукции, ультразвуковое воздействие.

Введение

Геологические условия залегания нефтяных залежей и применяемые технологии их разработки определяют наличие воды в скважинной продукции. Обводненность добываемой нефти по многим месторождениям России превышает 60–80 %. Совместное движение нефти и попутной воды в скважинах и про-

мысловых системах сбора продукции сопровождается взаимным диспергированием фаз и образованием в той или иной степени стабилизированных водонефтяных эмульсий (ВНЭ). В соответствии с требованиями ГОСТ Р 51858 товарная нефть, в зависимости от группы качества, не должна содержать более 0,5...1,0 % масс. воды и 100–900 мг/дм³ минеральных

солей. Достижение указанных показателей обеспечивается за счет деэмульсации – разрушения ВНЭ и расслоения воды и нефти в процессе ее промышленной подготовки. Наиболее распространенным методом разрушения ВНЭ является термохимический, включающий нагрев эмульсии до определенной температуры, обработку ее реагентами-деэмульгаторами и гравитационный отстой в термоотстойниках.

Сложный состав пластовой нефти, наличие в ней и в образующейся эмульсии природных эмульгаторов и стабилизаторов ВНЭ, а также различных по химической природе веществ (реагентов), поступающих в скважинную продукцию при геолого-технических мероприятиях по интенсификации добычи нефти, нестабильность состава поступающего на установки промышленной подготовки нефти (УППН) сырья осложняют процесс разрушения эмульсий и расслоения фаз в технологических аппаратах. Под действием этих факторов и в результате увеличения в термоотстойниках УППН содержания стабилизаторов эмульсий вблизи контакта «нефть – отстаивающаяся вода» формируются промежуточные слои в виде сложных эмульсий с высоким содержанием стабилизаторов механического происхождения, сульфида железа, парафинов и асфальтенов, по составу и свойствам отличающихся от поступающего на УППН сырья. За время полного обмена объема жидкости в технологических отстойниках часть сложной и стойкой эмульсии не разрушается, что ведет к накоплению объема промежуточного слоя в аппаратах, нарушению стабильности технологического процесса подготовки нефти и ухудшению показателей ее качества.

Сложные по составу и стабилизированные эмульсии в виде промежуточных слоев формируются также на границе «нефть–вода» в резервуарах предварительного сброса воды и резервуарах водоподготовки (РВП) в составе УППН. Объем промежуточных слоев в РВП, несмотря на отвод отстаивающейся нефти в «голову» технологического процесса подготовки на УППН, постоянно (с интенсивностью, зависящей от времени года и других факторов) увеличивается, что определяет необходимость организации специальных технологических цепочек для разрушения такой нефтесодержащей жидкости с целью выделения из нее нефти и получения воды, пригодной для отвода в систему поддержания пластового давления. Процесс разрушения стойких ВНЭ с большим содержанием стабилизаторов осуществляется с нагревом до более высокой, чем в основном процессе подготовки нефти, температуры (60–80 °С) и с повышенным расходом реагентов-деэмульгаторов. Результативность такого процесса остается невысокой, что определяет необходимость поиска более эффективных методов и способов разрушения и расслоения стойких ВНЭ в составе промыслов на УППН. Одним из перспективных направлений является использование в технологическом процессе на установках ультразвукового воздействия (УЗВ) [1].

Образующиеся при добыче нефти ВНЭ являются в основном эмульсиями обратного типа с диспергированной в нефти водой, частицы (глобулы) которой

защищены от их укрупнения при коагуляции и коалесценции межфазными бронирующими оболочками (слоями) сложного состава. По отношению к ультразвуковым колебаниям (акустическим волнам) такие эмульсии являются упругой средой, реагирующей на УЗВ возникновением механических колебаний и перемещений дисперсных частиц. Движение возбужденных при УЗВ глобул воды может вызывать их деформацию с механическим воздействием на бронирующие оболочки, учащение столкновений дисперсных частиц, что создает благоприятные условия для укрупнения и осаждения глобул [2–6].

Опубликованные в различных источниках результаты выполненных исследований указывают на возможность интенсификации процесса термохимического обезвоживания и обессоливания нефти на УППН за счет ультразвукового воздействия на ВНЭ [7–9]. Изменением частоты колебаний и интенсивности УЗВ можно оптимизировать процесс разрушения эмульсии и получать синергетический эффект при совместном термохимическом и ультразвуковом воздействии на ВНЭ [10–13]. При неправильно подобранных параметрах работы ультразвуковой существуют предпосылки противоположного эффекта – создание стабильной водонефтяной эмульсии [14, 15].

Результаты известных исследований и их оценка часто неоднозначны и в основном не базируются на экспериментальных работах в условиях реальных промысловых объектов.

В данной работе оцениваются и анализируются результаты выполненных авторами промысловых опытно-промышленных работ (ОПР) на мобильной установке подготовки скважинной продукции (МУПСР) [16, 17] по испытанию технологического процесса термохимического разрушения стойких ВНЭ с применением ультразвукового воздействия.

Экспериментальный ультразвуковой комплекс для разрушения стойких ВНЭ

В качестве ультразвукового комплекса при проведении опытно-промышленных работ использовались два пьезокерамических излучателя с установленными металлическими мембранами, способными выдавать резонансную частоту f , равную 13, 26, 40 кГц. Мембрана, представляющая собой колеблющуюся оболочку с двусторонней нагрузкой, выполняет распределение и ввод механических колебаний в жидкую среду (рис. 1).

Пьезокерамические излучатели подключены параллельно к одному генератору для синхронной работы. Источник ультразвука погружен в сосуд с жидкостью. Эта схема более гибка в части поиска эффективного акустического режима и анализа его влияния на флюид. За счёт комбинирования частот можно исследовать влияние ультразвука на флюид в широком частотном диапазоне. Внутри сепаратора волновод передаёт колебания на мембрану, распределяющую механические колебания по поверхности. Плоская мембрана более равномерно распределяет и эффективно передаёт ультразвуковые колебания от источника к жидкости в сепараторе, чем стержневая кон-

струкция. Для реализации процесса ультразвуковой коагуляции жидкодисперсных систем воздействие необходимо осуществлять в режиме, близком к докавитационному, чтобы избежать вторичного разрушения образующихся глобул воды и значительной диспергации внутренней фазы. Поддержание устойчиво-

го докавитационного режима требует ограничения интенсивности ультразвуковых колебаний, что снижает возможности ультразвуковой коагуляции [18]. С целью увеличения вводимой в эмульсию акустической энергии без развития кавитационного режима УЗВ осуществлялось в импульсном режиме.

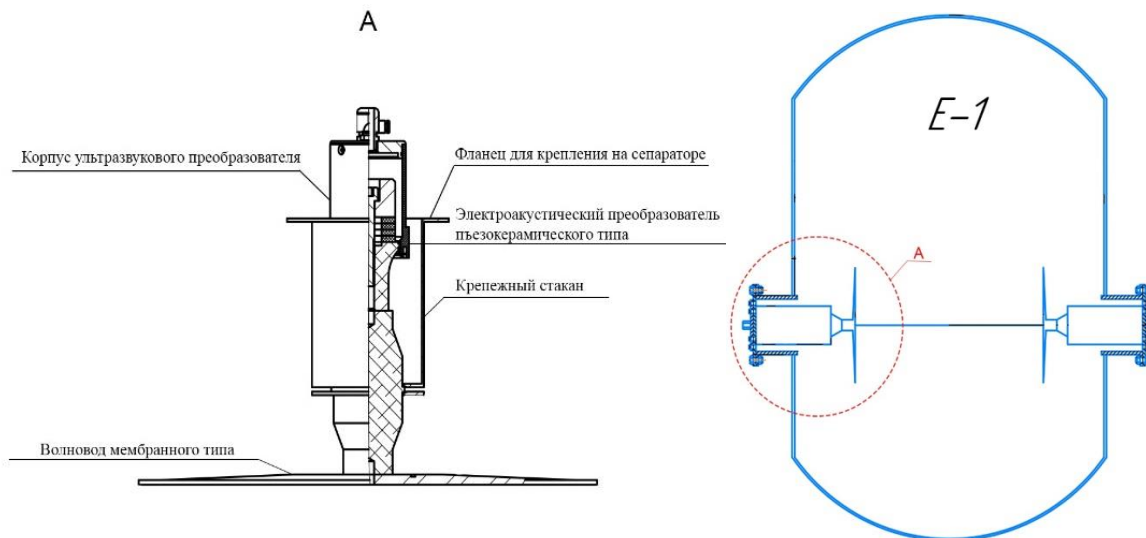


Рис. 1. Схематичное изображение ультразвукового излучателя в емкости E-1

Fig. 1. Schematic image of the ultrasonic emitter in container E-1

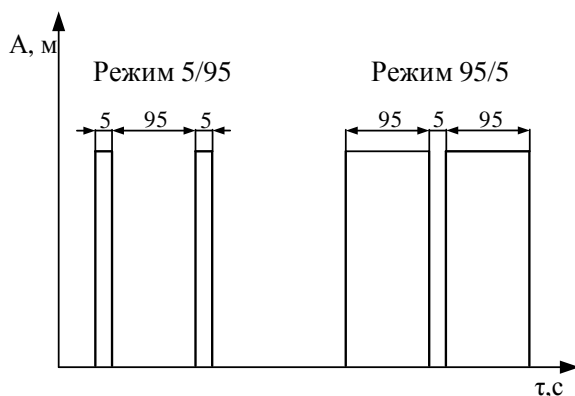


Рис. 2. Схематичное изображение циклов в работе/циклов в паузе 5/95 и 95/5

Fig. 2. Schematic representation of cycles in operation/cycles in pause 5/95 and 95/5

Интенсивность импульсного воздействия ультразвукового поля в ходе ОПИ обеспечивалась выбором определенного количества циклов в работе и паузе. Один цикл работы излучателя характеризуется настраиваемым интервалом времени на генераторе импульсов через ширину, количество импульсов и время релаксации между ними (время паузы). Для удобства принято считать максимальное количество импульсов 100, минимальное 0. При заданной мощности колебаний время релаксации капли воды в нефти стоячей ультразвуковой волной существенно влияет на процесс деэмульсации. Путем изменения времени релаксации можно установить наилучшие условия для расслоения эмульсии без создания искусственной кавитации и связанной с ней диспергации

частиц. Для проверки значимости параметра устанавливались три постоянных режима работы ультразвукового комплекса со значениями в широком диапазоне от 5/95 до 95/5 (соответственно количество циклов в работе/ циклов в паузе). На рис. 2 представлено схематичное изображение циклов в работе/циклов в паузе 5/95 и 95/5.

Проведение опытно-промышленных испытаний технологии ультразвукового воздействия на водонефтяную эмульсию

Объектом исследований является промежуточный слой в резервуаре водоподготовки (РВП) УППН (Пермский край), который представляет собой стойкую обратную ВНЭ. Такая эмульсия образуется по причине неполного разделения водной и углеводородной фаз, а также подкачки нефтесодержащей жидкости, доставляемой с нефтепромысла после проведения геолого-технических мероприятий на добывающем фонде скважин. В исследуемых ВНЭ содержание воды изменялось от 1 до 85 %, содержание сульфида железа – от 3900 до 7900 мг/дм³ (табл. 1).

Стойкая эмульсия, представленная в табл. 1, существенно отличается от поступающего в виде ВНЭ сырья на УППН: по содержанию мехпримесей в 120–150 раз; по концентрации сульфида железа более чем в 400 раз; по вязкости в 3–80 раз.

Процесс подготовки стойких водонефтяных эмульсий на УППН в рабочем режиме осуществляется следующим образом: водонефтяная эмульсия отбирается из резервуара водоподготовки с уровня 7 м, нагревается в печах трубчатых блочных (ПТБ) до температуры 60 °С и подается в этот же РВП на уро-

вень 5 м. На рис. 3 приведена схема технологического процесса подготовки промежуточных слоев на УППН с подключением МУПСП.

Таблица 1. Физико-химические свойства стойкой водонефтяной эмульсии

Table 2. Physical and chemical properties of stable water-oil emulsion

Показатель Parameter	Ед. изм. Unit of measurement	Значение Value
Плотность при температуре 20 °С Oil density at 20 °С	кг/м ³ kg/m ³	930–970
Объемная доля воды (W) Water content (W)	об. % vol. %	1–85
Содержание солей (S) Salt content (S)	мг/дм ³ mg/dm ³	57000–64000
Массовая доля механических примесей Mass fraction of mechanical impurities	мас. % mas. %	1,5–1,9
Массовая концентрация сульфида железа в нефтяной фазе Mass concentration of iron sulfide in the oil phase	мг/дм ³ mg/dm ³	3900–7900
Вязкость при температуре 20 °С Viscosity at 20 °С	мПа·с mPa·s	150–200

Рецикл нагретой эмульсии происходит в присутствии деэмульгатора (ДЭ) ФЛЭК-Д028 с дозировкой

200 г/т и с последующим гравитационным отстоем от 12 до 24 часов. Такая технология подготовки позволяет получить нефть с обводненностью 1,2...1,4 % при среднем солесодержании 1000 мг/дм³, что не соответствует требованиям ГОСТ Р 51858-2002.

Опытно-промышленные испытания технологии ультразвукового воздействия осуществлялись на мобильной установке подготовки скважинной продукции. Одной из функций МУПСП является моделирование методов и средств подготовки нефти и воды на площадных объектах без вмешательства в основной технологический процесс. Для определения оптимальных условий и режимов разрушения стойких водонефтяных эмульсий МУПСП была подключена к действующей установке подготовки нефти параллельно основному процессу (рис. 3). Установка выводится на режим, который в точности моделирует технологию подготовки на УППН. Выход на режим осуществляется следующим образом: проводится запуск МУПСП и наполнение емкости Е-1, водонефтяная эмульсия с расходом 0,1...0,6 м³/ч при температуре 15–20 °С и давлении 0,1 МПа подается из Е-1 по замкнутому циклу, нагреваясь в пластинчатом теплообменнике до температуры жидкости в технологических аппаратах УППН.

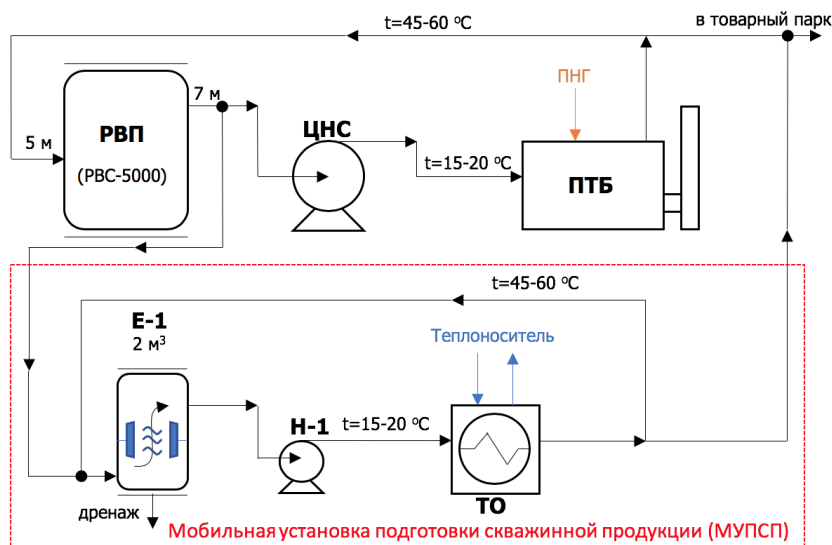


Рис. 3. Технологический процесс подготовки промежуточных слоев на установке промышленной подготовки нефти с подключением мобильной установки подготовки скважинной продукции

Fig. 3. Technological process of preparation of intermediate layers on the oil preparation unit with the connection of the mobile well production preparing unit

Калибровка осуществляется регулированием производительности насосного агрегата МУПСП исходя из равенства времени подготовки ВНЭ в моделируемых аппаратах при соблюдении термобарических условий, идентичных существующей технологии подготовки скважинной продукции на УППН. Далее производится обработка водонефтяной эмульсии с применением различных технологий и определением качества продукта до начала испытаний, в процессе и по их окончанию. Сравнение результатов проб на

входе и выходе МУПСП является основанием для оценки эффективности применяемой технологии.

Подбор оптимальных режимов ультразвукового воздействия

Для калибровки МУПСП на УППН исходный продукт, поступающий с уровня 7 м РВП при обводненности 18 %, нагревался с 15 до 60 °С. Подготовка осуществлялась в режиме «горячего» гравитационного отстоя. При таком процессе не удалось получить

нефть по ГОСТ Р 51858-2002, продукция имела обводненность 1,4 %, содержание хлористых солей 925 мг/дм³. Результаты по качеству подготовленного продукта на МУПСП по данной технологии сопоставимы с результатами лабораторных анализов водонефтяной эмульсии в резервуаре водоподготовки УППН, что указывает на высокую точность моделирования процесса на МУПСП.

Для исключения эффекта от нагрева осуществлялся подбор оптимальной интенсивности УЗВ при температуре 30 °С. Обработка велась ультразвуком в течение трех часов с частотой 13–14 кГц с последующим гравитационным отстоем в течение трех часов. В табл. 2 приведены результаты оценки эффективности технологии ультразвуковой обработки в зависимости от интенсивности воздействия.

Таблица 2. Результаты анализа проб после 7 часов динамического отстоя при различных режимах УЗВ

Table 2. Results of samples analysis after 7 hours of dynamic sedimentation under various modes of the ultrasonic impact

Номер режима Mode number	Циклы в работе/паузе Cycles within operation/pause	Показатели качества входящего сырья Quality of incoming water-oil emulsions		Показатели качества выходящего продукта Quality of output water-oil emulsions		t, °C	f, кГц f, kHz
		W, %	S, мг/дм ³ (mg/dm ³)	W, %	S, мг/дм ³ (mg/dm ³)		
1 УЗВ USI	5/95	1,2	571	1,2	513	30	13–14
2 УЗВ USI	40/60	1,4	495	1,2	513		
3 УЗВ USI	95/5	1,4	495	1,0	320		
4 УЗВ USI	95/5+5/95	1,2	539	1,0	568		

USI – ultrasonic impact.

На режиме 3 (работа–пауза 95/5) достигнуты наилучшие показатели качества: снижение обводненности с 1,4 до 1,0 % и снижение содержания хлористых солей с 495 до 320 мг/дм³ на выходе МУПСП, что соответствует 3 группе качества товарной нефти. На режиме 4 испытывалось комбинированное воздействие ультразвукового поля при режиме работа–пауза 95/5 (этап 1 – интенсификация) и далее 5/95 (этап 2 – стабилизация). По табл. 2 видно, что при таком подходе не ухудшаются показатели по обводненности, достигнутые на первом этапе озвучивания, однако на этапе 2 происходит незначительное увеличение солевого содержания после гравитационного отстоя. Уменьшение содержания воды в нефти ниже 1 % не проис-

ходит по причине высокой вязкости эмульсии, нагретой до температуры 30 °С. Степень подготовки сырья с исходной обводненностью 1,2...1,4 % невысокая. Это объясняется незначительной амплитудой колебаний капли воды по сравнению с расстоянием между глобулами дисперсной фазы. Эффект от УЗВ может быть усилен снижением вязкости дисперсионной среды (нефти) путем ее нагрева. Дальнейшие эксперименты и технологические процессы проведены при температуре не менее 50 °С.

С целью оценки влияния температуры на эффективность процесса разрушения стойких водонефтяных эмульсий проведена серия экспериментов, параметры которых приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристика режимов 4, 5, 6 разрушения ВНЭ при различной температуре

Table 3. Characteristics of water-oil emulsions destruction modes 4, 5, 6 under different temperatures

Номер режима Mode number	Показатели качества входящего сырья Quality of incoming water-oil emulsions		Показатели качества выходящего продукта Quality of output water-oil emulsions		t, °C	f, кГц f, kHz
	W, %	S, мг/дм ³ (mg/dm ³)	W, %	S, мг/дм ³ (mg/dm ³)		
4 (УЗВ) (USI)	1,2	539	1,0	568	30	14
5 (УЗВ+t*) (USI+t)	4,0	2580	0,8	629	50	
6 (УЗВ+t) (USI+t)	2,5	1048	0,9	240	60	

t* – нагрев/heating.

В ходе экспериментов установлено, что при температуре эмульсии 60 °С достигается оптимальная эффективность технологического процесса. С увеличением температуры межфазное натяжение и вязкость эмульсии (нефти) значительно снижаются. Уменьшение межфазного натяжения способствует консолидации дисперсных капель. При увеличении температуры может возникнуть незначительная кавитация в зоне, близкой к мембранным пластинам, за счет увеличения давления паров кавитационной среды. С увеличением кавитационных событий происхо-

дит разложение крупных капель с образованием мелких и обновление водонефтяной эмульсии. При этом за счет снижения вязкости интенсивнее протекает процесс коалесценции в режиме стабилизации УЗВ.

Установлено, что степень снижения обводненности с увеличением доли воды в исходном сырье возрастает (режим 5). Это объясняется улучшением условий УЗВ в связи с меньшими расстояниями между частицами дисперсной фазы. Детальное изучение дисперсионного состава позволяет установить основные закономерности протекающего механизма разрушения ВНЭ.

Обоснование параметров эффективного применения ультразвукового воздействия

Оценка эффективности УЗВ выполнена при проведении серии испытаний с различной исходной обводненностью водонефтяной эмульсии. Характеристики исследуемых режимов подготовки стойких ВНЭ приведены в табл. 4.

В ходе исследований определена необходимость в подаче реагента-деэмульгатора для повышения эффективности деэмульсации стойких водонефтяных эмульсий при УЗВ. Установлена возможность снижения дозировки реагента-деэмульгатора в комбинации

с ультразвуковым воздействием до 50 г/т. Увеличение дозировки не приводит к существенному улучшению результатов. Дозировка 50 г/т значительно ниже, чем при применяемой технологии промышленной подготовки стойких водонефтяных эмульсий (200 г/т), что объясняется более качественным диспергированием деэмульгатора в водонефтяной эмульсии при УЗВ и подтверждает целесообразность развития исследований в области способов ввода и доставки ДЭ его на границы глобул дисперсной фазы, распределенной в дисперсионной среде [19, 20].

Таблица 4. Характеристика режимов 6–10

Table 4. Characteristics of modes 6–10

Номер режима Mode number	t, °C	f, кГц f, kHz	ДЭ, г/т DE, g/t	Содержание воды (%) и сульфида железа (мг/дм ³) Water content (W) and mass concentration of iron sulfide (mg/dm ³)			
				в исходной эмульсии incoming water-oil emulsions		в выходящем продукте (нефти) output water-oil emulsions	
				W, %	S, мг/дм ³ S, mg/dm ³	W, %	S, мг/дм ³ S, mg/dm ³
7 (УЗВ+t) (USI+t)	60	14	–	85	5100	0,9	559
8 (УЗВ+t+ДЭ*) (USI+t+DE*)	58	14	50	45	4000	0,5	287
9 (УЗВ+t+ДЭ) (USI+t+DE)	50	14	50	4	2580	0,8	629
6 (УЗВ+t+ДЭ) (USI+t+DE)	58	14	50	2,5	1048	0,9	240
10 (УЗВ+t+ДЭ) (USI+t+DE)	59	22	50	1	678	0,8	454

ДЭ* – деэмульгатор.

DE* – demulsifier.

Все эксперименты по УЗВ проведены комбинированным воздействием ультразвукового поля с изменяемым параметром работа–пауза 95/5 (этап 1 – интенсификация) и далее 95/5 в импульсном режиме (этап 2 – стабилизация). Установлено, что эффективность УЗВ значительно снижается при обводненности менее 4 %. Исходное сырье с обводненностью 2,5 % (режим 6) и 1,0 % (режим 10) обезвожено на 64 и 20 % соответственно. Водонефтяная эмульсия с обводненностью 85 % (режим 7) и 45 % (режим 8) обезвожена на 99 %.

Выводы

1. Стойкие, с высоким содержанием стабилизаторов, водонефтяные эмульсии, образующиеся в составе промежуточных слоев на объектах УППН, не могут быть разрушены термохимическим методом с выделением товарной нефти (по ГОСТ Р 51585-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опытнo-промысловые испытания интенсифицирующих устройств на мобильной установке подготовки скважинной продукции / И.И. Мазеин, А.В. Усенков, А.Ю. Дурбажев, А.В. Лекомцев, П.Ю. Илюшин // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 6. – С. 136–139.
2. Козлов В.Г., Сабиров Р.Р., Субботин С.В. Осредненные течения в осциллирующей сферической полости с эластичной стенкой // Известия российской академии наук механика жидкости и газа. – 2018. – № 2. – С. 16–26.
3. Иванова А.А., Козлов В.Г. Вибрационная конвекция при непоступательных колебаниях полости (изотермический слу-

- 2002) и воды, по составу и свойствам пригодной для системы поддержания пластового давления.
2. С целью оценки в промышленных условиях возможности эффективного разрушения стойких ВНЭ с применением термохимического и ультразвукового воздействия выполнены опытно-промышленные работы на установке промышленной подготовки нефти. Получен синергетический эффект при комплексном (совместном) воздействии на эмульсии с применением указанных методов.
3. Определены параметры эффективного процесса разрушения стойких ВНЭ при совмещении термохимического и импульсного УЗВ в докавитационном режиме.
4. Установлено снижение эффективности разрушения стойких ВНЭ при комплексном воздействии на эмульсию низкой (менее 4 %) обводненности.

- чай) // Известия российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2003. – № 2. – С. 25–32.
4. Ниборг В. Акустические течения // Физическая акустика. – М.: Мир, 1969. – С. 302–377.
5. Acoustic levitation of liquid drops: Dynamics, manipulation and phase transitions / D. Zang, Y. Yu, Z. Chen, X. Li, H. Wu, X. Geng // Advances Colloid Interface Science. – 2017. – V. 243. – P. 77–85.
6. Trinh E., Zwern A., Wang T.G. An experimental study of small-amplitude drop oscillations in immiscible liquid systems // Journal of Fluid Mechanics. – 1982. – V. 115 – P. 453–474.
7. Афанасьев Е.С., Римаренко Б.И., Ясьян Ю.П. Влияние ультразвукового воздействия на процесс разрушения водонефтяных

- эмульсий // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2009. – № 9. – С. 39–41.
8. Guoxiang Ye, Xiaoping Lu, Pingfang Han. Desalting and dewatering of crude oil in ultrasonic standing wave field // Petroleum Science and Engineering. – 2010. – V. 70. – P. 40–144.
 9. Gaikwad G., Pandit B. Ultrasound emulsification: effect of ultrasonic and physicochemical properties on dispersed phase volume and droplet size // Ultrasonics Sonochemistry. – 2008. – № 15. – P. 554–563.
 10. Разделение стойкой водонефтяной эмульсии с применением ультразвукового воздействия / А.В. Лекомцев, П.Ю. Илюшин, К.А. Дерендяев, И.Б. Степаненко, В.А. Мордвинов, Р.В. Дворецкас // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 9–12.
 11. Yang X.-g., Tan W., Tan X.-f. Demulsification of crude oil emulsion via ultrasonic chemical method // Petroleum Science and Technology. – 2017. – № 27. – P. 2010–2020.
 12. Singh B.P., Pandey B.P. Ultrasonication for breaking water-in-oil emulsions // Proceedings of the Indian Academy of Sciences. – 1992. – № 3. – P. 181–194.
 13. An experimental study on the application of ultrasonic technology for demulsifying crude oil and water emulsions / M. Amani, M. Idris, M. Abdul Ghani, N. Dela Rosa, A. Carvero // Journal of Petroleum and Environmental Biotechnology. – 2017. – V. 7. – P. 1–12.
 14. Ramisetty K.A., Shyamsunder R. Effect of ultrasonication on stability of oil in water emulsions // International Journal of Drug Delivery. – 2011. – № 1. – P. 133–142.
 15. Emulsification by high frequency ultrasound using piezoelectric transducer: formation and stability of emulsifier free emulsion / M. Kaci, S. Meziani, E. Arab-Tehrany, G. Gillet, I. Desjardins-Lavis, S. Desobry // Ultrasonics Sonochemistry. – 2014. – № 21. – P. 1010–1017
 16. Установка подготовки скважинной продукции: пат. Рос. Федерация, № 2016114262, заявлено 2016.04.12; опубл. 2017.04.17, Бюл. № 11.
 17. Результаты опытно-промышленных испытаний мобильной установки подготовки скважинной продукции / О.В. Третьяков, А.В. Усенков, А.В. Лекомцев, П.Ю. Илюшин, С.В. Галкин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 2. – С. 131–135.
 18. Выявление оптимальных режимов ультразвукового импульсного воздействия для коагуляции в жидкодисперсных средах / В.Н. Хмелев, Р.Н. Голых, М.В. Хмелев, В.А. Шакура, А.В. Шалунов, Р.В. Барсуков // Южно-Сибирский Научный Вестник. – 2017. – № 3. – С. 15–20.
 19. Перспективы использования ультразвукового воздействия в процессе подготовки нефти на / А.В. Деньгаев, В.С. Вербицкий, И.Т. Мищенко, А.А. Геталов // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 4. – С. 28–30.
 20. Применение акустических методов разделения водонефтяных эмульсий / А.В. Деньгаев, А.А. Геталов, В.С. Вербицкий, М.М. Фархутдинов // Международная научно-техническая конференция Geopetrol 2018. – Закопане, Польша, 17–20 Сентября 2018. – С. 647–652.

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

Лекомцев А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Мордвинов В.А., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Дворецкас Р.В., аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Степаненко И.Б., магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Баканеев В.С., аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Силичев М.А., магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Корнилов К.В., магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276

JUSTIFICATION OF ULTRASONIC IMPACT TECHNOLOGY FOR DESTRUCTION OF STABLE WATER-OIL EMULSIONS

Alexander V. Lekomtsev¹,
alex.lekومتsev@mail.ru

Victor A. Mordvinov¹,
mva44@bk.ru

Romas V. Dvoreckas¹,
dvoretskas@mail.ru

Ivan B. Stepanenko¹,
stepanenko2403@gmail.com

Vitaliy S. Bakaneev¹,
Vitaly.Bakaneev@lp.lukoil.com

Maxim A. Silichev¹,
silichev.maxim@mail.ru

Konstantin V. Kornilov¹,
kornilov.neft@yandex.ru

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

The relevance. Preparation of wells production to the requirements of the first quality group for the commercial purposes is becoming more relevant every year in the Perm region. Most operational facilities are in the final stages of development and are characterized by high water content of well products, which later leads to the formation of water-oil emulsions during transportation and field preparation. Stable water-oil emulsions are poorly exposed to destruction when prepared by traditional methods, such as thermal and thermochemical gravity sedimentation. These preparing methods are easy to use, but do not always provide the expected result. In this regard, an urgent task is to find and apply new technologies for preparation of hydrocarbons, which can be used separately from traditional methods, or in combination with them. This method is ultrasound impact.

The main aim of the research is to evaluate the effectiveness of ultrasonic impact on the destruction of stable water-oil emulsions, to select the optimal parameters of ultrasound.

Object: water-oil emulsion from the water treatment tank, which is located in the Perm territory (Russia).

Methods: determining the main technological indicators, conducting laboratory research and pilot tests, making key graphs and dependencies.

Results. The paper shows the experience of using ultrasound impact. In addition, the high destruction efficiency of stable water-oil emulsions in comparison with traditional methods is noted there. The authors of the article conducted pilot tests on a mobile unit for preparing well products with the use of ultrasonic impact on stable water-oil emulsions, evaluated the technological effect and developed recommendations for the practical application of the proposed method. The scientific novelty of the work is to determine the parameters of the effective process of destruction specific type of stable water-oil emulsions with combining thermochemical and pulsed ultrasonic action in the pre-cavitation mode. It is possible to reduce the dosage of the demulsifier reagent in combination with ultrasound impact to 50 g/t. A decrease in the efficiency of destruction of stable water-oil emulsions under the complex effect of low (less than 4 %) water content on the emulsion is shown. It is also shown that the work of the pulsed ultrasonic system in the operation–pause mode 95/5 is optimal.

Key words:

Oil field preparation, pilot tests, demulsification of stable water-oil emulsion, mobile well production preparing unit, ultrasonic impact.

REFERENCES

- Mazein I.I., Usenkov A.V., Durbazhev A.Yu., Lekomtsev A.V., Ilyushin P.Yu. Experimental and field tests of intensifying devices on a mobile installation for preparing well products. *Oil industry*, 2018, no. 6, pp. 136–139. In Rus.
- Kozlov V.G., Sabirov R.R., Subbotin S.V. Steady flows in an oscillating spheroidal cavity with elastic wall. *Fluid Dynamics*, 2018, vol. 53, no. 2, pp. 189–199.
- Ivanova A.A., Kozlov V.G. Osrednennyye techeniya v oscilliruyushchey sferoidalnoy polosti s elastichnoy stenкой [Vibrational convection in non-accessible cavity vibrations (isothermal case)]. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii nauk. Fluid and gas mechanics*, 2003, no. 2, pp. 25–32.
- Niborg V. Akusticheskie techeniya [Acoustic currents]. *Fizicheskaya akustika* [Physical acoustics]. Moscow, Mir Publ., 1969. pp. 302–377.
- Zang D., Yu Y., Chen Z., Li X., Wu H., Geng X. Acoustic levitation of liquid drops: Dynamics, manipulation and phase transitions. *Advances Colloid Interface Science*, 2017, vol. 243, pp. 77–85.
- Trinh E., Zvern A., Wang T. G. An experimental study of small-amplitude drop oscillations in immiscible liquid systems. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, vol. 115, pp. 453–474.
- Afanasiev E.S., Rimarenko B.I., Yasyan Yu.P. Vliyanie ultrazvukovogo vozdeystviya na protsess razrusheniya vodoneftyanykh emulsiy [Influence of ultrasonic action on destruction of water-oil emulsions]. *Oil refining and petrochemistry*, 2009, no. 9, pp. 39–41.
- Guoxiang Ye, Xiaoping Lu, Pingfang Han. Desalting and dewatering of crude oil in ultrasonic standing wave field. *Petroleum Science and Engineering*, 2010, vol. 70, pp. 40–144.

9. Gaikwad G., Pandit B. Ultrasound emulsification: effect of ultrasonic and physicochemical properties on dispersed phase volume and droplet size. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, no. 15, pp. 554–563.
10. Lekomtsev A.V., Ilyushin P.Yu., Derendyaev K.A., Stepanenko I.B., Mordvinov V.A., Dvoretzkyas R.V. Separation of resistant water-oil emulsion with the use of ultrasonic action. *Chemical oil and gas engineering*, 2019, no. 2, pp. 9–12. In Rus.
11. Yang X.-g., Tan W., Tan X.-f. Demulsification of crude oil emulsion via ultrasonic chemical method. *Petroleum Science and Technology*, 2017, no. 27, pp. 2010–2020.
12. Singh B.P., Pandey B.P. Ultrasonication for breaking water-in-oil emulsions. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences*, 1992, no. 3, pp. 181–194.
13. Amani M., Idris M., Abdul Ghani M., Dela Rosa N., Carvero A. An experimental study on the application of ultrasonic technology for demulsifying crude oil and water emulsions. *Journal of Petroleum and Environmental Biotechnology*, 2017, vol. 7, pp. 1–12.
14. Ramisetty K.A., Shyamsunder R. Effect of ultrasonication on stability of oil in water emulsions. *International Journal of Drug Delivery*, 2011, no. 1, pp. 133–142.
15. Kaci M., Meziani S., Arab-Tehrany E., Gillet G., Desjardins-Lavis I., Desobry S. Emulsification by high frequency ultrasound using piezoelectric transducer: Formation and stability of emulsifier free emulsion. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, vol. 21, pp. 1010–1017.
16. Ilyushin P.Yu., Usenkov A.V., Tretyakov O.V., Lekomtsev A.V., Mazein I.I., Khasanov R.F., Gorbushin A.V., Durbazhev A.Yu. *Ustanovka podgotovki skvazhinnoy produktsii* [Well production preparing unit]. Patent RF, no. 2016114262. 2017.
17. Tretyakov O.V., Usenkov A.V., Lekomtsev A.V., Ilyushin P. Yu., Galkin S. V., Results of experimental and industrial tests of a mobile well preparation unit. *Oil industry*, 2016, no. 2, pp. 131–135. In Rus.
18. Khmelev V.N., Golykh R.N., Khmelev M.V., Shakura V.A., Shalunov A.V., Barsukov R.V. Identification of optimal modes of ultrasonic pulse action for coagulation in liquid-dispersed media. *South-Siberian Scientific Bulletin*, 2017, no. 3, pp. 15–20. In Rus.
19. Dengaev A.V., Verbitsky V.S., Mishchenko I.T., Getalov A.A. Prospects for the use of ultrasonic influence in the process of oil preparation on. *Oil industry*, 2020, no 4, pp. 28–30. In Rus.
20. Dengaev A.V., Getalov A.A., Verbitsky V.S., Farkhutdinov M.M. Primenenie akusticheskikh metodov razdeleniya vodoneftnykh emulsiy [Application of acoustic methods of separation of water-oil emulsions]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Geopetrol 2018* [Report at the international scientific and technical conference. Geopetrol]. Poland, 2018. pp. 647–652.

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Alexander V. Lekomtsev, Cand Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Victor A. Mordvinov, Cand Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Romas V. Dvoretzkyas, graduate student, Perm National Research Polytechnic University.

Ivan B. Stepanenko, student, Perm National Research Polytechnic University.

Vitaliy S. Bakanaev, graduate student, Perm National Research Polytechnic University.

Maxim A. Silichev, student, Perm National Research Polytechnic University.

Konstantin V. Kornilov, student, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 622.276

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАБОЙНОГО ДАВЛЕНИЯ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН НА ВЫРАБОТКУ ЗАПАСОВ ИЗ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Мартюшев Дмитрий Александрович,
martyushevdi@inbox.ru

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

Актуальность работы обусловлена тем, что при разработке сложнопостроенных карбонатных залежей зачастую возникают сложности, связанные с системой поддержания пластового давления и выбором оптимальных технологий, направленных на эффективную выработку запасов нефти. В данных условиях для поддержания уровня добычи на рентабельном уровне необходимо оптимизировать забойные давления скважин. Нефтегазовым компаниям, разрабатывающим карбонатные залежи, стоит обращать внимание на величину оптимального забойного давления, которая обеспечивает наиболее рациональную выработку запасов. Несмотря на то, что данный вопрос рассматривается достаточно долгое время многими отечественными и зарубежными учеными, он на сегодняшний момент времени остается нерешенным и в то же время имеет значительную научную и практическую значимость.

Целью работы является обоснование значения оптимального забойного давления добывающих скважин и его влияния на выработку запасов из сложнопостроенного карбонатного коллектора Гагаринского нефтяного месторождения.

Объект: карбонатная залежь Гагаринского нефтяного месторождения.

Методы: фильтрационные установки с моделированием пластовых условий УИК-5ВГ и AFS-300; использование гидродинамического симулятора Tempest версии 8.3.1 компании Roxar.

Результаты. Смыкание естественных трещин приводит не только к снижению производительности скважин и к неполной выработке запасов нефти в зоне дренирования, но и к низкой эффективности применяемых мероприятий, а также к ухудшению гидродинамической связи между скважинами. Следовательно, в данных условиях важным и необходимым является обоснование оптимальных забойных давлений добывающих скважин на начальных этапах разработки карбонатных залежей. Проведенные лабораторные исследования и расчеты с помощью геолого-гидродинамической модели карбонатной залежи, которая учитывает особенности строения пустотного пространства, показали практическое значение (выражается в увеличении добычи нефти) оптимизации забойного давления добывающих скважин, эксплуатирующих карбонатные трещиноватые коллекторы. Проведенный расчет экономической составляющей оптимизации (регулирование величины забойного давления) работы трех добывающих скважин Гагаринского месторождения позволит дополнительно получить 19,5 млн р.

Ключевые слова:

Естественная трещиноватость, геолого-гидродинамическая модель, дебит нефти, дополнительная добыча нефти, закачка воды, напряженное состояние горных пород, проницаемость, раскрытость трещин.

Введение

Проблемы и сложности, возникающие при добыче углеводородного сырья и выборе технологий для эффективной разработки сложнопостроенных карбонатных коллекторов, описываются многими учеными [1–3]. В настоящее время большинство научных методов и технологий для разработки карбонатных залежей используется на практике не в полной мере. Связано это, в первую очередь, со сложившимися традиционными подходами в области разработки терригенных коллекторов, во-вторых, с обширным разнообразием геологических особенностей строения и фильтрационно-емкостных свойств карбонатных залежей. Все эти факторы предопределяют и в тот же момент осложняют выбор технологий для разработки и выработки запасов углеводородов из карбонатных коллекторов.

Карбонатные залежи зачастую характеризуются сложным геологическим строением, связанным с различными условиями осадконакопления. Вследствие этого на залежах выделяются литолого-фациальные зоны с различными фильтрационно-емкостными свойствами. Карбонатные объекты характеризуются высокой неоднородностью и расчлененностью коллектора [4, 5]. Стоит отметить, что, исходя из анали-

за опыта разработки, в большинстве случаев закачка в пласт воды является малоэффективной как со стороны поддержания пластового давления (ППД), так и со стороны выработки запасов нефти [6–9]. Значительная неоднородность и сложность геологического строения карбонатных коллекторов оказывают существенное влияние (в некоторых случаях полностью отсутствует) на гидродинамическое взаимодействие между нагнетательными и добывающими скважинами [2, 10–14].

Еще одной актуальной проблемой при разработке данного типа коллектора является значительное влияние снижения пластового и забойного давлений ниже давления насыщения на работу залежей, которое изучалось на значительном числе нефтяных месторождений: Самотлорском (В.В. Исачевым, В.А. Казаковым), Ромашкинском (З.С. Алиевым, Р.Ф. Сагдиевым, Б.Е. Сомовым, Р.Н. Дияшевым, В.Д. Лысенко и др.), Трельжанском и Ярино-Каменноложском (В.Д. Викториним, Н.Е. Стадниковой), Ерсубайкинском, Ямашинском (Н.Г. Зайнуллиним, Р.Н. Дияшевым и др.). Основные выводы исследований сводились к следующему: снижение забойного и пластового давлений приводит к значительному уменьшению

проницаемости по нефти. При этом коэффициенты продуктивности скважин уменьшаются в два и более раза. Такой же эффект наблюдается не только на российских месторождениях, но и на месторождениях Канады, Венесуэлы и США [15–19].

Как правило, для увеличения добычи из сложно-построенных карбонатных коллекторов нефтяные компании стремятся устанавливать оптимальные (рациональные) забойные давления для добывающих скважин. Многими учеными [20–24] в области разработки карбонатных коллекторов отмечается, что эксплуатация залежей делится на четыре зоны:

- 1) $P_{заб} > P_{нас}$ – область шадящей эксплуатации пласта;
- 2) $P_{рац} < P_{заб} < P_{нас}$ – область рациональной эксплуатации пласта;
- 3) $P_{заб.кр} < P_{заб} < P_{рац}$ – область максимальной добычи нефти из пласта;
- 4) $P_{заб} < P_{заб.кр}$ – область недопустимой эксплуатации.

Стоит отметить, что нефтяным компаниям, разрабатывающим карбонатные залежи, стоит обращать внимание на величину оптимального забойного давления, которая обеспечивает наиболее рациональную выработку запасов, а не на критическую величину забойного давления. Несмотря на то, что данный вопрос рассматривается достаточно долгое время многими отечественными и зарубежными учеными, он на сегодняшний момент времени остается нерешенным и в то же время имеет значительную научную и практическую значимость.

Таким образом, при разработке сложнопостроенных карбонатных залежей зачастую возникают сложности, связанные с работой системы ППД и выбором оптимальных технологий выработки запасов нефти. В данных условиях для поддержания уровня добычи на рентабельном уровне необходимо оптимизировать забойные давления скважин. Для обоснования оптимальных забойных давлений добывающих скважин и их влияния на выработку запасов в статье рассматривается карбонатная залежь Гагаринского месторождения (Пермский край).

Общие сведения об объекте исследования

На рассматриваемом объекте Гагаринского месторождения вследствие неравномерности развития трещиноватости коллекторов выделены четыре литолого-фациальные зоны, каждая из которых требует индивидуального подхода в разработке месторождения [5]. Скважины, расположенные в зоне рифового гребня, характеризуются наиболее высокой производительностью за весь период работы. Скважины, расположенные в зонах верхней и нижней частей тылового шлейфа, характеризуются максимальным темпом снижения производительности.

На объекте наблюдается отрицательная динамика пластового давления. Снижение давления может быть вызвано недостаточной компенсацией темпов отбора и низкой эффективностью системы ППД. В конце 2018 г. на рассматриваемой залежи проводились трассерные исследования с целью изучения гидродинамической связи между нагнетательными и добывающими скважинами, а также влияния закачки на вы-

работку запасов. По результатам трассерных исследований установлено, что доля воды, приходящаяся на добывающую скважину, составляет менее 1 %, что указывает на слабую гидродинамическую связь между скважинами и на малую эффективность закачки воды на выработку запасов нефти [14].

В связи со значительной неоднородностью коллекторских свойств дебит скважины определяется не столько толщиной пласта, сколько типом коллектора, расчлененностью вскрываемого разреза и принадлежностью к той или иной фациальной зоне. Низкое энергетическое состояние только усугубляет ситуацию и, соответственно, повышает риск неполучения плановых дебитов [5, 8].

Таким образом, в результате проведенного детального анализа отмечается существенное влияние естественной трещиноватости на эксплуатацию скважин. Снижение пластового давления обусловлено как недостаточной компенсацией отборов закачкой, так и несоответствием по разрезу интервалов отдачи и приема в добывающих и нагнетательных скважинах. В данных условиях поддержание добычи на плановом уровне возможно за счет оптимизации забойного (определение оптимального) давления добывающих скважин.

Для обоснования оптимальных (рациональных) забойных давлений добывающих скважин проведены лабораторные исследования на образцах керна с целью оценки изменения проницаемости коллектора при динамике эффективного давления, которые в дальнейшем сопоставлены с результатами эксплуатации скважин.

Результаты проведения лабораторных исследований

Современные программные продукты гидродинамического моделирования используют исходные данные в форме таблиц изменения фильтрационно-емкостных свойств пластовых систем с изменением давления. Как правило, изменение пористости происходит через линейную функцию, в то же время проницаемость коллектора принимается постоянной величиной. Для создания полной и приближенной к пластовым условиям картины необходимо в геолого-гидродинамических моделях наиболее полно учитывать динамику фильтрационных свойств коллектора, а для этого необходимо проведение специальных лабораторных исследований на керновом материале.

С использованием керновых моделей проведена серия лабораторных исследований, основанная на изучении динамики проницаемости горной породы при создании различных давлений. При оценке влияния напряженного состояния на фильтрационно-емкостные свойства горных пород использовалась установка УИК-5ВГ. В кернодержателе фильтрационной установки на образцы керна создавалось условие одновременного воздействия внутрипорового давления ($P_{пор}$) и давления обжима ($P_{обж}$). В экспериментах нагрузка образца обеспечивалась до необходимого эффективного давления путем создания депрессии давлений: $P_{эф} = P_{обж} - P_{пор}$. По результатам проведения лабораторных исследований построена зави-

симось коэффициента абсолютной проницаемости от изменения эффективного давления (использовались образцы керна, которые относятся к трещинному типу коллектора, и образцы, характеризующиеся поровым строением пустотного пространства).

Стоит отметить, что для образцов керна порового типа даже при $P_{эф}=35$ МПа снижение значения проницаемости минимально и не превышает 3 % от начального значения. В целом для 93 % исследованных образцов характерна стабильность величин коэффициента пористости и проницаемости при росте $P_{эф}$ (в 37 случаях из 40). Для трещиноватых образцов керна, напротив, при создании нагрузки уже в диапазоне до 5 МПа установлено резкое снижение коэффициента пористости и проницаемости; относительное снижение фильтрационно-емкостных свойств при этом составляет 90 %.

В ряде экспериментов динамика коэффициента пористости и проницаемости от созданного эффективного давления исследована первоначально с ростом нагрузки на образец керна (от 0 до 35 МПа), а затем с последовательным ее уменьшением до $P_{эф}=0$.

Для образцов керна порового типа эксперименты показали практически полное восстановление фильтрационно-емкостных свойств после снижения нагрузки. Принципиально иная ситуация установлена для трещиноватых образцов керна, емкостное пространство которых по данным томографических исследований выполнено вторичными пустотами, преимущественно трещинами и мелкими порами, связанными с выщелачиваем детрита и оолитами. В данном случае после роста $P_{эф}$ от 0 до 35 МПа и последующего его снижения вследствие смыкания трещин

фильтрационно-емкостные свойства в полной мере не восстанавливаются.

По результатам опытов также установлено, что при создании нагрузки, равной 4 МПа, относительное изменение проницаемости для трещиноватых образцов составляет в среднем 78 %. Тогда как для образцов керна порового типа при $P_{эф}=4$ МПа проницаемость снижается менее чем на 1 %. Очевидно, что примеры резкого ухудшения фильтрационно-емкостных свойств трещиноватых коллекторов при нагрузке и их неполное восстановление после ее снятия является следствием смыкания трещин при росте $P_{эф}$. Существенное снижение проницаемости наблюдается в интервале давлений от 0 до 6 МПа. Более подробное и детальное описание методики проведения исследования и полученных результатов представлено в работе [25].

Таким образом, проанализированная в работе серия опытов позволила установить, что в карбонатных коллекторах, характеризующихся трещиноватостью, при снижении нагрузки проницаемость коллектора в полной мере не восстанавливается. Соответственно на участках развития трещиноватых коллекторов с самого начала эксплуатации скважин рекомендуется значительно не снижать их забойные давления.

Анализ режимов работы добывающих скважин

Сравним достоверность результатов, полученных в лабораторных условиях, с динамикой эксплуатации скважины, которая расположена в зоне верхнего тылового шлейфа. Эксплуатация данной скважины сопровождалась регулированием (изменением) забойного давления (рис. 1).

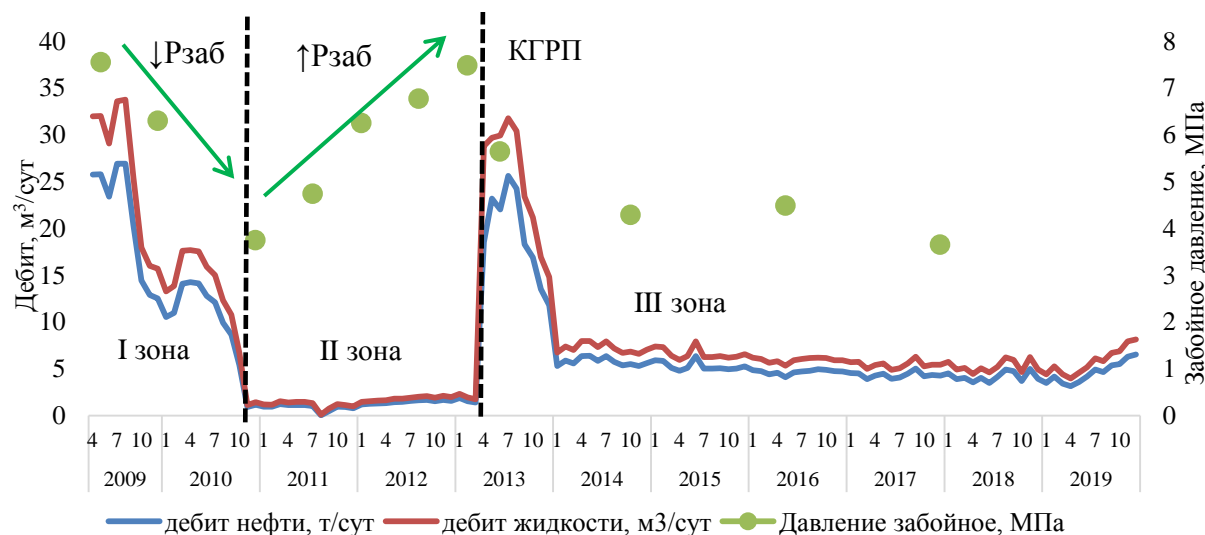


Рис. 1. Динамика технологических показателей работы скважины, расположенной в зоне верхнего тылового шлейфа
Fig. 1. Dynamics of technological indicators of the well located in the zone of the upper rear loop

Скважина начала работу в апреле 2009 г. с дебитом по нефти 25,8 т/сут. Первое гидродинамическое исследование (ГДИ) (забойное давление 7,6 МПа, пластовое 12,8 МПа), при интерпретации которого получен коэффициент проницаемости равный $0,0260 \text{ мкм}^2$, проведено 15.05.2009. За период эксплу-

атации скважины проведено 11 гидродинамических исследований. В табл. 1 представлены результаты интерпретации данных гидродинамических исследований, которые позволили оценить динамику проницаемости и средней раскрытости естественных трещин при изменении забойного давления.

Таблица 1. Результаты интерпретации данных гидродинамических исследований

Table 1. Results of interpretation of data from well tests

Дата Date	Давление забойное, МПа Bottomhole pressure, MPa	Коэффициент продуктивности, м ³ /сут*МПа Productivity index, m ³ /day*MPa	Давление пластовое, МПа Reservoir pressure, MPa	Проницаемость, мкм ² Permeability, μm ²	Раскрытость естественных трещин, мкм* Openness natural fractures, μm*
15.05.2009	7,554	6,24	12,686	0,0260	55,7
19.12.2009	6,298	5,71	9,049	0,0152	37,1
24.12.2010	3,747	0,49	6,403	0,0139	7,9
06.07.2011	4,738	0,54	7,691	0,0037	4,1
06.01.2012	6,249	0,64	8,744	0,0028	2,1
09.08.2012	6,769	0,79	9,163	0,0021	2,1
21.02.2013	7,485	1,25	9,010	0,0020	–**
17.06.2013	5,641	8,08	9,241	0,0143	15,4
24.10.2014	4,287	1,66	7,779	0,0034	5,4
21.05.2016	4,483	1,32	8,927	0,0010	–
09.12.2017	3,649	1,29	7,834	0,0011	–

*Средняя раскрытость естественных трещин определялась при обработке гидродинамических исследований методом Уоррена–Рута/Average opening of natural fractures was determined during the processing of hydrodynamic studies by the Warren–Root method

**По данным гидродинамических исследований естественная трещиноватость не идентифицируется/According to hydrodynamic studies, natural fracturing is not identified.

По результатам анализа эксплуатации скважины выделено три зоны:

- I – работа скважины при снижении забойного давления;
- II – работа скважины при увеличении забойного давления;
- III – работа скважины после проведения кислотного гидравлического разрыва пласта (КГРП).

На первом участке работы скважины наблюдается интенсивное падение дебита нефти с 25,8 т/сут (01.04.2009) до 5,4 т/сут (01.10.2010). Забойное давление за данный период снизилось в два раза (на 3,8 МПа), при этом проницаемость пласта снизилась в 1,9 раз с 0,0260 до 0,0139 мкм².

На втором участке работы скважины наблюдается увеличение забойного давления до первоначального уровня с 3,7 до 7,5 МПа, при этом дебит нефти изменялся незначительно и держался на уровне 1,1 т/сут. Коэффициент проницаемости снизился в семь раз – с 0,0139 до 0,0020 мкм².

Таким образом, проницаемость пласта уменьшилась в 13 раз (при первоначальном забойном давлении 7,6 МПа проницаемость пласта составляла 0,0260 мкм² (15.05.2009), при восстановлении забойного давления до 7,5 МПа (21.02.2013) проницаемость составила 0,0020 мкм²).

На третьем участке эксплуатации скважины проведен КГРП, что позволило восстановить проницаемость до 0,0143 мкм² и дебит нефти до 25 т/сут. Эффект от проведенного КГРП продлился всего шесть месяцев, дебит снизился до величины 5,5 т/сут. Забойное давление снизилось с 5,6 до 3,6 МПа, проницаемость вновь уменьшилась с 0,0143 до 0,0011 мкм².

Исходя из графика эксплуатации скважины (рис. 1) и результатов интерпретации ГДИ (табл. 1), можно сделать вывод о том, что падение забойного давления привело к существенному снижению проницаемости пласта. При повышении забойного давления проницаемость пласта не восстанавливается до исходных значений.

Полученные результаты подтверждаются результатами фильтрационных исследований.

Изменение (снижение) забойного давления в скважинах приводит к деформационным процессам в пласте (смыкание естественных трещин) и, как следствие, к существенному снижению продуктивности и производительности [15]. Последующее увеличение забойного давления не восстанавливает в полной мере проницаемость, что негативно влияет на производительность и полноту выработки запасов нефти [18–20].

Необходимо отметить, что смыкание естественных трещин приводит не только к снижению производительности скважин и неполной выработке запасов нефти в зоне дренирования, но и к низкой эффективности применяемых мероприятий, а также к ухудшению гидродинамической связи между скважинами, следовательно, в данных условиях важным и необходимым является обоснование оптимальных забойных давлений добывающих скважин на начальных этапах разработки карбонатных залежей.

Для обоснования оптимальных забойных давлений скважин и интенсификации добычи нефти целесообразно выбирать скважины, район дренирования которых обладает наибольшими остаточными извлекаемыми запасами. Извлекаемые запасы нефти для каждой скважины анализируемой залежи посчитаны с помощью геолого-гидродинамической модели (ГГДМ) в ПО ResVIEW при сопоставлении текущих дебитов нефти с остаточными извлекаемыми запасами. Также необходимо учитывать текущее пластовое и забойные давления в зонах дренирования скважин. По результатам проведенного анализа выделены три скважины: 431, 432 и 433.

Для определения оптимального забойного давления для выделенных скважин в ГГДМ необходимо изменять значения забойного давления на 1 МПа/год. Необходимые расчеты выполнялись в гидродинами-

ческом симуляторе Tempest версии 8.3.1 компании Roxar с помощью регулирования забойного давления и проницаемости [26–29].

По результатам лабораторных исследований и промыслового анализа эксплуатации скважин построена зависимость $k_{\text{прон}} - \Delta P$, которая позволяет оценить значение проницаемости при изменении забойного и/или пластового давлений. Для настройки геолого-гидродинамической модели для учета изменения проницаемости коллектора от динамики давлений использовался один из методов, описанных в работе [30], который дает удовлетворительные показатели при рациональных временных затратах. Предварительно проницаемость численно настраивалась по результатам интерпретации гидродинамических исследований. Далее происходил процесс модификации гидродинамической модели путем поиска множителей проницаемости в несколько этапов:

1. Преобразование полученной зависимости проницаемости от отношения текущего забойного к начальному пластовому давлению в зависимость проницаемости от текущего пластового давления. Зависимость будет иметь примерно такой же вид.
2. Построение зависимости проницаемости от пластового давления. Проницаемость, получаемая при исследованиях, будет равна проницаемости по латерали $K_x = K_y$.
3. Расчет значения проницаемости по латерали при достаточно маленьком шаге, например, 5 бар, от атмосферного до пластового давления (выше можно уменьшать дискретность).
4. Подстановка горизонтальной проницаемости в зависимость пункта 1. Получается распределение вертикальной проницаемости от пластового давления.

Принимается, что при начальном пластовом давлении проницаемости не изменены, а при изменении давления в ту или иную сторону увеличиваются либо уменьшаются. Так как распределение проницаемости в зоне каждой скважины может значительно различаться, то для использования необходимы не сами значения проницаемостей, а их множители (при $P_{\text{пл}} = P_{\text{пл-нач}}$ множитель равен единице).

Установлено, что при значительном снижении пластового давления роль вертикальной фильтрации выходит на первый план. Данная процедура была выполнена для каждой литолого-фациальной зоны рассматриваемого объекта разработки. Таким образом, имеются зависимости изменения проницаемостей по латерали и вертикали для каждой зоны. В отличие от распространенного способа при помощи ключевого слова KVSP применение ключевых слов KVPX, KVPY и KVPZ дает возможность разнонаправленного распределения изменения проницаемости от давления, что и было сделано.

В расчетах использовалась геолого-гидродинамическая модель карбонатной залежи Гагаринского месторождения, в которой произведен учет трещиноватости и параметра анизотропии проницаемости [31–33]. Особенности создания и использования модифицированной геолого-гидродинамической модели описаны в работе [34].

Результаты гидродинамического моделирования работы скважин

Исходя из динамики дебита нефти в зависимости от изменения забойного давления для скважины 431 установлено, что при значении забойного давления до 6 МПа наблюдается интенсивное снижение дебита нефти. Только при снижении забойного давления до 5 МПа и ниже наблюдается увеличение дебита нефти. Наибольшая накопленная добыча нефти для скважины 431 наблюдается при значении забойного давления 3 МПа, но при этом происходит интенсивное снижение пластового давления по сравнению с вариантом, где забойное давление составляет 8 МПа. Слишком низкое забойное давление приведет к резкому увеличению газового фактора. Исходя из вышесказанного, самым оптимальным вариантом будет поддержание забойного давления на уровне 8 МПа, при этом накопленная добыча составит 67,6 тыс. м³. Наименее эффективным вариантом эксплуатации для данной скважины будет являться величина забойного давления 6 МПа ($Q_{\text{нак}} = 66,3$ тыс. м³).

Аналогичная ситуация наблюдается на скважине 432. Наибольшая накопленная добыча нефти будет при значении забойного давления 3 МПа, накопленная добыча составит 135,3 тыс. м³. Наименее эффективным вариантом эксплуатации для данной скважины будет являться величина забойного давления 5 МПа ($Q_{\text{нак}} = 125,6$ тыс. м³).

Существенно отличается динамика работы скважины 434 (рис. 2, 3). По результатам гидродинамического моделирования наблюдается снижение дебитов нефти при уменьшении забойного давления. Падение дебита нефти происходит более низкими темпами при забойном давлении 6 МПа ($Q_{\text{нак}} = 22,5$ тыс. м³). Наименее эффективным вариантом для данной скважины наблюдается при поддержании забойного давления на уровне 3 МПа ($Q_{\text{нак}} = 20,0$ тыс. м³).

Экономическая эффективность предлагаемых мероприятий

Оценка экономической эффективности проводилась с помощью расчета чистого дисконтированного дохода (ЧДД) для каждой отдельной скважины. Исходные данные для расчета экономической эффективности предлагаемых мероприятий представлены в табл. 2.

Наибольший ЧДД (210,3 млн р.) для скважины 431 наблюдается при значении забойного давления 8 МПа. Несмотря на большую добычу нефти при варианте забойного давления 3 МПа ЧДД достигает всего 208,4 млн р. Наименьший ЧДД = 203,2 млн р. наблюдается при величине забойного давления 6 МПа. Таким образом, разница между оптимальным и наименее эффективным вариантом принесет прибыль в 7,1 млн р. за счет оптимизации режима работы добывающей скважины.

Наибольший ЧДД (468,7 млн р.) для скважины 432 наблюдается при значении забойного давления 3 МПа. При данном варианте наблюдается наибольшая добыча нефти. Но с технологической точки зрения такое низкое забойное давление приведет к еще

большему росту газового фактора и рискам прекращения добычи нефти из скважины. Поэтому для оптимального варианта разработки необходимо поддерживать забойное давление на уровне 6 МПа

(ЧДД=460,4 млн р.). Таким образом, разница между оптимальным и наименее эффективным вариантом составит 4,7 млн р. за счет оптимизации режима работы добывающей скважины.

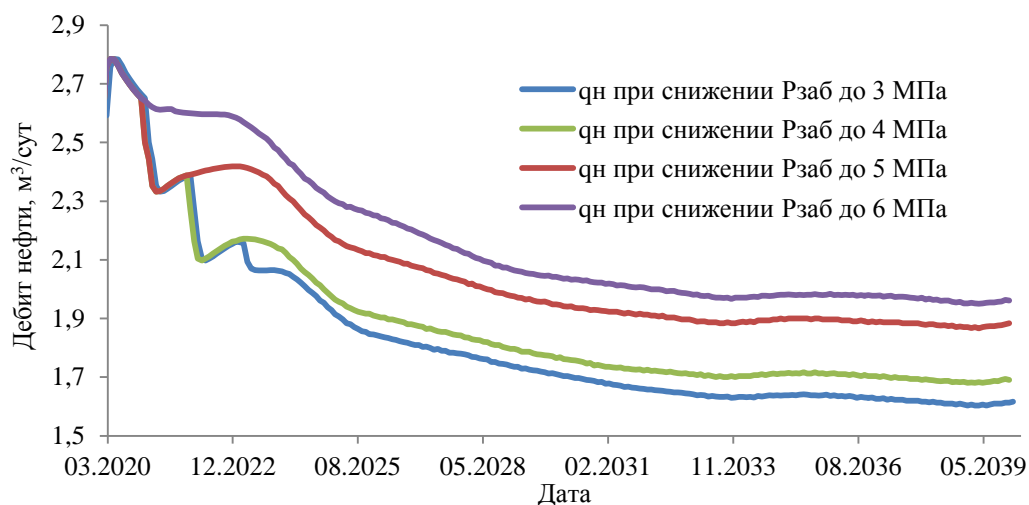


Рис. 2. Динамика дебита нефти скважины 434 в зависимости от изменения забойного давления
 Fig. 2. Oil production dynamics of well 434 depending on changes in bottomhole pressure

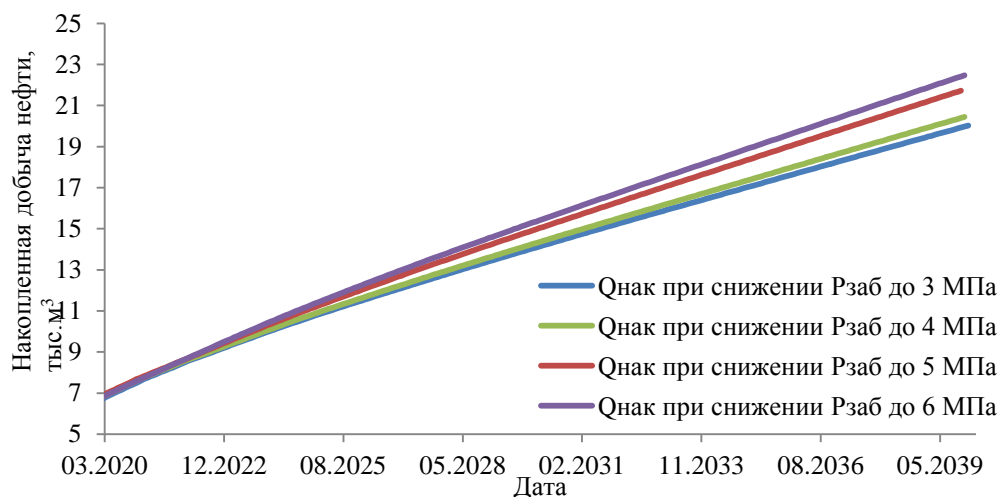


Рис. 3. Динамика накопленной добычи нефти скважины 434 в зависимости от изменения забойного давления
 Fig. 3. Dynamics of cumulative oil production of well 434 depending on changes in bottomhole pressure

Таблица 2. Исходные данные для расчет чистого дисконтированного дохода

Table 2. Initial data for calculating net present value (NPV)

Показатели Indicators		Единицы измерения Units of measurement	Значение Value
Период расчета Calculation period		лет years	20
Цена на нефть Urals (мировые) на 01.01.2020 Urals oil price (world) as of 01.01.2020		долл./барр. dollars/barrel	61,67
Налоги Taxes	На добавленную стоимость (НДС) Added value	%	20
	На прибыль At a profit	%	20
	На добычу полезных ископаемых (базовая ставка) For mining (base rate)	р./т rub./t	10172
Курс доллара на 01.01.2020 The dollar on 01.01.2020		рублей за доллар США rubles per US dollar	61,9
Цена реализации нефти Oil sales price		р./т rub./t	24801

Для скважины 434 (рис. 4) наибольший ЧДД (58,8 млн р.) соответствует наибольшей добыче нефти при величине забойного давления 6 МПа. Разница между оптимальным и наименее эффективным вариантом составляет 7,7 млн р.

Таким образом, проведенный расчет экономической целесообразности оптимизации (регулирование величины забойного давления) работы трех добывающих скважин Гагаринского месторождения позволит дополнительно получить 19,5 млн р.

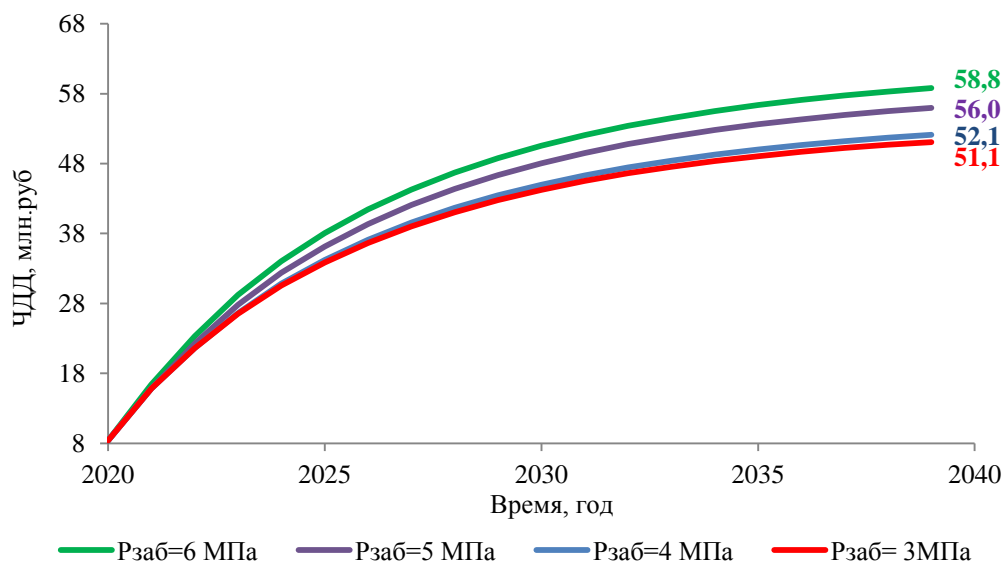


Рис. 4. Зависимость чистого дисконтированного дохода от величины забойного давления для скважины 434

Fig. 4. Net present value dependence on the value of bottomhole pressure of the well 434

Заключение

Разнообразие геологических условий залегания карбонатных залежей осложняет выбор технологий выработки запасов нефти. Одним из главных регуляторов эффективности разработки месторождения является забойное давление в добывающих скважинах. Оптимальное забойное давление для скважин с карбонатным типом коллектора позволяет увеличить эффективность разработки за счет оптимизации режима работы добывающих скважин. Необоснованное регулирование (снижение) забойного давления в скважинах может привести к смыканию естественных трещин и, как следствие, к снижению коэффициентов продуктивности и производительности скважин, поэтому необходимо устанавливать максимально допустимую продолжительность оптимального режима работы скважины, при котором не проявляется гистерезис коэффициента продуктивности [35, 36].

Проведенная серия экспериментов на образцах керна позволила установить, что для трещиноватых образцов при увеличении их напряженного состояния (рост $P_{эф}$) происходит резкое снижение фильтрационно-емкостных свойств. В дальнейшем при снижении (или полном снятии) напряженного состояния филь-

трационно-емкостные свойства трещиноватых коллекторов не восстанавливаются. К схожим выводам приводит анализ работы добывающих скважин. В участках развития процессов трещиноватости для скважин, работавших при низких забойных давлениях, после восстановления давлений текущая трещинная проницаемость оказывается существенно ниже начальной.

Используя геолого-гидродинамическую модель карбонатной залежи, которая учитывает структуру пустотного пространства горных пород, рассчитаны оптимальные забойные давления для добывающих скважин. Оптимизация забойного давления анализируемых скважин позволит дополнительно получить 19,5 млн р.

Таким образом, с самого начала эксплуатации карбонатных залежей, обладающих естественной трещиноватостью, крайне важно установить оптимальное забойное давление добывающих скважин. Определение и регулирование оптимального забойного давления для каждой добывающей скважины возможно с помощью модифицированных геолого-гидродинамических моделей, которые учитывают сложную структуру пустотного пространства горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A novel hydro-mechanical coupled analysis for the fractured vuggy carbonate reservoir / F. Zhang, M. An, B. Yan, Y. Wang, Y. Han // Computers and Geotechnics. – 2019. – V. 106. – P. 68–82.
2. A fast method of waterflooding performance forecast for large-scale thick carbonate reservoir / Yong Li, Qi Zhang, Daigang Wang, Benbio Song, Pengcheng Liu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 192. – Article 107227.
3. Theories and practices of carbonate reservoirs development in China / Yang Li, Zhijiang Kang, Zhaojie Xue, Songqing Zheng // Petroleum Exploration and Development. – 2018. – V. 45. – Iss. 4. – P. 712–722.
4. Kaminskaite I., Fisher Q.J., Michie E.A. Microstructure and petrophysical properties of deformation bands in high porosity carbonates // Journal of Structural Geology. – 2019. – V. 119. – P. 61–80.

5. Мартюшев Д.А., Зайцев Р.А. Влияние петрофизических параметров рифогенных карбонатных коллекторов нефтяных месторождений турнейско-фаменских отложений Верхнего Прикамья на продуктивность добывающих скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 77–85.
6. Исследования о наличии гидродинамической связи между терригенным бобриковским и карбонатным турнейским объектами на базе геолого-технологической модели участка месторождения / М.А. Сайфутдинов, И.Н. Хакимянов, В.Н. Петров, Р.И. Шешдилов, Л.М. Миронова // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 1. – С. 2–8.
7. Сулейманов Б.А., Ляйфов Я.А., Велиев Э.Ф. Применение умягченной воды для повышения нефтеотдачи пласта // SOCAR Proceedings. – 2019. – № 1. – С. 19–28.
8. Ali Y. Jirjees, Abdulaziz M. Abdulaziz Influences of uncertainty in well log petrophysics and fluid properties on well test interpretation: An application in West Al Qurna Oil Field, South Iraq // Egyptian Journal of Petroleum. – 2019. – V. 28. – Iss. 4. – P. 383–392.
9. Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н. Исследование особенностей выработки запасов трещинно-поровых коллекторов с использованием данных гидродинамических исследований скважин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 10. – С. 102–104.
10. Shedid A. Shedid Vertical-horizontal permeability correlations using coring data // Egyptian Journal of Petroleum. – 2019. – V. 28. – Iss. 1. – P. 97–101.
11. The effectiveness of flow salinity waterflooding in naturally fractured reservoirs / Faisal Awad Aljuboori, Jang Hyun Lee, Khaled A. Elraies, Kari D. Stephen // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 191. – Article 107167.
12. Introducing approximate well dynamics into production optimization for operations scheduling / E. Otte Hulse, Th. Lima Silva, E. Camponogara, V. Ramos Rosa // Computers and Chemical Engineering. – 2020. – V. 136. – 106773.
13. Adaptive modeling of waterflooding process in oil reservoirs / F. Hourfar, B. Moshiri, K. Salahshoor, M. Zaare-Mehrjerdi, P. Pourafshary // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2016. – V. 146. – P. 702–713.
14. Пономарева И.Н., Мартюшев Д.А., Черный К.А. Исследование взаимодействия между нагнетательными и добывающими скважинами на основе построения многоуровневых моделей // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 116–126.
15. Alexander Davis, Oladoyin Kolawole, Marshall Watson, Chioma Onwumelu Optimal field development and production design for unconventional reservoirs: A case study from Central Sub-Basin, Permian Basin, new Mexico // Petroleum Research. – 2021. – V. 6. – Iss.1. – P. 66–76.
16. Гамес Ф. Исследование трещиноватости, моделирование и анализ неопределенностей карбонатного коллектора с включением динамических данных (Ближний Восток) // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 154–157.
17. Фархуллин Р.Г., Ханнанов М.Т. Некоторые особенности гидромеханики нефтяных коллекторов с двойной пористостью при дренировании // Георесурсы. – 2006. – № 2 (19). – С. 37–39.
18. Flowing bottomhole pressure prediction for gas wells based on support vector machine and random samples selection / Wei Chen, Qinfeng Di, Feng Ye, Jingnan Zhang, Wenchang Wang // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – V. 42. – Iss. 29. – P. 18333–18342.
19. Sami Nashawi I., Malallah A.H. Well test analysis of finite-conductivity fractured wells producing at constant bottomhole pressure // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2007. – V. 57. – Iss. 3–4. – P. 303–320.
20. A new method for early gas kick detection based on the consistencies and differences of bottomhole pressure at two measured points / Hongwei Yang, Jun Li, Gonghui Liu, Chao Wang, Hailong Jiang, Kuidong Luo, Bin Wang // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 176. – P. 1095–1105.
21. Методика определения забойного давления с использованием многомерных моделей / В.И. Галкин, И.Н. Пономарева, И.А. Черных, Е.В. Филиппов, Г.Н. Чумаков // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 1. – С. 40–43.
22. Dongjae Kam, Jichao Han, Akhil Datta-Gupta. Streamline-based history matching of bottomhole pressure and three-phase production data using a multiscale approach // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 154. – P. 217–233.
23. Martyshev D.A., Yurikov A. Evaluation of opening of fractures in the Logovskoye carbonate reservoir, Perm Krai, Russia // Petroleum Research. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.002> (дата обращения 15.03.2021).
24. Jahanandish J., Salimifard B., Jalalifer H. Predicting bottomhole pressure in vertical multiphase flowing wells using artificial neural networks // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2011. – V. 75. – Iss. 3–4. – P. 336–342.
25. Мартюшев Д.А. Оценка влияния напряженного состояния горных пород на проницаемость карбонатных коллекторов // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 24–33.
26. Концептуальное геологическое моделирование как основа разработки карбонатных залежей на примере месторождения ближневосточного региона / Р.А. Растагаев, В.В. Морозов, С.И. Мельников, С.А. Идрисова, С.В. Мильчаков // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 168–171.
27. Mingshui Song Reservoir formation conditions and key technologies for exploration and development in Shengtuo oilfield in Bohai Bay Basin // Petroleum Research. – 2020. – V. 5. – Iss. 4. – P. 289–303.
28. Попов В.Л., Поднебесных А.В., Пыльник С.В. Определение и характеристика коэффициента связности коллектора геолого-гидродинамических моделей нефтегазовых залежей // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 211–221.
29. Особенности учета анизотропии проницаемости в гидродинамической модели / Р.И. Еремков, В.П. Меркулов, О.С. Чернова, М.О. Коровин // Записки Горного института. – 2020. – Т. 243. – С. 299–304.
30. Аббасов Е.М., Агаева Н.А., Керимова Ш.А. Интегральное моделирование работы газовых скважин с учетом деформируемости коллектора пласта // SOCAR Proceedings. – 2019. – № 2. – С. 45–52.
31. Huafeng Sun, Sandra Vega, Guo Tao. Analysis of heterogeneity and permeability anisotropy in carbonate rock samples using digital rock physics // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 156. – P. 416–429.
32. Characterization of unique natural gas flow in fracture-vuggy carbonate reservoir: A case study on Dengying carbonate reservoir in China / Xinhui Xie, Hongjiang Lu, Hucheng Deng, Hongzhi Yang, Bailu Teng, Huazhou Andy Li // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 182. – 106243.
33. Porosity and permeability of tight carbonate reservoir rocks in the north of Iraq / F. Rashid, P.W.J. Glover, P. Lorinczi, R. Collier, J. Lawrence // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015. – V. 133. – P. 147–161.
34. Мартюшев Д.А. Совершенствование геолого-гидродинамической модели карбонатного нефтяного объекта путем учета параметра анизотропии проницаемости // Записки Горного института. – 2020. – Т. 243. – № 3. – С. 313–318.
35. Reservoir and lithofacies shale classification based on NMR logging / Hongyan Yu, Zhenliang Wang, Fenggang Wen, Reza Rezaee, Maxim Lebedev, Xiaolong Li, Yihuai Zhang, Stefan Iglauer // Petroleum Research. – 2020. – V. 5. – Iss. 3. – P. 202–209.
36. Hydrocarbon migration in fracture-cave systems of carbonate reservoirs under tectonic stresses: A mechanism study / Chenjun Huang, Geyun Liu, Kaibo Shi, Jinyin Yina, Jinrui Guo, Chongzhi Tao // Petroleum Research. – 2020. – V. 5. – Iss. 2. – P. 124–130.

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

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

UDC 622.276

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF BOTTOMHOLE PRESSURE OF PRODUCING WELLS ON RESERVE PRODUCTION FROM COMPLICATED CARBONATE RESERVOIRS

Dmitriy A. Martyushev,
martyushev@inbox.ru

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

The relevance of the research is caused by the fact that when developing the complex carbonate deposits, the difficulties often arise. They are associated with the operation of the reservoir pressure maintenance system and the choice of optimal technologies for development of oil reserves. Under these conditions, to maintain the production at a profitable level, it is necessary to optimize the bottomhole pressure of the wells. For oil companies developing carbonate deposits, it is worth paying attention to the value of the optimal bottomhole pressure, which ensures the most rational development of reserves, and not critical. Even though this issue has been considered for quite a long time by many domestic and foreign scientists, it remains unresolved now and at the same time it has significant scientific and practical importance.

The main aim of the study is to substantiate the optimal bottomhole pressure of producing wells and its influence on the development of reserves from the complex carbonate reservoir of the Gagarinskoe oil field.

Object: carbonate reservoir of the Gagarinskoe oil field.

Methods: filtration units with reservoir conditions modeling UIK-5VG and AFS-300; using Roxar's Tempest Fluid Dynamic Simulator version 8.3.1.

Results. Closing of natural fractures leads not only to a decrease in well productivity and to incomplete production of oil reserves in the drainage zone, but also to a low efficiency of the measures used, as well as to a deterioration in the hydrodynamic connection between wells. Therefore, under these conditions, it is important and necessary to substantiate the optimal bottomhole pressures of producing wells at the initial stages of the development of carbonate deposits. Laboratory studies and calculations using a geological and hydrodynamic model of a carbonate reservoir, which takes into account the peculiarities of the geological structure, have shown the practical value (expressed in an increase in oil production) of optimizing the bottomhole pressure of producing wells operating fractured carbonate reservoirs. The calculation of the economic component of optimization (regulation of the bottomhole pressure value) of the operation of three production wells of the Gagarinskoe field will additionally receive 19,5 million rubles.

Key words:

Natural fractures, geological and hydrodynamic model, oil production rate, additional oil production, water injection, stress state of rocks, permeability, fracture opening

REFERENCES

- Zhang F., An M., Yan B., Wang Y., Han Y. A novel hydro-mechanical coupled analysis for the fractured vuggy carbonate reservoir. *Computers and Geotechnics*, 2019, vol. 106, pp. 68–82.
- Yong Li, Qi Zhang, Daigang Wang, Benbio Song, Pengcheng Liu. A fast method of waterflooding performance forecast for large-scale thick carbonate reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 192, Article 107227.
- Yang Li, Zhijiang Kang, Zhaojie Xue, Songqing Zheng. Theories and practices of carbonate reservoirs development in China. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, vol. 45, Iss. 4, pp. 712–722.
- Kaminskaite I., Fisher Q.J., Michie E.A. Microstructure and petrophysical properties of deformation bands in high porosity carbonates. *Journal of Structural Geology*, 2019, vol. 119, pp. 61–80.
- Martyushev D.A., Zaitsev R.A. Influence of oil field reef carbonate reservoir petrophysical parameters of tournaian-famennian deposits in upper Kama on well productivity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 77–85. In Rus.
- Sayfutdinov M.A., Khakimzyanov I.N., Petrov V.N., Sheshdirov R.I., Mironova L.M. Studies on the presence of a hydrodynamic connection between the terrigenous Bobrikovsky and carbonate Tournaian objects based on the geological and technological model of the field site. *Georesources*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 2–8. In Rus.
- Suleimanov B.A., Latifov Ya.A., Veliev E.F. Application of softened water to enhance oil recovery. *SOCAR Proceedings*, 2019, no. 1, pp. 19–28. In Rus.
- Ali Y. Jirjees, Abdulaziz M. Abdulaziz Influences of uncertainty in well log petrophysics and fluid properties on well test interpretation: An application in West Al Qurna Oil Field, South Iraq. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2019, vol. 28, Iss. 4, pp. 383–392.
- Martyushev D.A., Ponomareva I.N. Researching features of development of fractured porous reservoirs reserves using well-test data. *Oil industry*, 2017, no. 10, pp. 102–104. In Rus.
- Shedid A. Shedid Vertical-horizontal permeability correlations using coring data. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2019, vol. 28, Iss. 1, pp. 97–101.
- Faisal Awad Aljuboori, Jang Hyun Lee, Khaled A. Elraies, Kari D. Stephen. The effectiveness of flow salinity waterflooding in naturally fractured reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 191, Article 107167.
- Otte Hulse E., Lima Silva Th., Camponogara E., Ramos Rosa V. Introducing approximate well dynamics into production optimization for operations scheduling. *Computers and Chemical Engineering*, 2020, vol. 136, 106773.
- Hourfar F., Moshiri B., Salahshoor K., Zaare-Mehrjerdi M., Pourafshary P. Adaptive modeling of waterflooding process in oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 146, pp. 702–713.
- Ponomareva I.N., Martyushev D.A., Cherny K.A. Research of interaction between expressive and producing wells based on construction of multilevel models. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, Iss. 2, pp. 116–126. In Rus.
- Alexander Davis, Oladoyin Kolawole, Marshall Watson, Chioma Onwumelu Optimal field development and production design for unconventional reservoirs: A case study from Central Sub-Basin, Permian Basin, new Mexico. *Petroleum Research*, 2021, vol. 6, Iss. 1, pp. 66–76.
- Gamez F. Study of fracturing, modeling, and analysis of uncertainties of a carbonate reservoir with the inclusion of

- dynamic data (Middle East). *Georesources*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 154–157. In Rus.
17. Farkhullin R.G., Hannanov M.T. Some features of the hydromechanics of oil reservoirs with double porosity during drainage. *Georesources*, 2006, no. 2 (19), pp. 37–39. In Rus.
 18. Wei Chen, Qinfeng Di, Feng Ye, Jingnan Zhang, Wenchang Wang. Flowing bottomhole pressure prediction for gas wells based on support vector machine and random samples selection. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, Iss. 29, pp. 18333–18342.
 19. Sami Nashawi I., Malallah A.H. Well test analysis of finite-conductivity fractured wells producing at constant bottomhole pressure. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, vol. 57, Iss. 3–4, pp. 303–320.
 20. Hongwei Yang, Jun Li, Gonghui Liu, Chao Wang, Hailong Jiang, Kuidong Luo, Bin Wang. A new method for early gas kick detection based on the consistencies and differences of bottomhole pressure at two measured points. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 176, pp. 1095–1105.
 21. Galkin V.I., Ponomareva I.N., Chernykh I.A., Filippov E.V., Chumakov G.N. Methodology for determining bottomhole pressure using multidimensional models. *Oil industry*, 2019, no. 1, pp. 40–43. In Rus.
 22. Dongjae Kam, Jichao Han, Akhil Datta-Gupta. Streamline-based history matching of bottomhole pressure and three-phase production data using a multiscale approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 154, pp. 217–233.
 23. Martyushev D.A., Yurikov A. Evaluation of opening of fractures in the Logovskoye carbonate reservoir, Perm Krai, Russia. *Petroleum Research*, <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.002>
 24. Jahanandish J., Salimifard B., Jalalifer H. Predicting bottomhole pressure in vertical multiphase flowing wells using artificial neural networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, vol. 75, Iss. 3–4, pp. 336–342.
 25. Martyushev D.A. Rock stress state influence on permeability of carbonate reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, Iss. 8, pp. 24–33. In Rus.
 26. Rastegaev R.A., Morozov V.V., Melnikov S.I., Idrisova S.A., Milchakov S.V. Conceptual geological modeling as a basis for the development of carbonate deposits on the example of a field in the Middle East region. *Georesources*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 168–171. In Rus.
 27. Mingshui Song. Reservoir formation conditions and key technologies for exploration and development in Shengtuo oilfield in Bohai Bay Basin. *Petroleum Research*, 2020, vol. 5, Iss. 4, pp. 289–303.
 28. Popov V.L., Podnebesnykh A.V., Pyl'nik S.V. Determination and characteristics of the reservoir connectivity coefficient of geological and hydrodynamic models of oil and gas deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 211–221. In Rus.
 29. Ermekov R.I., Merkulov V.P., Chernova O.S., Korovin M.O. Especially considering the anisotropy of permeability in the hydrodynamic model. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 243, pp. 299–304. In Rus.
 30. Abbasov E.M., Agaeva N.A., Kerimova Sh.A. Integral modeling of gas well operation considering the deformability of the reservoir. *SOCAR Proceedings*, 2019, no. 2, pp. 45–52. In Rus.
 31. Huafeng Sun, Sandra Vega, Guo Tao. Analysis of heterogeneity and permeability anisotropy in carbonate rock samples using digital rock physics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 416–429.
 32. Xinhui Xie, Hongjiang Lu, Hucheng Deng, Hongzhi Yang, Bailu Teng, Huazhou Andy Li. Characterization of unique natural gas flow in fracture-vuggy carbonate reservoir: a case study on Dengying carbonate reservoir in China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 182, 106243.
 33. Rashid F., Glover P.W.J., Lorinczi P., Collier R., Lawrence J. Porosity and permeability of tight carbonate reservoir rocks in the north of Iraq. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, vol. 133, pp. 147–161.
 34. Martyushev D.A. Improving the geological and hydrodynamic model a carbonate oil object by taking into account the permeability anisotropy parameter. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 243, Iss. 3, pp. 313–318. In Rus.
 35. Hongyan Yu, Zhenliang Wang, Fenggang Wen, Reza Rezaee, Maxim Lebedev, Xiaolong Li, Yihuai Zhang, Stefan Iglauere. Reservoir and lithofacies shale classification based on NMR logging. *Petroleum Research*, 2020, vol. 5, Iss. 3, pp. 202–209.
 36. Chenjun Huang, Geyun Liu, Kaibo Shi, Jinyin Yina, Jinrui Guo, Chongzhi Tao. Hydrocarbon migration in fracture-cave systems of carbonate reservoirs under tectonic stresses: A mechanism study. *Petroleum Research*, 2020, vol. 5, Iss. 2, pp. 124–130.

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Dmitriy A. Martyushev, Cand. Sc., associate professor, Department of Oil and Gas Technologies Perm National Research Polytechnic University.

УДК 550.83+ 552.5 +553.98

ВТОРИЧНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КАЧЕСТВЕ АТРИБУТА НЕФТЕГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ПЕСЧАНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ТАМБЕЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Мельник Игорь Анатольевич¹,
melnik@tpu.ru

Родивилов Данила Борисович²,
rodivilovdb@gmail.com

Никитин Иван Александрович³,
nikitin_ivan_alex@mail.ru

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

² Филиал Газпром недр НТЦ ООО «Газпром недр»,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Герцен а, 70.

³ НИПИ «СургутНИПИнефть»,
Россия, 628415, г. Сургут, ул. Энтузиастов, 48.

Актуальность исследования определяется рассмотренной возможностью при отсутствии керна выявлять пропущенные продуктивные залежи в песчаных интервалах по материалам как старого, так и нового фонда геофизических исследований скважин. Современные требования к созданию и разработке на высочайшем уровне минерально-сырьевой базы РФ предполагают введение большого количества принципиально новых месторождений и залежей, рентабельность которых устанавливается уровнем изученности. Во многих случаях просто необходимо снизить временные рамки и капитальные затраты на геологоразведочные работы в силу применения и доисследования данных в прошлом изученных месторождений. Район Тамбейского месторождения является достаточно перспективным в свете активного освоения нефтегазовых площадей Ямала. **Цель:** иллюстрация использования таких параметров, как статистические интенсивности вторичных пелитизации и карбонатизации, в качестве индикаторов нефтегазонасыщенности песчаных коллекторов на различных участках Тамбейского месторождения.

Объекты: меловые песчаные отложения нефтегазоносного месторождения Тамбейской площади полуострова Ямал. **Результаты.** Показаны петрологически-геохимические индикаторы нефтегазоносности и их определение по материалам ГИС. Проиллюстрированы сопоставления результатов статистической интерпретации материалов ГИС с результатами петрографического исследования керна. В работе использована инновационная технология статистической интерпретации материалов ГИС на предмет выявления интенсивностей вторичных геохимических процессов при индикации нефтегазоносных коллекторов. Подтверждено, что на Северо-Тамбейском участке с 80 % вероятностью индикатором газонасыщенности пласта является интенсивность вторичной карбонатизации при условии превышения её критической величины 0,22 усл. ед., а на Западно-Тамбейском участке индикатором нефтегазонасыщенности коллекторов является интенсивность вторичной пелитизации при условии превышения их величин до 0,084 усл. ед.

Ключевые слова:

Наложено-эпигенетический процесс, вторичная пелитизация, вторичная карбонатизация, низкоомный коллектор, углеводороды, геохимический индикатор нефтегазоносности, геофизические исследования скважин.

Введение

Образования аутигенных минералов в горных породах при вторичных геохимических процессах в большинстве своем обусловлены наложенным эпигенезом, проходящим в результате субвертикальной миграции флюидов по проницаемым зонам литосферы, вследствие действия градиента литостатического давления. В зависимости от химического состава флюида и степени различия рН между внешним флюидом и заполняемой им средой происходят геохимические преобразования породообразующих минералов с различной интенсивностью. Вновь сформированные минералы будут являться индикаторами качества и свойств мигрирующих флюидов. По интенсивностям вторичных геохимических процессов можно судить о характере насыщения пласта и выделять интересные нас углеводородные интервалы [1–5].

Интенсивность процессов можно определить по количеству аутигенных минералов, образованных в результате вторичных преобразований (и генетически с ними связанных) аллотигенных минералов относительно их первоначального содержания на единице площади. Для этого необходимо провести минералогическое петрографическое исследование образцов керна. Концентрацию первичных аллотигенных минералов часто выявляют по косвенным признакам. При отсутствии керна качество и степень вторичных геохимических изменений среды можно определить по результатам статистическо-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин (ГИС) [6, 7].

Многочисленные исследования дали нам понять, что показателем присутствия углеводородов в исследуемых песчаных пластах являются вычисляемые

статистическо-корреляционные параметры (СКП) интенсивностей различных эпигенетических процессов в пределах их определенных граничных величин [7, 8]. Сопоставив результаты испытаний пластов с выборочными величинами СКП интенсивностей различных процессов, выбираем среди них геохимический индикатор и его граничные величины для нефтегазонасыщенных пластов. В итоге, определив критерий поиска углеводородных (УВ) интервалов для исследуемой площади, мы можем выявить пропущенные низкоомные залежи, обусловленные вторичными процессами [9].

Целью данной статьи является иллюстрация результатов инновационных исследований по технологии определения СКП (на основе данных ГИС) интенсивностей вторичных процессов, обусловленных УВ насыщением в меловых песчаных отложениях Тамбейского нефтегазоносного месторождения полуострова Ямал. Показаны геохимические индикаторы нефтегазонасыщенности и результаты сопоставления данных статистической интерпретации материалов ГИС с петрографическими изучением шлифов керн.

Краткое теоретическое обоснование

До поступления внешних флюидов в песчаный коллектор породы песчаника находится в равновесном состоянии с точки зрения прохождения химических процессов. После поступления флюидов с различной рН относительно заполняемой среды равновесие нарушается, и проходящая химическая реакция влияет как на трансформацию минералов, так и на петрофизические свойства породы коллектора. Например, в результате поступления кислых глубинных флюидов с растворенной углекислотой (рН=4,0–5,0) углекислотный метасоматоз протекает следующим образом – полевые шпаты либо глиноземы, вступая в химическое взаимодействие с растворенным в воде углекислым газом, преобразуются в каолиниты с образованием катионов железа, калия, а также угольной и кремневой кислот [5, 10].

Фиксируется растворение как заполняющего поры цемента, так и матричного алюмосиликата вследствие высоких показателей кислотности. Наблюдается увеличение проницаемости, а также емкости коллектора [1]. Образующиеся катионы мигрируют к отрицательно заряженной глинистой поверхности двойного электрического слоя (ДЭС), тем самым повышая диффузионную плотность зарядов и соответствующую поверхностную электропроводность гетерогенной породы [6, 11]. Данную дополнительную компоненту электропроводности невозможно учесть при стандартной интерпретации материалов ГИС, что может привести к ошибочной интерпретации характера насыщения коллектора и соответствующему пропуску продуктивного пласта [12].

При поступлении в полиминеральный, с содержанием полевых шпатов, песчаный коллектор в породе синхронно увеличиваются содержания глинистых минералов (каолинитов) относительно кислых внешних флюидов и её пористость. Очевидно, это априори предполагает образование *положительной регрессии*

в корреляционной связи независимых петрофизических параметров выборки глинистости с пористостью. При отсутствии вторичных геохимических процессов, как правило, между ними регрессия отрицательная и открытая пористость частично зависит от глинистости. Поэтому образование положительной регрессии между рассматриваемыми петрофизическими параметрами по данным ГИС в исследуемом песчаном интервале выявляет наличие процесса *вторичной каолинитизации.*

Вторичные карбонаты могут образоваться после разгерметизации флюидоупора с резким понижением давления, и в зависимости от времени прохождения метасоматоза в нижних слоях породы с соответствующей остаточной кислотностью среды происходит «вскипание» углекислоты и ощелоченный мигрирующий в верхние отложения раствор карбонатирует (кальцитизирует) породу [13].

При образовании коллектора на завершающих стадиях в области водонефтяного контакта (ВНК) повышается рН среда, связанная с соединением щелочного раствора с водным, который был вытеснен вниз углеводородами [12]. Перешедшие в раствор ионы редких земель могут изоморфно входить в структуру образующихся карбонатов, повышая тем самым макроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов (МСП). В таком случае вторичные карбонаты выявляются *в случае положительной регрессии карбонатов с МСП породы при увеличении карбонитизации песчаника.*

В естественных условиях пирит формируется в основном за счет химического взаимодействия сероводорода и железистых соединений, растворенных в воде. Соединения с серой всегда присутствуют в углеводородной смеси, поэтому пирит часто ассоциируется с УВ [14]. В полимиктовой песчаной породе мезозойских отложений Западной Сибири пирит является наиболее часто встречающимся железосодержащим минералом с электропроводящими свойствами. Поэтому *отрицательная регрессия содержания железа с УЭС породы с большой вероятностью будет ассоциироваться с пиритами.*

Вторичные изменения железосодержащего биотита, такие как хлоритизация, гидратация с сидеритизацией, также повышают электропроводность породы, и в этом случае отрицательная регрессия железа с УЭС породы обусловлена процессами преобразования аллотипного биотита [13].

Пелитизация калиевых полевых шпатов с последующим образованием гидратированной пленки глинистых минералов (например, крустификационного хлорита) приводит замыкающую поверхностную электрическую цепь к формированию обратной корреляционной связи УЭС с содержанием калия.

Образование вторичных пиритов, пелитов в случае формирования поверхностной электрической цепи, как и образование двойного электрического слоя глины с повышенной электрической проводимостью вследствие диффузии свободных катионов приводят к формированию в пластах низкоомных коллекторов с возможным УВ насыщением.

Итак, перечисленные регрессии между выборочными материалами ГИС, петрофизическими и петрохимическими данными позволяют (на качественном уровне) выделять песчаные интервалы с вторичными геохимическими процессами. Но нам нужны и количественные характеристики – интенсивности этих процессов.

Статистическо-корреляционные параметры i -интенсивности различных эпигенетических процессов можно определять на основании корреляций между двумя дискретными массивами данных, обоснованными физико-химической связью [6–8]. Главным результатом связи двух отдельных выборок (X, Z) являются коэффициенты корреляции R и аппроксимации R^2 , определяющиеся следующим образом:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z})}{n\sigma_x\sigma_z},$$

где σ – стандартное отклонение выборочных значений. Коэффициент аппроксимации отражает долю дискретных значений от общего их количества n , соответствующую определенному тренду (например, $f=Z(X)$), т. е. *качество*, «тесноту» их связи.

Для определения доли интервала пласта, в которой вторичный процесс преобразует вещество, *количественный* статистический параметр вычисляется по следующей зависимости:

$$Y = \frac{q}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n},$$

где q – количество выборочных значений при условии исследуемой регрессии $R_i > |\pm 0,6|$; n – генеральная выборка (количество исследуемых дискретных значений пласта). Статистический параметр Y выражает интервальную меру влияния вторичного процесса в песчаниках исследуемых пластов, т. е. показывает *количественную* долю преобразованного вещества исследуемого интервала. Назовем его *интервальный параметр*.

Различные теоретические и эмпирические исследования показали, что *статистическая интенсивность вторичных процессов* (каоинитизация, пелитизация, пиритизация и карбонатизация) исследуемого интервала песчаного пласта по скважине равна произведению вычисляемых СКП [6]:

$$i = R^2 Y.$$

Покажем результативность применения рассмотренной технологии на примере сопоставления эмпирических данных исследований песчаных пластов мезозоя Тамбейского месторождения полуострова Ямал с вычисляемыми статистическими интенсивностями вторичных процессов.

Краткое описание методики определения выборочных значений

К исследуемым выборочным значениям относятся кажущееся УЭС породы, коэффициенты глинистости ($k_{гп}$), общей пористости (k_n), плотности, карбонатности ($k_{кар}$), макроскопическое сечение поглощения

тепловых нейтронов (МСП) и относительное содержание железа.

Все исследуемые выборочные данные определяются для каждого песчаного интервала отдельно – после калибровки. В начале в разрезе скважины выбирается песчаный интервал, где имеются данные ГИС: нейтронный каротаж по тепловым нейтронам (ННКт) либо нейтронный гамма каротаж (НГК), данные кажущего УЭС (например, двухметровый градиент-зонд ГЗ-3), гамма-каротажа скважин (ГК) и собственной поляризации (ПС). По зависимостям $k_{гп}=F(\text{ГК, ПС})$, $k_n=F(\text{НК})$ и $k_{кар}=F(\text{НК, ГК, ПС})$ после калибровки, по которой для каждой зависимости определяются калибровочные коэффициенты пропорциональности и на основании зависимостей поточно (по глубине песчаного интервала) вычисляются коэффициенты глинистости, пористости и карбонатности. Например, предварительно в разрезе скважины по данным каротажа определяются величины ПС_(max) при $k_{гп}=100\%$ и ПС_(min) при $k_{гп}=0\%$, далее усредненное (по интервалу) отношение разниц приравнивают к вычисленной средней глинистости интервала и по отношению средней глинистости и среднего отношения определяется калибровочный коэффициент. Так для всех зависимостей.

При определении относительного содержания железа и МСП калибровочные коэффициенты вычисляются на основании уже известных алгоритмов [6]. На базе ранее проведенных лабораторных исследований керн нескольких тысяч песчаных интервалов в меловых и юрских пластах по Западно-Сибирской нефтегазовой провинции в полимиктовой песчаной породе были определены средние содержания породообразующих и редкоземельных химических элементов, оказывающих наибольшее влияние на показание нейтронного каротажа. По значениям средних содержаний химических элементов и данным нейтронного каротажа, а также пористости, глинистости и карбонатности, на основании уже выявленных зависимостей вычисляются калибровочные коэффициенты по каждому интервалу отдельно.

После определения калибровочных коэффициентов на базе системы уравнений [6] вычисляются относительные содержания бора и железа, в наибольшей степени влияющих (после водорода) на показания нейтронного каротажа и химически активных элементов. Остальные элементы связаны зависимостями с глинистостью и карбонатностью песчаного интервала. В полимиктовой песчаной породе содержание калия оказалось связано функциональной зависимостью с содержанием бора и показанием ГК.

Анализ и обобщение результатов исследования

В данной работе исследуются два участка Тамбейского месторождения: северный и западный. Проведенный статистический анализ результатов инновационной интерпретации материалов ГИС позволил выявить петрологические индикаторы присутствия УВ в песчаных интервалах как на западном, так и на северном участках Тамбейского месторождения. Покажем итоги выявления индикаторов в песчаных по-

родах, а также результаты сопоставления вычисленной интенсивности вторичных процессов с описанием шлифов образцов керна и результатами определения общего состава карбонатных минералов методом полуколичественного рентгеноструктурного анализа.

Проведенные исследования песчаных пластов мелового комплекса отложений Тамбейских участков обнаружили, что для каждого нефтегазонасыщенного участка определяются свои, индивидуальные индикаторы нефтегазонасыщенности пласта. Сопоставления полученных результатов статистической интерпретации песчаных интервалов с результатами испытаний пластов позволяют сформировать две выборки вычисленных статистических параметров для их дальнейшего анализа. При сопоставлении двух выборок и их значительном количественном различии количество значений данных выборок уравнивалось.

Для Западно-Тамбейского участка массив данных (для четырех параметров интенсивностей) УВ насыщенных интервалов составил 47 выборочных значений и 32 значения для водонасыщенных пластов. По результатам статистического анализа определился параметр-индикатор нефтегазонасыщенности пластов. Это интенсивность *пелитизации*, средняя величина которой в УВ насыщенной породе на 47 % меньше средней величины водонасыщенного пласта, что является наибольшей отличительной особенностью в сравнении с остальными статистическими параметрами. Если из выборки убрать нулевые значения, то средняя величина интенсивности УВ насыщенного коллектора будет отличаться на 33 % от средней интенсивности в водоносном пласте. Кроме того, парный двухвыборочный *t*-тест для средних показал значимое отличие выборок интенсивностей пелитизации газонасыщенных и водонасыщенных пластов с коэффициентом $k=2,08$ при критическом значении $k_{кр}=1,7$.

По всей видимости, уменьшение интенсивности пелитизации в газонасыщенных пластах (рис. 1) обусловлено эффектом консервации углеводородами геохимических процессов (закономерность Чепикова) [15]. В отличие от газонасыщенных интервалов, в нефтенасыщенных пластах данного участка интенсивность пелитизации повышается. Это связано с особенностями фазового разделения смеси нефти и воды (в отличие от газа) при её заполнении коллектора.

Исследования указывают на то, что при интенсивности пелитизации *меньше* граничной величины 0,084 усл. ед. вероятность выявления газонасыщенных пластов на Западно-Тамбейском участке равна 80 %.

По Северо-Тамбейскому участку выборка газонасыщенных интервалов составила 74 значения (по четырем параметрам) и 43 значения для водонасыщенных пластов. Проведенный статистический анализ результатов интерпретаций определил параметр-индикатор газонасыщенности пластов. Это интенсивность *вторичной карбонатизации*, средняя величина которой в УВ насыщенной породе на 63 % больше данной средней величины водонасыщенных пластов (рис. 2). Остальные параметры меняются незначительно.

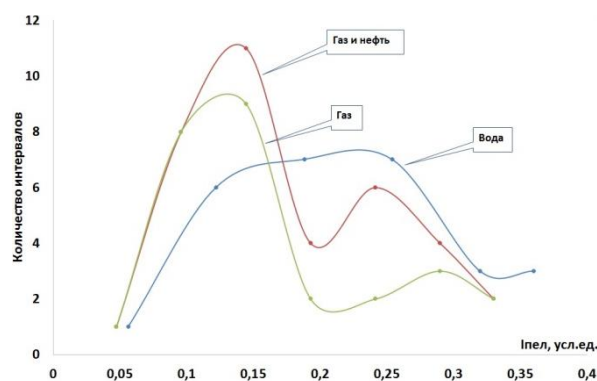


Рис. 1. Гистограммы плотности распределения параметра интенсивности пелитизации в водо- и нефтегазонасыщенных песчаных интервалах Западно-Тамбейского участка

Fig. 1. Histograms of distribution density of the pelitization intensity parameter in water and hydrocarbon saturated sand intervals of the West Tambeyskaya area

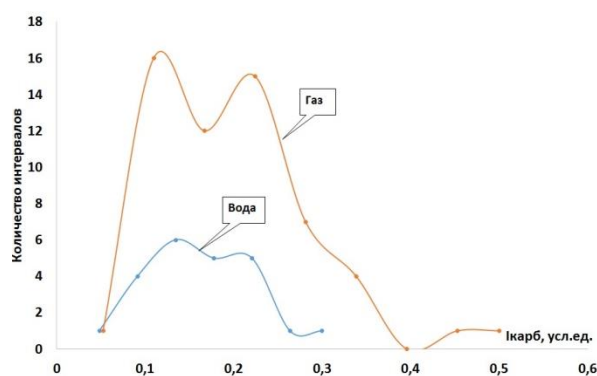


Рис. 2. Гистограммы плотности распределения параметра интенсивности вторичной карбонатизации в водо- и газонасыщенных песчаных интервалах Северо-Тамбейского участка

Fig. 2. Histograms of distribution density of the secondary carbonatization intensity parameter in the water and hydrocarbon saturated sand intervals of the North Tambeyskaya area

Если из выборки убрать нулевые значения, средняя величина интенсивности карбонатизации газонасыщенного коллектора будет больше на 23 % от средней интенсивности в водоносном пласте. Кроме того, парный двухвыборочный *t*-тест для средних показал отличие выборок интенсивностей карбонатизации газонасыщенных и водонасыщенных пластов с коэффициентом $k=1,9$ при критическом значении $k_{кр}=1,7$.

При интенсивности вторичной карбонатизации *больше* граничной величины 0,22 усл. ед. вероятность выявления газонасыщенных пластов на Северо-Тамбейском участке равна 80 %.

Значимое отличие величин средней интенсивности вторичной карбонатизации при выборках с нулевыми и в отсутствие нулевых значений объясняется тем, что в газонасыщенных пластах Северо-Тамбейского участка карбонатизация встречается в 2 раза чаще, чем в водоносных горизонтах.

Отличие геохимических процессов в песчаных пластах Северо-Тамбейского участка от Западно-

Тамбейского может быть обусловлено только различием в скорости заполнения флюидом коллектора. При малой скорости заполнения емкости газом химически агрессивная вода, поступающая с глубинных горизонтов, успевает преобразовать породу до её консервации. Что и происходит на северном участке месторождения.

Поровые воды на стадии катагенеза имеют щелочной характер, и минеральные компоненты породы находятся в геохимическом равновесии с ними. Приход в коллектор миграционных кислых вод, сопровождающих нефть, приводит к нарушению этого равновесия в сторону увеличения кислотности среды, в результате чего начинается изменение минеральной матрицы породы и её растворение. В условиях затрудненного водообмена по мере увеличения концен-

трации в растворах катионов щелочноземельных элементов в результате каолинитизации и пелитизации полевых шпатов кислотные свойства растворов ощелачиваются и растворение сменяется вторичным минералообразованием. В нейтральных и слабощелочных условиях (pH=7,0–7,5) реализуется серицитизация плагиоклазов, начинается сидеритизация биотита. Растворяющийся биотит, взаимодействуя с водой, приводит к локальному повышению щёлочности порового раствора и интенсивной вторичной карбонатизации. С ростом щелочности по мере удаления от ВНК образуются изоморфнозамещенные кальциты: в верхних частях более железистые и магниезальные, в нижних более кальциевые (нейтральные, слабощелочные и щелочные среды) [16–20].

Таблица. Результаты статистической интерпретации данных ГИС и исследований образцов керна Северо-Тамбейского участка

Table. Results of statistical interpretation of well log data and core samples from the North Tambej area

№	Скважина Well	Интервал исслед., м Research interval, m	Пласт Formation	Стат. интенсивность Statistical intensity				Исследование керна Core study	
				Икаол	Икарб	Ипир	Ипел	Аутигенный цемент Authigenic cement	Постседиментация Post-sedimentation
				усл. ед. conventionally units					
1	С-Т-205	2693,6–2703,2	БЯ8	0,07	0,22	0,18	0,06	Единичные пленки и примазки лейкоксена 0,4 %; пелитоморфный сидерит 0,9 %; кальцит отдельные знаки; аутигенный кварц 0,2 % Single films and smears of leucoxene 0,4 %; pelitomorphous siderite 0,9 %; calcite isolated marks; authigenic quartz 0,2 %	Пелитизация, серицитизация, редко частичное растворение полевого шпата; гидратизация, пластическая деформация слюды; хлоритизация, сидеритизация биотита; слабо проявленная регенерация единичных зерен кварца Pelitization, sericitization, rarely partial dissolution of feldspar; hydration, plastic deformation of mica; chloritization, sideritization of biotite; weakly manifested regeneration of single quartz grains
2	С-Т-205	2720,0–2727,4	БЯ10	0,00	0,00	0,00	0,21	Лейкоксен 1,1 %; пирит 0,1 %; аутигенный кварц 0,1 %; кальцит 0,7 % Leucoxene 1,1 %; pyrite 0,1 %; authigenic quartz 0,1 %; calcite 0,7 %.	Пелитизация, серицитизация, иногда частичное растворение полевого шпата; гидратизация, пластическая деформация слюды; хлоритизация биотита; растворение и слабая регенерация отдельных зерен кварца Pelitization, sericitization, sometimes partial dissolution of feldspar; hydration, plastic deformation of mica; chloritization of biotite; dissolution and weak regeneration of individual quartz grains
3	С-Т-205	2802,2–2811,8	БЯ12	0,00	0,36	0,14	0,23	Лейкоксен (прерывистые пленки и отдельные примазки) 1,2 %; пирит 0,1 %; кальцит 2,8 % Leucoxene (discontinuous films and separate smears) 1,2 %; pyrite 0,1 %; calcite 2,8 %.	Пелитизация, серицитизация, деформация (единичные зерна) полевого шпата; гидратизация, пластическая деформация слюды; хлоритизация биотита; растворение кварца; частичная карбонатизация обломочного материала Pelitization, sericitization, deformation (single grains) of feldspar; hydration, plastic deformation of mica; chloritization of biotite; dissolution of quartz; partial carbonatization of clastic material
4	С-Т-203	2348,0–2357,6	ТП14	0,11	0,36	0,12	0,05	В разной степени раскристаллизованный каолинит (распределён пятнами, некоторые поры с серицитом) 7,5 %; хлорит (пленки) 0,5 %; сидерит (отдельные поры) 0,9 %; кальцит (распределен равномерно) 14,7 % Crystallized kaolinite to varying degrees (distributed by spots, some pores with sericite) 7,5 %; chlorite (films) 0,5 %; siderite (separate pores) 0,9 %; calcite (evenly distributed) 14,7 %	Пелитизация, серицитизация, каолинитизация и растворение полевого шпата; гидратация, пластическая деформация слюд, хлоритизация и сидеритизация биотита; растворение и регенерация кварца. Карбонатизация обломочного материала Pelitization, sericitization, kaolinization and feldspar dissolution; hydration, plastic deformation of micas, chloritization and sideritization of biotite; dissolution and regeneration of quartz. Detrital material carbonation

5	C-T-203	2356,6–2375,2	ТП14(1)	0,05	0,20	0,22	0,11	В разной степени раскристаллизованный каолинит (распределен неравномерно) 8,4 %; хлорит (пленки) 1,0 %; сидерит (отдельные поры) 1,9 % Crystallized kaolinite to varying degrees (unevenly distributed) 8,4 %; chlorite (films) 1,0 %; siderite (separate pores) 1,9 %	Пелитизация, серицитизация и растворение полевого шпата; гидратация, пластическая деформация слюды, хлоритизация и сидеритизация биотита; растворение и регенерация кварца Pelitization, sericitization and dissolution of feldspar; hydration, plastic deformation of micas, chloritization and sideritization of biotite; dissolution and regeneration of quartz
6	C-T-203	2516,8–2526,4	ТП18	0,11	0,41	0,16	0,00	Плохо раскристаллизованный каолинит (распределен неравномерно) 6,4 %; хлорит (пленки и единичные поры) 1,8 %; гидрослюда (поры и пленки) 0,5 %; сидерит (отдельные поры) 0,9 %; кальцит 6,1 % Poorly crystallized kaolinite (unevenly distributed) 6,4 %; chlorite (films and single pores) 1,8 %; hydromica (pores and films) 0,5 %; siderite (separate pores) 0,9 %; calcite 6,1 %	Пелитизация, серицитизация и растворение полевого шпата; гидратация, пластическая деформация слюды, хлоритизация и сидеритизация биотита; растворение и регенерация кварца. Частичная карбонатизация обломочного материала Pelitization, sericitization and dissolution of feldspar; hydration, plastic deformation of micas, chloritization and sideritization of biotite; dissolution and regeneration of quartz. Partial carbonation of clastic material
7	C-T-201	2631,2–2641,8	ХМ2	0,00	0,32	0,22	0,07	Пелитоморфный сидерит 10,1 %, приуроченный в основном к слоям разнозернистого алевролита; пирит в основном по углистой растительной органике Pelitomorphic siderite 10,1 %, confined mainly to layers of different-grained siltstone; pyrite is mainly based on carbonaceous plant organic matter	Пелитизация, серицитизация, иногда растворение полевого шпата; пластическая деформация, гидратация, расщепление слюды; хлоритизация, сидеритизация биотита; растворение единичных зерен кварца Pelitization, sericitization, sometimes dissolution of feldspar; plastic deformation, hydration, cleavage of mica; chloritization, sideritization of biotite; dissolution of single grains of quartz
8	C-T-201	1800,8–1810,4	ТП1	0,05	0,08	0,00	0,21	Редкие примазки и пленки лейкоксена 1–2 %; пирит доли процента Rare smears and leucoxene films 1–2 %; pyrite of a fraction of a percent	Пелитизация, серицитизация, растворение полевого шпата; гидратация слюды; растворение кварца Pelitization, sericitization, feldspar dissolution; hydration of mica; dissolution of quartz
9	C-T-201	2511,4–2521,0	ТП18	0,24	0,47	0,22	0,18	Лейкоксен (единичные прерывистые пленки, и отдельные примазки) 1–2 %; пирит доли процента; сидерит в среднем составляет 7–8 %; кальцит 5–6 % Leucoxene (single intermittent films, and separate smears) 1–2 %; pyrite of a fraction of a percent; siderite averages 7–8 %; calcite 5–6 %	Частичное растворение, пелитизация, серицитизация полевого шпата; растворение зерен кварца; пластическая деформация, гидратация слюды; хлоритизация, сидеритизация биотита; слабая карбонатизация обломочного материала Partial dissolution, pelitization, sericitization of feldspar; dissolution of quartz grains; plastic deformation, hydration of mica; chloritization, sideritization of biotite; weak carbonatization of clastic material
10	C-T-201	2628,6–2638,2	ТП22	0,14	0,45	0,22	0,14	Пирит по единичным углистым растительным остаткам доли процента; единичные примазки лейкоксена; пелитоморфный сидерит по биотиту и в виде пятнистых выделений (10,4 %), приурочен в основном к слоям углесто-слюдистого состава; кальцит 25–26 % Pyrite on single carbonaceous plant residues of a fraction of a percent; single leucoxene smears; pelitomorphic siderite after biotite and in the form of spotty excretions (10,4 %), confined mainly to layers of carbonaceous-micaceous composition; calcite 25–26 %	Пелитизация, серицитизация, иногда частичная каолинизация полевого шпата; гидратация, пластическая деформация, редко расщепление слюды; сидеритизация, иногда хлоритизация биотита; частичная карбонатизация обломочного материала Pelitization, sericitization, sometimes partial kaolinization of feldspar; hydration, plastic deformation, rarely mica splitting; sideritization, sometimes chloritization of biotite; partial carbonatization of clastic material

В таблице показаны результаты статистическо-корреляционной интерпретации материалов ГИС в десяти песчаных интервалах трех скважин Северо-Тамбейского участка, а именно интенсивности вторичных процессов каолинитизации, карбонатизации, пиритизации и пелитизации. В последних двух столбцах даны результаты петрологических исследований шлифов керн на предмет определения содержания аутигенного цемента и постседиментационных геохимических процессов. При сопоставлении интенсивностей вторичных процессов с описанием результатов петрологических исследований мы видим, что интенсивность вторичной карбонатизации неплохо коррелирует с результатами исследований шлифов. Например, при значительных показателях интенсивности $i_{\text{карб}}=0,36-0,47$ усл. ед. (строки 3, 4, 6, 7, 9, 10) в описании шлифов процессы сидеритизации и кальцитизации проявляются с достаточно большим содержанием данных вторичных карбонатов (~6–35 %). И наоборот, при интенсивности карбонатизации равной нулю (строки 2, 8) в описании результатов исследования шлифов их содержание отсутствует либо весьма незначительно (меньше 1 %).

Если сопоставить величины интенсивностей пиритизации с описанием шлифов, то мы видим их полное несоответствие. Это связано с тем, что в данном случае вместо пиритизации проходит процесс хлоритизации с последующей сидеритизацией биотитов. Хлоритизация идет в кислой среде ($\text{pH}=5,0-6,0$) после каолинитизации, при её устойчивости в щелочной. Как известно, все минералы, образующиеся в результате перечисленных процессов, содержат железо. В результате гидратации с сидеритизацией железосодержащих биотитов и образованием электропроводящих кристифицированных пленок глинистых минералов может образоваться электропроводящая цепь, связанная с содержанием железа и понижающая УЭС породы, интерпретируемая как пиритизация. Это заметно по результатам анализа таблицы – там, где отсутствует в описании шлифов «гидратация, пластическая деформация слюды, хлоритизация и сидеритизация биотита» интенсивность «пиритизации» равна нулю (строки 2 и 8).

В интервалах (таблица, строки 4, 6, 9, 10), где статистическая интенсивность вторичной каолинитизации проявилась в пределе $i_{\text{каоил}}>0,1$ усл. ед., в описаниях шлифов обнаруживаются следующие формулировки: «Плохо раскристаллизованный каолинит; каолинитизация и растворение полевого шпата; частичное растворение». Очевидно, что в исследуемых интервалах после поступления внешних кислых флюидов ощелачивание раствора проходило через определенное время, достаточное для образования вторичных каолинитов. Далее процесс интенсивной карбонатизации контролировался процессом ощелачивания среды.

Лабораторные определения содержаний общих карбонатов в образцах песчаных пород, в интервалах проведения статистической интерпретации данных ГИС исследуемых скважин, позволили сопоставить величины интенсивностей вторичной карбонатизации

с усредненными (по изучаемому интервалу) содержаниями общих карбонатов. Сопоставление выборочных данных выявило их хорошее соответствие с коэффициентом корреляции линейного тренда 0,73 (рис. 3).

Статистически значимый разброс отдельных выборочных значений относительно линии тренда объясняется следующими неувязками: во-первых, по керну были определены средние содержания *общих* карбонатов, а по данным ГИС – интенсивности процессов *вторичной* карбонатизации; во-вторых, точность определения усредненных величин содержаний по интервалу зависит от количества изученных образцов в данном интервале, однако в некоторых случаях эмпирической статистики явно не хватало.

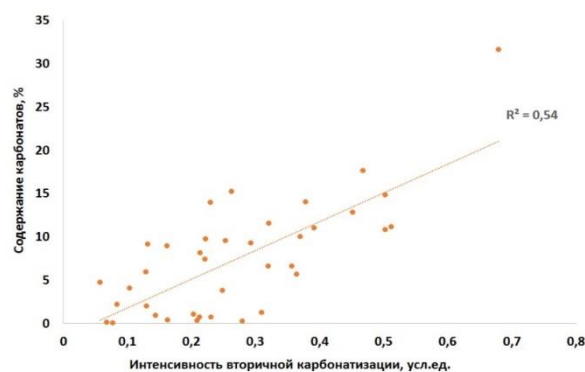


Рис. 3. Сопоставление средних содержаний общих карбонатов, определенных по образцам керн, с интенсивностью вторичных карбонатов, вычисленных по данным ГИС в песчаных интервалах Тамбейского месторождения

Fig. 3. Comparison of the average contents of total carbonates determined from core samples with the intensity of secondary carbonates calculated from well log data in the sandy intervals of the Tambey field

Заключение

Итак, на основании результатов проведенных исследований применения технологии статистическо-корреляционной интерпретации материалов ГИС в песчаных коллекторах Тамбейского месторождения для выявления пропущенных УВ насыщенных низкоомных коллекторов можно сделать следующие выводы:

1. Вычисленные статистические интенсивности вторичных процессов (каолинитизации, карбонатизации, пиритизации и пелитизации) в песчаных интервалах полностью соответствуют результатам лабораторных исследований керн.
2. Если при выявлении в песчаных коллекторах Западно-Тамбейского участка интенсивность вторичной пелитизации оказалась менее 0,084 усл. ед., то с вероятностью ~80 % исследуемый интервал можно считать УВ насыщенным.
3. На Северо-Тамбейском участке с 80 % вероятностью индикатором газо-насыщенности пласта является интенсивность вторичной карбонатизации при условии превышения её критической величины 0,22 усл. ед.

Таким образом, интенсивности определенных вторичных геохимических процессов играют роль в качестве атрибутов нефтегазонасыщенности в низкоомных песчаных интервалах Тамбейского месторождения. Вычисление интенсивностей осуществляется с

помощью инновационной технологии статистическо-корреляционной интерпретации материалов ГИС. В качестве геофизических материалов можно использовать как старые, так и новые данные фондов в формате *Las*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Изд-во «Недра», 1992. – 239 с.
2. Authigenic kaolin and illitic minerals during burial diagenesis of sandstones: a review / B. Lanson, D. Beaufort, G. Berger, A. Bauer, A. Cassagnabere, A. Meunier // *Clay minerals*. – 2002. – V. 37. – Iss. 1. – P. 1–22.
3. Chlorite in sandstones / R.H. Worden, J. Griffiths, L.J. Wooldridge, J.E.P. Utley, A.Y. Lawan, D.D. Muhammed, N. Simon, P.J. Armitage // *Earth-Science Reviews*. – 2020. – V. 204. – P.103–105.
4. Origins of authigenic minerals and their impacts on reservoir quality of tight sandstones: Upper Triassic Chang-7 Member, Yanchang Formation, Ordos Basin, China / Y.L. Zhang, Z.D. Bao, Y. Zhao, L. Jiang, Y.Q. Zhou, F.H. Gong // *Australian Journal of Earth Sciences*. – 2017. – V. 64. – Iss. 4. – P. 519–536.
5. Milliken K.L. Late diagenesis and mass transfer in sandstone–shale sequences // *Treatise on Geochemistry*. – 2003. – V. 7. – P. 159–190.
6. Мельник И.А. Определение интенсивности геохимических процессов по материалам геофизических исследований скважин. – Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2016. – 146 с.
7. Мельник И.А. Интенсивности процессов наложенного эпигенеза как индикаторы нефтенасыщенности песчаных коллекторов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 90–97.
8. Мельник И.А., Шарф И.В., Иванова М.П. Статистический параметр двойного электрического слоя как индикатор нефтенасыщенности нижнесреднеюрских отложений Томской области // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 10. – С. 24–26.
9. Мельник И.А. Причины образования нефтенасыщенных низкоомных коллекторов // *Геология нефти и газа*. – 2018. – № 6. – С. 129–136.
10. Mechanisms of smart waterflooding in carbonate oil reservoirs / J. Hao, S. Mohammadkhani, H. Shahverdi, M.N. Esfahany, A. Shapiro // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 179. – P. 276–291.
11. Nasralla R.A., Nasr H.A. Double-layer expansion: is it a primary mechanism of improved oil recovery by low-salinity waterflooding // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2014. – V. 17. – P. 1–11.
12. Природный тектонический насос углеводородов и вторичная доломитизация – порождение тектоно-гидротермальной активности рифтогенного осадочного бассейна / А.Д. Коробов, Л.А. Коробова, Е.Ф. Ахлестина, А.Т. Колотухин, В.М. Мухин // *Известия Саратовского университета. Серия «Науки о Земле»*. – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 46–52.
13. Карнюшина Е.Е. Основные причины возникновения зон карбонатной цементации в толщах нефтегазоносных бассейнов // *Вестник Московского университета. Раздел геология*. – 2012. – № 5. – С. 47–49.
14. Pyrite formation from FeS and H₂S is mediated through microbial redox activity / J. Thiel, J.M. Byrne, A. Kappler, B. Schink, M. Pester // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2019. – V. 116. – P. 6897–6902.
15. Зарипов О.Г., Сонич В.П. Влияние литологии пород – коллекторов на удельное электрическое сопротивление пластов // *Нефтяное хозяйство*. – 2001. – № 9. – С. 18–21.
16. Чепиков К.Р., Ермолова Е.П., Орлова Н.А. Эпигенетические минералы как показатели времени прихода нефти в песчаные промышленные коллекторы // *Докл. АН СССР*. – 1959. – № 5. – С. 1097–1099.
17. Роль дизъюнктивной тектоники в формировании пустотного пространства в коллекторах пласта Ю13 Западно-Моисеевского участка Двуреченского нефтяного месторождения (Томская область) / Н.М. Недоливко, А.В. Ежова, Т.Г. Перевертайло, Е.Д. Полумогина // *Известия Томского политехнического университета*. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 47–53.
18. Предтеченская Е.А., Шиганова О.В., Фомичев А.С. Катагенетические и гидрохимические аномалии в нижнесреднеюрских нефтегазоносных отложениях Западной Сибири как индикаторы флюидодинамических процессов в зонах дизъюнктивных нарушений // *Литосфера*. – 2009. – № 6. – С. 54–65.
19. Velbel M.A. Influence of surface area, surface characteristics, and solution composition on feldspar weathering rates // *Symposium Series: Geochemical Processes at Mineral Surfaces*. – 1986. – № 323. – P. 614–634.
20. Bjorkum P.A., Gielsvik N. An isochemical model for formation of authigenic kaolinite, feldspar and illite in sediments // *Journal of Sedimentary Petrology*. – 1988. – V. 58. – P. 506–511.

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

Мельник И.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения нефтегазового дела Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Родивилов Д.Б., заместитель начальника отдела анализа и интерпретации данных ГИС, филиал Газпром недр НТЦ ООО «Газпром недр».

Никитин И.А., начальник группы отдела по проектированию и анализу эффективности геолого-технических мероприятий НИПИ «СургутНИПИнефть».

UDC 550.83+ 552.5 +553.98

SECONDARY GEOCHEMICAL PROCESSES AS HYDROCARBON SATURATION ATTRIBUTE OF THE SAND RESERVOIRS OF TAMBHEY FIELD

Igor A. Melnik¹,
melnik@tpu.ru

Danila B. Rodivilov¹,
rodivilovdb@gmail.com

Ivan A. Nikitin³,
nikitin_ivan_alex@mail.ru

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

² Branch of Gazprom nedra,
70, Gertsena sreet, Tyumen, 625000, Russia.

³ «SurgutNIPIneft»,
48, Entuziastov street, Surgut, 628415, Russia.

The relevance of the study is determined by the considered possibility, in the absence of a core, to identify missed productive deposits in sandy intervals using materials from both the old and the new well logging fund. Modern requirements for the creation and development of the mineral resource base of the Russian Federation at the highest level presuppose the introduction of a large number of fundamentally new deposits and deposits, the profitability of which is established by the level of knowledge. In many cases, it is simply necessary to reduce the time frame and capital costs for exploration work due to the application and additional exploration of data from the past studied fields. The area of the Tambey field is quite promising in light of the active development of the Yamal oil and gas fields.

The aim of the research is the illustration of the use of such parameters as statistical intensities of secondary pelitization and carbonatization as indicators of oil and gas saturation of sandy reservoirs in various areas of the Tambey field.

Objects: cretaceous sandy deposits of the oil and gas field of the Tambey area of the Yamal Peninsula.

Results. The paper demonstrates the petrological and geochemical indicators of oil and gas content and their determination based on logging data. Comparison of the results of statistical interpretation of logging data with the results of petrographic core study is illustrated. The work uses an innovative technology of statistical interpretation of logging materials for identifying the intensities of secondary geochemical processes in indication of oil and gas reservoirs. It was confirmed that in the North-Tambey area, with 80 % probability, the indicator of the formation gas saturation is the intensity of secondary carbonatization, provided that its critical value is exceeded by 0,22 conventional units, and in the West-Tambey area, the indicator of the oil and gas saturation of reservoirs is the intensity of secondary pelitization, provided that their values are exceeded up to 0,084 conventional units.

Key words:

Superimposed-epigenetic process, secondary pelitization, secondary carbonation, low-impedance reservoir, hydrocarbons, geochemical indicator of hydrocarbon saturation, well logging.

REFERENCES

- Lebedev B.A. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov v osadochnykh basseynakh* [Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins]. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p.
- Lanson B., Beaufort D., Berger G., Bauer A., Cassagnabere A., Meunier A. Authigenic kaolin and illitic minerals during burial diagenesis of sandstones: a review. *Clay minerals*, 2002, vol. 37, no. 1, pp. 1–22.
- Worden R.H., Griffiths J., Wooldridge L.J., Utley J.E.P., Lawan A.Y., Muhammed D.D., Simon N., Armitage P.J. Chlorite in sandstones. *Earth-Science Reviews*, 2020, vol. 204, pp. 103–105.
- Zhang Y.L., Bao Z.D., Zhao Y., Jiang L., Zhou Y.Q., Gong F.H. Origins of authigenic minerals and their impacts on reservoir quality of tight sandstones: Upper Triassic Chang-7 Member, Yanchang Formation, Ordos Basin, China. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2017, vol. 64, no. 4, pp. 519–536.
- Milliken K.L. Late diagenesis and mass transfer in sandstone–shale sequences. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 7, pp. 159–190.
- Melnik I.A. *Opreделение intensivnosti geokhimicheskikh protsessov po materialam geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Determination of the intensity of geochemical processes based on well logging data]. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 2016. 146 p.
- Melnik I.A. Intensity of superimposed epigenesis processes as indicators of oil saturation in sandy reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 90–97. In Rus.
- Melnik I.A., Sharf I.V., Ivanova M.P. Statistical parameter of the double electric layer as an indicator of oil saturation of the lower-Middle Jurassic deposits of the Tomsk region. *Oil industry*, 2018, no. 10, pp. 24–26. In Rus.
- Melnik I.A. The reasons for the formation of oil-saturated low-resistance reservoirs. *Geology of oil and gas*, 2018, no. 6, pp. 129–136. In Rus.
- Hao J., Mohammadkhani S., Shahverdi H., Esfahany M.N., Shapiro A. Mechanisms of smart waterflooding in carbonate oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 179, pp. 276–291.
- Nasralla R.A., Nasr H.A. Double-layer expansion: is it a primary mechanism of improved oil recovery by low-salinity waterflooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, vol. 17, pp. 1–11.
- Korobov A.D., Korobova L.A., Akhlestina E.F., Kolotukhin A.T., Mukhin V.M. Natural tectonic pump of hydrocarbons and secondary dolomitization – the generation of tectonic-hydrothermal activity of the riftogenic sedimentary basin. *Saratov University Publ. Series «Earth Sciences»*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 46–52. In Rus.
- Karnyushina E.E. The main reasons for the occurrence of zones of carbonate cementation in the strata of oil and gas basins. *Moscow*

- University Bulletin. Geology Section*, 2012, no. 5, pp. 47–49. In Rus.
14. Thiel J., Byrne J.M., Kappler A., Schink B., Pester M. Pyrite formation from FeS and H₂S is mediated through microbial redox activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, vol. 116, pp. 6897–6902.
 15. Zariipov O.G. Sonic V.P. Influence of lithology of rocks-reservoirs on the resistivity of reservoirs. *Oil industry*, 2001, no. 9, pp. 18–21. In Rus.
 16. Chepikov K.R., Ermolova E.P., Orlova N.A. Epigeneticheskie mineral kak pokazateli vremeni prikhoda nefi v peschanye promyshlennye kollektory [Epigenetic minerals as indicators of the time of oil arrival in industrial sandy reservoirs]. *Report Academy of Sciences of the USSR*, 1959, no. 5, pp. 1097–1099.
 17. Nedolivko N.M., Ezhova A.V., Perevertailo T.G., Polumogina E.D. The role of disjunctive tectonics in the formation of void space in the reservoirs of the Yu13 formation of the West Moiseevsky section of the Dvurechensk oil field (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 5, pp. 47–53.
 18. Predtechenskaya E.A., Shiganova O.V., Fomichev A.S. Catagenetic and hydrochemical anomalies in the Lower Middle Jurassic oil and gas deposits of Western Siberia as indicators of fluid-dynamic processes in zones of disjunctive disturbances. *Lithosphere*, 2009, no. 6, pp. 54–65. In Rus.
 19. Velbel M.A. Influence of surface area, surface characteristics, and solution composition on feldspar weathering rates. *Symposium Series: Geochemical Processes at Mineral Surfaces*, 1986, no. 323, pp. 614–634.
 20. Bjorkum P.A., Gielsvik N. An isochemical model for formation of authigenic kaolinite, feldspar and illite in sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1988, vol. 58, pp. 506–511.

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Igor A. Melnik, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Danila B. Rodivilov, deputy head of the department of analysis and log data interpretation, Branch of Gazprom nedra.

Ivan A. Nikitin, head of the group, «SurgutNIPIneft».

УДК 621.434-242.004.67

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВТУЛОК ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Пилипенко Станислав Владимирович¹,
44-08@mail.ru

Фруцкий Виктор Александрович¹,
Fruzki@mail.ru

Дудан Александр Витальевич¹,
DudanAV@mail.ru

¹ Полоцкий государственный университет,
Беларусь, 211440, г. Новополоцк, ул. П. Блохина, 29.

Актуальность работы обусловлена необходимостью ремонта втулок, имеющих рабочий износ, повышения антифрикционных характеристик трибосопряжений, экономии дорогостоящего сырья и внедрения ресурсосберегающих технологий. Вопрос экономии дорогостоящих материалов или замены их на менее дорогостоящие, а также применение отходов металлообрабатывающих производств не вызывает сомнений. Обеспечение повышенных значений нагрузок и скоростей скольжения при общем снижении стоимости сопряжений и соизмеримых межремонтных периодов достигается путем применения отходов стружки и проведения экономного динамического легирования на микроуровне материалами, способными улучшить эксплуатационные показатели сопряжения в целом. Снижение уровня антропогенного влияния достигается вследствие применения относительно безотходных методов восстановления.

Цель: создать трибосопряжение, эффективно работающее при заданных условиях эксплуатации, при этом ограничивая количество потерь дорогостоящих ресурсов и сводя к минимуму негативное влияние на окружающую среду. Для этого применяется основа из измельченных металлоотходов с использованием экономного динамического легирования.

Методы: теоретические исследования стойкости предложенного материала, конструкции сопряжения и метода его нанесения; расчет технологических параметров нанесения материала в зависимости от условий эксплуатации.

Результаты. Определено наилучшее значение линейных параметров элементарных стружечных отходов, оптимальное значение легирующих элементов для данных условий эксплуатации трущихся пар. Разработана технология получения материалов с прогнозируемыми свойствами, с возможностью регулировки отдельных свойств материалов в зависимости от реальных условий эксплуатации. Разработанная технология ремонта тяжело нагруженных подшипников скольжения, работающих в неблагоприятных условиях эксплуатации, проверена в условиях современного машиностроительного предприятия.

Ключевые слова:

Экономия георесурсов, получение покрытий из отходов механической обработки, экономное легирование, антифрикционный материал из вторичного сырья, плазмообразующий газ, ресурсосберегающие технологии.

Введение

Подшипники скольжения, как неотъемлемая часть крупных агрегатов и механизмов, работают в сложных условиях трения и подвергаются относительно высоким скоростям износа [1–5]. Значительная степень износа подшипника может привести к выводу из строя узла или даже машины в целом. Поэтому вопрос замены таких деталей становится достаточно актуальным. К примеру, при ремонте прессового оборудования часто, при необходимости, заменяют втулки подшипников скольжения. Так, в прессе ПБ-6332Б замена четырех втулок общей массой 28 кг приводит к значительной экономии материальных ресурсов. В условиях современного предприятия с целью сохранения георесурсов и экономии средств предприятия заменяемые в ходе ремонтного цикла подшипники рационально подвергать ремонту. Таким образом продлевается срок службы подшипника, экономятся материальные ресурсы предприятия, в какой-то мере снижается антропогенное воздействие деятельности человека на окружающую среду [6]. Важно иметь приемлемую в ценовом отношении качественную технологию восстановления изнашиваемых деталей.

Также важно, чтобы в качестве сырья (по возможности) использовались отходы производства (например, металлическая стружка), а не дорогостоящие антифрикционные материалы [4]. При этом полученная поверхность детали должна обладать хорошими триботехническими свойствами. Исходя из этого, исследование в этой области является актуальной задачей [5, 7]. Целью исследования является разработка приемлемого антифрикционного материала подшипников скольжения с хорошими триботехническими свойствами и стоимостью меньшей, чем стоимость ранее применяемых материалов.

Объект и предметы исследования

Объектом исследования выступают процессы плазменной наплавки материалов, при использовании в качестве исходного сырья отходов производства. Предметы исследования – ресурсосберегающая технология восстановления трибосопряжений.

Анализ исследований

На рис. 1 показан типичный подшипник скольжения с жидкостным трением. Сухое трение в подшип-

никах такого вида используется редко [8, 9], обеспечивают либо жидкостное, либо полужидкостное (смазка имеет слой толщиной около 0,1 мкм) [8–10].

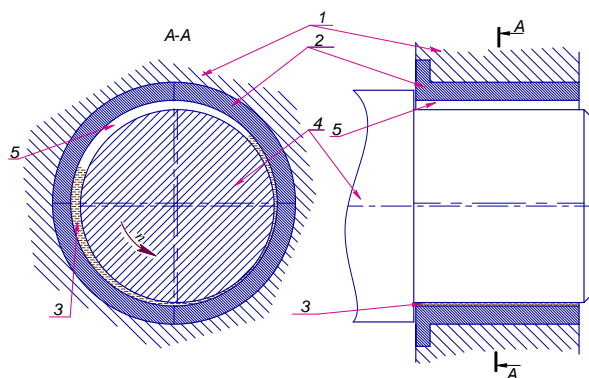


Рис. 1. Схема подшипника скольжения с жидкостным трением [6, 11–14]: 1 – корпус; 2 – вкладыши (неподвижен); 3 – масляный слой (зона нагнетания) [15, 16]; 4 – вал; 5 – зона разрежения [15, 16]; n – частота вращения вала

Fig. 1. Scheme of a sliding bearing with liquid friction [6, 11–14]: 1 – housing; 2 – insert (motionless); 3 – oil layer (oil injection zone) [15, 16]; 4 – shaft; 5 – rarefaction zone [15, 16]; n – shaft rotation frequency

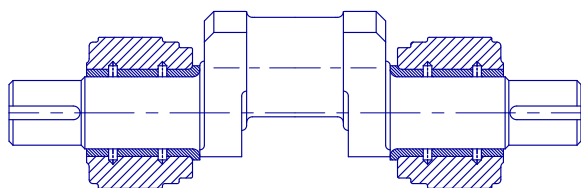


Рис. 2. Ведущий вал главного исполнительного механизма кривошипно-шатунного пресса [17, 18]

Fig. 2. Drive shaft of the main actuator of the crank press [17, 18]

Таблица 1. Рекомендуемые режимы эксплуатации антифрикционных материалов [19]

Table 1. Recommended modes of operation of antifriction materials [19]

Материал (указана марка бронзы или чугуна) Materials (bronze or cast iron grade is indicated)	Режимы эксплуатации (предельные) Operating modes (ultimate)		
	Давление (P), МПа Pressure (P), MPa	Скорость скольжения (V), м/с Sliding velocity (V), m/s	[P×V], МПа·м/с MPa·m/s
АЧС-1 AChS	0,05–9,0	2,0–0,2	0,1–1,8
АЧС-3 AChS - 3	0,1–6,0	3,0–0,75	0,3–4,5
АЧВ-1 AChV - 1	0,5–12	5,0–1,0	2,5–12
АЧК-1 AChK - 1	0,5–12	5,0–1,0	2,5–12
БрОЦС 5-5-5 BrOCS 5-5-5	8	3,0	12
БрОФ 10-1 BrOF 10 - 1	10	10,0	15
БрАЖ 9-4 BRAG 9 - 4	15,0	4,0	12
Полимеры/Polymers	до 5/to 5	до 1/to 1	–

Как видно из рис. 1, при работе подшипника между втулкой и валом образуется специфический клинообразный зазор, в который увлекается определенное количество смазки, выбрасываемой с обратной стороны. В зоне контакта трибопары можно различить зону нагнетания и зону разрежения [15, 16].

В данном случае подшипники являются опорой для коленчатого вала, который приводит возвратно-поступательное движение шатуна (рис. 2). В целом в механизме можно выделить рабочий (прямой) и холостой ход [17–19].

Давление и скорость скольжения – основные рабочие режимы, определяющие работу антифрикционного материала в подшипниках скольжения (табл. 1).

Основной материал

В рассматриваемом исполнительном механизме кривошипно-шатунного пресса используются целнометаллические втулки из бронзы марки БрОФ 10-1. В ходе эксплуатации периодически контролируют зазор трибосопряжения. В случае достижения предельной величины зазора втулки демонтируют и утилизируют как лом цветного материала. При ремонте заменяются все четыре втулки. Масса одной втулки равна 7,0 кг, однако общий вес одновременно утилизируемых деталей достигает 280 кг (рис. 1).

Анализ работы втулок подшипников скольжения, который был проведен в кузнечном цехе Минского подшипникового завода, показал следующее:

- из-за конструктивного расположения узла затруднена возможность монтажа или демонтажа втулок, что уменьшает частоту данных ремонтных мероприятий;
- втулки являются основной опорой коленчатого вала и воспринимают нагрузки во время рабочего хода от шатуна пресса [18, 20–22];
- наблюдается неравномерное распределение нагрузок по рабочей поверхности коленчатого вала (рис. 3) [18, 20–22];
- трибосопряжения работают под воздействием переменной динамической нагрузки;
- наблюдается повторно кратковременный режим работы узла при скорости скольжения $V=3$ м/с и давлении $P=5$ МПа;
- вид трения трибопары «вал–втулка» граничный;
- смазочный материал в зону трибосопряжения закачивается через специальные технологические каналы;
- из-за наличия на участке станков заточной и шлифовальной групп трибопары работают в условиях запыленности рабочего помещения. На оборудовании отсутствуют пылезащитные уплотнения и кожухи. Смазочный материал постоянно загрязняется песком и пылью, в которой содержится кварц и корунд с твердостью 18 и 23 ГПа соответственно.

Металлографические исследования используемых для производства вкладышей антифрикционных материалов, которые проводились на комплексе Nikon Epi Phot 200 BD, установили:

- вкладыши из литых оловянистых бронз изготовлены методом литья;

- бронза вкладышей имеет резко выраженную дендритную структуру (рис. 4);
- периферийные зоны имеют меньшее содержание олова, чем дендриты, от чего они имеют более легкоплавкую структуру большей твердости;
- исследуемый материал соответствует типу структуры Шарпи I, состоит из мягкой матрицы α -фазы с равномерно расположенными интерметаллидными упрочняющими фазами в виде Cu_3P и Cu_3Sn_8 [23].

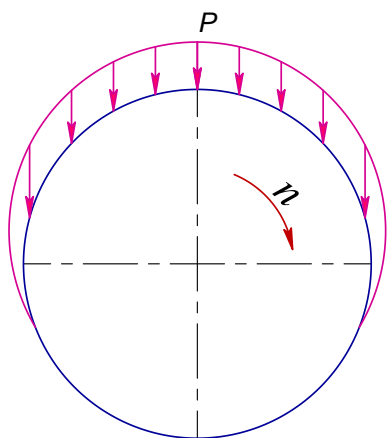


Рис. 3. Распределение радиальной нагрузки на валу кривошипно-шатунного механизма

Fig. 3. Radial load distribution on the shaft of the crank mechanism

Исходя из анализа режимов ($P \geq 5$ МПа, $V \geq 3$ м/с), сделан вывод о целесообразности использования сплавов с высокими антифрикционными свойствами, например, оловянисто-фосфористых бронз (табл. 1). Но есть возможность и более дешевого материала – сплава на основе чугуна. Втулки из сплавов чугуна применяются не только для валов, имеющих повышенную твердость поверхности (более 55 HRC_э). В трибосопряжении с валом из улучшенной стали (25–35 HRC_э) можно использовать мягкие антифрикционные чугуны марок АЧС-3, АЧВ-2, АЧК-2 при относительной дешевизне материала втулки.

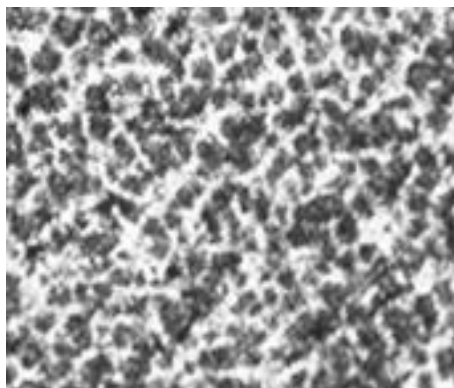


Рис. 4. Структура бронзы исследуемого вкладыша подшипника скольжения (марка бронзы – BrOF 10-1, $\times 100$)

Fig. 4. Bronze structure of the investigated plain bearing liner (designation of bronze – BrOF 10-1, $\times 100$)

Для ремонта втулок подшипников скольжения предлагается использовать композиционный материал на основе отходов металлообработки серого чугуна (стружка), подвергаемый термодиффузионному легированию (с целью улучшения эксплуатационных характеристик). Дополнительное легирование чугунов производится как растворимыми в матрице чугуна элементами, так и не растворимыми. Последние образуют самостоятельные упрочняющие фазы. Повышение эксплуатационных характеристик серого чугуна производилось введением бора (несущая способность) и меди (повышение антифрикционных свойств).

Для ремонта вкладышей разработана технология с использованием композиционного материала, которая включает:

- сбор стружки и ее сепарирование;
- отсеив нужных фракций (0,06...0,1 мм);
- диффузионное насыщение чугунной стружки в подвижных расходуемых смесях [24].

В итоге получен диффузионно-легированный порошок, содержащий бор (до 1,5 %) и медь (около 15 %), который необходимо нанести на изношенную поверхность втулок. Ремонт производился с использованием технологии плазменного напыления материала на установке ВДУ-3Д. Пробно-аналитическим методом определены оптимальные режимы для нанесения подготовленного порошка на ремонтируемые поверхности втулки, которая имеет вид тонкостенной трубы с толщиной стенки около 4 мм.

В качестве плазмообразующего газа выбран аргон (расход до 20 л/мин). Диаметр относительного отверстия для истечения смеси – 3 мм. Порошковая смесь с фракцией 0,065–0,1 мм подавалась инжекторным способом. Угол наклона рабочей головки – 50–60° при расстоянии напыления в 80–120 мм. Скорость вращения напыляемой детали – 6 об/мин. Максимальный нагрев подложки – 500 °С.

Таблица 2. Пористость материала при различной силе тока

Table 2. Material porosity at different amperage

Материал Material	Сила тока Current strength, A	Пористость Porosity, %		
		min	max	mean
Стружка из нелегированного чугуна марки СЧ-20 Unalloyed cast iron shavings grade SCh20	200	18	31	24
Стружка из нелегированного чугуна марки СЧ-20 + бронза + медь Unalloyed cast iron shavings grade SCh20 + bronze + copper	150	18	32	24
	200	11	22	17
	300	6	15	11

Получение пористого материала слоя позволяет дополнительно повысить его эксплуатационные свойства. Поры будут накапливать и подавать смазочный материал в зону соприкосновения трущихся поверхностей. Определено, что на количественный состав пор значительное влияние оказывает сила тока применяемого источника. Так, уменьшение силы тока до 150 А приводит к существенному увеличению пористости материала из-за недостаточного нагрева напы-

ляемых частиц, обладающих малой пластичностью. Увеличение же силы тока до 300 А уменьшает пористость наносимого материала более чем в два раза, так как прочность частиц повышается (табл. 2). Экспериментальным образом определено, что оптимальная сила тока напыления должна лежать ниже 300 А.

В табл. 3 показаны результаты исследований влияния технологических факторов на прочность сцепления $\sigma_{сц}$ покрытия.

Таблица 3. Прочность сцепления материала при плазменном напылении, $\sigma_{сц}$, Мпа

Table 3. Material adhesion strength during plasma spraying, $\sigma_{сц}$, MPa

Сила тока Current strength, A	Дистанция напыления, мм Spraying distance, mm			Прочность сцепления, МПа Adhesion strength, MPa
	80	100	120	
100	4,8	4,1	3,6	60...65
200	7,9	7,2	6,6	70...75
300	13,0	13,4	12,5	80...90

Экспериментальные исследования показали, что с ростом силы тока повышается и прочность сцепления; увеличение дистанции напыления приводит к уменьшению $\sigma_{сц}$; двойной рост температуры подложки также приводит к резкому увеличению $\sigma_{сц}$, что объясняется не только дополнительной активацией поверхности, но и частичным связыванием адсорбированных поверхностных пленок бором; пластичность поверхности контакта также оказывает заметное влияние на прочность сцепления, а добавка в поверхностный слой легкоплавкой меди или напыление подслоя из никель-алюминиевого порошка повышает $\sigma_{сц}$.

Окончательное формирование микроструктуры композиционного материала осуществляется диффузионным отжигом в печи с защитной атмосферой. Температура отжига – 820...860 °С, продолжительность – 6 часов. Нагрев можно производить в герметичном контейнере, который на $\frac{3}{4}$ заполнен карбюризатором.

На рис. 5 показана общая схема предложенной технологии получения антифрикционного композиционного покрытия.



Рис. 5. Схема предложенной технологии получения антифрикционного композиционного покрытия

Fig. 5. Scheme of the proposed technology for producing anti-friction composite coating

В итоге получили структуру, близкую по конструкции структурам Шарпи I типа.

Далее приведены результаты металлографического и триботехнического исследования материалов полученного покрытия (рис. 6, табл. 4).

Сила тока и состав напыляемой смеси имеют преобладающее влияние на строение напыленного слоя

(табл. 5). Необходимое строение покрытия до термообработки представлено на рис. 6. После окончательной термообработки покрытие обеспечивает необходимый уровень антифрикционных свойств (табл. 5). Эксплуатационные характеристики такого покрытия не уступают антифрикционным оловянистым бронзам, но значительно дешевле их.

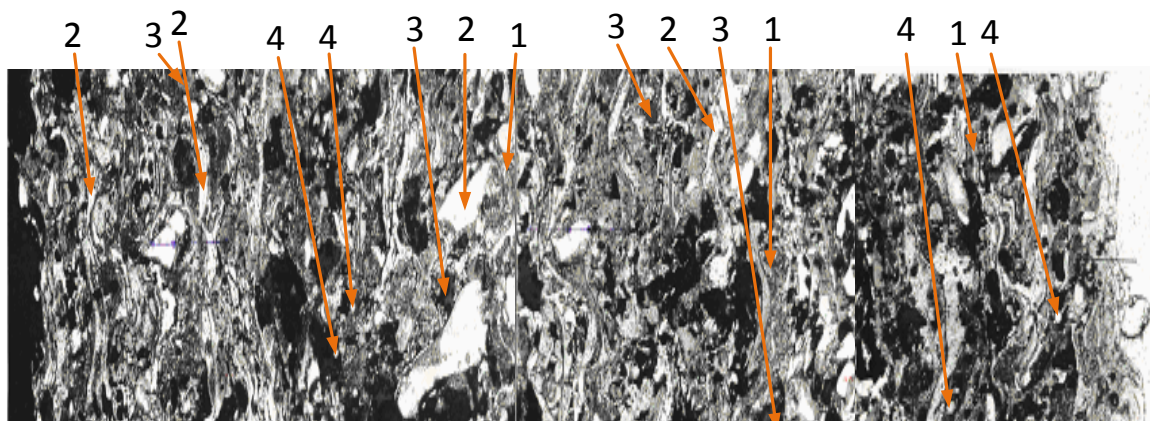


Рис. 6. Полученное плазменное покрытие из диффузионно-легированной бором и медью стружки серого чугуна ($\times 300$). 1 – мелкодисперсная бористая эвтектика; 2 – ламели α -фазы с фрагментами перлита; 3 – медистые включения; 4 – боридные, бороцементитные включения

Fig. 6. Plasma coating of gray cast iron chips diffusion-alloyed with boron and copper ($\times 300$). 1 – finely divided boron eutectic; 2 – lamellas of α -phases with perlite fragments; 3 – copper inclusions; 4 – boride, boron-cementite inclusions

Таблица 4. Влияние на структуру и пористость покрытия режимов нанесения материала

Table 4. Influence of material application modes on coating structure and porosity

Материал Materials	Сила тока Current strength, A	Микроструктура Microstructure ×300	Пористость Porosity, %
Стружка из нелегированного чугуна марки СЧ-20 Unalloyed cast iron shavings grade SCh20	200		9,54
Стружка из нелегированного чугуна марки СЧ-20 + бронза Unalloyed cast iron shavings grade SCh20 + bronze	200		8,67
Стружка из нелегированного чугуна марки СЧ-20 + бронза + медь Unalloyed cast iron shavings grade SCh20 + bronze + copper	150		8,27
	200		6,38
	300		4,15

Таблица 5. Износ вкладышей образцов, $мг \cdot E^{-5}$

Table 5. Wear of the liners of the samples, $mg \cdot E^{-5}$

Материал (указана марка бронзы или чугуна) Material (the grade of bronze or cast iron is indicated)	Путь трения, м Friction path, m			Твердость, НВ Hardness, НВ
	2000	4000	6000	
БрОЦС 5-5-5 BrOCS 5-5-5	0,95	1,67	2,95	60
БрАЖ 9-4 BRAG 9 - 4	0,85	1,19	1,75	130
СЧ20 SCh20	4,10	4,50	11,30	100
БрОФ 10-1 BrOF 10 - 1	1,30	1,45	1,57	90
Предложенный сплав Suggested alloy	1,23	1,35	1,46	90

Из табл. 5 видно, что эксплуатационные характеристики у полученного из отходов серого чугуна композиционного материала сопоставимы с показателями антифрикционных материалов на основе меди.

Заключение

Показана одна из возможностей применения в ремонтных производствах промышленных предприятий технологии получения материалов на основе метал-

лоотходов, которые обеспечивают необходимые эксплуатационные свойства трибосопряжений и позволяют экономить материальные средства предприятий.

Разработанная технология позволяет применять при ремонте втулок подшипников скольжения кривошипно-шатунных механизмов прессы синтезированные, относительно дешевый материал-заменитель дорогостоящих дефицитных бронз. Разработана технология получения материалов с прогнозируемыми свойствами, возможностью их регулирования в необходимых диапазонах. Полученное относительно дешевое покрытие по своим эксплуатационным свойствам не уступает известным антифрикционным материалам. Определено, что с применением плазмообразующего газа аргона (расход до 20 л/мин) диаметром отверстия для истечения смеси в 3 мм, подаваемой инжекторным способом порошковой смеси фракцией 0,065–0,1 мм, угле наклона рабочей головки – 50–60° и расстоянии напыления в 80–120 мм оптимальная сила тока напыления должна лежать ниже 300 А. Разработанная технология возможна к применению не только для ремонта втулок подшипников скольжения кривошипно-шатунных прессы, но и подшипников скольжения прокатных станов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Li S., An Q. Lubrication performance of planar thrust bearing with consideration of roughness of the surfaces // Journal of Engineering Tribology. – 2018. – № 47. – P. 356–361.
- Mikutadze M.A., Khasyanova D.U. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – № 47 (4). – P. 356–361.
- Olt J., Maksarov V.V., Krasnyy V.A. Study of bearing units wear resistance of engines career dump trucks, working in fretting corrosion conditions // Записки Горного института. – 2019. – № 235. – P. 70–77.
- Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский, Ф.Г. Геккер, И.Г. Горячева, В.В. Гриб, Н.Б. Демкин, М.Н. Добычин, Ю.А. Евдокимов, С.М. Захаров, В.Я. Кершенбаум, Ю.М. Лужнов, Н.М. Михлин, А.Т. Романова, И.Г. Фукс. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
- Review of recent advances in tribology / Y. Meng, J. Xu, Z. Jin, B. Prakash, Y. Hu // Friction. – 2020. – № 8. – P. 221–300.
- Ligier J.-L., Noel B. Friction reduction and reliability for engines bearings // Lubricants. – 2015. – № 3. – P. 569–596.
- Heat treatment-microstructure-mechanical/tribological property relationships in austempered ductile iron / T. Nasir, D.O. Northwood, J. Han, Q. Zou, G. Barber, X. Sun, P. Seaton // WIT

- Transactions on Engineering Sciences. – 2011. – № 71. – С. 159–169.
8. Forming 4.0: smart machine components applied as a hybrid plain bearing and a tool clamping system / R. Kurth, R. Tehel, T. Päßler, M. Putz, K. Wehmeyer, C. Kraft, H. Schwarze // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – № 27. – С. 65–71.
 9. Кузьев И.М., Анисимов В.Н. Анализ температурных процессов в подшипниках скольжения с учетом трения // *Problems of Tribology*. – 2012. – № 1. – Р. 27–40.
 10. Паровой Е.Ф., Ибатуллин И.Д. Актуальные проблемы надёжности узлов трения газотурбинных двигателей // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2015. – № 3. – С. 375–383.
 11. Plain bearing: pat. United States № 6.089.756; заявл. 12.03.1998; опубл. 18.07.2000. – 8 р.
 12. 3D mechanical analysis of aeronautical plain bearings: validation of a finite element model from measurement of displacement fields by digital volume correlation and optical scanning tomography / A. Germaneau, F. Peyruseigt, S. Mistou, P. Doumalin, J.-C. Dupré // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2010. – V. 48. – № 6. – Р. 676–683.
 13. Numerical analysis of plain journal bearing under hydrodynamic lubrication by water / G. Gao, Z. Yin, D. Jiang, X. Zhan // *Tribology International*. – 2014. – № 75 – Р. 31–38.
 14. Иванов В.А., Еркаев Н.В. Анализ упругих деформаций в подшипнике скольжения // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 6. – С. 241–245.
 15. Силуянова М.В., Фертиков А.О. Расчёт течения смазки в подшипнике скольжения редуктора авиационного двигателя // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. – 2019. – Т. 18. – № 2. – С. 75–88.
 16. Моделирование характеристик масляных и газовых подшипников скольжения методами вычислительной газовой динамики / А.О. Пугачёв, Ю.А. Равикович, Ю.И. Ермилов, Д.П. Холобцев, А.А. Матушкин // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва*. – 2013. – № 3 (41). – Ч. 1. – С. 211–221.
 17. Hlaváč J., Čechura M. Direct drive of 25 MN mechanical forging press // *Procedia Engineering*. – 2015. – № 100. – Р. 1608–1615.
 18. Бурдуковский В.Г., Инатович Ю.В. Оборудование кузнечно-штамповочных цехов. Кривошипные машины. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 168 с.
 19. Гаркунов Д.Н. Триботехника – М.: Машиностроение, 1999. – 336 с.
 20. Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 560 с.
 21. Chval Z., Cechura M. Optimization of power transmission on mechanical forging presses // *Procedia Engineering*. – 2014. – № 69. – Р. 890–896.
 22. Бочаров Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование. – М.: ИЦ «Академия», 2008. – 480 с.
 23. Фруцкий В.А. Антифрикционный материал из легированной бором и медью чугуновой стружки для подшипников скольжения: дис... канд. техн. наук. – Новополоцк, 2006. – 135 с.
 24. Штемпель О.П. Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новополоцк, 2003. – 23 с.

Поступила 12.12.2020 г.

Информация об авторах

Пилипенко С.В., кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета.

Фруцкий В.А., кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета.

Дудан А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета.

UDC 621.434-242.004.67

USE OF SECONDARY MATERIALS IN THE RESTORATION OF SLEEVE BEARING BUSHINGS EFFICIENCY

Stanislav V. Pilipenko¹,
44-08@mail.ru

Victor A. Frutski¹,
Fruzki@mail.ru

Aleksandr V. Dudan¹,
DudanAV@mail.ru

¹ Polotsk State University,
29, Blokhin street, Novopolotsk, 211440, Belarus.

The relevance of the work is caused by the need of repairing bushings that have working wear, to improve the anti-friction characteristics of tribo-tension, to save expensive raw materials and the need of resource saving technologies implementation. There is no doubt in saving expensive materials and replacing them with less expensive ones or using metalworking production waste. Provision of increased values of loads and sliding speeds with a general reduction in the cost of interfaces and comparable inter-repair periods is achieved by using chip waste and conducting economical dynamic alloying at the micro level with materials that can improve the performance of interfaces in general. The decrease in value of anthropogenic influence is achieved due to the use of relatively waste-free recovery methods.

The aim of the research is to create a tribo-voltage that works effectively under the specified operating conditions, while limiting the amount of waste of expensive resources and minimizing the negative impact on the environment. For this purpose a base of crushed metal waste is used with the application of economical dynamic alloying.

Methods: theoretical studies of the proposed material resistance, the design of the coupling and the method of its application; calculation of material application process parameters depending on operating conditions.

Results. The authors have determined the best value of linear parameters of elementary chip waste, the optimal value of alloying elements for these operating conditions and developed the technology for obtaining materials with pre-set properties with the ability to adjust individual properties depending on the actual operating conditions. The developed technology for repairing heavy-loaded plain bearings functioning under adverse operating conditions was tested in the conditions of a modern machine-building enterprise.

Key words:

Resource saving, obtaining coatings from mechanical processing waste, economical alloying, anti-friction material from secondary raw materials, plasma-forming gas, eco-friendly application technology.

REFERENCES

- Li S., An Q. Lubrication performance of planar thrust bearing with consideration of roughness of the surfaces. *Journal of Engineering Tribology*, 2018, no. 47, pp. 356–361.
- Mikutadze M.A., Khasyanova D.U. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, no. 47 (4), pp. 356–361.
- Olt J., Maksarov V.V., Krasnyy V.A. Study of bearing units wear resistance of engines career dump trucks, working in fretting corrosion conditions. *Notes of the Mining Institute*, 2019, no. 235, pp. 70–77.
- Chichinadze A.V., Brown E.D., Boucher N.A., Buyanovsky I.A., Gekker F.G., Goryacheva I.G., Grib V.V., Demkin N.B., Dobychin M.N., Evdokimov Yu.A., Zakharov S.M., Kershenbaum V.Ya., Luzhnov Yu.M., Mikhlin N.M., Romanova A.T., Fuks I.G. *Osnovy tribologii (treniye, iznos, smazka)* [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 664 p.
- Meng Y., Xu J., Jin Z., Prakash B., Hu Y. Review of recent advances in tribology. *Friction*, 2020, no. 8, pp. 221–300.
- Ligier J.-L., Noel B. Friction reduction and reliability for engines bearings. *Lubricants*, 2015, no. 3, pp. 569–596.
- Nasir T., Northwood D.O., Han J., Zou Q., Barber G., Sun X., Seaton P. Heat treatment-microstructure-mechanical/tribological property relationships in austempered ductile iron. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 2011, no. 71, pp. 159–169.
- Kurth R., Tehel R., Päßler T., Putz M., Wehmeyer K., Kraft C., Schwarze H. Forming 4.0: Smart machine components applied as a hybrid plain bearing and a tool clamping system. *Procedia Manufacturing*, 2019, no. 27, pp. 65–71.
- Kuzyaev I.M., Anisimov V.N. Analysis of temperature processes in sliding bearings, taking into account friction. *Problems of Tribology*, 2012, no. 1, pp. 27–40. In Rus.
- Parovay E.F., Ibatullin I.D. Actual problems of the reliability of friction units for gas turbine engines. *Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2015, no. 3, pp. 375–383. In Rus.
- Ono A., Matsumura H., Niwa M., Nawa S., Shibayama T. *Plain bearing*. Patent USA, no. 6.089.756, 2000.
- Germaneau A., Peyruseigt F., Mistou S., Doumalin P., Dupré J.-C. 3D mechanical analysis of aeronautical plain bearings: Validation of a finite element model from measurement of displacement fields by digital volume correlation and optical scanning tomography. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, vol. 48, no. 6, pp. 676–683.
- Gao G., Yin Z., Jiang D., Zhan X. Numerical analysis of plain journal bearing under hydrodynamic lubrication by water. *Tribology International*, 2014, no. 75, pp. 31–38.
- Ivanov V.A., Erkaev N.V. Analysis of elastic strain in a plain bearing. *Fundamental Research*, 2015, no. 6, pp. 241–245. In Rus.
- Silyanova M.V., Fertikov A.O. Calculation of the lubricant flow in the sliding bearing of an aircraft engine gearbox. *Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and engineering*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 75–88. In Rus.
- Pugachev A.O., Ravikovich Yu.A., Ermilov Yu.I., Kholobtsev D.P., Matushkin A.A. Modeling the characteristics of oil and gas plain bearings using computational gas dynamics. *Bulletin of the Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev*, 2013, no. 3 (41), pp. 211–221. In Rus.

17. Hlaváč J., Čechura M. Direct drive of 25 MN mechanical forging press. *Procedia Engineering*, 2015, no. 100, pp. 1608–1615.
18. Burdukovsky V.G., Inatovich Yu.V. *Oborudovanie kuznechno-shtampovochnykh tsekhov. Krivoshipnye mashiny* [Equipment forging and stamping shops. Crank Machines]. Yekaterinburg, Ural University Press, 2018. 168 p.
19. Garkunov D.N. *Tribotekhnika* [Tribotechnology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999, 336 p.
20. Zhivov L.I., Ovchinnikov A.G., Skladchikov E.N. *Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie* [Forging and stamping equipment]. Moscow, N.E. Bauman MSTU Publ. House, 2006. 560 p.
21. Chval Z., Cechura M. Optimization of power transmission on mechanical forging presses. *Procedia Engineering*, 2014, no. 69, pp. 890–896.
22. Bocharov Yu.A. *Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie* [Forging and stamping equipment]. Moscow, Academiya Publ. Center, 2008. 480 p.
23. Frutsky V.A. *Antifriktsionny material iz legirovannoy borom i medyu chugunnoy struzhki dlya podshipnikov skolzheniya*. Diss. Kand. nauk [Antifriction material from alloyed with boron and copper cast iron shavings for plain bearings. Cand. Diss.]. Novopolotsk, 2006. 135 p.
24. Shtempel O.P. *Intensifikatsiya diffuzionnogo legirovaniya metallicheskih poroshkov dlya zashchitnykh pokrytiy v podvizhnykh poroshkovykh smesyakh*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Intensification of diffusion alloying of metal powders for protective coatings in movable powder mixtures. Cand. Diss. Abstract]. Novopolotsk, 2003. 23 p.

Received: 12 December 2020.

Information about the authors

Stanislav V. Pilipenko, Cand. Sc., associate professor, Polotsk State University.

Victor A. Frutski, Cand. Sc., associate professor, Polotsk State University.

Aleksandr V. Dudan, Cand. Sc., associate professor, Polotsk State University.

УДК 622.32:519.8

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ГЕОЛОГО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЕЁ АВТОАДАПТАЦИИ К ПРОЦЕССАМ РАЗРАБОТКИ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ

Еремян Грачик Араикович¹,
eremyanga@hw.tpu.ru

Давуди Шадфар¹,
davoodis@hw.tpu.ru

Рукавишников Валерий Сергеевич¹,
rukavishnikovvs@hw.tpu.ru

Степико Артем Вадимович¹,
stepikoav@hw.tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью выбора из множества параметров геолого-гидродинамической модели месторождения углеводородов именно тех, за счет настройки которых алгоритм оптимизации будет находить решения, обеспечивающие корректное воспроизведение исторических данных моделью. Адаптация модели на историю эксплуатации залежи углеводородов является трудоемким и неотъемлемым этапом численного моделирования резервуаров углеводородов, подтверждающим пригодность модели для прогнозов. Ограничение числа настроечных параметров адаптации до наиболее значимых дает возможность модели быть успешно адаптированной на практике в рамках разумных временных затрат.

Цель: определить набор значимых параметров адаптации модели на основе изучения степени и характера их влияния на сходимость ключевых показателей работы скважин и месторождения.

Объект: автоматизированная адаптация синтетической модели нефтяного месторождения на данные эталонного расчета, являющегося аналогом исторических показателей разработки месторождения.

Методы: геолого-гидродинамическое моделирование, вычислительный эксперимент, анализ чувствительности.

Результаты. Составлена классификация параметров адаптации модели по степени влияния и степени неопределенности исходя из закона течения флюида в пористой среде. На основе множественных вычислительных экспериментов на построенной в ходе работы синтетической геолого-гидродинамической модели изучена степень и характер влияния различных параметров адаптации на сходимость показателей разработки месторождения. Применение двух видов анализа чувствительности позволило охарактеризовать как отдельное влияние параметров, так и комбинированное влияние с учетом варьирования остальных параметров. Понимание взаимовлияния параметров важно, поскольку при адаптации модели варьируются сразу все настроечные параметры. Выводы численных экспериментов согласуются с аналитическим подходом. Реализованный комплексный подход позволяет сформировать обоснованный набор настроечных параметров модели, ранжированный по степени важности для адаптации.

Ключевые слова:

Анализ чувствительности, параметризация модели, параметры адаптации, неопределенности, автоматизированная адаптация, алгоритм оптимизации, целевая функция, геолого-гидродинамическое моделирование.

Введение

Компьютерное моделирование разработки месторождений углеводородов используется в качестве вспомогательного инструмента для наиболее полного извлечения запасов сырья при максимальной экономической рентабельности. Для подтверждения пригодности модели для прогнозов сначала необходимо произвести процедуру адаптации или «калибровки» параметров модели таким образом, чтобы она корректно воспроизводила историю разработки месторождения. Основанием для адаптации параметров, заложенных в модель, являются присутствие им диапазоны неопределенности. Адаптация модели является классической обратной задачей [1].

Типичным подходом к задаче адаптации гидродинамических моделей является ручная настройка параметров модели, содержащих в себе наибольшую неопределенность [2]. Данному подходу присущ ряд

недостатков, в числе которых большие временные затраты, единственное решение, недооценка неопределенностей в данных и прогнозе. В качестве альтернативного подхода используются алгоритмы автоматизированной адаптации, включая машинное обучение и нейронные сети. Подходы и алгоритмы автоматизированной адаптации описаны в ряде работ [3–15]. В той или иной степени методы автоадаптации позволяют улучшить надежность и эффективность применения гидродинамических моделей. Суть автоматизированной адаптации модели заключается в минимизации целевой функции, которая представляет собой меру расхождения между модельным расчетом и историей добычи и является критерием качества адаптации. Минимизация целевой функции производится с помощью математических оптимизационных алгоритмов, которые итеративно подбирают значение параметров модели в рамках их диапазонов неопре-

деленности. Более подробно роль, виды и эффективность целевых функций применительно к задаче автоадаптации описаны в работах [16–23].

До начала процесса адаптации модели необходимо выполнить параметризацию, то есть из множества параметров модели выбрать именно те, за счет настройки которых оптимизационный алгоритм будет находить решения, обеспечивающие корректное воспроизведение исторических данных. Если бы вычислительные мощности не были бы ограничены, то для оптимизации можно было бы задать весь набор всевозможных параметров адаптации, в истинных значениях которых существует некоторая неопределенность, а затем найти решения с помощью простого стохастического перебора комбинаций (метод Монте Карло). Поскольку описанный выше пример носит чисто гипотетический характер, инженеру по моделированию разработки реального месторождения необходимо выбрать те параметры, которые обладают наибольшей неопределенностью и в то же время существенно влияют на динамику течения флюида в пласте. Ограничение числа настроечных параметров адаптации до наиболее значимых дает возможность модели быть успешно адаптированной на практике в рамках разумных временных затрат. Таким образом, выявление, оценка и оцифровка неопределенностей являются важными этапами в построении геолого-гидродинамической модели [24, 25]. Примеры подходов к количественной оценке неопределенностей детально описаны в работах [26–29].

Целью данной работы является определение набора значимых параметров адаптации модели на основе комплексного изучения степени и характера их влияния на сходимость ключевых показателей разработки месторождения.

Новизна данной работы заключается в комплексировании четырех подходов к параметризации модели: на основе анализа уравнения фильтрации, простого и расширенного анализов чувствительности, на основе численных экспериментов, а также на основе визуального анализа сходимости графиков показателей работы скважины.

Подходы и методы исследования

Для решения задачи параметризации возможно применение двух основных подходов. Первый подход основан на теоретическом анализе взаимосвязи параметров модели с законом течения флюида в пористой среде, также известным как закон Дарси [30].

Второй подход к выбору параметров адаптации основан на анализе чувствительности результатов расчета модели (например, накопленной добычи нефти) к изменению значений параметров адаптации [31–37]. При данном методе сначала выявляются и оцифровываются всевозможные геологические, петрофизические и прочие неопределенности параметров модели. Далее проводится расчет цифровой модели месторождения при поочередном варьировании значений параметров адаптации в пределах заданных диапазонов неопределенностей. По результатам расчетов строятся торнадо-диаграммы, на которых рас-

полагают параметры в порядке от наиболее влияющего к наименее влияющему, таким образом давая визуальное представление о степени влияния параметров. Некоторые коммерческие программы для геолого-гидродинамического моделирования позволяют на основе результатов расчета моделей для анализа чувствительности построить торнадо-диаграмму для продвинутого анализа чувствительности. Отличие продвинутой модификации в том, что она позволяет увидеть комбинированное влияние параметров адаптации на основе прокси-моделирования и расчета коэффициентов корреляции. Понимание взаимовлияния параметров важно, поскольку при адаптации модели варьируются сразу все настроечные параметры. Дополнительно в комплексный подход к параметризации модели включается визуальный анализ сходимости показателей работы скважин по графикам.

Для выполнения анализа чувствительности, основанного на серии вычислительных экспериментов, в рамках работы построена синтетическая геолого-гидродинамическая модель (рис. 1).

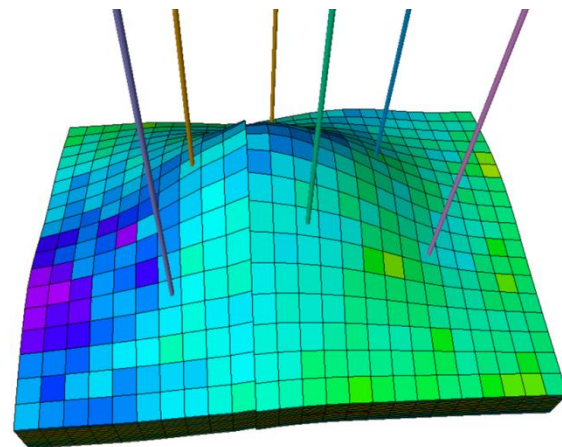


Рис. 1. Синтетическая 3D модель нефтяной залежи
Fig. 1. Synthetic 3D model of an oil reservoir

Модель представляет собой типичную пластово-сводовую нефтяную залежь. В концепцию модели заложена прибрежно-морская обстановка осадконакопления по аналогии с одним из месторождений Томской области. Толщина песчаного коллектора варьируется в диапазоне от 11 до 14 м, средняя проницаемость равна 50 мД. Модель состоит из 6800 ячеек и включает в себя 6 скважин, 3 из которых добывают нефть, остальные 3 закачивают воду в пласт. Таким образом имитируется разработка залежи методом заводнения. Для того чтобы эксперименты по адаптации были возможны, необходимо было создать аналогию исторических показателей работы скважин. Модель рассчитывается в режиме прогноза при заданных забойных давлениях на всех скважинах и при исходных («истинных») значениях параметров модели. Далее получившиеся показатели работы скважин, такие как дебиты, приемистости и давления, выгружаются в качестве данных истории, характеризующая эталонную модель. В данном случае создана история для 7 лет работы скважин.

Синтетическая модель существенно меньше и проще моделей большинства реальных месторождений. В то же время она состоит из тех же элементов и подчиняется тем же законам фильтрации флюида в пористой среде, как и модели реальных месторождений углеводородов.

Результаты

Уравнение дебита скважины для установившегося режима течения описывается формулой (1), которая является радиальной формой закона Дарси и получила название формулы Дюпюи [38].

$$Q = \frac{2\pi kh}{B\mu \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + S_{\text{общ}} \right)} (\overline{P}_{\text{пл}} - P_{\text{заб}}), \quad (1)$$

где Q – дебит флюида; $\overline{P}_{\text{пл}}$ – среднее пластовое давление; $P_{\text{заб}}$ – забойное давление; k – эффективная проницаемость по флюиду; h – толщина коллектора; B – объемный коэффициент флюида; μ – коэффициент вязкости флюида; r_e – радиус контура питания; r_w – радиус скважины; $S_{\text{общ}}$ – суммарный скин-фактор.

Правая часть формулы (1) является произведением депрессии, представленной разностью пластового и забойного давления, и коэффициента продуктивности, представленного остальной частью произведения (формула (2)).

$$PI = \frac{2\pi kh}{B\mu \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + S_{\text{общ}} \right)}, \quad (2)$$

где PI – коэффициент продуктивности.

Таким образом, коэффициент продуктивности скважины может быть выражен как дебит, деленный на депрессию (формула (3)), показывая какой суточный объем флюида добывается скважиной за счет единицы перепада давления. Физически коэффициент продуктивности скважины характеризует фильтрационные свойства пласта и призабойной зоны скважины.

$$\frac{2\pi kh}{B\mu \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + S_{\text{общ}} \right)} = \frac{Q}{(\overline{P}_{\text{пл}} - P_{\text{заб}})}. \quad (3)$$

Правая часть формулы (3) описывается историческими данными разработки скважин и месторождения в целом. Параметры модели, входящие в левую часть и/или влияющие на нее, обладают некоторой степенью неопределенности, поэтому требуется подобрать их значения в процессе оптимизации таким образом, чтобы результаты расчета модели соответствовали историческим данным.

В табл. 1 представлены параметры адаптации, условно разделенные на 6 групп на основании природы их влияния на продуктивность скважины. Показаны наиболее влияющие параметры адаптации для разбуренного месторождения исходя из закона течения флюида в пористой среде.

Чем сильнее параметр влияет на коэффициент продуктивности, тем сильнее его влияние на сходимость расчетных дебитов и давлений с историей, то

есть на адаптацию. Параметры, оказывающие сильное влияние на адаптацию и в то же время обладающие наибольшей неопределенностью, как правило, связаны с распределением эффективной проницаемости в пространстве и во времени. Эффективной проницаемостью называется проницаемость, характеризующая течение данной фазы при наличии в коллекторе других флюидов. Как правило, модель калибруется варьированием коэффициентов абсолютной проницаемости, относительных фазовых проницаемостей (ОФП), вертикальной анизотропии проницаемости, проводимости разломов и тому подобного. Наглядные примеры описаны в работах [39, 40].

Таблица 1. Наиболее влияющие параметры адаптации для разбуренного месторождения исходя из закона течения флюида в пористой среде

Table 1. The most influencing history matching parameters for a developed field based on the law of fluid flow in a porous medium

Группа Group	Параметры адаптации History matching parameters	Степень влияния Influence	Степень неопр. Uncertainty
1	Проницаемость (абсолютная, эффективная) Permeability (absolute, effective)	Сильное Strong	Высокая High
2	Параметры, влияющие на проницаемость (пористость, водонасыщенность и прочие) Parameters affecting permeability (porosity, water saturation and others)	Умеренное Moderate	Средняя Medium
3	Толщина коллектора Reservoir thickness	Сильное Strong	Низкая Low
4	Вязкость и объемный коэффициент Viscosity and formation volume factor	Сильное Strong	Низкая Low
5	Скин-фактор Skin factor	Умеренное Moderate	Средняя Medium
6	Геометрия скважины и зоны дренирования Well geometry and drainage area	Умеренное Moderate	Низкая Low

После теоретического анализа параметризации модели в данной работе проводится серия вычислительных экспериментов на построенной синтетической модели. Каждый настроечный параметр модели, теоретически способный существенно влиять на расчет модели, был протестирован численным экспериментом, чтобы убедиться в степени и характере влияния тестируемого параметра. Список выбранных параметров адаптации с указанием их буквенных обозначений, истинных значений и диапазонов варьирования приведен в табл. 2.

В качестве параметров адаптации выбрано 8 параметров, отвечающих за проницаемость, водонасыщенность и уровень зеркала свободной воды. В качестве уравнения взаимосвязи проницаемости от пористости используется формула вида

$$\ln k = a\varphi + b,$$

где k – проницаемость; φ – пористость; a и b – коэффициенты уравнения.

Анализ чувствительности накопленных показателей разработки залежи к изменению параметров адаптации позволяет ранжировать и упорядочивать параметры по степени влияния (рис. 2).

Расчет моделей при адаптации производится с контролем расходов жидкости, что означает, что количество добытой и закаченной жидкости в модели должно строго соответствовать тем же показателям по истории работы скважин. Диаграмма Торнадо для накопленной добычи жидкости свидетельствует о том, что варьирование коэффициентов $Corey_water$, $Perm_a$ и $Perm_b$ может привести к недобору жидкости скважинами модели, что, несомненно, приведет к нарушению материального баланса. Перечисленные коэффициенты сильно влияют на эффективную про-

ницаемость, входящую в уравнение фильтрации флюида в пористой среде. Данный эффект происходит при недостатке продуктивности пласта даже при использовании максимального перепада давления.

По степени влияния на накопленную добычу нефти распределение настроечных параметров выглядит иначе. Наиболее влияющим параметром является FWL , поскольку он определяет вскрытую нефтенасыщенную толщину. Его варьирование может отражаться на накопленной добыче нефти в диапазоне от 39 % недобора до 42 % перебора. Ожидается сильно влияют коэффициенты уравнения ОФП и уравнения пористость–проницаемость. Влияние вертикальной анизотропии Kv_Kh и водонасыщенности в переходной зоне Sw_a более слабое, поскольку добывающие скважины вертикальные и пробурены в чистую нефтяную зону.

Таблица 2. Параметры адаптации модели

Table 2. History matching parameters of the model

№	Параметры адаптации History matching parameters	Обозначение Designation	Мин Min	Макс Max	Истина Truth
1	Глубина зеркала свободной воды, м Free water level, m	\$FWL	-2455	-2445	-2450
2	Степень уравнения Кори по нефти Oil exponent in Corey equation	\$Corey_O_W	3,0	8,0	5,0
3	Степень уравнения Кори по воде Water exponent in Corey equation	\$Corey_water	0,6	5,0	1,2
4	Концевая точка ОФП по воде End point of water relative permeability	\$Krw_Sorw	0,3	0,9	0,7
5	Коэффициент «а» в уравнении проницаемости от пористости Coefficient «a» in poro-perm equation	\$Perm_a	64	74	70
6	Коэффициент «b» в уравнении проницаемости от пористости Coefficient «b» in poro-perm equation	\$Perm_b	8,0	9,0	8,2
7	Вертикальная анизотропия проницаемости, д.е. Vertical anisotropy of permeability, unit fraction	\$Kv_Kh	0,01	0,30	0,20
8	Коэффициент уравнения J-функции Coefficient in J-function	\$Sw_a	-0,20	-0,14	-0,18

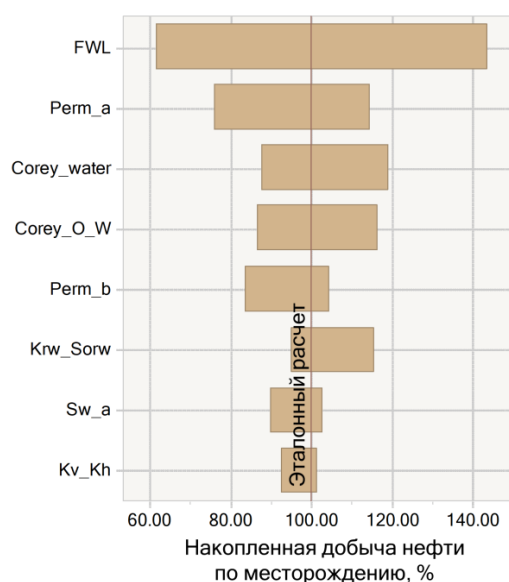
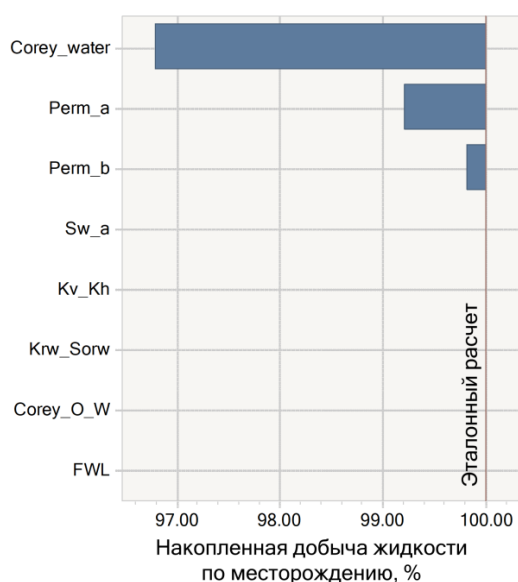


Рис. 2. Диаграммы Торнадо на основе анализа чувствительности

Fig. 2. Tornado charts based on sensitivity analysis

Более наглядным с инженерной точки зрения является анализ графиков показателей работы скважин: дебитов жидкости, нефти, воды и забойных давлений. На

примере скважины А видно, в каких широких диапазонах изменяется сходимость показателей при варьировании настроечного параметра $Corey_Water$ (рис. 3).

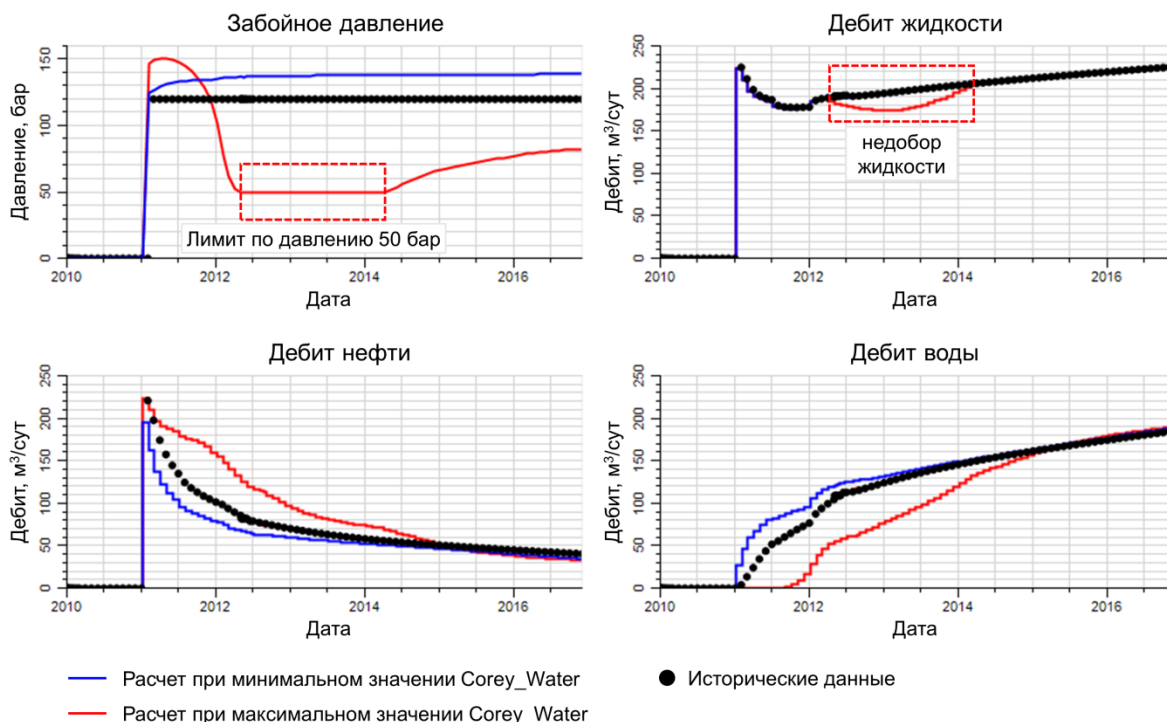


Рис. 3. Показатели работы скважины А при минимальном и максимальном значениях параметра *Corey_Water*
Fig. 3. Performance indicators of well A at minimum and maximum values of the parameter *Corey_Water*

Участок недобора жидкости возникает в том же временном периоде, где забойное давление принимает минимальное значение 50 бар, ограниченное технологическим режимом работы скважины. Причиной является сильное расхождение пропорции добываемых флюидов: мало воды и недостаточно много нефти для компенсации недобора жидкости. Из этого следует, что диапазон неопределенности настроечно-

го параметра *Corey_Water* может быть сужен для того, чтобы избежать нарушения материального баланса и сэкономить вычислительные мощности на расчете заведомо неудовлетворительных вариантов модели.

На примере графиков работы той же скважины при варьировании параметра *Perm_a* наблюдается различие в характере влияния параметра на сходимость показателей (рис. 4).

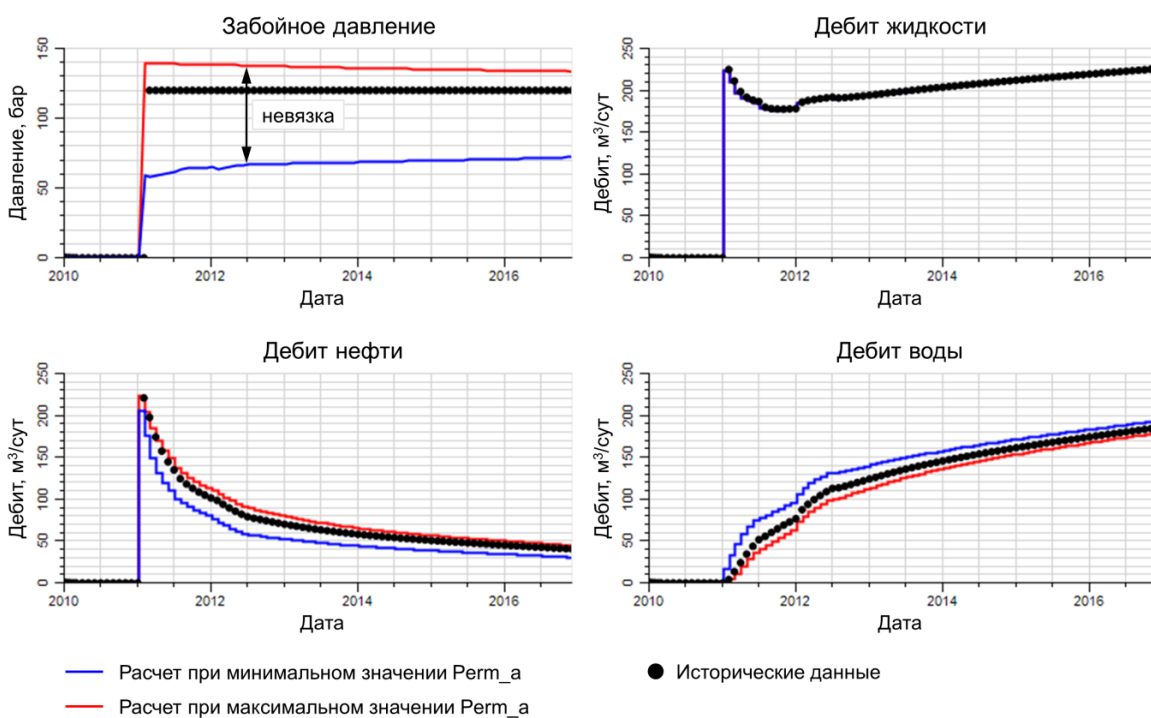


Рис. 4. Показатели работы скважины А при минимальном и максимальном значениях параметра *Perm_a*
Fig. 4. Performance indicators of well A at minimum and maximum values of the parameter *Perm_a*

Поскольку от параметра Perm_a прямо пропорционально зависит продуктивность скважины, это отражается на широком диапазоне расхождения забойного давления. Влияние на соотношение дебитов воды и нефти существенно слабее.

В целевую функцию в данной работе включены: дебит нефти, дебит воды, приемистость воды, забойные и пластовые давления по всем 6 скважинам в соответствии с методикой выбора оптимального вида целевой функции [41]. При адаптации модели ориентиром для алгоритма оптимизации является значение целевой функции. В связи с этим имеет смысл по-

строить диаграмму Торнадо для анализа чувствительности целевой функции к параметрам адаптации. В дополнение к простому анализу чувствительности в используемом программном комплексе для каждого параметра адаптации на основе прокси-моделирования рассчитаны весовые коэффициенты, учитывающие комбинированное влияние данного параметра при одновременном варьировании других параметров. Полученные веса позволяют наряду с простой диаграммой Торнадо построить подобную диаграмму для расширенного анализа чувствительности (рис. 5).

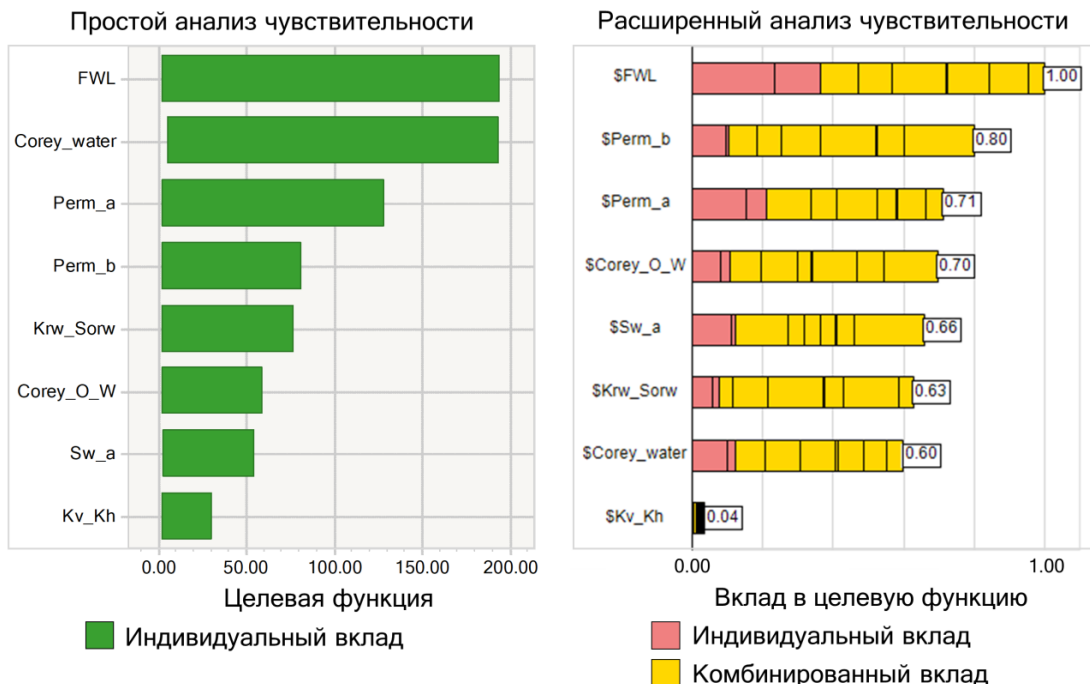


Рис. 5. Сравнение результатов простого и расширенного анализов чувствительности

Fig. 5. Comparison of the results of simple and advanced sensitivity analyzes

Простой анализ чувствительности говорит о том, что можно выделить три самых влияющих параметра из восьми: FWL, Corey_water и Perm_a. Однако расширенный анализ чувствительности показывает, что все используемые параметры, кроме Kv_Kh, сильно влияют на значение целевой функции и, соответственно, на адаптацию. Таким образом, получаем новый и более уверенный вывод о том, что для задачи адаптации целесообразно отказаться только от параметра вертикальной анизотропии проницаемости Kv_Kh, остальные следует использовать.

После применения обозначенных подходов к параметризации следует произвести комплексирование результатов. Теоретический анализ на основе уравнения фильтрации помог выделить общие группы параметров модели по степени влияния и степени неопределенности. Анализ чувствительности на основе численных экспериментов позволил отранжировать 8 выбранных параметров по степени влияния на адаптацию конкретной модели нефтяной залежи. Благодаря расширенному анализу чувствительности удалось сделать вывод, что параметр Kv_Kh можно исклю-

чить без ущерба для адаптации модели. Анализ графиков показателей работы скважин позволяет увидеть характер влияния каждого параметра, что ценно с инженерной точки зрения.

Выводы

Комплексный подход к параметризации модели нефтяной залежи для автоадаптации позволяет визуализировать и понять степень и характер влияния конкретных параметров адаптации на сходимость показателей работы скважин и месторождения.

Применение двух видов анализа чувствительности позволило охарактеризовать как отдельное влияние параметров, так и влияние с учетом варьирования остальных параметров. Понимание взаимовлияния параметров важно, поскольку при адаптации модели варьируются сразу все настроечные параметры. Выводы численных экспериментов согласуются с описанным аналитическим подходом.

Реализованный комплексный подход позволил сформировать обоснованный набор настроечных параметров для созданной геолого-гидродинамической

модели нефтяной залежи, ранжированный по степени важности для автоадаптации процесса её разработки. Ограничение числа настроечных параметров адаптации до наиболее значимых сокращает вычислительные затраты алгоритма оптимизации благодаря

уменьшению размерности пространства поиска. Таким образом, предложенный подход помогает на практике сократить временные затраты на адаптацию модели, столь трудоемкий и важный этап моделирования разработки нефтяных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. – Paris: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. – 342 p.
2. Гладков Е.А., Гладкова Е.Е. Трехмерная геолого-технологическая модель месторождения УВ на основе индивидуальной поскважинной адаптации // Газовая промышленность. – 2010. – № 5. – С. 36–39.
3. Геологически обоснованная автоматизированная адаптация гидродинамических моделей на примере реального месторождения / Г.Ю. Шишаев, И.В. Матвеев, Г.А. Еремян, В.В. Демьянов, С.В. Кайгородов // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 6. – С. 58–61.
4. Geology driven history matching / I. Matveev, G. Shishaev, G. Eremyan, V. Demyanov, O. Popova, S. Kaygorodov, V. Belozerov, J. Uzhegova, D. Konoshonkin, M. Korovin // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, 22–24 October, 2019. URL: <https://onepetro.org/SPERTC/proceedings-abstract/19RPTC/1-19RPTC/D013S001R004/219147> (дата обращения: 05.04.2021).
5. Geology realism control in automated history matching / I. Matveev, G. Shishaev, G. Eremyan, D. Konoshonkin, V. Demyanov, S. Kaygorodov // ECMOR XVII: Conference Proceedings. – Houten, 14–17 September, 2020. – Houten: European Association of Geoscientists & Engineers Publ., 2020. – V. 2020. – P. 1–9.
6. Verga F., Cancelliere M., Viberti D. Improved application of assisted history matching techniques // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2013. – V. 109. – P. 327–347.
7. Foroud T., Seifi A., Amin Shahidi B. Assisted history matching using artificial neural network based global optimization method – Applications to Brugge field and a fractured Iranian reservoir // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2014. – V. 123. – P. 46–61.
8. An integrated closed-loop solution to assisted history matching and field optimization with machine learning techniques / Z. Chai, A. Nwachukwu, Y. Zagayevskiy, S. Amini, S. Madasu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 198. – 108204.
9. Genetic Algorithm for the History Matching Problem / C.R. Xavier, E.P. Santos, V.F. Vieira, R.W. Santos // Procedia Computer Science. – 2013. – V. 18. – P. 946–955.
10. Rwechungura R.W., Dadashpour M., Kleppe J. Advanced history matching techniques reviewed // SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. – Manama, Bahrain, September, 2011. URL: <https://onepetro.org/SPEMEOS/proceedings-abstract/11MEOS/All-11MEOS/SPE-142497-MS/148210> (дата обращения: 05.04.2021).
11. Almeida F.L.R., Davolio A., Schiozer D.J. A New approach to perform a probabilistic and multi-objective history matching // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Amsterdam, Netherlands, October, 2014. URL: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/14ATCE/All-14ATCE/SPE-170623-MS/211614> (дата обращения: 05.04.2021).
12. Al-Sofi A.M., Blunt M.J. Control of numerical dispersion in simulations of augmented waterflooding // SPE Improved Oil Recovery Symposium. – Tulsa, USA, April 2010. URL: <https://onepetro.org/SPEIOR/proceedings-abstract/10IOR/All-10IOR/SPE-129658-MS/107593> (дата обращения: 05.04.2021).
13. Joint history matching of production and 4D-seismic related data for a North Sea field case / V. Gervais-Couplet, F. Roggero, M. Feraille, M. Le Ravalec-Dupin, A. Seiler // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Florence, Italy, September, 2010. URL: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/10ATCE/All-10ATCE/SPE-135116-MS/102106> (дата обращения: 05.04.2021).
14. Kazemi A., Stephen K.D. Optimal parameter updating in assisted history matching using streamlines as a guide // Oil & Gas Science and Technology. – 2013. – V. 68. – P. 577–594.
15. New approach to automatic history matching using kernel PCA / P. Sarma, L.J. Durlafsky, K. Aziz, W.H.A. Chen // SPE Reservoir Simulation Symposium. – Houston, USA, 26–28 February, 2007. URL: <https://onepetro.org/spersc/proceedings-abstract/07RSS/All-07RSS/SPE-106176-MS/143615> (дата обращения: 05.04.2021).
16. Design of objective function for interference well testing / R. Booth, A.C. Bertolini, K.L. Morton, A.J. Fitzpatrick // OTC Brasil. – Rio de Janeiro, Brazil, October, 2013. URL: <https://onepetro.org/OTCBRASIL/proceedings-abstract/13OTCB/All-13OTCB/OTC-24513-MS/40969> (дата обращения: 05.04.2021).
17. Bouzarkouna Z., Nobakht B., Karim N. A better formulation of objective functions for history matching using hausdorff distances // EUROPEC 2015. – Madrid, Spain, 1–4 June, 2015. URL: <https://onepetro.org/SPEEURO/proceedings-abstract/15EURO/All-15EURO/SPE-174302-MS/183479> (дата обращения: 05.04.2021).
18. How does the definition of the objective function influence the outcome of history matching? / G. Eremyan, I. Matveev, G. Shishaev, V. Rukavishnikov, V. Demyanov // ECMOR XVII: Conference Proceedings. – Houten, 14–17 September, 2020. – Houten: European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – V. 2020. – P. 1–14.
19. Ferraro P., Verga F. Use of evolutionary algorithms in single and multi-objective optimization techniques for assisted history matching // Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. – Ravenna, Italy, 25–27 March, 2009. URL: <https://onepetro.org/OMCONF/proceedings-abstract/OMC09/All-OMC09/OMC-2009-079/1101> (дата обращения: 05.04.2021).
20. Park H.Y. Handling conflicting multiple objectives using pareto-based evolutionary algorithm for history matching of reservoir performance // SPE Reservoir Simulation Symposium. – Woodlands, USA, 18–20 February, 2013. URL: <https://onepetro.org/spersc/proceedings-abstract/13RSS/All-13RSS/SPE-163623-MS/177620> (дата обращения: 05.04.2021).
21. Stephen K.D. Seismic history matching with saturation indicators combined with multiple objective function optimization // EAGE Annual Conference & Exhibition incorporating SPE Europec. – London, UK, 10–13 June, 2013. URL: <https://onepetro.org/SPEEURO/proceedings-abstract/13EURO/All-13EURO/SPE-164857-MS/177300> (дата обращения: 05.04.2021).
22. Еремян Г.А., Рукавишников В.С. Критерии качества автоматизированной адаптации геолого-гидродинамической модели месторождения углеводородов // Экспозиция Нефть Газ. – 2020. – № 6. – С. 76–79.
23. Еремян Г.А., Рукавишников В.С. Влияние способов нормировки целевой функции на результаты автоадаптации численной модели месторождения углеводородов // Экспозиция Нефть Газ. – 2020. – № 6. – С. 81–86.
24. Прогнозирование геолого-физических параметров месторождений углеводородов в условиях неопределенности данных / А.И. Кобрунов, В.Е. Кулешов, А.С. Могутов, А.Н. Дорогобед // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 7. – С. 78–80.
25. Reservoir model uncertainty quantification through computer-assisted history matching / C. Yang, L.X. Nghiem, C. Card, M. Breimeier // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Anaheim, USA, 11–14 November, 2007. URL: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/07ATCE/All-07ATCE/SPE-109825-MS/142893> (дата обращения: 05.04.2021).
26. Wilson A. Uncertainty quantification for history-matching problems // Journal of Petroleum Technology. – 2017. – V. 69. – P. 90–92.
27. Hierarchical benchmark case study for history matching, uncertainty quantification and reservoir characterization / D. Arnold, V. Demyanov, D. Tatum, M. Christie, T. Rojas, S. Geiger, P. Corbett // Computers & Geosciences. – 2013. – V. 50. – P. 4–15.

28. Christie M., Demyanov V., Erbas D. Uncertainty quantification for porous media flows // Journal of Computational Physics. – 2006. – V. 127. – P. 143–158.
29. Multi-data reservoir history matching for enhanced reservoir forecasting and uncertainty quantification / K. Katterbauer, S. Arango, S. Sun, I. Hoteit // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015. – V. 128. – P. 160–176.
30. Dake L.P. Fundamentals of reservoir engineering. – Amsterdam: Elsevier, 1978. – 443 p.
31. Reservoir history matching by ensemble smoother with principle component and sensitivity analysis for heterogeneous formations / Q. Liao, K. Alsamadony, G. Lei, A. Awotunde, S. Patil // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 198. – 108140.
32. A random forests-based sensitivity analysis framework for assisted history matching / A. Aulia, D. Jeong, I.M. Saaid, D. Kania, M.T. Shuker, N.A. El-Khatib // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 181. – 106237.
33. Sensitivity and history match analysis of a carbon dioxide «huff-and-puff» injection test in a horizontal shale gas well in Tennessee / C. Keles, X. Tang, C. Schlosser, A.K. Louk, N.S. Ripepi // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2020. – V. 77. – 103226.
34. Kang B., Choe J. Initial model selection for efficient history matching of channel reservoirs using Ensemble Smoother // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 152. – P. 294–308.
35. Submarine fan reservoir architecture and heterogeneity influence on hard-to-recover reserves. Achimov Fm / A. Kondratyev, V. Rukavishnikov, L. Shakirzyanov, K. Maksyutin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress. – 2015. – V. 24. – 012041.
36. Givens B., Hoffman B.T. A Sensitivity analysis of input parameters for modeling primary and tertiary recovery in unconventional oil reservoirs // SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Meeting. – Denver, USA, 17–18 April, 2014. URL: <https://onepetro.org/SPEWRM/proceedings-abstract/14WRRM/All-14WRRM/SPE-169530-MS/211285> (дата обращения: 05.04.2021).
37. Peskova D.N., Sizykh A.V., Rukavishnikov V.S. Evaluation the value-of-Information (VOI) and look back analysis during modelling of the exploration works // 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Conference Proceedings. – St-Petersburg, Russia, April, 2016. – Houten: European Association of Geoscientists & Engineers, 2016. – P. 480–487.
38. Ritzi R.W., Bobeck P. Comprehensive principles of quantitative hydrogeology established by Darcy (1856) and Dupuit (1857) // Water Resources Research. – 2008. – V. 44. – P. 1–14.
39. Bertolini A.C., Schiozer J.D. Influence of the objective function in the history matching process // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2011. – V. 78. – P. 32–41.
40. Oliveira G.S., Schiozer D.J., Maschio C. History matching by integrating regional multi-property image perturbation methods with a multivariate sensitivity analysis // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 153. – P. 111–122.
41. Еремян Г.А. Методика выбора оптимальной целевой функции для автоадаптации геолого-гидродинамической модели // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2021. – № 1. – С. 30–38.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Еремян Г.А., инженер лаборатории геологии месторождений нефти и газа Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Давуди Ш., инженер-исследователь Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рукавишников В.С., PhD, директор Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Степико А.В., инженер лаборатории геологии месторождений нефти и газа Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.32:519.8

COMPREHENSIVE APPROACH TO PARAMETRIZATION OF A PETROLEUM RESERVOIR MODEL FOR AUTOMATED HISTORY MATCHING

Grachik A. Eremyan¹,
eremyanga@hw.tpu.ru

Shadfar Davoodi¹,
davoodis@hw.tpu.ru

Valeriy S. Rukavishnikov¹,
rukavishnikovvs@hw.tpu.ru

Artem V. Stepiko¹,
stepikoav@hw.tpu.ru

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

The relevance of the research is caused by the need to select from a variety of parameters of a petroleum reservoir model the most important ones. By adjusting these parameters, the optimization algorithm should find solutions that ensure the correct reproduction of historical data by the model. History matching is a time-consuming and inevitable step in numerical modeling of hydrocarbon reservoirs, which confirms the suitability of the model for predictions. Limiting the number of tuning parameters to the most significant allows the model to be successfully history matched in practice within a reasonable time frame.

The main aim of the work is to determine a set of significant history matching parameters based on the study of the degree and nature of their influence on the convergence of key performance indicators of the wells and the field.

Object: automated history matching of a petroleum reservoir model to the data of a reference case, which is an analogue of historical indicators of real field development.

Methods: numerical geological modelling and reservoir simulation, computational experiment, sensitivity analysis.

Results. The authors have developed the classification of history matching parameters according to the degree of influence and the degree of uncertainty based on the law of fluid flow in a porous medium. Based on multiple computational experiments on the synthetic reservoir model built during the work we studied the degree and nature of the influence of various history matching parameters on the convergence of field development indicators. The use of two types of sensitivity analysis made it possible to characterize both the individual influence of the parameters and the combined influence taking into account the variation of the remaining parameters. Understanding the mutual influence of the parameters is important, since during history matching all tuning parameters are varied simultaneously. The conclusions of the numerical experiments are consistent with the analytical approach. The implemented comprehensive approach makes it possible to form a reasonable set of tuning parameters of the model, ranked according to the degree of importance for history matching.

Key words:

Sensitivity analysis, model parametrization, history matching parameters, uncertainties, automated history matching, optimization algorithm, objective function, reservoir simulation.

REFERENCES

1. Tarantola A. *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. Paris, Society for Industrial and Applied Mathematics Publ., 2005. 342 p.
2. Gladkov E.A., Gladkova E.E. Trekhmernaya geologotekhnologicheskaya model mestorozhdeniya UV na osnove individualnoy poskvazhinnoy adaptatsii [Three-dimensional geological and engineering model of hydrocarbon field based on individual well level history matching]. *Gazovaya promyshlennost*, 2010, no. 5, pp. 104–108.
3. Shishaev G.Y., Matveev I.V., Eremyan G.A., Demyanov V.V., Kaygorodov S.V. Geologically plausible computer-aided history matching on the example of one of the oil fields. *Oil Industry*, 2020, no. 6, pp. 58–61. In Rus.
4. Matveev I., Shishaev G., Eremyan G., Demyanov V., Popova O., Kaygorodov S., Belozerov B., Uzhegova J., Konoshonkin D., Korovin M. Geology driven history matching. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, 22–24 October, 2019. Available at: <https://onepetro.org/SPERPTC/proceedings-abstract/19RPTC/1-19RPTC/D013S001R004/219147> (accessed: 05 April 2021).
5. Matveev I., Shishaev G., Eremyan G., Konoshonkin D., Demyanov V., Kaygorodov S. Geology realism control in automated history matching. *ECMOR XVII: Conference Proceedings*. Houten, 14–17 September, 2020. Houten, European Association of Geoscientists & Engineers Publ., 2020, vol. 2020, pp. 1–9.
6. Verga F., Cancelliere M., Viberti D. Improved application of assisted history matching techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, vol. 109, pp. 327–347.
7. Foroud T., Seifi A., Amin Shahidi B. Assisted history matching using artificial neural network based global optimization method – applications to Brugge field and a fractured Iranian reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, vol. 123, pp. 46–61.
8. Chai Z., Nwachukwu A., Zagayevskiy Y., Amini S., Madasu S. An integrated closed-loop solution to assisted history matching and field optimization with machine learning techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 198, no. 108204.
9. Xavier C.R., Santos E.P., Vieira V.F., Santos R.W. Genetic algorithm for the history matching problem. *Procedia Computer Science*, 2013. vol.18, pp. 946–955.
10. Rwechungura R.W., Dadashpour M., Kleppe J. Advanced history matching techniques reviewed. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. Manama, Bahrain, September, 2011. Available at: <https://onepetro.org/SPEMEOS/proceedings-abstract/11MEOS/All-11MEOS/SPE-142497-MS/148210> (accessed: 05 April 2021).
11. Almeida F.L.R., Davolio A., Schiozer D.J. A New approach to perform a probabilistic and multi-objective history matching. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Amsterdam, Netherlands, October, 2014. Available at: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/14ATCE/All-14ATCE/SPE-170623-MS/211614> (accessed: 05 April 2021).

12. Al-Sofi A.M., Blunt M.J. Control of numerical dispersion in simulations of augmented waterflooding. *SPE Improved Oil Recovery Symposium*. Tulsa, USA, April 2010. Available at: <https://onepetro.org/SPEIOR/proceedings-abstract/10IOR/All-10IOR/SPE-129658-MS/107593> (accessed: 05 April 2021).
13. Gervais-Couplet V., Roggero F., Feraïlle M., Le Ravalec-Dupin M., Seiler A. Joint history matching of production and 4d-seismic related data for a north sea field case. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Florence, Italy, September, 2010. Available at: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/10ATCE/All-10ATCE/SPE-135116-MS/102106> (accessed: 05 April 2021).
14. Kazemi A., Stephen K.D. Optimal parameter updating in assisted history matching using streamlines as a guide. *Oil & Gas Science and Technology*, 2013, vol. 68, pp. 577–594.
15. Sarma P., Durlifsky L.J., Aziz K., Chen W.H. A new approach to automatic history matching using kernel PCA. *SPE Reservoir Simulation Symposium*. Houston, USA, 26–28 February, 2007. Available at: <https://onepetro.org/spersc/proceedings-abstract/07RSS/All-07RSS/SPE-106176-MS/143615> (accessed: 05 April 2021).
16. Booth R., Bertolini A.C., Morton K.L., Fitzpatrick A.J. Design of objective function for interference well testing. *OTC Brasil*. Rio de Janeiro, Brazil, October, 2013. Available at: <https://onepetro.org/OTCBRASIL/proceedings-abstract/13OTCB/All-13OTCB/OTC-24513-MS/40969> (accessed: 05 April 2021).
17. Bouzarkouna Z., Nobakht B., Karim N. A better formulation of objective functions for history matching using hausdorff distances. *EUROPEC 2015*. Madrid, Spain, 1–4 June, 2015. Available at: <https://onepetro.org/SPEEURO/proceedings-abstract/15EURO/All-15EURO/SPE-174302-MS/183479> (accessed: 05 April 2021).
18. Eremyan G., Matveev I., Shishaev G., Rukavishnikov V., Demyanov V. How does the definition of the objective function influence the outcome of history matching? *ECMOR XVII: Conference Proceedings*. Houten, 14–17 September, 2020. Houten, European Association of Geoscientists & Engineers Publ., 2020. Vol. 2020, pp. 1–14.
19. Ferraro P., Verga F. Use of evolutionary algorithms in single and multi-objective optimization techniques for assisted history matching. *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*. Ravenna, Italy, 25–27 March, 2009. Available at: <https://onepetro.org/OMCONF/proceedings-abstract/OMC09/All-OMC09/OMC-2009-079/1101> (accessed: 05 April 2021).
20. Park H.Y. Handling conflicting multiple objectives using pareto-based evolutionary algorithm for history matching of reservoir performance. *SPE Reservoir Simulation Symposium*. Woodlands, USA, 18–20 February, 2013. Available at: <https://onepetro.org/spersc/proceedings-abstract/13RSS/All-13RSS/SPE-163623-MS/177620> (accessed: 05 April 2021).
21. Stephen K.D. Seismic history matching with saturation indicators combined with multiple objective function optimization. *EAGE Annual Conference & Exhibition incorporating SPE Europec*. London, UK, 10–13 June, 2013. Available at: <https://onepetro.org/SPEEURO/proceedings-abstract/13EURO/All-13EURO/SPE-164857-MS/177300> (accessed: 05 April 2021).
22. Eremyan G.A., Rukavishnikov V.S. Quality criteria for automated history matching of hydrocarbon reservoir models. *Exposition Oil Gas*, 2020, no. 6, pp. 76–79. In Rus.
23. Eremyan G.A., Rukavishnikov V.S. Influence of the objective function normalization method on the reservoir model history matching results. *Exposition Oil Gas*, 2020, no. 6, pp. 81–86. In Rus.
24. Kobrunov A.I., Kuleshov V.E., Mogutov A.S., Dorogobed A.N. Prediction of hydrocarbon deposit physical and geological commercial parameters under conditions of data uncertainty. *Oil Industry*, 2014, no. 7, pp. 78–80. In Rus.
25. Yang C., Nghiem L.X., Card C., Breimeier M. Reservoir model uncertainty quantification through computer-assisted history matching. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Anaheim, USA, 11–14 November, 2007. Available at: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/07ATCE/All-07ATCE/SPE-109825-MS/142893> (accessed: 05 April 2021).
26. Wilson A. Uncertainty quantification for history-matching problems. *Journal of Petroleum Technology*, 2017, vol. 69, pp. 90–92.
27. Arnold D., Demyanov V., Tatum D., Christie M., Rojas T., Geiger S., Corbett P. Hierarchical benchmark case study for history matching, uncertainty quantification and reservoir characterization. *Computers & Geosciences*, 2013, vol. 50, pp. 4–15.
28. Christie M., Demyanov V., Erbas D. Uncertainty quantification for porous media flows. *Journal of Computational Physics*, 2006, vol. 127, pp. 143–158.
29. Katterbauer K., Arango S., Sun S., Hoteit I. Multi-data reservoir history matching for enhanced reservoir forecasting and uncertainty quantification. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, vol. 128, pp. 160–176.
30. Dake L.P. *Fundamentals of reservoir engineering*. Amsterdam, Elsevier Publ., 1978. 443 p.
31. Liao Q., Alsamadony K., Lei G., Awotunde A., Patil S. Reservoir history matching by ensemble smoother with principle component and sensitivity analysis for heterogeneous formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 198, no. 108140.
32. Aulia A., Jeong D., Saaid I.M., Kania D., Shuker M.T., El-Khatib N.A. A random forests-based sensitivity analysis framework for assisted history matching. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 181, no. 106237.
33. Keles C., Tang X., Schlosser C., Louk A.K., Ripepi N.S. Sensitivity and history match analysis of a carbon dioxide «huff-and-puff» injection test in a horizontal shale gas well in Tennessee. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, vol. 77, no. 103226.
34. Kang B., Choe J. Initial model selection for efficient history matching of channel reservoirs using Ensemble Smoother. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 152, pp. 294–308.
35. Kondratyev A., Rukavishnikov V., Shakirzyanov L., Maksyutin K. Submarine fan reservoir architecture and heterogeneity influence on hard-to-recover reserves. Achimov Fm. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress*, 2015, vol. 24, no. 012041.
36. Givens B., Hoffman B.T. A sensitivity analysis of input parameters for modeling primary and tertiary recovery in unconventional oil reservoirs. *SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Meeting*. Denver, USA, 17–18 April, 2014. Available at: <https://onepetro.org/SPEWRM/proceedings-abstract/14WRRM/All-14WRRM/SPE-169530-MS/211285> (accessed: 05 April 2021).
37. Peskova D.N., Sizykh A.V., Rukavishnikov V.S. Evaluation the value-of-Information (VOI) and look back analysis during modeling of the exploration works. *7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition*. St-Petersburg, April, 2016. Houten, European Association of Geoscientists & Engineers Publ., 2016, pp. 480–487.
38. Ritz R.W., Bobeck P. Comprehensive principles of quantitative hydrogeology established by Darcy (1856) and Dupuit (1857). *Water Resources Research*, 2008, vol. 44, pp. 1–14.
39. Bertolini A.C., Schiozer J.D. Influence of the objective function in the history matching process. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, vol. 78, pp. 32–41.
40. Oliveira G.S., Schiozer D.J., Maschio C. History matching by integrating regional multi-property image perturbation methods with a multivariate sensitivity analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 153, pp. 111–122.
41. Eremyan G.A. Methodology for selecting the optimal objective function for reservoir model history. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2021, no. 1, pp. 30–38. In Rus.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Grachik A. Eremyan, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Shadfar Davoodi, research engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valeriy S. Rukavishnikov, PhD, director of Petroleum Learning Centre, National Research Tomsk Polytechnic University.

Artem V. Stepiko, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 665.6/7;627.556.013

ИССЛЕДОВАНИЕ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УЧАСТКАХ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ГЕОРЕСУРСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Саруханян Арестак Арамаисович¹,
asarukhanyan51@mail.ru

Балджян Паргев Оганесович¹,
baljyan-51@list.ru

¹ Национальный политехнический университет Армении,
Армения, 009, г. Ереван, ул. Теряна, 105.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью достижения бесперебойности и надежности работ систем, связанных с транспортировкой георесурсов. Важной составляющей инженерных сооружений этих систем являются мостовые переходы. На водотоках горной зоны эти переходы часто выполняются однопролетными. На участках перехода для установления опор моста ширина реки сужается, что приводит к развитию процесса размыва грунта дна. Отметка подошвы опоры и условий ее безаварийной работы главным образом зависит от точности определения максимальной величины размыва дна реки. Для водотоков горно-предгорной зоны эта задача недостаточно изучена. С этой точки зрения рассматриваемая задача имеет актуальное значение, и ее решение представляет важное научно-практическое значение.

Целью работы является моделирование процесса русловых преобразований на участке мостового перехода на реках горно-предгорной зоны и разработка метода расчета по определению деформации дна в переходном участке.

Объектами исследования являются исходные параметры потока и русловые характеристики водотоков горно-предгорной зоны, гидродинамические процессы, происходящие на участке мостового перехода, краевые условия задачи и форма поперечного сечения русла.

Методы. В результате анализа существующих работ оценено нынешнее состояние поставленной задачи и отмечены пути развития; проведено физическое и теоретическое моделирование процесса русловых преобразований на участке мостового перехода; определены краевые и граничные условия для различных конструктивных решений этих переходов; разработан способ гидравлического расчета русловых преобразований мостового перехода на водотоках горно-предгорной зоны; для оценки разработанного метода сопоставлены результаты численного примера с данными экспериментов.

Результаты. Представлена физическая модель завершающей устойчивой стадии русловых преобразований на участке мостового перехода. Выявлены гидрологические, гидравлические и русловые параметры, являющиеся исходными при решении задачи. С учетом уравнений энергии, неразрывности потока и баланса наносов составлена математическая модель движения неравномерного потока в условиях преобразованного дна переходного участка. При этом поставленная задача преследует цель установить такое положение дна мостового перехода, в условиях которого процесс размыва русла будет завершен и восстановлено стационарное состояние движения. В разработках установлены краевые и граничные условия задачи. Используются также зависимости поперечной формы русла и формула Шези. В результате совместных решений указанных выражений разработан расчетный метод установления положения стабилизированного дна на переходном участке реки и гидравлических параметров потока. Представлен численный пример расчета по определению координат стабилизированного дна и свободной поверхности в мостовом переходе. Дана оценка полученных результатов расчета. Сделано заключение о возможности использования предложенного метода для расчета параметров переходных участков горно-предгорных рек.

Ключевые слова:

Река, транспортировка георесурсов, мостовой переход, деформация дна, русло, мостовые опоры.

Введение

Безаварийная транспортировка георесурсов является одним из важных компонентов их комплексного эффективного использования, переработки и безопасного распределения. При этом определенный интерес представляет обеспечение бесперебойных и надежных условий работы инженерных коммуникационных систем и путей сообщения при транспортировке георесурсов. Эти коммуникационные системы и пути более часто пересекают горные реки и другие рельефные преграды, для чего устанавливают мостовые переходы или другие искусственные сооружения. Геологические условия, русловые и гранулометрические параметры водотоков горной зоны весьма разнообразны. Эти характеристики сильно меняются также вдоль реки. Кроме того, значительные колебания намечаются между сезонными расходами реки. В указанных условиях очень сложно установить общепри-

емлемые связи по определению параметров рек горно-предгорной зоны. Этим объясняется большое расхождение между расчетными и натурными данными этих потоков [1–3]. Гидродинамические явления, происходящие на участках речных сооружений, расположенных на небольших горных реках, мало изучены и интерпретированы. Указанные выше обстоятельства негативно влияют на точность разработанных расчетных методов речных сооружений. В качестве примеров следует указать: неправильное определение регулирующего объема в малых и средних водохранилищах [4], установление конечной поверхности накопленных перед селезащитной дамбой наносов [5, 6], прогнозирование деформаций естественного русла в мостовых переходах малых рек [7, 8] и т. д. Решения некоторых проблем, встречающихся в приведенных выше примерах либо отсутствуют, либо являются неполными. Успешное решение различных

задач по русловым процессам обусловлено правильной оценкой ряда факторов, имеющих определяющее влияние на данный процесс. Следует отметить исследование по определению расхода наносов или наносонесущей способности потока и скорости отрыва частиц грунта, составляющих дно русла. Важным фактором является также правильное определение граничных условий исследуемой задачи.

Ряд исследований был проведен для определения русловых изменений в мостовых переходах. Подобные гидродинамические задачи достаточно успешно изучены и решены для различных условий равнинных рек [9–11]. На основе этих разработок получены различные модели прогнозирования параметров размыва у мостовых опор и по длине мостового перехода [12–14]. Для речных потоков горно-предгорных районов такие исследования довольно неполные. Основные причины отсутствия таких исследований упомянуты выше. Статистика разрушения мостов, сооруженных на этих реках, показывает, что главной причиной аварий является размыв фундамента мостовых опор, обусловленный неправиль-

ным установлением глубины размыва подстилки подмостового русла. Наглядный пример разрушения мостовой опоры показан на рис. 1, где причиной разрушения мостовой опоры стал неправильно учтенный размыв грунта ее подошвы.

В ходе изменения гидродинамических параметров речного потока по всей длине мостового перехода происходит сложный процесс массообмена твердой фазы потока. С увеличением скоростей на переходном участке транспортирующая способность потока увеличивается. Начинаются смыв и унос грунта дна русла. Со временем глубина на этом участке увеличивается, скорости уменьшаются, и начатый процесс размыва затухает. По длине русла восстанавливаются баланс наносов и стационарность движения. В результате указанных преобразований в мостовом переходе устанавливаются новые устойчивые условия как для русла, так и для движения потока. С теоретической и особенно с практической точек зрения большой интерес представляет прогнозирование параметров, характеризующих конечный результат русловых преобразований.



Рис. 1. Разрушенная опора моста: а) вид с верхнего бьефа; б) вид с нижнего бьефа
Fig. 1. Destroyed support of the bridge: a) view from upstream; b) view from downstream

Постановка задачи

Конструктивные решения по укреплению мостовых опор, построенных на указанных водотоках, обычно реализуются или построением береговых защитных дамб, или без дамб. В данной работе сделана попытка разработать математическую модель для описания происходящих гидродинамических процессов на участке мостового перехода горных рек при прохождении паводкового потока. С этой целью предлагается метод расчета деформаций подмостового русла и соответствующие параметры потока.

Предположим, что мостовой проход с отверстием b_m и длиной опор моста ℓ расположен в реке с шириной B_0 и уклоном i_0 (рис. 1). В случае, когда паводковый поток с расходом Q входит в мостовой переход,

происходит изменение его гидродинамических параметров. Из-за резкого сужения ширины реки у мостовой опоры происходят волновые процессы, нарушается плавно-изменяющийся характер потока (рис. 2). Но вскоре в результате образования у опор мертвых зон восстанавливается режим плавно-изменяющегося движения. Одновременно в переходном участке русла начинается процесс размыва русла. Со временем глубина потока по длине переходного участка увеличивается, а скорости уменьшаются. Начатый нестационарный процесс русловых преобразований постепенно затухает, и по длине русла восстанавливается стационарность движения. Прогноз конечного положения дна русла на переходном участке имеет важное значение для определения отметок подошвы опор моста и переходных сооружений.

Следовательно, расчетная схема потока, показанная на рис. 2, может быть заменена адекватной схемой (рис. 3, а), в которой имеются переходные участки, обеспечивающие плавно-изменяющийся характер потока. При этом на входном сужающемся участке мостового перехода длиной L ширина русла уменьшается от значения B_0 до ширины b_m . На участке мостовой опоры ширина русла остается постоянной, равной b_m , а на выходном русле расширяется от b_m до B_0 .

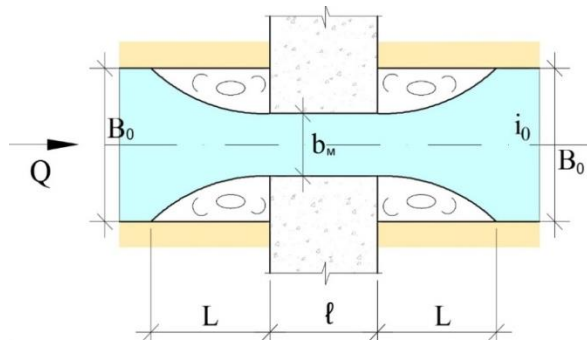


Рис. 2. Мостовой переход без боковых переходных дамб
 Fig. 2. Bridge crossing without side transition dams

Согласно плавно-изменяющемуся режиму движения угол расширения (сужения) боковых стенок переходных участков должен быть не больше $\alpha=8^\circ-10^\circ$ (рис. 3, а).

Анализ результатов

За начало координатной системы z , x примем начальную точку 0–0 мостового перехода (рис. 3, а, б). Мостовой переход разделен на три участка, в которых ширина русла определяется соответствующими закономерностями:

- в интервале

$$0 \leq x < L: b = B_0 - 2x \operatorname{tg} \alpha;$$

- в интервале

$$L \leq x \leq L + l: b = b_m; \quad (1)$$

- в интервале

$$L + l < x \leq 2L + l: b = b_m + 2x \operatorname{tg} \alpha.$$

Согласно рис. 3, а, длина переходных участков L до и после мостовых опор будет

$$L = \frac{B_0 - b_m}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (2)$$

где α – угол наклона боковых стенок переходных участков (рис. 3, а, б).

Вышеописанная физическая модель исследуемого процесса позволяет взамен нестационарной сложной системы при моделировании использовать наиболее простую систему уравнений. В исследуемой задаче рассматривается конечная стационарная стадия движения, при которой установлен также количественный баланс твердого расхода. В различных задачах по размыву русел больших рек протекающие процессы часто описываются трехмерным моделированием [15].

Однако для горных водотоков, где глубина и ширина небольшие, неравномерное движение потока можно с достаточной точностью считать одномерным [16]. При указанных условиях в пределах мостового перехода имеют место основные уравнения наносонесущего потока:

- уравнение неустановившегося одномерного движения потока:

$$\frac{dz}{dx} + \frac{dh}{dx} + \frac{d}{dx} \left(\frac{V^2}{2g} \right) = \frac{V^2}{C^2 R}; \quad (3)$$

- уравнение неразрывности потока:

$$Q = AV = \operatorname{const}; \quad (4)$$

- уравнение баланса для твердых расходов:

$$Q_s = \operatorname{const} \text{ или } S = \operatorname{const}. \quad (5)$$

Для ряда формул по определению твердых расходов [17, 18] при соблюдении условия баланса твердого расхода (5) получено

$$\frac{\chi}{\chi_0} = \left(\frac{A}{A_0} \right)^3, \quad (6)$$

где χ – смоченный периметр; A – площадь живого сечения; параметры с индексом «0» относятся к живым сечениям естественного участка реки.

Для интегрирования уравнения (3) с условиями (4) и (5), помимо граничных условий (1), необходимы дополнительные условия между параметрами h , V , R , C . В первую очередь следует задать форму поперечного живого сечения и гранулометрический состав естественного русла. В большинстве случаев форму поперечного сечения русла принимают прямоугольной. В этом случае будем иметь

$$A = bh, \quad (7)$$

$$\chi = b + 2h. \quad (8)$$

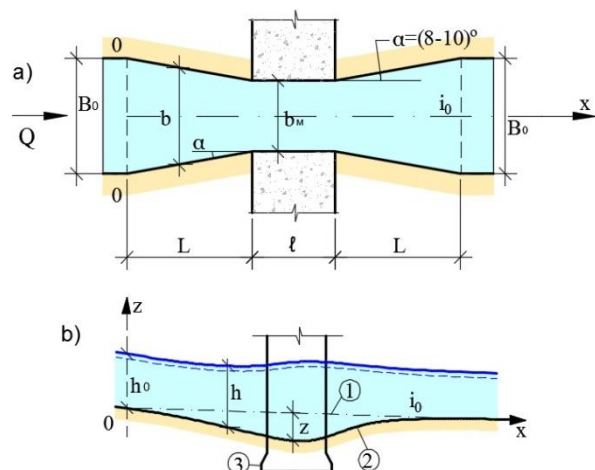


Рис. 3. План (а) и профиль (б) мостового перехода; 1 – естественное дно русла; 2 – стабилизированное дно русла; 3 – мостовые опоры

Fig. 3. Plan (a) and profile (b) of the bridge; 1 – natural bottom of the channel; 2 – stabilized bottom of the channel; 3 – bridge supports

Из формулы (6) с учетом уравнения неразрывности потока (4) и соотношений (7) и (8) получена зависимость [19]

$$h = \frac{\varphi_0}{b^{\frac{2}{3}}}, \quad (9)$$

где φ_0 – параметр, определяемый по формуле (13). В практических расчетах его можно принимать равным $h_0 B_0^{\frac{2}{3}}$ [19].

Отметим, что полученная зависимость (9) имеет удовлетворительно точное совпадение с известными формулами [7, 20] по определению глубины потока в мостовых переходах. С учетом уравнения (9), получаем

$$A = bh = \varphi_0 b^{\frac{1}{3}}, \quad (10)$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\varphi_0 b^{\frac{1}{3}}}, \quad (11)$$

$$R = \frac{A}{\chi} = \frac{b}{\beta + 2}. \quad (12)$$

В формулах (9)–(12) введены обозначения

$$\varphi_0 = \left(\frac{\beta + 2}{\beta_0 + 2} \cdot \frac{\beta_0}{\beta} \right)^{\frac{1}{3}} h_0 B_0^{\frac{2}{3}}, \quad (13)$$

где

$$\beta = \frac{b}{h}, \quad \beta_0 = \frac{B_0}{h_0}.$$

Согласно формуле (9), для соотношения $\beta = \frac{b}{h}$ получим зависимость

$$\beta = \frac{b^{\frac{5}{3}}}{\varphi_0}. \quad (14)$$

Доказано, что значение зависимости $\left(\frac{\beta + 2}{\beta_0 + 2} \cdot \frac{\beta_0}{\beta} \right)^{\frac{1}{3}}$ всегда близко к единице [19]. Следовательно, уравнение (13) можно переписать в виде

$$\varphi_0 = h_0 B_0^{\frac{2}{3}}. \quad (15)$$

Используя формулу Маннинга для коэффициента Шези C и с учетом полученных зависимостей (9), (11), (12), (14) для h , V , R , β из уравнения движения (3) получим

$$\frac{dz}{dx} - \frac{2}{3} b^{-\frac{5}{3}} \left(\varphi_0 + \frac{Q^2}{2g\varphi_0^2} \right) \frac{db}{dx} = \frac{Q^2 n^2 \left(\frac{b^{\frac{5}{3}}}{\varphi_0} + 2 \right)^{\frac{4}{3}}}{\varphi_0^2 b^2}. \quad (16)$$

Полученное уравнение для мостовых переходов, в зависимости от граничных условий, будет иметь три формы соответственно:

1. На суживающемся участке $0 \leq x \leq L$, согласно граничному условию (1), имеем $\frac{db}{dx} = -2 \operatorname{tg} \alpha$, вследствие чего уравнение деформации дна русла (16) примет вид

$$\frac{dz}{dx} + \frac{4}{3} b^{-\frac{5}{3}} \left(\varphi_0 + \frac{Q^2}{2g\varphi_0^2} \right) \operatorname{tg} \alpha = \frac{Q^2 n^2 \left(\frac{b^{\frac{5}{3}}}{\varphi_0} + 2 \right)^{\frac{4}{3}}}{\varphi_0^2 b^2}. \quad (17)$$

2. На участке постоянной ширины русла $L \leq x \leq L + \ell$ имеем $\frac{db}{dx} = 0$, и дифференциальное уравнение (16) примет вид

$$\frac{dz}{dx} = \frac{Q^2 n^2 \left(\frac{b^{\frac{5}{3}}}{\varphi_0} + 2 \right)^{\frac{4}{3}}}{\varphi_0^2 b^2}. \quad (18)$$

3. На расширяющемся участке $L + \ell < x \leq 2L + \ell$ имеем $\frac{db}{dx} = 2 \operatorname{tg} \alpha$, и уравнение (16) примет вид

$$\frac{dz}{dx} - \frac{4}{3} b^{-\frac{5}{3}} \left(\varphi_0 + \frac{Q^2}{2g\varphi_0^2} \right) \operatorname{tg} \alpha = \frac{Q^2 n^2 \left(\frac{b^{\frac{5}{3}}}{\varphi_0} + 2 \right)^{\frac{4}{3}}}{\varphi_0^2 b^2}. \quad (19)$$

Полученные расчетные уравнения позволяют для рек горной зоны прогнозировать деформации мостового перехода по его длине. Для проверки достоверности предложенного расчетного метода ниже приводится численный пример. Предположим, что на водостоке с шириной $B_0 = 12$ м и продольным уклоном $i_0 = 0,01$ установлен мостовой переход шириной $b_m = 6$ м. Значение паводкового расхода равно $Q = 50$ м³/с, коэффициент шероховатости русла – $n = 0,035$. В указанных условиях, согласно гидравлическим расчетам, нормальная глубина потока будет $h_0 = 1,35$ м. Принимая угол наклона переходных участков равным 10° , из выражения (2) получим

$$L = \frac{B_0 - b_m}{2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{12 - 6}{2 \operatorname{tg} 10^\circ} = 17 \text{ м.}$$

При значении $h_0 = 1,35$ м по формуле (15) имеем

$$\varphi_0 = h_0 B_0^{\frac{2}{3}} = 1,35 \cdot 12^{\frac{2}{3}} = 7,13.$$

На основе значений исходных параметров для каждого участка перехода приводится численное решение по соответствующим дифференциальным уравнениям. Наряду с координатой деформации русла рассчитаны также глубины потока. В частности, на входном участке ($0 \leq x \leq 17$) имеем $b = 12 - 2x \operatorname{tg} 10^\circ$. Значения координаты z рассчитаны по уравнению (17), а глубины h – по зависимости (9). Результаты приведены в табл. 1.

На участке мостовых опор ($17 \leq x \leq 27$), имеем $b=b_m=6$ м. Координаты рассчитаны по уравнению (18), а глубины – по зависимости (9). Результаты приведены в табл. 2.

На выходном участке ($27 \leq x \leq 44$) имеем $b=6+2x \operatorname{tg} 10^\circ$.

Расчетными уравнениями являются (19) и (9). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 1. Расчетные значения деформации, ширины и глубины потока на входном участке мостового перехода

Table 1. Calculated values of deformation, width and depth of flow at the inlet section of the bridge passage

X (м)	0	2	4	6	8	10	13	16	17
b (м)	12	11,29	10,59	9,88	9,17	8,47	7,41	6,35	6,00
Z (м)	0	-0,055	-0,119	-0,19	-0,27	-0,37	-0,56	-0,79	-0,89
h (м)	1,35	1,41	1,48	1,55	1,62	1,71	1,88	2,08	2,16

Таблица 2. Расчетные значения деформации, ширины и глубины потока на участке мостовых опор

Table 2. Calculated values of deformation, width and depth of the stream at the site of bridge supports

X (м)	17	19	21	23	25	27
b (м)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Z (м)	-0,89	-0,86	-0,83	-0,81	-0,78	-0,75
h (м)	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16

Таблица 3. Расчетные значения деформации, ширины и глубины потока на выходном участке мостового перехода

Table 3. Calculated values of deformation, width and depth of flow at the exit section of the bridge passage

X (м)	27	29	31	33	35	37	40	42	44
b (м)	6,00	6,71	7,41	8,12	8,82	9,53	10,58	11,29	12,00
Z (м)	-0,75	-0,52	-0,32	-0,15	0,005	0,14	0,32	0,47	0,52
h (м)	2,16	2,00	1,92	1,76	1,67	1,58	1,48	1,42	1,35

На основе данных табл. 1–3 по длине мостового перехода построены кривые размытого дна русла и свободной поверхности потока (рис. 4).

Анализ данных, приведенных в табл. 1–3, показывает, что максимальная величина размыва дна фикси-

руется у входа опор моста (0,89 м), а глубина потока принимает максимальное значение по длине мостовых опор (2,16 м). Эти результаты по форме изменения соответствуют лабораторно-экспериментальным данным [21].

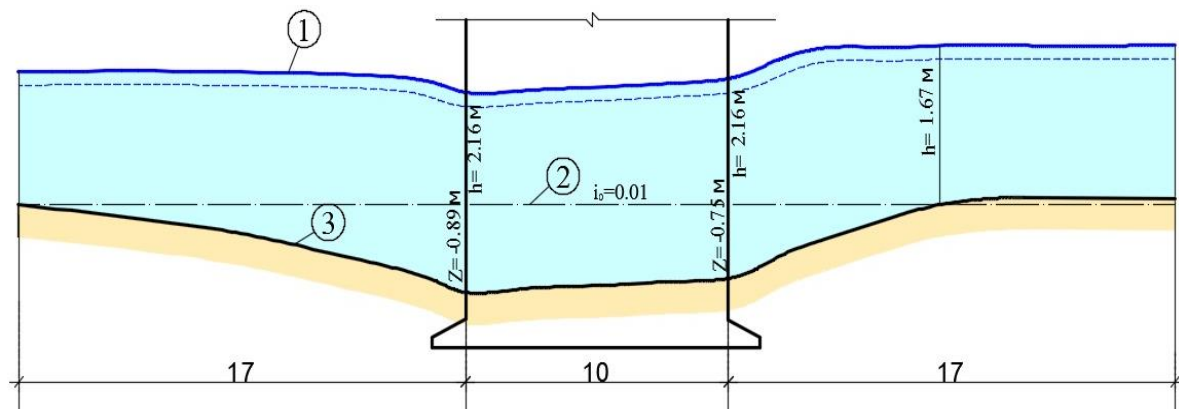


Рис. 4. Расчетные кривые в мостовом переходе: 1 – уровень свободной поверхности потока; 2 – естественный уровень дна реки; 3 – стабилизированная поверхность дна

Fig. 4. Theoretical curves in the bridge crossing section: 1 – level of the stream free surface; 2 – natural level of the riverbed; 3 – stabilized bottom surface

Заключение

В разработанном методе учтены все основные факторы, обуславливающие процесс русловых преобразований в мостовых переходах рек горной зоны. Предлагаемый метод прогнозирования вертикальных русловых деформаций позволяет определить форму и координаты стабилизированного дна реки и выбрать отметку подошвы фундамента сооружений. Анализ

расчетных данных, полученных предложенным методом по формам деформированного дна мостового перехода и кривой свободной поверхности, показывает хорошее совпадение с аналогичными результатами, полученными лабораторными экспериментами. Данный метод может быть использован также в тех задачах, где изменения геометрических параметров водотока приводят к руслодеформируемым процессам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rysin I., Petukhova L. Monitoring of channel processes on the interfluvium between the Kama and the Vyatka rivers // Sediment

Transfer through the Fluvial System. Proc. of the International Symposium. – Moscow: IAHS Publ., 2004. – V. 288. – P. 261–268.

2. Dey S. Fluvial hydrodynamics: hydrodynamic and sediment transport phenomena. –Berlin, Germany: Springer, 2014. – 667 p.
3. Балджян В.П. К методу расчета гидроморфометрических параметров русел рек // Сб. научных трудов Института водного хозяйства Грузинского технического университета. – 2018. – № 73. – С. 9–16.
4. Tackling reservoir siltation by controlled sediment flushing: impact on downstream fauna and related management issues / P. Espa, R.J. Batalla, M.L. Brignoli et al. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218822> (дата обращения 15.03.2021).
5. Защита народнохозяйственных объектов от воздействия селевых потоков: Материалы Международной конференции по селям. – Пятигорск, 2004. – Вып. 2. – 175 с.
6. Балджян П.О., Балджян В.П. Руслоформирующие явления у селезащитных сооружений. Методы расчета их параметров. – Молдова: LAP Lambert Academic Publishing, 2018. – 57 с.
7. Monitoring of river channel morphodynamical changes in the zone of bridge piers / N. Kuspilić, D. Bekić, G. Gilja, E. McKeogh // Materials I International Conference on Road and Rail Infrastructure. – Opatija, Croatia, 2010.
8. Tokmajyan V.H., Baljyan V.P., Babayan G.R. Possible gradelines of channel transformations // Modern Problems of Water Management, Architecture and Construction: Collected Papers IX Intern. Scientific and Technical Confer. – Tbilisi, 22–27 July, 2019. – P. 28–32.
9. Van Rijn L.C. Sediment transport by currents and waves: the handbook. –Netherlands: Delft Hydraulics Laboratory, 1989. – 343 p.
10. Dey S. Experimental study on incipient motion of sediment particles on generalized sloping fluvial beds // International Journal of Sediment Research. – 2001. – V. 16. – P. 391–398.
11. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и русловых процессов. – СПб.: Изд-во «Нестор-История», 2011. – 504 с.
12. Sumer B.M. Mathematical modelling of scour: a review // Journal of Hydraulic Research. 2007. – V. 45. – P. 723–735.
13. Melville B.W. The physics of local scour at bridge piers // 4th International Conference on Scour and Erosion. – Tokyo, Japan, November 5–7, 2008. – P. 28–40.
14. Equilibrium scour depths around piles in noncohesive sediments under currents and waves / U.C. Zanke, T.W. Hsu, A. Roland, O. Link, R. Diab // Coastal Engineering. – 2011. – V. 58. – P. 986–991.
15. 3D numerical simulation of scouring around bridge piers (case study: bridge 524 crosses the Tanana river) / T. Esmaeili, A.A. Dehghani, A.R. Zahiri, K. Suzuki // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2009. – V. 58. – P. 1028–1032.
16. Tokmajyan H.V., Baljyan P.H., Sarukhanyan A.A. Boundaries of applicability of liquids flow regularities for mud flows // Floods and modern methods of control measures: International Symposium. – Tbilisi, 2009. – P. 492–494.
17. Поздняков Ш.П., Шмакова М.В. Сравнительный анализ формул расхода влекомых наносов на примере реки Ала-арча // Экосистемы малых рек: экология, охрана: Матер. 2-й Всероссийской школы-конференции. – Борок, 2014. – Т. 2. – С. 320–323.
18. Мамедов Дж.Г. Методика расчета наибольших расходов взвешенных наносов грязевых селей // Известия РАН. Серия Географическая. – 2019. – № 3. – С. 98–104.
19. Baljyan P.H., Madatyan G.G., Kelejian H.G. Calculation of parameters of the channel erosion in transition sites of the mountain river zone // Bulletin of High Technology. – 2017. – V. 2 (4). – P. 3–9.
20. Андреев О.В. Проектирование мостовых переходов. – М.: Транспорт, 1980. – 215 с.
21. Бададжян Г.С., Балджян П.О. К экспериментальному исследованию русловых деформаций мостовых переходов через горные реки // Тезисы докладов IV в/т конференции по водному хозяйству. – Ереван, 1982. – С. 26–28.

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

Саруханян А.А., доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики Национального университета архитектуры и строительства Армении.

Балджян П.О., доктор технических наук, профессор кафедры транспортных средств Национального политехнического университета Армении.

UDC 665.6/7;627.556.013

STUDY OF CHANNEL DEFORMATION AT BRIDGE CROSSING SECTIONS OF GEORESOURCES TRANSPORTATION SYSTEMS

Arestak A. Sarukhanyan¹,
assarukhanyan@mail.ru

Pargev O. Baldjyan¹,
baljyan-51@list.ru

¹ National Polytechnic University of Armenia,
105, Teryan street, Yerevan, 009, Armenia.

The relevance of the study is conditioned by the necessity of achieving an uninterrupted and reliable operation of systems associated with the transportation of georesources. An important component of the engineering structures of these systems are bridge crossings. On the streams of the mountain zone, these crossings are often performed single-span. In the transition sections for establishing the bridge supports, the width of the river narrows, which leads to erosion of the bottom soil. The mark of the sole of the support and the very conditions of its long-term operation, depends on the accuracy of determining the maximum amount of erosion of the bottom of the river. From this point of view the problem under consideration is topical and will follow a solution that is of important practical value.

The main aim of the work is modelling of channel transformations processes running at bridge crossing sections in mountain foothill zones and developing a calculation method for determining riverbeds deformations.

The objects of the present study are initial parameters of the stream and channel characteristics of waterways in mountain foothill zones, hydrodynamic processes occurring at the bridge crossing section in rivers of a mountain foothill zone; channel deformations of the bottom; boundary conditions of the problem and the shape of the cross section of the channel.

Methods. As a result of a relatively complete analysis of existing works the current state of the set problem has been assessed and the ways of development were marked; physical and theoretical modeling of the channel transformation at the bridge crossing area was performed; boundary conditions for various structural solutions of bridge crossings were determined; a method for hydraulic calculation of channel transformations at bridge crossings was developed for streams of mountain-foothills; numerical example was calculated according to the developed methods and the obtained results were analysed.

Results. The paper introduces the physical model of the final stable stage of channel transformations at the bridge crossing section. The hydrological, hydraulic and channel parameters that are initial in solving the problem are identified. A mathematical model of nonuniform flow motion in the conditions of the transformed river bottom of the transition section was compiled taking into consideration equations of energy, continuity of flow and sediment balance. At the same time, the problem in view is aimed at establishing such a position of the bridge crossing bottom when the channel erosion will come to the end and the steady-state flow – restored. In elaborations boundary and boundary conditions of the problem were established. Dependences of the transverse form of the channel and the Shezy formula were also used. As a result of joint solutions of the above expressions a calculation method was developed to establish the position of the stabilized bottom on the transitional section of the river and hydraulic parameters of the flow. A numerical example of calculation made for determining the coordinates of the stabilized bottom and free surface in a bridge crossing is presented. The estimation of calculation results is given. The authors have made a conclusion on possibility of using the proposed method in calculations of parameters of transitional sections of mountain-foothill rivers.

Key words:

River, transportation of georesources, bridge crossing, bottom deformation, channel, bridge supports.

REFERENCES

1. Rysin I., Petukhova L. Monitoring of channel processes on the interfluvium between the Kama and the Vyatka rivers. *Sediment transfer through the fluvial system. Proc. of the International Symposium*. Moscow, IAHS Publ., 2004. Vol. 288, pp. 261–268.
2. Dey S. *Fluvial hydrodynamics: hydrodynamic and sediment transport phenomena*. Berlin, Germany, Springer, 2014. 667 p.
3. Baljyan V.P. To the method of calculating hydromorphometric parameters of riverbeds. *Collection of scientific works Institute of Water Management of the Georgian Technical University*, 2018, no. 73, pp. 9–16. In Rus.
4. Espia P., Batalla R.J., Brignoli M.L. *Tackling reservoir siltation by controlled sediment flushing: impact on downstream fauna and related management issues*. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218822> (accessed 15 March 2021).
5. *Zashchita narodokhozyaystvennykh ob'ektov ot vozdeystviya solevykh potokov. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii po selyam* [Protection of national economic objects from the effects of mudflows Materials of the International Conference on Mudflows]. Pyatigorsk, 2004. Iss. 2, 175 p.
6. Baljyan P.H., Baljyan V.P. *Rusloformiruyushchie yavleniya u selezashchitnykh sooruzheniy. Metody rascheta ikh parametrov* [Channel-forming phenomena in mudflow protection facilities. Methods for calculating their parameters]. Moldova, LAP Lambert Academic Publ., 2018. 57 p.
7. Kuspilic N., Bekic D., Gilja G., McKeogh E. Monitoring of river channel morphodynamical changes in the zone of bridge piers. *Materials I Intern. Confer. on Road and Rail infrastructure*. Opatija, Croatia, 2010.
8. Tokmajyan V.H., Baljyan V.P., Babayan G.R. Possible gradelines of channel transformations. *Collected Papers IX Intern. Scientific and Technical Confer. Modern Problems of Water Management, Architecture and Construction*. Tbilisi, 22–27 July, 2019. pp. 28–32.
9. Van Rijn L.C. *Sediment transport by currents and waves. The handbook*. Netherlands, Delft Hydraulics Laboratory, 1989. 343 p.
10. Dey S. Experimental study on incipient motion of sediment particles on generalized sloping fluvial beds. *International Journal of Sediment Research*, 2001, vol. 16, pp. 391–398.
11. Klaven A.B., Kopaliani Z.D. *Ekspерименталnye issledovaniya i gidravlicheskie modelirovaniye rechnykh potokov i ruslovykh protsessov* [Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel processes]. St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2011. 504 p.
12. Sumer B.M. Mathematical modelling of scour: a review. *Journal of Hydraulic Research*, 2007, vol. 45, pp. 723–735.

13. Melville B.W. The physics of local scour at bridge piers. 4th *International Conference on Scour and Erosion*. Tokyo, Japan, November 5–7, 2008. pp. 28–40.
14. Zanke U.C., Hsu T.W., Roland A., Link O., Diab R. Equilibrium scour depths around piles in no cohesive sediments under currents and waves. *Coastal Engineering*, 2011, vol. 58, pp. 986–991.
15. Esmaili T., Dehghani A.A., Zahiri A.R., Suzuki K. 3D numerical simulation of scouring around bridge piers (case study: bridge 524 crosses the Tanana river). *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, vol. 58, pp. 1028–1032.
16. Tokmajyan H.V., Baljyan P.H., Sarukhanyan A.A. Boundaries of applicability of liquids flow regularities for mud flows. *International Symposium. Floods and modern methods of control measures*. Tbilisi, 2009. pp. 492–494.
17. Pozdnyakov Sh.R., Shmakova M.V. Sravnitelny analiz formul raskhoda vlekomykh nanosov na primere reki Ala-archa [Comparative analysis of the formulas of the tractional load by the example of the Ala-Archa River]. *Ekosistemy malykh rek: ekologiya, okhrana. Materialy 2 Vserossiyskoy shkoly-konferentsii* [Mater. 2nd All-Russian School-Conference «Small River Ecosystems: Ecology, Protection». Borok, 2014. Vol. II, pp. 320–323.
18. Mamedov J.G. Metodika rassheta naibolshevikh raskhodov vneshnikh nanosov gryazevykh seley [Technique of calculation of the highest consumption of mud torrent suspended sediments]. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2019, no. 3, pp. 98–104.
19. Baljyan P.H., Madatyan G.G., Kelejian H.G. Calculation of parameters of the channel erosion in transition sites of the mountain river zone. *Bulletin of High Technology*, 2017, vol. 2 (4), pp. 3–9.
20. Andreev O.V. *Proektirovanie mostovykh perekhodov* [Design of bridge crossings]. Mosocw, Transport Publ., 1980. 215 p.
21. Badajyan G.S., Baljyan P.H. K eksperimentalnomu issledovaniyu ruslovykh deformatsiy mostovykh perekhodov cherez gornye reki [To experimental study on channel deformations of bridge crossings over mountain rivers]. *Tezisy dokladov IV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po vodnomu khozhyaystvu* [Abstracts of IV Scientific Conference on Water management]. Erevan, 1982. pp. 26–28.

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Arestak A. Sarukhanyan, Dr. Sc., professor, National University of Architecture and Construction of Armenia.

Pargev O. Baldjyan, Dr. Sc., professor, National Polytechnic University of Armenia.

УДК 551.578.46: 550.42

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СНЕЖНОГО ПОКРОВА Г. ТОБОЛЬСК

Московченко Дмитрий Валерьевич¹,
moskovchenko1965@gmail.com

Пожитков Роман Юрьевич¹,
pozhitkov-roma@yandex.ru

Соромотин Андрей Владимирович²,
asoromotin@mail.ru

¹ Тюменский научный центр СО РАН, структурное подразделение Институт проблем освоения Севера, Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

² Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

Актуальность исследования обусловлена усилением техногенного загрязнения урбанизированных территорий с развитой промышленностью.

Цель: оценка уровня аэротехногенного загрязнения в г. Тобольск по данным изучения микроэлементного состава твердой фазы снежного покрова.

Объекты: фоновые ландшафты и техногенные урбозокосистемы, включающие различные функциональные зоны города.

Методы: эколого-геохимическое опробование снежного покрова, определение физико-химических характеристик снега (рН, электропроводность, минерализация), количества пылеаэрозолей в снеготальных водах, анализ элементного состава твердофазной составляющей с использованием методов спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и атомно-эмиссионной спектрометрии. Вычисление показателей, характеризующих экологическую ситуацию (коэффициентов концентрации Кс, суммарного загрязнения Zс, суммарной имиссии элементов Zd).

Результаты. В Тобольске выявлено типичное для урбозокосистем подщелачивание снеготальных вод, рост их минерализации и электропроводности. Пылевая нагрузка в городе возрастает относительно фона в 4,7 раза, среднее значение составляет 15,2 мг/м² в сутки. Интенсивность выпадения пылеаэрозолей ниже, чем в крупных городах с развитой промышленностью. Главной причиной запыления снежного покрова, роста минерализации, электропроводности и рН снеготальных вод является движение транспорта. На прилегающей к городу фоновой территории твердофазные выпадения обогащены халькофильными элементами, которые в составе субмикронных частиц переносятся из отдаленных промышленных регионов. В городе ассоциация элементов-загрязнителей, включающая Ti, Mn, Co, Ni, W, свидетельствует о влиянии эрозионно-почвенной составляющей (Ti, Mn), автотранспорта за счет сжигания моторных топлив (Ni), истирания металлических частей (W, Co). Городская промзона, включающая Тобольский нефтехимический комбинат и ТЭЦ, не является существенным источником поступления пылеаэрозолей, поскольку не превосходит другие функциональные зоны города по интенсивности пылевых выпадений и содержанию элементов-загрязнителей. Подсчет показателей суммарного загрязнения Zс и имиссии элементов Zd показал, что Тобольск характеризуется низким уровнем загрязнения, за исключением участков с интенсивным движением автотранспорта.

Ключевые слова:

Снежный покров, пылевой аэрозоль, Тобольск, тяжелые металлы, суммарное загрязнение.

Введение

По данным Федеральной службы государственной статистики, в настоящее время в городах проживает 75 % населения России [1]. Поэтому оценка экологического состояния урбанизированных территорий является важнейшим условием для формирования комфортной и безопасной среды проживания людей. Однако научные исследования в этом направлении проводятся преимущественно в крупных городах, а многие малые и средние остаются зачастую слабо исследованными. Так, в Тюменской области изучение экологического состояния городской среды проводилось главным образом в Тюмени, в то время как второй по численности населения город – Тобольск, почти не был изучен. Вместе с тем по материалам, представленным в [2], по количеству выбросов в атмосферу от стационарных источников Тобольск мало уступает Тюмени.

Для изучения атмосферных выпадений очень часто используют снежный покров [3–5]. Доказано [6], что отбор проб снежного покрова является эффективным методом мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в северных регионах. В Сибири продолжительность залегания снега составляет 5–9 месяцев, что позволяет объективно проанализировать особенности поступления загрязнителей. В 2020 г. нами было проведено изучение геохимических свойств снежного покрова Тобольска и прилегающей условно-фоновой территории. Поскольку формирование техногенных потоков и ореолов рассеяния во многом связано с характером распределения твердых взвешенных частиц [7], основное внимание было уделено твердофазной составляющей.

Тобольск расположен в юго-западной части Западно-Сибирской равнины, в подзоне южной тайги [8]. Климат континентальный, с продолжительной

холодной зимой. Устойчивый снежный покров залегает в среднем 5,5 месяцев, с 30 октября по 14 апреля [9]. Преобладают ветра южного и западного направлений. Из годового количества осадков на холодный период приходится около 20 %, это определяет относительную сухость зимнего сезона.

Численность населения Тобольска на 2020 г. составляет 102,0 тыс. человек [10]. Крупнейшим промышленным предприятием является ООО «СИБУР Тобольск» (ранее Тобольский нефтехимический комбинат). Основными направлением деятельности предприятия является переработка легких углеводородов, поставляемых по продуктопроводу газоперерабатывающими заводами севера Тюменской области. В Тобольске также функционируют предприятия энергетики (Тобольская ТЭЦ), машиностроения (ЗАО «Судоверфь»), развито производство стройматериалов (ООО «Железобетон», ООО ЗЖБИ № 4). Крупнейшая промышленная зона города, образованная нефтехимическим комбинатом и ТЭЦ, расположена на расстоянии 8 км в восточном направлении от зоны жилой застройки. Тобольск – важнейший транспорт-

ный узел, через который идут потоки автомобильного и железнодорожного транспорта в северные нефтегазодобывающие районы. Протяженность маршрутной сети города по состоянию на 2020 г. составляет 421 км. Среди функциональных зон города преобладают участки, относящиеся к зонам транспортной инфраструктуры, производственной и коммунально-складской [10].

Целью работы была оценка уровня аэротехногенного загрязнения в г. Тобольск по данным изучения микроэлементного состава твердой фазы снежного покрова. В исследовании были поставлены следующие задачи: определить интенсивность выпадения пылеаэрозолей, установить ассоциацию химических элементов-загрязнителей в твердофазных выпадениях, оценить количество поступления поллютантов, дать оценку экологической ситуации.

Актуальность данной тематики подтверждается большим числом работ зарубежных исследователей, в которых элементный состав снежного покрова является основным объектом исследования при оценке аэротехногенного загрязнения [11–13].

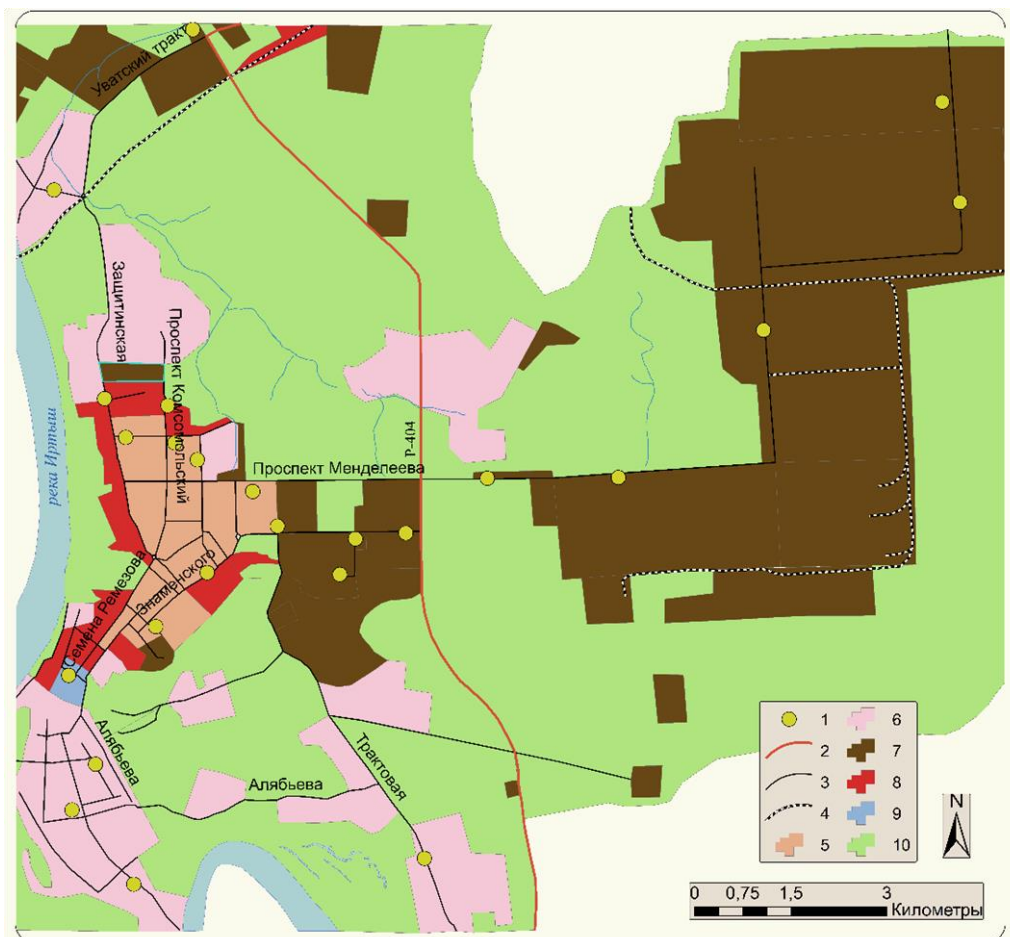


Рис. 1. Схема опробования: 1 – пункты опробования; 2 – федеральная автотрасса Р-404; 3 – железная дорога Тюмень–Сургут; 4 – дороги общегородского пользования; 5 – зона многоэтажной застройки; 6 – зона малоэтажной застройки; 7 – зоны производственного и коммунально-складского назначения; 8 – общественно-деловая зона; 9 – зона историко-культурного центра города; 10 – рекреационная зона

Fig. 1. Study area: 1 – sampling points; 2 – Federal highway R-404; 3 – Tyumen–Surgut railway; 4 – city roads; 5 – zone of high-rise buildings; 6 – zone of low-rise buildings; 7 – zones for industrial and communal storage purposes; 8 – public and business area; 9 – historical and cultural center of the city; 10 – recreational zone

Материалы и методы

Опробование снежного покрова было проведено 9–10 марта 2020 г. По данным метеонаблюдений, формирование устойчивого снежного покрова в зимний период 2019–2020 гг. началось 8 ноября, количество осадков, выпавшее до начала опробования, составило 101 мм [14], что близко к среднемноголетним величинам [9]. В зимний период 2019–2020 гг. наблюдалось отчетливое доминирование ветров южного, юго-западного и юго-восточного румбов.

Исследования проводились по общепринятой методике [15, 16]. Смешанные пробы отбирали весовым снегомером на территории города и на фоновых участках, удаленных от города на расстояние от 9 до 20 км в северном, южном и юго-восточном направлениях. Условно-фоновые пробы были отобраны в разных ландшафтных условиях – на безлесных участках, в таежном лесу и на сельхозугодьях. Схема опробования в городе приведена на рис. 1.

При отборе проб определяли глубину снежного покрова, плотность снега и влагозапас. Пробы помещали в пластиковые контейнеры с крышкой и доставляли в химико-экологическую лабораторию Института экологии и рационального природопользования ТюмГУ. В общей сложности на территории города были отобраны 24 пробы, на фоновых участках – 7 проб. Таяние снега происходило при комнатной температуре. В талых пробах измеряли величину pH с использованием ионметров HI83141 и HydroMaster HM-500. Минерализацию и электропроводность определяли с помощью кондуктометра СОМ-100. Затем пробы были профильтрованы через беззольные нитроцеллюлозные фильтры (Millipore) с размером пор 0,45 мкм. Массу пыли на фильтре после высушивания определяли путем взвешивания на лабораторных аналитических весах с дискретностью 0,1 мг.

Элементный состав твердофазных выпадений определен в аналитическом центре ИПТМ РАН (г. Черногловка). Содержание макро- и микроэлементов, включая тяжелые металлы (ТМ) и металлоиды определяли с использованием методов атомно-эмиссионной спектроскопии (ICP-AES) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS).

Статистическая обработка результатов была проведена в программе Excel. Поскольку распределение значений минерализации, электропроводности и содержания большинства химических элементов не соответствовало нормальному закону, в качестве средних величин было подсчитано среднее геометрическое значение. Для оценки геохимических свойств пылевых выпадений были подсчитаны кларки концентрации (KK) и рассеяния (KP). При подсчетах были применены значения кларков элементов в верхней части континентальной земной коры, использованные при анализе геохимических свойств снежного покрова восточной Москвы [17] и объединяющие величины, полученные различными исследователями в последние десятилетия. Для тех элементов, значения кларков которых в указанной работе отсутствовали, были использованы кларки по Григорьеву [18]. Для

определения техногенной составляющей в формировании состава пылеаэрозолей проведено вычисление коэффициента обогащения KO :

$$KO = \frac{(C_i / C_{Al})_{\text{проба}}}{(C_i / C_{Al})_{\text{земная кора}}},$$

где C_i и C_{Al} – содержание интересующего элемента и алюминия в пробе или в земной коре.

Пылевую нагрузку Pn определяли по формуле:

$$Pn = \frac{m}{ST},$$

где m – масса пыли на фильтре; S – суммарная площадь отбора проб; T – временной интервал в сутках между моментом опробования и датой установления устойчивого снежного покрова. Зимой 2019/20 г. продолжительность залегания снега до опробования составила 123 суток.

Экологическая оценка проводилась путем вычисления следующих показателей:

- коэффициентов концентрации элементов

$$Kc = \frac{C}{C_{\phi}},$$

где C – концентрация элемента во взвеси в городе; C_{ϕ} – концентрация на условно-фоновой территории;

- коэффициентов превышения выпадений над фоном

$$Kd = \frac{D}{D_{\phi}},$$

где D – масса элемента, поступающего на поверхность снежного покрова в городе; D_{ϕ} – на условно фоновой территории;

- суммарного показателя загрязнения

$$Zc = \sum Kc - (n - 1);$$

- показателя суммарной имиссии элементов

$$Zd = \sum Kd - (n - 1),$$

где n – число химических элементов с Kc или $Kd > 1,5$.

Поскольку значения показателей Kc и Kd могут изменяться в зависимости от выбора исследуемых элементов и их количества, для сопоставления мы использовали те же элементы, которые применялись для экологической оценки выпадения пылеаэрозолей в Москве [17]. К ним относятся Cd, Pb, Ni, Co, Cr, Be (1-й класс опасности), Ag, As, Bi, Cu, Mn, Sb, Sn, Sr, Zn (2-й класс опасности), Mo, V (3-й) и W, Fe, Ti (4-й). Уровень загрязнения и экологической опасности загрязнения снежного покрова металлами и пылью оценивался в соответствии со шкалой распределения значений Zc и Zd , приведенной в [19]. Для выделения геохимических ассоциаций химических элементов-загрязнителей был проведен кластерный анализ.

Результаты и обсуждение

Средняя высота снежного покрова составила в городе 50 см, на фоновых участках – 49 см. Плотность снега была одинакова – 0,22 г/см³. Таким образом, показатели снегонакопления были сходными как на

урбанизированной территории, так и в загородной зоне. Снеготалые воды на фоновых участках имели слабокислую реакцию. Среднее значение рН (5,1 ед.) было несколько ниже, чем рН снеготалых вод на территории ХМАО-Югры (5,3 ед.) [20]. В городе при преобладании слабокислой реакции снеготалых вод встречаются пробы с нейтральной реакцией. Среднее значение рН 6,0 ед., увеличение по сравнению с фоновым составило 0,9 ед. Ранее подщелачивание снеготалых вод было отмечено вблизи населенных пунктов и автодорог на территории ХМАО-Югры [20] и в Тюмени [21]. Причиной роста рН считается выпадение карбонатных пылевых частиц [2]. Уровень подщелачивания в Тобольске можно оценить как умеренный. Так, в восточном административном округе Москвы подщелачивание снежного покрова относительно фоновых территорий составило в среднем 0,4 [17]. В Нижневартовске был выявлен более существенный рост рН – от 5,5 ед. на фоновом участке до 7,1 ед. на территории города [22].

На фоновой территории минерализация снеготалых вод в среднем составляет 11 мг/л. Полученная величина, судя по литературным источникам [21, 23], типична для фоновых условий в Западной Сибири. Считается, что минерализацию атмосферных осадков $M \leq 15$ мг/л можно принять за региональный фон [24]. В городе среднее значение минерализации составило 25 мг/л, максимальное значение достигает 563 мг/л и вызвано использованием противогололедных реагентов на дорогах. По сравнению с фоном минерализация в среднем увеличилась в 2,3 раза, рост минерализации можно оценить как умеренный. Для сравнения, в Восточном административном округе Москвы минерализация снеготалой воды в 4 раза выше фонового значения и увеличивается вдоль автомагистралей и в жилой зоне высокой этажности в 6–9 раз [17].

Электропроводность снеготалых вод в городе по сравнению с фоном увеличивается в среднем в 2 раза – от 17 до 32 мкСм/см. Экологической нормой предложено считать значение проводимости осадков 60 мкСм/см [24]. В Тобольске в четырех пробах (17 %) это значение превышено.

Количество пылевых выпадений в снежном покрове является важным индикатором экологического состояния атмосферного воздуха [25–27]. Известно, что в снеге полярных районов, не подверженных влиянию местных источников воздействия, содержание пылевых частиц составляет 0,2–3 мг/л [28]. В районе Тобольска содержание пыли в снеге на фоновых участках было выше и в среднем составило 5,7 мг/л, что свидетельствует о наличии полей рассеяния от разнообразных источников, как местных, так и связанных с межрегиональным переносом. Наличие на юге Тюменской области западного переноса поллютантов от крупных промышленных предприятий Урала, расположенных на расстоянии 250–350 км, отмечалось в [29].

Фоновые показатели пылевой нагрузки в районе Тобольска варьировали от 1,4 до 11,6 мг/м² в сутки (среднегеометрическое значение 3,2 мг/м²). Для сопоставления, в Томской области фоновая величина су-

точных пылевых выпадений составляет 7 мг/м² в сутки [30]. На территории Омской и Новосибирской областей количество пылевых выпадений ниже – около 3 мг/м² в сутки [31, 32]. Таким образом, в районе Тобольска фоновая величина пылевой нагрузки находится на уровне средних значения для юга Западной Сибири.

В городе содержание пылевых частиц увеличивается до 17,3 мг/л, пылевая нагрузка – до 15,2 мг/м² в сутки (среднее геометрическое значение). Полученные величины свидетельствуют об умеренной интенсивности пылевых выпадений. В условиях интенсивного техногенеза, связанного с выбросом большого количества пылеаэрозолей (например, в районах металлургических производств), значения P_n на 1–2 порядка выше. Так, в Норильском промышленном районе пылевая нагрузка местами превышает 1000 мг/м² в сутки [33]. В городах, где уровень воздействия промышленности не так высок, пылевая нагрузка близка к полученным на территории Тобольска значениям. Так, средняя величина суточных выпадений твердых частиц из атмосферы за зимний период в восточном административном округе Москвы 27 мг/м² [17]. В Томске среднесуточное значение пылевой нагрузки в 2011 и 2013 гг. составило соответственно 25 и 28 мг/м² [27]. В Тобольске по сравнению с фоном величина пылевой нагрузки возрастает в 4,7 раза, что сходно с показателями, выявленными в промышленных центрах Сибири. Так, в Томск-Северской промышленной агломерации в 2006–2013 гг. пылевая нагрузка в 3,6–5,4 раза превышала фоновый уровень [34].

Величина пылевой нагрузки на территории города значительно варьирует в зависимости от форм и интенсивности воздействия. Наблюдается разброс значений на два математических порядка – от фоновых величин до показателей, соответствующих высокому, опасному уровню загрязнения в соответствии со шкалой нормирования, приведенной в [17, 19]. Максимальное значение в Тобольске (406 мг/м² в сутки) было выявлено вблизи транспортной развязки на пересечении федеральной автотрассы, соединяющей юг Тюменской области с северными округами, и проспекта, связывающего промышленную зону Тобольска с кварталами жилой застройки. Существенное варьирование пылевой нагрузки типично для урбанизированных территорий. Так, в Томске количество пылевых выпадений меняется от 16 до 303 мг/м² в сутки [35].

Распределение физико-химических показателей по функциональным зонам города, представленное на рис. 2, показывает, что главной причиной запыления снежного покрова, роста минерализации, электропроводности и рН снеготалых вод является движение транспорта. Именно вблизи автотрасс отмечены максимальные значения этих показателей. На участках многоэтажной застройки также наблюдается рост минерализации и электропроводности снеготалых вод, однако он выражен значительно слабее. Промышленная зона отличается низкими показателями пылевой нагрузки и содержания водорастворимых солей. Чаше

всего отмечается существенное негативное воздействие крупных промышленных объектов на химический состав снеготалых вод [36]. Но в более ранних экологических исследованиях промзоны Тобольска были выявлены только единичные случаи превыше-

ния содержания взвешенных частиц в снеготалых водах по сравнению с фоновым уровнем и не отмечено прямой связи между размещением загрязненных участков и преобладающими направлениями распространения выбросов от техногенных источников [37].

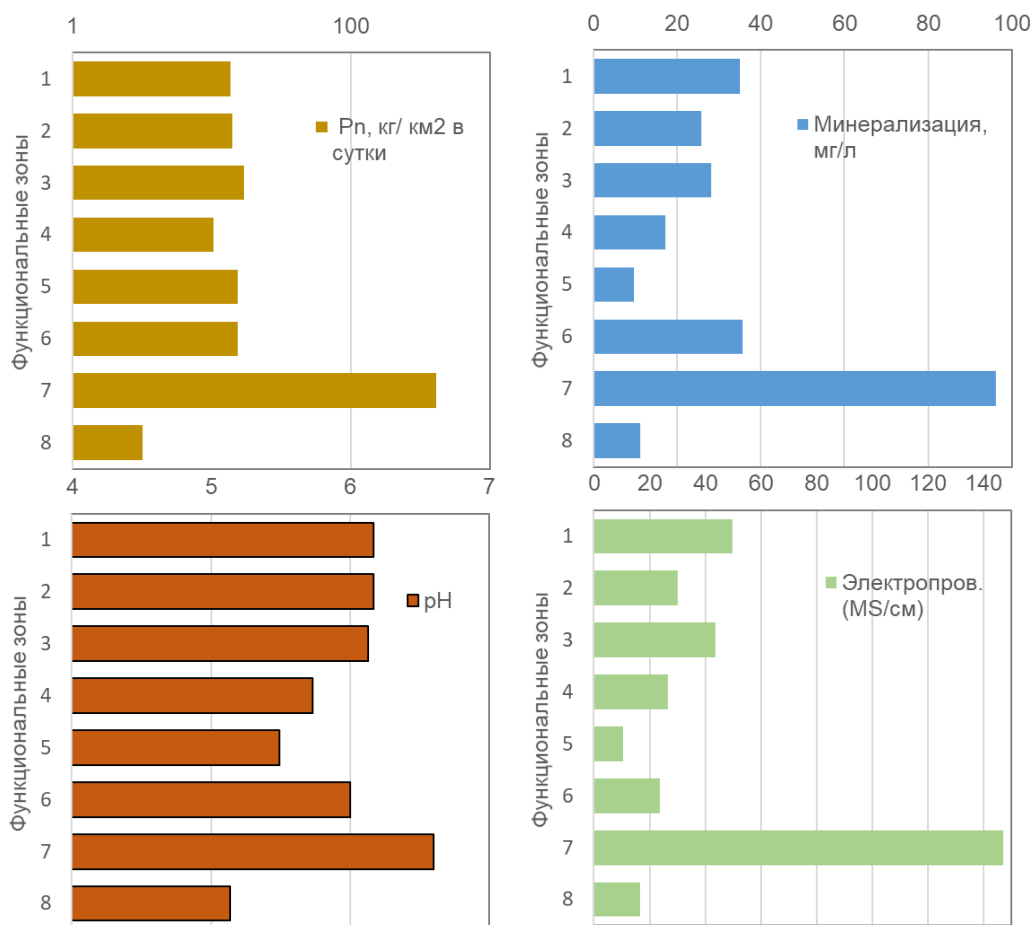


Рис. 2. Значения минерализации, электропроводности pH и пылевой нагрузки в различных функциональных зонах Тобольска. Функциональные зоны: 1 – многоэтажной застройки; 2 – малоэтажной застройки; 3 – общественно-деловая; 4 – промышленная; 5 – коммунально-складская; 6 – историко-культурный центр; 7 – автотрассы; 8 – фоновые участки

Fig. 2. Mineralization, electrical conductivity, pH and dust load values in different functional zones of Tobolsk. Functional zones: 1 – high-rise buildings; 2 – low-rise buildings; 3 – public and business; 4 – industrial; 5 – communal-warehouse; 6 – historical and cultural center; 7 – highways; 8 – background areas

Основной методический прием изучения загрязнения тяжелыми металлами основан на сопоставлении с показателями местного фона. В районе Тобольска на фоновой территории по значениям кларков концентрации выделяются элементы, концентрирующиеся в твердофазных выпадениях ($3 < KK < 10$) – Ag, Sn, Cd, Pb, Sb, Zn, слабоконцентрирующиеся ($1,5 < KK < 3$) – Mo, Bi, Ni, с околочларковыми концентрациями – Cr, W, V, Cu, As и рассеивающиеся ($KP > 3$) – Fe, Mn, Co, Zr, Sr, Ba, Ti, Sc, Ga, Al, Li и др. (табл. 1). Таким образом, пылевые выпадения на фоновых участках характеризуются повышенным содержанием халькофильных элементов. Концентрация литофильных и сидерофильных элементов, как правило, на уровне кларка либо ниже его в несколько раз.

Значения коэффициента обогащения пылеаэрозолей представлены на рис. 3. KO используется для оценки генезиса элементов. Считается, что значения

$KO < 10$ свидетельствуют о формировании пылеаэрозолей под влиянием природных источников, при значениях KO 10–100 пылеаэрозоли имеют смешанное, как природное, так и антропогенное, происхождение, $KO > 100$ индицирует антропогенное загрязнение [38]. Обращают на себя внимание высокие значения KO халькофильных элементов (Ag, Cd, Pb, Mo), которые на фоновой территории выше, чем в городе (рис. 3).

На фоновой территории у всех халькофильных элементов, кроме Hg, значения $KO > 10$. Следовательно, они поступают, хотя бы частично, из техногенных источников. Влияют техногенные источники на поступление сидерофильных Cr, Ni, Mo. Все литофильные элементы отличаются низкими значениями KO . Примечательно, что в составе макроэлементов содержание серы превышает содержание Na, K, P (табл. 1), что не соответствует кларковому ряду.

Таблица 1. Содержание макро- и микроэлементов в снежной пыли Тобольска и прилегающей фоновой территории, мг/кг (Na, Mg, Al, K, Ca, Fe, %)

Table 1. Macro- and microelement concentrations of snow dust deposition in Tobolsk city and the surrounding background area, mg/kg (Na, Mg, Al, K, Ca, Fe, %)

Элемент Element	Город/City, n=24					Фон/Background, n=7				
	Ср. геом. Geom. mean	min	max	КК	КР	Ср. геом. Geom. mean	min	max	КК	КР
Li	5,4	0,78	20,1	–	6,1	3,3	1,8	6,5	–	10,1
Be	0,52	0,15	1,6	–	4,4	0,39	0,25	0,62	–	5,9
Na	0,33	0,099	1,00	–	6,2	0,14	0,075	0,26	–	14,4
Mg	2,76	0,14	10,03	1,6	–	0,84	0,16	2,21	–	2,1
Al	1,49	0,16	5,60	–	5,1	0,76	0,36	18,2	–	10,0
Fe	1,83	0,16	39,3	–	2,2	0,90	0,36	2,03	–	4,5
P	326	76	1167	–	2,1	455	225	1467	–	1,5
S	1251	612	1772	–	1,1	2489	1963	2894	1,8	–
K	0,39	0,086	1,46	–	5,8	0,23	0,13	0,42	–	9,8
Ca	0,54	0,051	2,24	–	7,1	0,29	0,046	0,80	–	13,5
Sc	4,1	0,76	10,8	–	3,8	1,2	0,7	3,7	–	19,5
Ti	1064	176	3947	–	3,7	199	17	1248	–	19,6
Mn	339	68	643	–	2,3	115	41	270	–	6,7
V	22,1	2,54	97,1	–	4,8	37	20	70	–	2,9
Cr	274	65	1313	3,0	–	145	76	288	1,6	–
Co	14,4	1,07	42,0	–	1,0	5,0	1,8	11,6	–	3,0
Ni	262	33	865	5,2	–	120	54	258	2,4	–
Zn	428	125	1465	5,7	–	236	176	375	3,1	–
Cu	70	20	188	2,6	–	52	30	111	1,9	–
As	7,8	0,25	27,8	1,4	–	5,3	0,7	17,3	1,0	–
Zr	28,7	7,9	98,9	–	5,6	18,0	9,8	50,6	–	8,9
Ga	2,9	0,23	11,3	–	6,6	2,7	1,3	9,4	–	7,1
Sr	43,3	8,3	138,8	–	6,2	24,6	13,2	55,7	–	11,0
Rb	14,9	1,6	56,3	–	6,6	7,9	4,1	19,7	–	12,4
Y	4,4	1,1	16,1	–	5,9	2,5	1,3	5,4	–	10,3
Nb	2,5	0,62	10,0	–	4,9	2,1	1,4	3,7	–	5,8
Mo	1,4	0,49	2,3	1,3	–	2,8	2,2	3,3	2,5	–
Ag	0,2	0,07	0,7	4,6	–	1,9	1,2	3,8	35,6	–
Cd	0,7	0,13	1,4	8,2	–	0,56	0,29	1,69	6,2	–
Sn	3,8	1,31	9,2	1,5	–	22,6	8,0	73,7	9,0	–
Sb	2,9	1,14	9,5	3,6	–	2,7	1,5	5,7	3,3	–
Cs	0,7	0,09	2,9	–	7,7	0,4	0,2	1,2	–	12,5
Ba	137	24	443	–	3,7	67	32	154	–	7,6
W	2,7	0,57	8,3	1,3	–	1,21	0,25	2,4	–	1,7
La	7,1	1,9	22,5	–	4,5	5,4	3,3	15,0	–	5,9
Hg	0,014	0,001	0,1	0,22	4,6	0,022	0,013	0,045	–	2,9
Pb	59	11,2	157	3,5	–	83,7	30,2	326,8	4,9	–
Tl	0,09	0,02	0,3	ND	–	0,060	0,038	0,116	–	12,8
Bi	0,4	0,08	3,7	1,9	–	0,57	0,32	1,3	2,5	–
Th	1,5	0,27	5,1	–	6,3	0,69	0,36	1,6	–	13,1
U	0,7	0,20	2,1	–	3,5	0,34	0,15	0,93	–	7,3

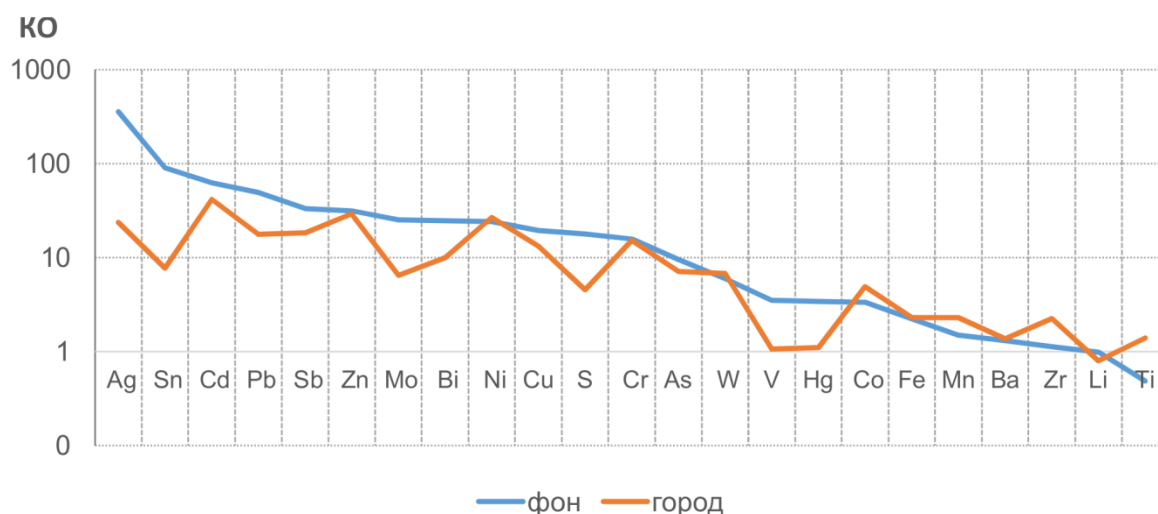


Рис. 3. Значения коэффициентов обогащения снежной пыли на фоновой и урбанизированной территориях
Fig. 3. Values of the enrichment factors for snow dust in the background and urbanized areas

Преобладание халькофильных элементов в аэротехногенных потоках рассеяния неоднократно описано в научной литературе. Согласно В.В. Добровольскому [39], максимальные коэффициенты аэрозольной концентрации свойственны Cd, Pb, Sn, Zn, Cu, Ni. Изучение снега на фоновых участках Подмоскovie показало концентрирование Zn, Cd, Sb, Pb в твердофазной составляющей [17]. В Западной Сибири сделан вывод о максимальных значениях KO для Sb, Zn, Cd и As [40]. Сходные значения, подтверждающие доминирование халькофильных элементов в составе пылеаэрозолей, получены и зарубежными исследователями. В атмосферных осадках Пекина элементы по величине коэффициента обогащения образуют следующий ряд: Cd, As, Zn, Pb, Cu [41], в расположенном поблизости Тяньцзинь значения KO для снега убывают в последовательности Se, Hg, Cd, Zn, As, Cu, Ni, Pb [42], на территории Тегерана – в последовательности Cd, Zn, Pb, Cu, Ni [43]. В снеге отдаленных районов Тибета были отмечены значения $KO > 100$ для Zn and Cd [44]. Таким образом, на фоновых участках в районе Тобольска пылеаэрозоли характеризуются накоплением халькофильных элементов, которые распространяются в глобальном масштабе – Cd, Zn, Pb, As. Обогащение Sn и Ag ранее не отмечалось, но эти элементы редко исследуются и отсутствие их в списках техногенных загрязнителей вызвано слабой изученностью. Крайне высокое значение KO для Ag, возможно, связано с поступлением этого элемента при горении древесины. Лесные пожары указаны в качестве крупного источника Ag, превышающего ветровую эрозию по объемам поступления [45].

Пониженные значения KO для многих элементов в городе по сравнению с фоном (рис. 3), при внешней парадоксальности такого явления, имеют вполне простое объяснение. Снижение коэффициента обогащения для Ag, Sn, Pb, Sb, Mo, Hg, V свидетельствует о различном генезисе пылеаэрозолей. Hg, Pb или V могут переноситься в атмосфере на большие расстояния (10^2 – 10^3 км) в ультрадисперсных аэрозолях [46]. Если на фоновых участках пылеаэрозоли поступают в результате дальнего межрегионального переноса частиц микронного и субмикронного размера, состав которых в значительной степени формируется в удаленных от Тобольска промышленных районах, то в городе увеличивается роль крупных частиц местного терригенного происхождения с высоким содержанием литофильных элементов, в том числе используемого для вычисления KO алюминия. Поэтому соотношение $C_{\text{элемент}}/C_{\text{Al}}$ в городе уменьшается, и соответственно KO снижается по сравнению с фоном.

Абсолютные концентрации химических элементов в пылевых выпадениях по сравнению с фоном возрастают в несколько раз. Наиболее существенно увеличивается содержание Ti (среднее значение $Kc=5,3$), Mg (3,3), Mn (3,0) Co (2,9) Ni (2,6), W (2,2). Содержания остальных металлов близко к фоновым значениям. Максимальные значения Kc для Ti, Mn, Fe свидетельствуют о преобладании эрозионно-почвенного источника пылеаэрозолей в городе. Основным техногенным источником Ti является сжигание угля на

электростанциях и производство цемента [47], однако Тобольская ТЭЦ в качестве топлива использует природный газ и не является источником поступления этого элемента, поскольку в промышленной зоне концентрация Ti не превышает средние для города значения.

Среднее содержание макроэлементов в твердофазных выпадениях на территории Тобольска образует ряд $Mg > Fe > Al > Ca > K > Na > S > Ti > Mn > P$, в котором последовательность элементов по сравнению с кларковым рядом отличается повышенным содержанием Mg и S. На фоновых участках среднее содержание Mg (0,84 %) соответствует содержанию в пойменных почвах нижнего течения Иртыша, где по данным [48] варьирует от 0,4 до 1,57 %. На территории города содержание Mg увеличивается в 3,3 раза. Мелкодисперсная (илистая и глинистая) фракция ветроэродируемых почв и отложений обычно содержит более высокие концентрации металлов, чем основная почва или материнские породы, из которых они получены, благодаря большой удельной площади поверхности мелких частиц, что способствует поглощению ионов металлов или присутствию органических веществ, с которыми часто связаны ионы металлов [49].

Значения Kc для большинства элементов сильно варьируют по территории города, что связано с многообразием источников выбросов. В зонах, где велико влияние автотранспорта (возле автомагистралей и в общественно-деловой), наблюдается обогащение пылеаэрозолей Co, W, Ni. Поступление W и Co связано с металлообразивными пылями [7], что говорит о поступлении этих элементов при истирании металлических деталей автотранспорта. Ni в повышенных количествах содержится в нефти и продуктах ее переработки.

В зоне многоэтажной застройки, где отмечены максимальные значения суммарного показателя загрязнения Zc (табл. 2), в геохимическую ассоциацию загрязнителей входят Ti, Zn, Bi, Ni, Co. Присутствие в ассоциации загрязнителей Ni свидетельствует о влиянии транспорта. Bi поступает в окружающую среду при производстве стройматериалов [7].

Значения суммарного показателя загрязнения Zc во всех пунктах опробования < 32 , что соответствует низкому неопасному уровню загрязнения. Максимальные значения Zc (28–31) отмечены в пробах, отобранных в центре города. Резкого различия в уровне загрязненности различных функциональных зон не выявлено.

Как показал кластерный анализ, в пылеаэрозолях города выделяются три геохимических ассоциации. Наиболее тесная связь характерна для ассоциации литофильных элементов Li, Ti, Rb, Be, Sr, Y, Ba, La, Th, U (рис. 4). В данную ассоциацию входят элементы, в значительных количествах поступающие с крупной терригенной пылью. Во вторую ассоциацию входят халькофильные Cu, Sn, Mo As Cd, Ag, Sb. Халькофильные элементы (Pb, Cd, As) образуют ассоциации с газообразными компонентами (сульфатами) [50]. Отмеченный ранее факт обогащения пылеаэрозолей на фоновых участках халькофильными элементами

дает основания для предположения о поступлении их преимущественно с мелкодисперсными частицами путем трансрегионального переноса. В третью ассоциацию входят W, Co, Ni, Mn, Sc – элементы, кото-

рые осаждаются вблизи автомагистралей. Поэтому данную ассоциацию можно считать индикатором влияния автотранспорта.

Таблица 2. Показатели концентрирования ТМ и металлоидов в снежной пыли функциональных зон Тобольска (суммарный показатель загрязнения Zc и коэффициент концентрации Kc)

Table 2. Indicators of concentration of trace metals and metalloids in snow dust of functional zones of Tobolsk city (total contamination index Zc and concentration coefficient Kc)

Функциональные зоны Land use type	Zc	Kc=5,1–10	3,1–5	1,5–3
Многоэтажной застройки High-rise residential area	29	Ti _{5,6}	Zn _{4,0} Bi _{3,9} Ni _{3,4} Co _{3,2}	Mn _{3,0} Be _{2,9} W _{2,3} Fe _{2,3} As _{2,2} Cr _{2,1} Sr _{1,9} Cu _{1,9} V _{1,8} Sb _{1,6} Cd _{1,5}
Малозэтажной застройки Low-rise residential area	23	–	Ti _{4,3} Zn _{3,5} Co _{3,5}	Ni _{2,9} Be _{2,9} Mn _{2,8} Cr _{2,5} Fe _{2,4} W _{2,2} As _{2,0} Sb _{2,0} Cu _{1,9} Sr _{1,9} Cd _{1,5}
Историко-культурный центр Historical center	10	Ti _{5,4}	–	As _{2,4} Mn _{2,2} Sr _{1,9} Co _{1,8}
Автомагистрали Transport area	21	–	Co _{3,9}	W _{3,0} Ti _{2,9} Ni _{2,9} Mn _{2,0} Cr _{2,0} Fe _{1,5}
Общественно-деловая Public and business area	18	–	Co _{4,5} Ti _{4,0} Ni _{3,9} W _{3,4}	Mn _{2,8} Fe _{2,2} Cr _{2,2} As _{1,7} Zn _{1,6}
Коммунально-складская Communal warehouse area	16	–	Ti _{4,5}	Mn _{2,7} Co _{2,4} Ni _{2,3} W _{2,2} As _{2,1} Fe _{1,8} Sr _{1,8} Cd _{1,7} Be _{1,7} Cr _{1,6} Zn _{1,6}
Промзона Industrial area	16	–	Ti _{3,8} Cr _{3,2}	Mn _{2,6} Sr _{2,5} Zn _{2,5} As _{2,4} Co _{2,2} W _{1,9} Be _{1,8} Fe _{1,8} Ni _{1,7}

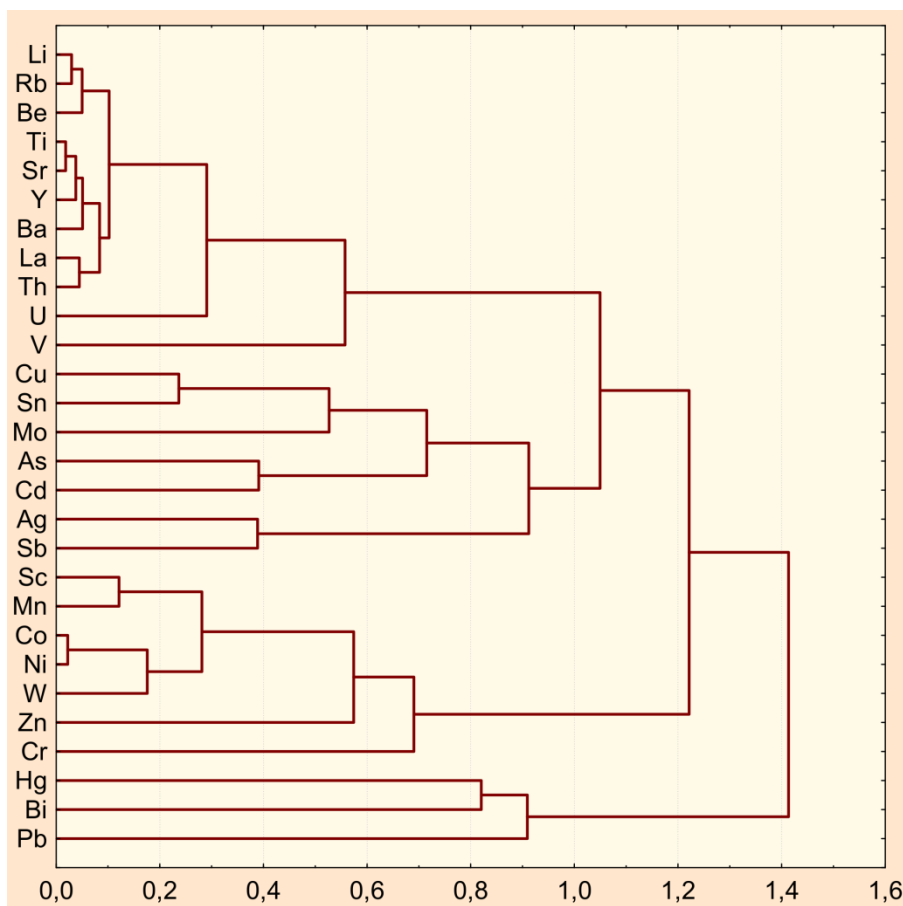


Рис. 4. Дендрограмма кластерного анализа выпадений микроэлементов на территории Тобольска. Метод наиболее удаленных соседей, мера сходства 1–r

Fig. 4. Dendrogram of cluster analysis of microelement deposition in Tobolsk city. Amalgamation (joining) rule: Complete Linkage. Distance metric is 1–Pearson r

Значения суммарного показателя имиссии Zd на территории Тобольска изменяются на два математических порядка, достигая в максимуме 4083 (табл. 3).

Однако почти во всех пунктах наблюдений Zd < 1000, что соответствует низкому уровню загрязнения. Только на участке с интенсивным движением транс-

порта, на пересечении двух транспортных потоков – федеральной автотрассы Тюмень–Сургут и дороги, соединяющей жилую зону Тобольска с промышленной, отмечен очень высокий уровень загрязнения ($Zd=4000-8000$). Высокое значение Zd объясняется здесь крайне высокой пылевой нагрузкой, превышающей 400 кг/км^2 в сутки. В зоне многоэтажной застройки, где проживает основная часть населения Тобольска, интенсивность выпадения ТМ невелика ($Zd=185$). Незначительная величина имиссии связана с относительно малым количеством пылевых выпадений и невысокой концентрацией металлов и металло-

идов. Примечательно, что в промышленной зоне имиссия загрязнителей меньше, чем в жилой зоне. На территории промзоны был отмечен довольно большой разброс значений Zd – от 7 до 543, причем максимальное значение отмечено на участке с интенсивным движением транспорта, а минимальное – на площадке возле ЛЭП, вдали от автодорог. Таким образом, деятельность предприятий Тобольской промзоны приводит лишь к незначительному росту пылевых выпадений и поступления ТМ, количество которых не превышает показателей в других функциональных зонах города.

Таблица 3. Величины коэффициентов превышения выпадений ТМ и металлоидов над фоном Kd и суммарного показателя имиссии элементов Zd в различных функциональных зонах Тобольска

Table 3. Values of the coefficient of of trace metals and metalloids deposition excess over the background Kd and the total imission index Zd in different functional zones of Tobolsk city

Функциональные зоны Functional zones	Zd	$Kd >25$	$Kd=25-10$	$Kd=10-5$	$Kd<5$
Многоэтажной застройки High-rise buildings	185	Ti _{35,0}	Co _{20,0} Mn _{18,5} Ni _{14,3} Fe _{13,1} W _{11,6} Zn _{11,0} Sr _{10,5} As _{10,0}	Cr _{9,7} Cu _{8,8} Cd _{8,1} Be _{7,8} Sb _{6,8} Bi _{6,4} V _{5,5}	Pb _{4,1}
Малозэтажной застройки Low-rise buildings	162	–	Ti _{24,7} Co _{23,2} Ni _{17,6} Mn _{14,6} W _{13,6} Cr _{11,7} Zn _{11,5}	Fe _{9,5} Sr _{8,4} Cd _{7,6} Cu _{7,5} As _{6,0} Be _{5,8} Sb _{5,7}	Pb _{4,1} V _{3,1} Bi _{3,0}
Историко-культурный центр Historical and cultural center	50	–	Ti _{14,4}	As _{6,4} Mn _{5,8} Sr _{5,0}	Co _{4,9} Fe _{3,9} W _{3,6} Be _{3,2} Cd _{3,0} Cu _{3,0} Ni _{2,9} Zn _{2,0} V _{1,9} Cr _{1,8} Pb _{1,7}
Автомобильная магистраль Transport area	4083	Co ₇₂₀ W ₅₇₂ Ni ₅₅₀ Ti ₅₃₀ Mn ₄₁₈ Cr ₃₇₈ Fe ₂₈₅ Sr ₁₇₄ Be ₈₂ Zn ₇₄ V ₆₇ Sb ₆₄ As ₅₈ Cu ₄₈ Cd ₄₃	Bi ₁₈ Pb ₁₇	–	–
Общественно-деловая Public and business area	233	Co _{34,8} Ti _{31,4} Ni _{30,4} W _{26,3}	Mn _{22,2} Fe _{17,4} Cr _{17,0} As _{11,4} Zn _{10,0}	Cd _{9,2} Sr _{9,0} Cu _{6,7} Be _{6,0} V _{5,9} Sb _{5,6}	Bi _{3,4} Pb _{2,6}
Коммунально-складская Communal warehouse area	151	Ti _{32,1}	Mn _{12,9} Co _{12,6} W _{11,7} Sr _{10,8} Fe _{10,5} As _{10,1}	Be _{9,4} Ni _{8,1} Cr _{7,9} Zn _{7,5} Sb _{6,6} Cu _{6,3} Pb _{6,0} Cd _{5,7}	V _{4,3} Bi _{4,3}
Промзона Industrial area	132	–	Ti _{17,8} Mn _{15,4} Co _{13,0} Zn _{12,2} As ₁₂	Ni _{9,2} Fe _{8,9} Cr _{8,7} Sr _{7,9} Be _{7,5} W _{7,0} Cd _{6,6} V _{6,3}	Cu _{4,8} Bi _{3,7} Sb _{3,7} Pb _{2,9}

Выводы

1. Минерализация снеготалых вод в среднем в фоновых условиях составляет 11 мг/л, в городе – 25 мг/л, резкое увеличение минерализации отмечено вблизи автодорог вследствие использования противогололедных реагентов.
2. Пылевая нагрузка в городе возрастает относительно фона в 4,7 раза, среднее значение – $15,2 \text{ мг/м}^2$ в сутки. Интенсивность пылевых выпадений по сравнению с крупными городами (Москва, Томск, Норильск) низкая. Значительное усиление выпадения пылеаэрозолей – до 406 мг/м^2 в сутки – наблюдается на участках интенсивного движения автотранспорта.
3. Выявлено типичное для урбоэкосистем подщелачивание снеготалых вод, средняя величина pH возрастает от 5,1 ед. на фоновых участках до 6,0 ед. в городе.
4. Элементный состав пылеаэрозолей на фоновой территории определяется процессами трансрегионального переноса загрязнителей, что выражается в обогащенности халькофильными элементами (Ag, Cd, Pb, Sn, Sb). У всех халькофильных эле-

- ментов, кроме Hg, значение коэффициента обогащения $KO>10$, что говорит о техногенной природе.
5. На территории города ассоциация элементов-загрязнителей включает в себя Ti, Mn, Co, Ni, W. Максимальные значения коэффициента концентрации Kc для Ti, Mn, Fe свидетельствуют о преобладании эрозионно-почвенного источника. Под влиянием автотранспорта наблюдается обогащение пылеаэрозолей Co, W, Ni, поступление которых связано с металлообразивными частицами.
6. Значения суммарного показателя загрязнения Zc во всех пунктах опробования <32 , что соответствует низкому неопасному уровню загрязнения. Значения суммарного показателя имиссии элементов Zd , характеризующего как микроэлементный состав твердофазных выпадений, так и пылевую нагрузку, также соответствуют низкому уровню загрязнения с неопасной экологической ситуацией. Только на участке с интенсивным движением транспорта отмечен очень высокий уровень имиссии элементов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-50062 и проекта фундаментальных исследований СО РАН IX.135.2.2. (Рег. № НИОКТР АААА-А17-117051850064-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная служба государственной статистики. Демография. Численность населения. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (дата обращения 08.10.2020).
2. Доклад об экологической ситуации в Тюменской области в 2017 году. Правительство Тюменской области. URL: https://admtumen.ru/ogv_ru/about/ecology/eco_monitoring/environment.htm (дата обращения 08.10.2020).
3. Characteristics of the trace elements and arsenic, iodine and bromine species in snow in east-central China / Y. Gao, C. Yang, J. Ma, M. Yin // *Atmospheric Environment*. – 2018. – V. 174. – P. 43–53. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.015> (дата обращения 08.10.2020).
4. Assessment of major ions and trace elements in snow: a case study across northeastern China, 2017–2018 / H. Xue, W. Chen, M. Li, B. Liu, G. Li, X. Han // *Chemosphere*. – 2020. – V. 251. – P. 126328. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126328> (дата обращения 08.10.2020).
5. Heavy metal concentration and distribution of snow and Lichea samples in urban area: case study of Jelgava / J. Pilecka, I. Grinfelde, K. Valujeva, I. Straupe, O. Purmalis // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*. – 2017. – V. 17. – P. 459–466. DOI: 10.5593/sgem2017/41
6. Seasonal comparison of moss bag technique against vertical snow samples for monitoring atmospheric pollution / H. Salo, A.K. Berisha, J. Mäkinen // *Journal of Environmental Sciences*. – 2016. – V. 41. – P. 128–137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.04.021> (дата обращения 08.10.2020).
7. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сагет, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, Р.С. Смирнова, И.Л. Башаркевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, Н.Я. Трефилова, А.И. Ачкасова, С.Ш. Саркисян. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
8. Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование Тюменской области. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – 246 с.
9. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 2. Многолетние данные. Вып. 17. Тюменская и Омская области. – СПб: Гидрометеоздат, 1998. – 702 с.
10. Официальный сайт администрации города Тобольска. Социально-экономическое развитие города. URL: <http://admtobolsk.ru/econom/price/> (дата обращения 08.10.2020).
11. Laboratory melting of late-winter urban snow samples: the magnitude and dynamics of releases of heavy metals and PAHs / A. Vijayan, H. Österlund, J. Marsalek, M. Viklander // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2019. – V. 230. – № 8. – P. 182. URL: <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4201-2> (дата обращения 08.10.2020).
12. Lau W.K., Kim K.M. Impact of snow darkening by deposition of light-absorbing aerosols on snow cover in the Himalayas–Tibetan Plateau and influence on the Asian summer monsoon: a possible mechanism for the Blandford hypothesis // *Atmosphere*. – 2018. – V. 9. – № 11. – P. 438. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos9110438> (дата обращения 08.10.2020).
13. Atmospheric deposition of organochlorine pesticides and industrial compounds to seasonal surface snow at four glacier sites on Svalbard, 2013–2014 / M.H. Hermanson, E. Isaksson, R. Hann, C. Teixeira, D.C. Muir // *Environmental Science & Technology*. – 2020. – V. 54. – № 15 – P. 9265–9273. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01537> (дата обращения 08.10.2020).
14. Архив погоды в Тюмени. Расписание погоды. URL: <https://rt5.ru/> (дата обращения 08.10.2020).
15. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами / Б.А. Ревич, Ю.Е. Сагет, Р.С. Смирнова, Е.П. Сорокина. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 112 с.
16. Касимов Н.С. Экогеохимия городских ландшафтов. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1995. – 336 с.
17. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы / Н.С. Касимов, Н.Е. Кошелева, Д.В. Власов, Е.В. Терская // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. – 2012. – № 4. – С. 14–24.
18. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 382 с.
19. Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / Н.С. Касимов, В.Р. Битюкова, С.М. Малхазова, Н.Е. Кошелева, Е.М. Никифорова, Н.В. Шартова, Д.В. Власов, С.А. Тимонин, В.Н. Крайнов. – М.: ИП Филимонов М.В., 2014. – 560 с.
20. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. Особенности формирования химического состава снежного покрова на территории Ханты-Мансийского автономного округа // *Криосфера Земли*. – 2012. – Т. XVI. – № 1. – С. 71–81.
21. Московченко Д.В. Нефтегазодобыча и окружающая среда: эколого-геохимический анализ Тюменской области. – Новосибирск: Наука, Сиб. предприятие РАН, 1998. – 112 с.
22. Пожитков Р.Ю., Московченко Д.В., Кудрявцев А.А. Геохимия снежного покрова г. Нижневартовска // *Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование*. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 6–24. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-6-24
23. Дорожукоева С.Л. Эколого-геохимические особенности нефтегазодобывающих районов Тюменской области: автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2004. – 25 с.
24. Свистов П.Ф., Полищук А.И. Атмосферные осадки над городами и регионами России // *Природа*. – 2014. – № 3 (1183). – С. 28–36.
25. Saharan dust particles in snow samples of Alps and Apennines during an exceptional event of transboundary air pollution / C. Telloli, M. Chicca, S. Pepi, C. Vaccaro // *Environmental monitoring and assessment*. – 2018. – V. 190. – № 1. – P. 37. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-017-6412-6> (дата обращения 08.10.2020).
26. Dust dominates high-altitude snow darkening and melt over high-mountain Asia / C. Sarangi, Y. Qian, K. Rittger, L.R. Leung, D. Chand, K.J. Bormann, T.H. Painter // *Nature Climate Change*. – 2020. – P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00909-3> (дата обращения 08.10.2020).
27. Atmospheric dust deposition varies by season and elevation in the Colorado Front Range, USA / R.C. Heindel, A.L. Putman, S.F. Murphy, D.A. Repert, E.L. Hinckley // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. – 2020. – V. 125. – № 5. – P. e2019JF005436. URL: <https://doi.org/10.1029/2019JF005436> (дата обращения 08.10.2020).
28. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики / В.П. Шевченко, А.П. Лисицын, Р. Штайн, Н.В. Горюнова, А.А. Кловиткин, М.Д. Кравчишина, М. Кривс, А.Н. Новигатский, В.Г. Соколов, А.С. Филиппов, Х. Хаас // *Проблемы Арктики и Антарктики*. – 2007. – № 1 (75). – С. 106–118.
29. Боев В.А., Лежнина А.А. Тяжелые металлы в снежном покрове Тюменского района Тюменской области // *Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование*. – 2012. – № 7. – С. 41–48.
30. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняя Л.В. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв: монография. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 264 с.
31. Оценка пылевого загрязнения атмосферы г. Омска по данным снеговой съемки / В.В. Литгау, А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, А.Д. Лончакова, М.И. Третьякова // *Оптика атмосферы и океана*. – 2015. – Т. 28. – № 3. – С. 256–259.
32. Ермолов Ю.В., Смоленцев Н.Б. Зимний фоновый сток примесей атмосферы на юго-востоке Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. – 2020. – Т. 33. – № 1 (372). – С. 75–81. DOI: 10.15372/AOO20200111
33. Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района / А.А. Онучин, Т.А. Буренина, О.Н. Зубарева, О.В. Трефилова, И.В. Данилова // *Сибирский экологический журнал*. – 2014. – Т. 21. – № 6. – С. 1025–1037.
34. Таловская А.В., Филимонов Е.А., Язиков Е.Г. Динамика элементного состава снежного покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск–Северской промышленной агломерации // *Оптика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 27. – № 6. – С. 491–495.
35. Таловская А.В. Геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории г. Томска // *Оптика атмосферы и океана*. – 2010. – Т. 23. – № 6. – С. 519–524.
36. Jarzyna K., Kozłowski R., Szwed M. Chemical properties of snow cover as an impact indicator for local air pollution sources // *Infrastructure and Ecology of rural areas*. – 2017. – V. 4. – № 2. – P. 1591–1607. DOI: <http://dx.medra.org/10.14597/infraeco.2017.4.2.120>

37. Факашук Н.Ю., Соромотин А.В. Оценка состояния снежного покрова и почв Тобольской промзоны // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. – 2017. – Т. 3. – № 2. – С. 22–33. DOI: 10.21684/2411-7927-2017-3-2-22-33
38. Concentrations and solubility of trace elements in fine particles at a mountain site, southern China: regional sources and cloud processing / T. Li, Y. Wang, W.J. Li, J.M. Chen, T. Wang, W.X. Wang // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2015. – V. 15. – P. 8987–9002. DOI: 10.5194/acp-15-89-87-2015
39. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. – М.: Мысль, 1983. – 272 с.
40. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Lowland across a 1700 km latitudinal gradient / V.P. Shevchenko, O.S. Pokrovsky, S.N. Vorobyev, I.V. Krickov, R.M. Manasyrov, N.V. Politova, S.G. Kopysov, O.M. Dara, Y. Auda, L.S. Shirokova, L.G. Kolesnichenko, V.A. Zemtsov, S.N. Kirpotin // Hydrology and Earth System Sciences. – 2017. – V. 21. – P. 5725–5746. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-21-5725-2017> (дата обращения 08.10.2020).
41. Guo L., Lyu Y., Yang Y. Concentrations and chemical forms of heavy metals in the bulk atmospheric deposition of Beijing, China // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 24. – P. 27356–27365. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0324-4> (дата обращения 08.10.2020).
42. Determination of major and trace elements in snow in Tianjin, China: a three-heating-season survey and assessment / G. Wu, Q. Wei, C. Sun, J. Gao, L. Pan, L. Guo // Air Quality, Atmosphere & Health. – 2016. – V. 9. – P. 687–696. URL: <https://doi.org/10.1007/s11869-015-0375-y> (дата обращения 08.10.2020).
43. Study of trace elements in wet atmospheric precipitation in Tehran, Iran / H. Kamani, M. Hoseini, G.H. Safari, J. Jaafari, A.H. Mahvi // Environmental Monitoring and Assessment. – 2014. – V. 186. – P. 5059–5067. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3759-9> (дата обращения 08.10.2020).
44. New insights into trace elements deposition in the snow packs at remote alpine glaciers in the northern Tibetan Plateau, China / Z.W. Dong, S.C. Kang, X. Qin, X.F. Li, D.H. Qin, J.W. Ren // Science of the Total Environment. – 2015. – V. 529. – P. 101–113. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.065> (дата обращения 08.10.2020).
45. Микроэлементы в атмосфере фоновых районов суши и океана / А.Х. Остромогильский, Ю.А. Анохин, В.А. Ветров, В.А. Петрухин, А.Л. Пословин // Контроль загрязнения природной среды. Обзорная информация. Вып. 2. – Обнинск: Информационный центр ВНИИГМИ-МЦД, 1981. – 42 с.
46. Steinnes E., Friedland A.J. Metal contamination of natural surface soils from long-range atmospheric transport: existing and missing knowledge // Environmental Reviews. – 2006. – V. 14. – № 3. – P. 169–186. URL: <https://doi.org/10.1139/a06-002> (дата обращения 08.10.2020).
47. Nriagu J.O., Pacyna J.M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils with trace elements // Nature. – 1988. – V. 333. – P. 134–139.
48. Нечаева Е.Г. Ландшафтно-геохимический анализ динамики таежных геосистем. – Иркутск: Ин-т географии СО АН СССР, 1985. – 210 с.
49. Metal and arsenic distribution in soil particle sizes relevant to soil ingestion by children / K. Ljung, O. Selinus, E. Otabbong, M. Berglund // Applied Geochemistry. – 2006. – V. 21. – P. 1613–1624. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.05.005> (дата обращения 08.10.2020).
50. Elemental and base anions deposition in the snow cover of north-eastern Estonia. The impact of industrial emissions / M. Kaasik, R. Rõõm, O. Røyset, M. Vadset, Ü. Sõukand, K. Tõugu, H. Kaasik // Water, Air, and Soil Pollution. – 2000. – V. 121. – P. 324–366. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1005239810199> (дата обращения 08.10.2020).

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

Московченко Д.В., доктор географических наук, главный научный сотрудник, Тюменский научный центр СО РАН, структурное подразделение Институт проблем освоения Севера.

Пожитков Р.Ю., младший научный сотрудник, Тюменский научный центр СО РАН, структурное подразделение Институт проблем освоения Севера.

Соромотин А.В., доктор биологических наук, профессор, Институт наук о Земле, Тюменский государственный университет.

UDC 551.578.46: 550.42

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SNOW COVER IN TOBOLSK

Dmitriy V. Moskovchenko¹,
moskovchenko1965@gmail.com

Roman Yu. Pozhitkov¹,
pozhitkov-roma@yandex.ru

Andrey V. Soromotin²,
asoromotin@mail.ru

¹ Tyumen scientific center SB RAS,
86, Malygin street, Tyumen, 625026, Russia.

² Tyumen State University,
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

The relevance of this study is associated with the increasing technogenic pollution of highly industrialized urban areas.

The aim of the research is to determine chemical element contents in solid precipitation and identify sources of pollutants.

Materials: background ecosystems and technogenic urboecosystems in different functional zones of the city of Tobolsk.

Methods: ecological-geochemical analyses of snow cover, determination of physicochemical characteristics of snow (pH, electrical conductivity and salinity), contents of dust-aerosol particles in meltwaters and the chemical composition of solid-phase components using inductively coupled plasma mass spectrometry and atomic emission spectrometry, calculations of parameters characterizing the ecological situation (concentration coefficient K_c , total contamination Z_c and emission of elements Z_d).

Results. The studied meltwaters were characterized by increased alkalinity, salinity and electrical conductivity, which is typical for urboecosystems. The mean daily dust deposition rate of 15,2 mg/m² in Tobolsk was 4,7 times higher than that in background ecosystems, but lower than those in large industrial cities. Transport is the main source of snow contamination in Tobolsk. Solid precipitation in background ecosystems around Tobolsk was contaminated by chalcophile elements, which originated from submicron particles brought from distant industrial regions. In Tobolsk, the assemblage of contaminants was indicative of influences of soil erosion (Ti and Mn), motorized vehicles (Ni) and abrasion of metal parts (W and Co). Rates of dust-aerosol emissions from the city's industrial zone, which includes the Tobolsk petrochemical complex and the power plant, were not significantly higher than those from other functional zones of the city. Based on Z_c and Z_d indices, pollution levels within the city, except the main transport zone, were defined as low.

Key words:

Snow cover, dust aerosol, Tobolsk, heavy metals, total pollution.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-05-50062) and project of fundamental research of SB RAS IX.135.2.2. (AAAA-A17-117051850064-0).

REFERENCES

1. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. Demografiya. Chislennost naseleniya* [Federal state statistics service. Demography. Population size]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (accessed 8 October 2020).
2. *Doklad ob ekologicheskoy situatsii v tyumenskoy oblasti v 2017 godu. Pravitelstvo Tyumenskoy oblasti* [The report on the environmental situation in the Tyumen region in 2017. Government of the Tyumen region]. Available at: https://admtyumen.ru/ogv_ru/about/ecology/eco_monitoring/environment.htm (accessed 8 October 2020).
3. Gao Y., Yang C., Ma J., Yin M. Characteristics of the trace elements and arsenic, iodine and bromine species in snow in east-central China. *Atmospheric Environment*, 2018, vol. 174, pp. 43–53. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.015> (accessed 8 October 2020).
4. Xue H., Chen W., Li M., Liu B., Li G., Han X. Assessment of major ions and trace elements in snow: a case study across northeastern China, 2017–2018. *Chemosphere*, 2020, vol. 251, pp. 126328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126328> (accessed 8 October 2020).
5. Pilecka J., Grinfelde I., Valujeva K., Straupe I., Purmalis O. Heavy metal concentration and distribution of snow and Lichea samples in urban area: case study of Jelgava. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 2017, vol. 17, pp. 459–466. DOI: 10.5593/sgem2017/41
6. Salo H., Berisha A.K., Mäkinen J. Seasonal comparison of moss bag technique against vertical snow samples for monitoring atmospheric pollution. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, vol. 41, pp. 128–137. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.04.021> (accessed 8 October 2020).
7. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasova A.I., Sarkisyan S.Sh. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
8. Gvozdetkiy N.A. *Fiziko-geograficheskoe rayonirovanie Tyumenskoy oblasti* [Physical and geographical zoning of the Tyumen region]. Moscow, Moscow State University Publ., 1973. 246 p.
9. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 2. Mnogoletnie dannye. Vyp. 17. Tyumenskaya i Omskaya oblasti* [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Series 2. Multiyear data. Iss. 17. Tyumen and Omsk regions]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1998. 702 p.
10. *Oftisialnyy sayt administratsii goroda Tobolska. Sotsialno-ekonomicheskoe razvitie goroda* [Official website of the Tobolsk city administration. Socio-economic development of the city]. Available at: <http://admtoobolsk.ru/econom/price/> (accessed 8 October 2020).
11. Vijayan A., Österlund H., Marsalek J., Viklander M. Laboratory melting of late-winter urban snow samples: the magnitude and dynamics of releases of heavy metals and PAHs. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, vol. 230, no 8, pp. 182. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4201-2> (accessed 8 October 2020).

12. Lau W.K., Kim K.M. Impact of snow darkening by deposition of light-absorbing aerosols on snow cover in the Himalayas–Tibetan Plateau and influence on the Asian summer monsoon: A possible mechanism for the Blanford hypothesis. *Atmosphere*, 2018, vol. 9, no. 11, pp. 438. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos9110438> (accessed 8 October 2020).
13. Hermanson M.H., Isaksson E., Hann R., Teixeira C., Muir D.C. Atmospheric deposition of organochlorine pesticides and industrial compounds to seasonal surface snow at four glacier sites on Svalbard, 2013–2014. *Environmental Science & Technology*, 2020, vol. 54, no. 15, pp. 9265–9273. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01537> (accessed 8 October 2020).
14. *Arkhiv pogody v Tyumeni. Raspisanie pogody* [Weather archive in Tyumen. Weather schedule]. Available at: <https://rt5.ru/> (accessed 8 October 2020).
15. Revich B.A., Saet Yu.E., Smirnova R.S., Sorokina E.P. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke zagryazneniya territorii gorodov khimicheskimi elementami* [Methodological recommendations for geochemical assessment of urban pollution by chemical elements]. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 112 p.
16. Kasimov N.S. *Ekogeokhimiya gorodskikh landshaftov* [Ecogeochemistry of urban landscapes]. Moscow, Moscow State University Publ., 1995. 336 p.
17. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geochemistry of snow cover within the Eastern district of Moscow. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 2012, no. 4, pp. 14–24. In Rus.
18. Grigoryev N.A. *Rasprezelenie khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2009. 382 p.
19. Kasimov N.S., Bityukova V.R., Malkhazova S.M., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M., Shartova N.V., Vlasov D.V., Timonin S.A., Kraynov V.N. *Regiony i goroda Rossii: Integralnaya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya* [The regions and cities of Russia: integrated environmental assessment]. Moscow, Filimonov M.V. Publ., 2014. 560 p.
20. Moskovchenko D.V., Babushkin A.G. Peculiarities of formation of chemical composition of snow waters (on example of Khanty-Mansi autonomous district). *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. XVI, no. 1, pp. 71–81. In Rus.
21. Moskovchenko D.V. *Neftegazodobycha i okruzhayushchaya sreda: ekologo-geokhimicheskii analiz Tyumenskoy oblasti* [Oil and gas production and environment: ecological and geochemical analysis of the Tyumen region]. Novosibirsk, Nauka Publ., Sib. predpriyatie RAN, 1998. 112 p.
22. Pozhitkov R.Yu., Moskovchenko D.V., Kudryavtsev A.A. Geochemistry of the snow cover of Nizhnevartovsk. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 6–24. In Rus. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-6-24
23. Dorozhukova S.L. *Ekologo-geokhimicheskie osobennosti neftegazodobyvayushchikh rayonov Tyumenskoy oblasti*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical features of oil and gas producing areas of the Tyumen region. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2004. 25 p.
24. Svistov P.F., Polishchuk A.I. Atmospheric precipitation over cities and regions of Russia. *Priroda*, 2014, no. 3 (1183), pp. 28–36. In Rus.
25. Telloli C., Chicca M., Pepi S., Vaccaro C. Saharan dust particles in snow samples of Alps and Apennines during an exceptional event of transboundary air pollution. *Environmental monitoring and assessment*, 2018, vol. 190, no. 1, pp. 37. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-017-6412-6> (accessed 8 October 2020).
26. Sarangi C., Qian Y., Rittger K., Leung L.R., Chand D., Bormann K.J., Painter T.H. Dust dominates high-altitude snow darkening and melt over high-mountain Asia. *Nature Climate Change*, 2020, pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00909-3> (accessed 8 October 2020).
27. Heindel R.C., Putman A.L., Murphy S.F., Repert D.A., Hinckley E.L. Atmospheric dust deposition varies by season and elevation in the Colorado Front Range, USA. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, vol. 125, no. 5, pp. e2019JF005436. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019JF005436> (accessed 8 October 2020).
28. Shevchenko V.P., Lisicyn A.P., Shtayn R., Goryunova N.V., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Krivs M., Novigatskiy A.N., Sokolov V.T., Filippov A.S., Haas H. Distribution and composition of insoluble particles in Arctic snow. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2007, no. 1 (75), pp. 106–118. In Rus.
29. Boev V.A., Lezhnina A.A. Heavy metals in the snowpack of the Tyumen district, Tyumen region. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, 2012, no. 7, pp. 41–48. In Rus.
30. Yazikov E.G., Talovskaya A.V., Zhorniyak L.V. *Otsenka ekologo-geokhimicheskogo sostoyaniya territorii g. Tomsk po danym izucheniya pyleaerozoley i pochv: monografiya* [Assessment of the ecological and geochemical state of the territory of Tomsk according to the study of dust aerosols and soils: monograph]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2010. 264 p.
31. Litau V.V., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Lonchakova A.D., Tretyakova M.I. Dust pollution assessment on the territory of Omsk city using snow survey. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 256–259. In Rus.
32. Ermolov Y.V., Smolentsev N.B. Background aerosol deposition in the south-eastern part of Western Siberia. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, vol. 33, no. 1 (372), pp. 75–81. In Rus. DOI: 10.15372/AOO20200111
33. Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trefilova O.V., Danilova I.V. Pollution of snow cover in the impact zone of enterprises in Norilsk industrial area. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 714–722.
34. Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G. Dynamics of the elemental composition of the snow cover in the north-eastern zone of influence of Tomsk-Seversk industrial agglomeration. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2014, vol. 27, no. 6, pp. 491–495. In Rus.
35. Talovskaya A.V. Geochemical characteristic of dust atmospheric precipitations on the Tomsk area. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2010, vol. 23, no. 6, pp. 519–524. In Rus.
36. Jarzyna K., Kozłowski R., Szwed M. Chemical properties of snow cover as an impact indicator for local air pollution sources. *Infrastructure and Ecology of rural areas*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 1591–1607. DOI: <http://dx.medra.org/10.14597/infraeco.2017.4.2.120>
37. Fakashchuk N.Yu., Soromotin A.V. Environmental assessment of the Tobolsk industrial zone territory. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 22–33. In Rus. DOI: 10.21684/2411-7927-2017-3-2-22-33
38. Li T., Wang Y., Li W.J., Chen J.M., Wang T., Wang W.X. Concentrations and solubility of trace elements in fine particles at a mountain site, southern China: regional sources and cloud processing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, vol. 15, pp. 8987–9002. DOI: 10.5194/acp-15-89-87-2015
39. Dobrovolskiy V.V. *Geografiya mikroelementov. Globalnoe rassseyaniye* [Geography of trace elements. Global scattering]. Moscow, Mysl Publ., 1983. 272 p.
40. Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Manasyrov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Y., Shirokova L.S., Kolesnichenko L.G., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Lowland across a 1700km latitudinal gradient. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, vol. 21, pp. 5725–5746. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-21-5725-2017> (accessed 8 October 2020).
41. Guo L., Lyu Y., Yang Y. Concentrations and chemical forms of heavy metals in the bulk atmospheric deposition of Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 27356–27365. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0324-4> (accessed 8 October 2020).
42. Wu G., Wei Q., Sun C., Gao J., Pan L., Guo L. Determination of major and trace elements in snow in Tianjin, China: a three-heating-season survey and assessment. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2016, vol. 9, pp. 687–696. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11869-015-0375-y> (accessed 8 October 2020).
43. Kamani H., Hoseini M., Safari G.H., Jaafari J., Mahvi A.H. Study of trace elements in wet atmospheric precipitation in Tehran, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186, pp. 5059–5067. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3759-9> (accessed 8 October 2020).
44. Dong Z.W., Kang S.C., Qin X., Li X.F., Qin D.H., Ren J.W. New insights into trace elements deposition in the snow packs at remote

- alpine glaciers in the northern Tibetan Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 529, pp. 101–113. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.065> (accessed 8 October 2020).
45. Ostromogilsky A.K., Anokhin Yu.A., Vetrov V.A., Petrukhin V.A., Poslovin A.L. *Mikroelementy v atmosfere fonovykh rayonov sushi i okeana. Kontrol zagryazneniya prirodnoy sredy. Obzornaya informatsiya. Vyp. 2* [Microelements in the atmosphere of background regions of land and ocean. Control of environmental pollution. Overview information. Iss. 2]. Obninsk, VNIIGMI–MCD information center Publ., 1981. 42 p.
46. Steinnes E., Friedland A.J. Metal contamination of natural surface soils from long-range atmospheric transport: existing and missing knowledge. *Environmental Reviews*, 2006, vol. 14, no. 3, pp. 169–186. Available at: <https://doi.org/10.1139/a06-002> (accessed 8 October 2020).
47. Nriagu J.O., Pacyna J.M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils with trace elements. *Nature*, 1988, vol. 333, pp. 134–139.
48. Nechaeva E.G. *Landshaftno-geokhimicheskiy analiz dinamiki ta-yeznykh geosistem* [Landscape-geochemical analysis of the dynamics of taiga geosystems]. Irkutsk, Institute of Geography USSR Academy of Sciences Publ., 1985. 210 p.
49. Ljung K., Selinus O., Otabbong E., Berglund M. Metal and arsenic distribution in soil particle sizes relevant to soil ingestion by children. *Applied Geochemistry*, 2006, vol. 21, pp. 1613–1624. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.05.005> (accessed 8 October 2020).
50. Kaasik M., Rõõm R., Røyset O., Vadset M., Sõukand Ü., Tõugu K., Kaasik H. Elemental and base anions deposition in the snow cover of north-eastern Estonia. The impact of industrial emissions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, vol. 121, pp. 324–366. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1005239810199> (accessed 8 October 2020).

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Dmitry V. Moskovchenko, Dr. Sc., principal scientist, Tyumen scientific center SB RAS.

Roman Yu. Pozhitkov, junior scientist, Tyumen scientific center SB RAS.

Andrey V. Soromotin, Dr. Sc., professor, Tyumen State University.

УДК 544.558

ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СИНТЕЗ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ИЗ РУДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Пак Александр Яковлевич¹,
ayarak@tpu.ru

Якич Тамара Юрьевна¹,
cherkasovatu@tpu.ru

Кокорина Александра Ивановна¹,
aik48@tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлены растущим потреблением карбида вольфрама в связи с его применением в различных сферах: обрабатывающая промышленность, катализ, металлургия и др. Соответственно поиск новых малозатратных методов переработки вольфрамсодержащих руд является актуальной задачей.

Цель: определить параметры безвакуумного электродугового синтеза карбидов вольфрама в атмосферной плазме с использованием в качестве исходного сырья концентрата вольфрамсодержащей руды, которые обеспечивают эффект самопроизвольного экранирования реакционного объема от кислорода воздуха.

Объекты: синтез карбида вольфрама в плазме дугового разряда постоянного тока из концентрата вольфрамсодержащей руды безвакуумным методом.

Методы: безвакуумный электродуговой метод синтеза, рентгенофазовый анализ на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 7000s ($\lambda=1,54060 \text{ \AA}$), электронная микроскопия, совмещенная с рентгенофлуоресцентным энергодисперсионным анализом на базе микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU с приставкой OXFORD X-Max 50 с Si/Li (TESCAN, Чехия).

Результаты. Проведена серия экспериментов по синтезу карбидов вольфрама в дуговом разряде постоянного тока из вольфрамового концентрата руды, в результате рентгенофазового анализа полученных образцов, растровой электронной микроскопии, совмещенной с энергодисперсионным анализом химического состава полученных из рудного концентрата образцов, было установлено, что в продуктах электродуговой переработки можно идентифицировать фазы карбида вольфрама WC и W₂C, при этом полная переработка исходного сырья наблюдается при длительности электродуговой обработки не менее 30 с (при энергии дуги не менее 95 кДж). Было установлено, что с увеличением времени синтеза доля W₂C убывает, при этом доля карбида вольфрама WC возрастает.

Ключевые слова:

Дуговой разряд, атмосферная плазма, безвакуумный синтез, вольфрамсодержащий рудный концентрат, шеелит, вольфрамит, карбид вольфрама.

Введение

Карбид вольфрама является сырьевой основой производства сверхтвердых элементов для различных инструментов [1]. Порошки и покрытия на основе карбида вольфрама получают различными методами: осаждение из газовой фазы [2], обработка поверхностей высокоинтенсивными электронными и ионными пучками [3], перемалывание исходных компонентов в шаровых мельницах [4], генерация плазменных пучков [5–7], карботермическое восстановление в резистивных, дуговых и иных печах [8, 9]. Все эти методы обычно реализуются с использованием чистого вольфрама или его оксида, которые извлекаются из вольфрамовой руды. Вопрос совершенствования технологий переработки руды, содержащей вольфрам, все еще актуален ввиду несовершенства существующих методов, в частности в отношении снижения количества отходов, повышения энергоэффективности, снижения объема сопутствующих переработке добавок, снижения количества промежуточных стадий обработки [10]. Среди вольфрам-содержащих минералов основными для производства вольфрама считаются вольфрамит (Fe, Mn(WO₄)) и шеелит CaWO₄. Процесс переработки включает помол до нужного грануло-

метрического состава, процесс флотации и магнитной сепарации на электродинамических и электростатических сепараторах, выделение в результате концентрата оксида вольфрама WO₃ [10, 11], который затем нужно восстановить. В целях совершенствования процессов переработки вольфрамовых руд в последние годы развивается подход, основанный на получении карбида вольфрама в одной из первых стадий обработки руды с последующим выделением полученной фракции [12–15]. Такие процессы реализуются методом карботермического восстановления исходного материала в присутствии активированного угля и магнезия с последующей очисткой продукта синтеза при помощи HCl и NaOH. Одним из возможных подходов к переработке руды может быть электродуговое воздействие, в результате которого можно получить материал, содержащий кристаллические фазы карбидов вольфрама [16, 17]. В последние годы развивается безвакуумный электродуговой метод синтеза углеродных наноматериалов и порошков карбидов металлов и неметаллов различной дисперсности [18, 19]. Метод отличается от традиционного электродугового реализацией в открытой воздушной среде, что возможно благодаря эффекту экранирования реакционной зоны газообразными оксидами углерода,

поток которых генерируется при горении дугового разряда между графитовыми электродами. Эти особенности позволяют снизить энергоемкость получаемого продукта, повысить производительность, существенно упростить схему дугового реактора [20, 21].

В данной работе представлены результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, в которых порошок концентрата вольфрамовой руды обрабатывался электродуговой плазмой безвакуумным методом; показана возможность получения карбида вольфрама в одностадийном процессе разрабатываемым методом.

Методы

В качестве исходного материала использовался вольфрамовый концентрат в виде порошка, по химическому составу соответствующий стандарту «ГОСТ 213-83». Данный концентрат содержит, согласно данным производителя, вольфрам до 42,0 масс. %, железо до 16,2 масс. %, марганец до 8,8 масс. %, кальций до 3 масс. %, кислород, а также другие элементы в незначительных количествах (алюминий, кремний, титан, цирконий, свинец, сера).

Экспериментальные исследования по обработке рудного концентрата проводились на электродуговом реакторе постоянного тока совмещенного типа [18]. Графитовые электроды подключались к однофазному источнику постоянного тока с максимальной мощностью 10 кВт. В полый катод в виде графитового стакана загружался концентрат вольфрамовой руды с добавлением 20 % масс порошка графита, общая масса загрузки составила 2 г. Источник настраивался на рабочую силу тока 165 А, разряд поджигался в полости катода и поддерживался заданное время – от 10 до 30 с – таким образом, чтобы через исходную смесь протекал ток разрядного контура. Диаметр катода подобран таким образом, чтобы размер катодного пятна был не меньше площади дна катода и, соответственно, не меньше площади, покрытой исходными реагентами. В ходе горения дугового разряда регистрировались вольтамперные характеристики дуги, фиксировалась температура внешней стенки катода.

Рентгенофазовый анализ исходного рудного концентрата и полученных материалов проводился на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 7000s ($\lambda=1,54060 \text{ \AA}$, графитовый монохроматор) с использованием базы данных PDF4+. Эталонные рентгеновские дифрактограммы строились в программе PowderCell 2,4 по данным карточек базы данных PDF4+. Морфология частиц в составе порошков и их элементный состав анализировались с использованием сканирующего электронного микроскопа. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) проводилась на базе растрового микроскопа марки TESCAN VEGA 3 SBU с приставкой энергодисперсионного анализа (ЭДС) химического состава OXFORD X-Max (производитель TESCAN, Чехия. Ускоряющее напряжение для СЭМ съемки и анализа было 20 кВ с интенсивностью тока зонда в пределах 4–11,5 нА. Локальный рентгеноспектральный анализ выполнялся

с предварительной калибровкой интенсивности зонда (11,4–11,5 нА), которая производилась по кобальтовому стандарту при рабочем (фокусном) расстоянии 15 мм. СЭМ фотографии накапливались для двух основных детекторов: вторичных электронов (SE – secondary electrons) и обратно-рассеянных электронов (BSE – backscattered electrons). Снимки, полученные при детекторе SE, отражают контраст рельефа поверхности (или топо-контраст), снимки при детекторе BSE – контраст состава поверхности (или фазовых контраст). Далее в подписи рисунка с СЭМ-снимками указывается соответствующий тип детектора.

Результаты и обсуждение

Согласно полученным осциллограммам тока и напряжения, средняя мощность дугового разряда составила не более 4,5–5,0 кВт, что обеспечило выделение энергии в дуговом разряде до 96,7 кДж при изменении времени поддержания разряда до 30 с. Масса катода практически не изменилась, а масса анода изменялась пропорционально количеству подведенной энергии в количестве 10 мг/кДж (это соответствует эрозии до ~1 г при поддержании дугового разряда в течение 30 с). Масса эрозии анода частично перенеслась в зону реакции в виде катодного депозита (твердого графитового образования) с массой до 0,8 г, который отделялся от продукта переработки механически. В каждом эксперименте собирался порошок массой до ~1 г (при массе исходной загрузки 2 г). Таким образом, можно констатировать факт потери массы в системе в первую очередь за счет эрозии анода и образования газообразных оксидов углерода, а также, вероятно, за счет испарения влаги в исходном вольфрамовом концентрате и потери кислорода в его составе в процессе реакции. Температура внешней поверхности катода составляла от 750 до 1250 °С в зависимости от количества подведенной энергии за счет изменения длительности поддержания дугового разряда.

На рис. 1 представлены типичные рентгеновские дифрактограммы исходного рудного концентрата и продуктов электродуговой переработки. По данным качественного рентгенофазового анализа в исходном вольфрамовом концентрате можно выделить три основные кристаллические фазы: шеелит CaWO_4 , а также ферберит $\text{Fe}(\text{WO}_4)$ и гюбнерит $\text{Mn}(\text{WO}_4)$, составляющие вольфрамит (Fe , $\text{Mn}(\text{WO}_4)$). При этом некоторые дифракционные максимумы не соответствуют данным фазам и могут принадлежать различным примесям в вольфрамовом концентрате, например оксидам железа, кремния, алюминия, титана, циркония, свинца и другим соединениям в малых количествах.

В типичных продуктах переработки можно также идентифицировать фазу графита gC , гексагональные фазы WC и W_2C . Наличие фазы графита является следствием его добавления в вольфрамовый концентрат на этапе подготовки исходного сырья, а также процесса эрозии анода с переносом части его массы на катод (соответственно, и в продукт переработки) [19]. Фазы карбида вольфрама WC и W_2C формиру-

ются в результате воздействия высоких температур, достигаемых при горении дугового разряда в присутствии углерода, согласно известным данным о параметрах диаграммы состояний в системе «вольфрам–углерод» [22]. Формирование нескольких кристаллических фаз карбида вольфрама типично для электродуговых методов его синтеза при использовании в качестве исходного материала как чистого вольфрама, его оксида [23], так и концентратов вольфрамовых руд, например шеелита [16, 17]. Причиной этой закономерности может быть высокий градиент температурного поля и неоднородность распределения вольфрама в реакционной зоне. Согласно литературным данным, в проведенных экспериментах, учитывая размеры электродов, в плазменном факеле вблизи по-

верхности катода температура может изменяться в диапазоне от 10000 до 2000 К вдоль радиуса. При этом интегрально температура катода повышается с увеличением продолжительности поддержания дугового разряда, что, вероятно, может влиять на фазовый состав продукта переработки. Следует отметить, что на картинах дифракции присутствуют и не идентифицированные малоинтенсивные дифракционные максимумы, которые могут принадлежать различным фазам, вероятность образования которых весьма велика. В первую очередь это фазы карбидов кальция, кремния, титана и других фаз, которые нередко образуются в процессе переработки вольфрамовых концентратов, в частности, с применением дуговых разрядов [15, 16].

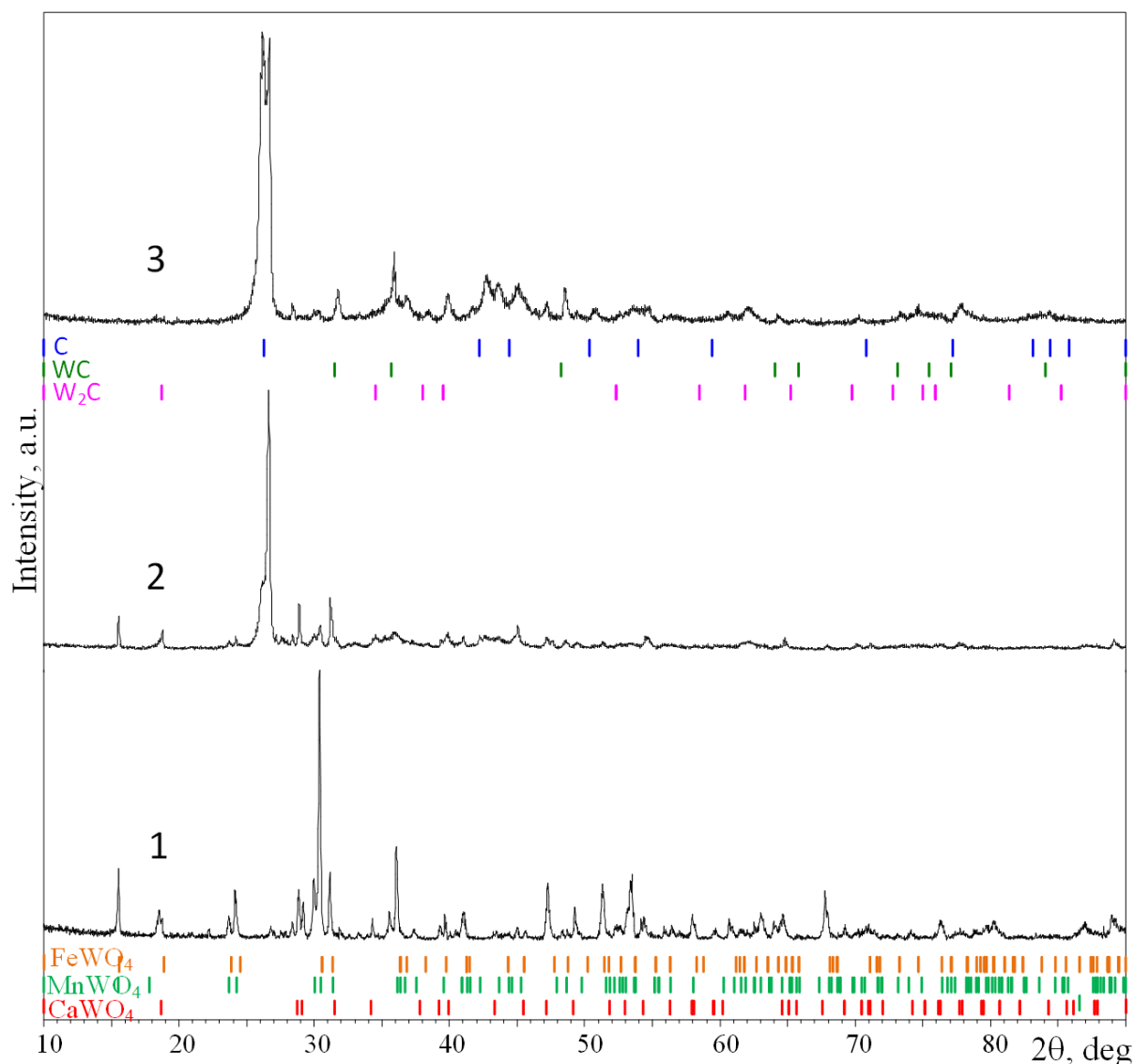


Рис. 1. Типичные рентгеновские дифрактограммы: 1 – исходного вольфрамового концентрата; 2 – продукта переработки, полученного с наименьшей энергией дугового разряда в серии экспериментов (~30 кДж, 10 с); 3 – продукта переработки, полученного с наибольшей энергией дугового разряда в серии экспериментов (более 95 кДж, 30 с)

Fig. 1. Typical X-ray diffraction patterns of: 1 – the initial tungsten concentrate; 2 – the product of processing obtained with the lowest arc discharge energy in the series of experiments (~30 kJ, 10 s); 3 – the processed product obtained with the highest arc discharge energy in the series of experiments (more than 95 kJ, 30 s)

Проведение количественного рентгенофазового анализа в рассматриваемой системе с приемлемой точностью представляется практически невозможной задачей ввиду известных погрешностей, обусловленных наличием в материале элементов с существенно разной атомной массой. В связи с этим в данном случае можно рассмотреть соотношение относительных интенсивностей в серии экспериментов. На рис. 2 представлена данная зависимость. Видно, что в исходном вольфрамовом концентрате основной дифракционный максимум принадлежит фазе FeWO_4 , второй по интенсивности соответствует фазе MnWO_4 , и наименьшая интенсивность соответствует основному максимуму фазы CaWO_4 . Эти данные согласуются с известными сведениями об используемом вольфрамовом концентрате: массовая доля железа больше, чем марганца, а доля кальция из этих трех элементов наименьшая. Для всех картин рентгеновской дифракции переработанных материалов характерен основной дифракционный максимум, соответствующий графиту.

С увеличением продолжительности поддержания дугового разряда (от 10 до 30 с) видно, как интенсивности основных дифракционных максимумов фаз FeWO_4 , MnWO_4 , CaWO_4 снижаются, при этом растет относительная интенсивность фаз WC и W_2C . Эксперимент, в котором дуговой разряд поддерживался 30 с, отличается от предыдущих снижением интенсивности максимумов фазы W_2C и значительным ростом интенсивности основного дифракционного максимума фазы WC . Такой результат представляется закономерным, так как при более высоких температурах (и/или времени нахождения материала при более высоких температурах) выход фазы WC должен повышаться. Таким образом, согласно полученным результатам в отношении плазменной переработки рудных концентратов на основе вольфрама, можно сделать заключение о возможности получения фаз карбида вольфрама W_2C и WC электродуговым воздействием на вольфрамовый концентрат разрабатываемым безвакуумным методом.

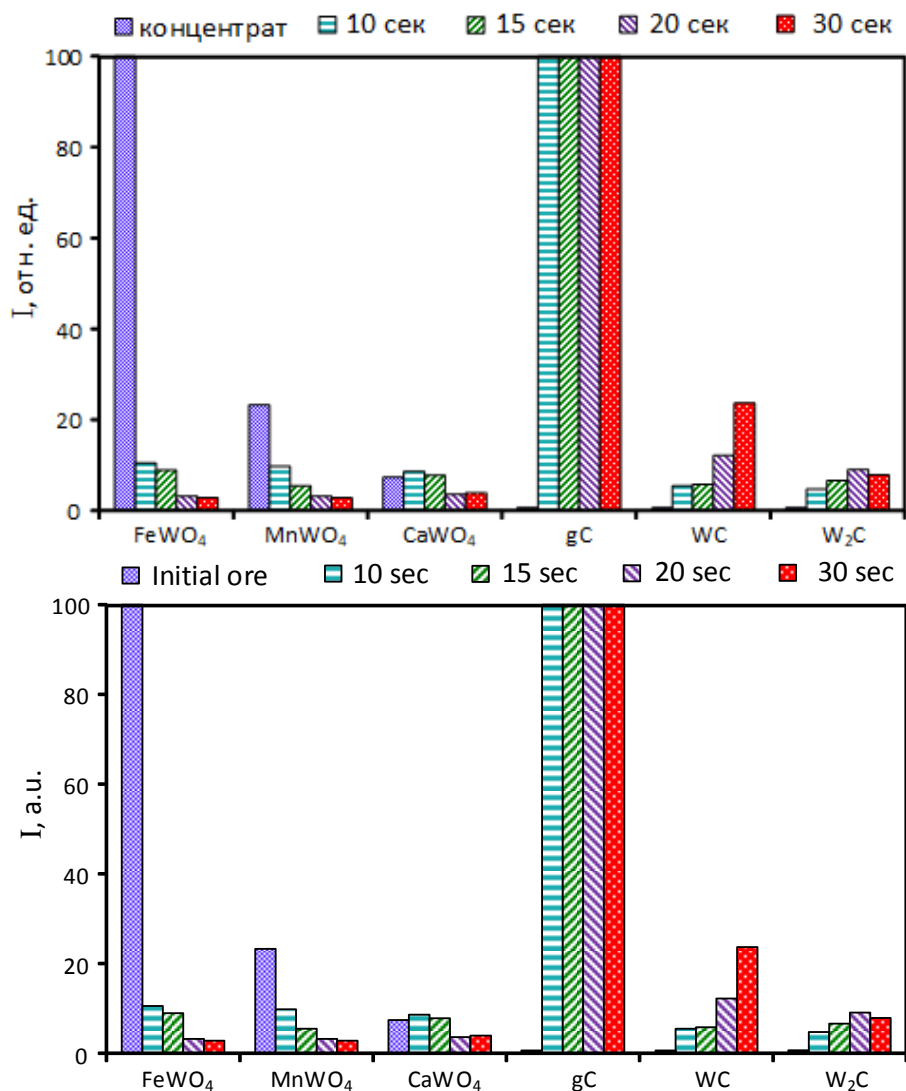


Рис. 2. Относительные интенсивности основных кристаллических фаз в исходном вольфрамовом концентрате и продуктах электродуговой переработки от времени поддержания дугового разряда

Fig. 2. Relative intensities of the main crystalline phases in the initial tungsten concentrate and the products of electric arc processing versus the time of the maintaining of the arc discharge

Исходный рудный концентрат до его плазменной обработки, по данным растровой электронной микроскопии, состоит как из отдельных кристаллов с правильными идиоморфными очертаниями при средней размерности около 100 мкм, так и из агломератов ча-

стиц с размерами до 500 мкм. В режиме фазового контраста видна неоднородность распределения наиболее тяжелого элемента – вольфрама. Внешний вид единичных кристаллов и агломератов типичен для вольфрамовых концентратов [12].

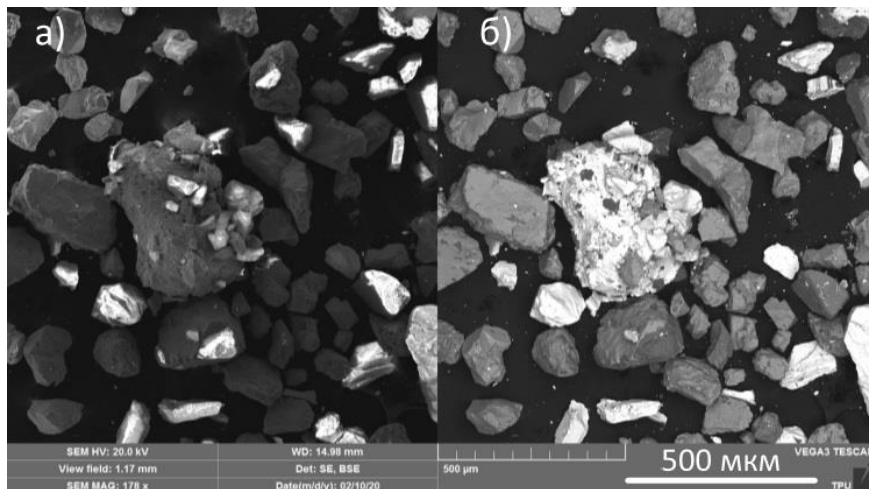


Рис. 3. Снимки с растрового электронного микроскопа типичного исходного вольфрамового концентрата: а) в режиме SE, б) в режиме фазового контраста (BSE)

Fig. 3. Pictures from a scanning electron microscope of a typical initial tungsten concentrate: a) in SE mode, б) in phase contrast mode (BSE)

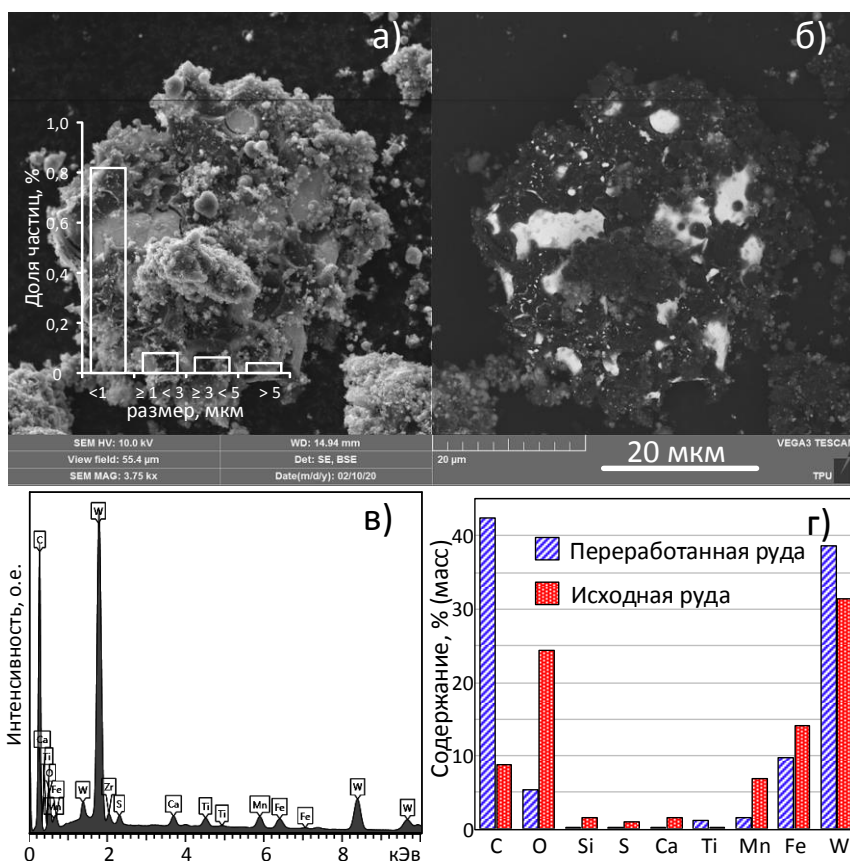


Рис. 4. Снимки с растрового электронного микроскопа: а) в SE детекторе; б) в BSE детекторе; в) типичный энергодисперсионный спектр полученного продукта синтеза; г) усредненные данные количественного анализа химического состава вольфрамового рудного концентрата (исходного материала) и продукта синтеза

Fig. 4. Images from a scanning electron microscope: а) in the SE detector; б) in the BSE detector; в) typical energy dispersive spectrum of the obtained synthesis product; г) averaged data of the quantitative analysis of the chemical composition of the initial ore concentrate and the synthesis product

По полученным данным растровой электронной микроскопии (рис. 4) типичного продукта переработки, полученный материал состоит из агрегатов с размерами порядка 25–50 мкм. Преимущественно наиболее плотный материал, содержащий вольфрам, погружен в наименее плотный материал, видимо, графит. Частицы фаз карбида вольфрама в новообразованных агрегатах характеризуются размерами преимущественно в диапазоне 1–5 мкм. По данным энергодисперсионного анализа, в исходном вольфрамовом концентрате содержатся следующие элементы: Вe, С, О, F, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Sr, Zr, Re, Pb. На рис. 4, з представлены гистограммы элементного состава исходного рудного концентрата и типичного продукта его переработки, полученные по результатам 37 измерений энергодисперсионного анализа. Образцы характеризуются значительной неоднородностью, поэтому полученные данные носят оценочный характер. Видно, что в исходном материале основную массу составляет вольфрам и кислород, в несколько меньшем количестве также содержится железо, марганец, кальций и углерод, что точно согласуется с данными рентгеновской дифрактометрии. В типичном переработанном материале основную массу порошка составляет углерод (свыше 40 мас. %) и вольфрам (свыше 35 мас. %). При этом можно заметить значительное уменьшение концентрации в рассматриваемых образцах кислорода с ~24 до 9 мас. %. Эти данные в отношении плазменной переработки рудных вольфрамовых концентратов косвенно подтверждают возможность успешной реализации процесса синтеза кристаллических фаз карбида вольфрама в виде порошка из оксидных фаз в составе используемого исходного рудного концентрата.

Заключение

Согласно представленным данным, можно сделать вывод о возможности синтеза субмикронных частиц кристаллических фаз карбида вольфрама безвакуумным электродуговым методом, используя в качестве

исходного сырья вольфрамовый рудный концентрат. При этом продукт электродуговой переработки загрязнен графитом и другими кристаллическими фазами, очевидно, остатками непрореагировавших исходных компонентов, и, вероятно, образовавшимися карбидами кальция, кремния, титана, железа. На текущей стадии экспериментальных исследований, к сожалению, не удалось выделить фазу карбида вольфрама как отдельный продукт. Обычно подобные процессы, в том числе электродуговые, являются частью технологической цепочки, включающей также стадии обработки продуктов HCl, NaOH, водой, просеивания, магнитной сепарации для разделения различных фаз [12, 13, 17]. В сравнении с традиционными методами, основанными на карботермическом восстановлении [13], разрабатываемый метод не требует добавления в исходный материал активированного угля и магния (в количестве 2 г активированного угля и 1 г магния на 1 г перерабатываемого концентрата), не требует длительной выдержки материала при высоких температурах (50 часов и более при температуре не менее 800 °С). В отличие от прямого аналога в виде электродуговой методики, основанной на обработке вольфрамового концентрата углеродной электродуговой плазмой в графитовой ванне (тигле), разрабатываемый метод не требует расхода инертного газа, в частности аргона, применяемого в работе [17]. Также в сравнении с прямым аналогом разрабатываемый метод реализуется при времени рабочего цикла до 0,5 мин (аналог 3–5 мин), при сравнимой электрической мощности дугового разряда и плотности энергии, отнесенной к обрабатываемой площади, на которой располагается исходное сырье. При этом продукт безвакуумной электродуговой переработки, как и полученный в рамках методов-аналогов, загрязнен графитом, другими примесями, требующими разработки методов обогащения продукта.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект № 19-79-00086.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Konyashin I., Klyachko L.I. History of cemented carbides in the Soviet Union // *Int. Journal of Refractory.* – 2015. – V. 49. – P. 9–26.
2. The formation of tungsten and tungsten carbides by CVD synthesis and the proposed mechanism of chemical transformations and crystallization processes / V.V. Dushik, N.V. Rozhanskii, V.O. Lifshits, T.V. Rybkina, V.P. Kuzmin // *Materials Letters.* – 2018. – V. 228. – P. 164–167.
3. Formation of nanoscale carbon structures in the surface layer of metals under the impact of high intensity ion beam / G.E. Remnev, V.V. Ugllov, V.I. Shymanski, S.K. Pavlov, A.K. Kuleshov // *Applied Surface Science.* – 2014. – V. 310. – P. 204–209.
4. A simple route to produce tungsten carbide powders by high-energy ball milling and annealing / R.M.T. Fernique, S. Savoie, M. Gariépy, N. Braidry, R. Schulz // *Ceramics International.* – 2020. – V. 40. – № 2. – P. 1736–1742.
5. Plasma synthesis of tungsten carbide and cobalt nanocomposite powder / R. Taegong, H.Y. Sohn, K.S. Hwang, Z. Fang // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2009. – V. 481. – P. 274–277.
6. Dash T., Nayak B.B. Tungsten carbide-titanium carbide composite preparation by arc plasma melting and its characterization // *Ceramics International.* – 2019. – V. 45. – № 4. – P. 4771–4780.
7. Исследование кинетики электроимпульсного плазменного спекания ультрамелкозернистых твердых сплавов WC-10 % Co / Е.А. Ланцев, В.Н. Чувильдеев, А.В. Нохрин, М.С. Болдин, Ю.В. Цветков, Ю.В. Благовещенский, Н.В. Исаева, П.В. Андреев, К.Е. Сметанина // *Физика и химия обработки материалов.* – 2019. – № 6. – С. 36–51.
8. Fabrication of ultrafine and high-purity tungsten carbide powders via a carbothermic reduction-carburization process / K.F. Wang, G.D. Sun, Y.D. Wu, G.H. Zhang // *Journal of Alloys and Compound.* – 2019. – V. 784. – P. 362–369.
9. Нанодисперсный карбид вольфрама (WC) и углеродсодержащие наноккомпозиты (WC:nC): синтез, морфология, микроструктура / В.Н. Красильников, Е.В. Поляков, Н.А. Хлебников, М.В. Кузнецов, Н.В. Таракина // *Химия твердого тела и функциональные материалы: матер. XI семинара «Термодинамика и материаловедение».* – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2016. – С. 184–186.
10. Tungsten extractive metallurgy: a review of processes and their challenges for sustainability / L. Shen, X. Li, D. Lindberg, P. Taskinen // *Minerals Engineering.* – 2019. – V. 142. – P. 105934.
11. Yang X. Beneficiation studies of tungsten ores – a review // *Minerals Engineering.* – 2018. – V. 12. – P. 111–119.
12. Singh H., Pandey O.P. Direct synthesis of nanocrystalline tungsten carbide from scheelite ore by solid state reaction method // *Ceramics International.* – 2013. – V. 39. – № 1. – P. 785–790.

13. Singh H., Pandey O.P. Single step synthesis of tungsten carbide (WC) nanoparticles from scheelite ore // *Ceramics International*. – 2013. – V. 39. – № 6. – P. 6703–6706.
14. Балахонов Д.И. Исследование сплава системы W-C, полученного методом локального высокоэнергетического воздействия из шеелитового концентрата // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2020. – Т. 24. – № 1. – С. 195–207.
15. Получение карбида вольфрама воздействием плазмы на шеелитовый концентрат / Е.Н. Кузьмичев, С.В. Николенко, А.И. Евстигнеев, Д.И. Балахонов // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. – 2018. – Т. 1. – № 3. – С. 97–105.
16. Кузьмичев Е.Н., Балахонов Д.И. Получение функциональных материалов на основе вольфрамсодержащего многокомпонентного минерального сырья // *Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии*. – 2015. – № 3. – С. 39–44.
17. Kuzmichev E.N., Nikolenko S.V., Balakhonov D.I. Preparation of tungsten carbide from scheelite concentrate using concentrated energy fluxes // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2018. – V. 52. – № 4. – P. 619–623.
18. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge / А.Я. Пак, I.I. Shanenkov, G.Y. Mamontov, A.I. Kokorina // *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. – 2020. – V. 93. – P. 105343.
19. Arora N., Sharma N.N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: comprehensive review // *Diamond and Related Materials*. – 2014. – V. 50. – P. 135–150.
20. Low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by low-pressure air arc discharge / Y. Su, H. Wei, T. Li, H. Geng, Y. Zhang // *Materials Research Bulletin*. – 2014. – V. 50. – P. 23–25.
21. Synthesis of thin bundled single walled carbon nanotubes and nanohorn hybrids by arc discharge technique in open air atmosphere / A.J. Berkman, M. Jagannatham, R.D. Reddy, P. Haridoss // *Diamond & Related Materials*. – 2015. – V. 55. – P. 12–15.
22. Predel B. Phase equilibria, crystallographic and thermodynamic data of binary alloys // *C-W (Carbon-Tungsten)*. – 1992. – V. 5B. – P. 1–3.
23. Saito Ya., Matsumoto T., Nishikubo K. Encapsulation of carbides of chromium, molybdenum and tungsten in carbon nanocapsules by arc discharge // *Journal of Crystal Growth*. – 1997. – V. 172. – P. 163–170.

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

Пак А.Я., кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательского центра «Экоэнергетика 4.0» Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Якич Т.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кокорина А.И., студент Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 544.558

ELECTRIC ARC SYNTHESIS OF TUNGSTEN CARBIDE FROM ORE CONCENTRATES

Alexander Ya. Pak¹,
ayapak@tpu.ru

Tamara Yu. Yakich¹,
cherkasovatu@tpu.ru

Aleksandra I. Kokorina¹,
aik48@tpu.ru

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

The relevance of the study is related to the growing world consumption of tungsten carbide based materials and its possible application in many various fields: cutting tools manufacturing, powder, metallurgy catalysis, etc. In this case the search for new energy effective low-cost methods for tungsten ores processing is a well-known important topic.

The aim of the study is to carry out the research for finding out the operation parameters of vacuum-free arc plasma synthesis of tungsten carbides in atmospheric plasma using tungsten-containing ore concentrate as an initial material, which provide the spontaneous self-shielding effect of the reaction volume from atmospheric oxygen.

Objects: synthesis of tungsten carbide in a DC arc discharge plasma from a tungsten-containing ore concentrate by a non-vacuum method.

Methods: vacuum-free electric arc synthesis method, X-ray powder diffractometry on a Shimadzu XRD 7000s X-ray diffractometer ($\lambda=1,54060 \text{ \AA}$), scanning electron microscopy using a TESCAN VEGA 3 SBU microscope (TESCAN, Czech Republic) equipped with an attachment for energy dispersive analysis (EDS) ODS Max 50 with Si/Li crystal detector.

Results. A series of experiments was carried out on the synthesis of tungsten carbides in a DC arc discharge from tungsten ore concentrate, as a result of X-ray diffraction data of several obtained samples, scanning electron microscopy and analysis, it was found that the phases of tungsten carbide WC and W₂C can be identified in the products of electric arc processing of ore concentrate, while complete processing of the initial material is observed with the duration of electric arc processing not less than 30 s (with an arc energy of not less than 95 kJ). According to the obtained data with an increase in the synthesis time, the proportion of W₂C decreases, while the proportion of tungsten carbide WC increases.

Key words:

Arc discharge, atmospheric plasma, vacuum free synthesis, tungsten ore concentrate, scheelite, wolframite, tungsten carbide

The research was carried out due to the grant of the Russian Science Foundation, project no. 19-79-00086.

REFERENCES

- Konyashin I., Klyachko L. I. History of cemented carbides in the Soviet Union. *Int. Journal of Refractory*, 2015, vol. 49, pp. 9–26.
- Dushik V.V., Rozhanskii N.V., Lifshits V.O., Rybkina T.V., Kuzmin V.P. The formation of tungsten and tungsten carbides by CVD synthesis and the proposed mechanism of chemical transformations and crystallization processes. *Materials Letters*, 2018, vol. 228, pp. 164–167.
- Remnev G.E., Uglov V.V., Shymanski V.I., Pavlov S.K., Kuleshov A.K. Formation of nanoscale carbon structures in the surface layer of metals under the impact of high intensity ion beam. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 310, pp. 204–209.
- Fernique R.M.T., Savoie S., Gariépy M., Braidy N., Schulz R. A simple route to produce tungsten carbide powders by high-energy ball milling and annealing. *Ceramics International*, 2020, vol. 40, no. 2, pp. 1736–1742.
- Taegong R., Sohn H.Y., Hwang K.S., Fang Z. Plasma synthesis of tungsten carbide and cobalt nanocomposite powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 481, pp. 274–277.
- Dash T., Nayak B.B. Tungsten carbide-titanium carbide composite preparation by arc plasma melting and its characterization. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, no. 4, pp. 4771–4780.
- Lantsev E.A., Chuvildeev V.N., Nokhrin A.V., Boldin M.S., Tsvetkov Yu.V., Blagoveshchenskiy Yu.V., Isaeva N.V., Andreev P.V., Smetanina K.E. Study of the kinetics of electric pulse plasma sintering of ultrafine-grained hard alloys WC-10 % Co. *Physics and Chemistry of Material Processing*, 2019, no. 6, pp. 36–51. In Rus.
- Wang K.F., Sun G.D., Wu Y.D., Zhang G.H. Fabrication of ultrafine and high-purity tungsten carbide powders via a carbothermic reduction-carburization process. *Journal of Alloys and Compound*, 2019, vol. 784, pp. 362–369.
- Krasilnikov V.N., Polyakov E.V., Khlebnikov N.A., Kuznetsov M.V., Tarakina N.V. Nanodispersnye karbid volframa (WC) i uglerodsoderzhashchie composity (WC:nC): sintez, morfologiya, mikrostruktura [Nanodispersed tungsten carbide (WC) and carbon-containing nanocomposites (WC:nC): synthesis, morphology, microstructure]. *XI seminar. Termodinamika i materialovedenie [XI seminar. Thermodynamics and Materials Science]*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2016. pp. 184–186.
- Shen L., Li X., Lindberg D., Taskinen P. Tungsten extractive metallurgy: a review of processes and their challenges for sustainability. *Minerals Engineering*, 2019, vol. 142, pp. 105934.
- Yang X. Beneficiation studies of tungsten ores – a review. *Minerals Engineering*, 2018, vol. 12, pp. 111–119.
- Singh H., Pandey O.P. Direct synthesis of nanocrystalline tungsten carbide from scheelite ore by solid state reaction method. *Ceramics International*, 2013, vol. 39, no. 1, pp. 785–790.
- Singh H., Pandey O.P. Single step synthesis of tungsten carbide (WC) nanoparticles from scheelite ore. *Ceramics International*, 2013, vol. 39, no. 6, pp. 6703–6706.
- Balakhonov D.I. Investigation of the alloy of the W-C system obtained by the method of local high-energy impact from scheelite concentrate. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 195–207. In Rus.
- Kuzmichev E.N., Nikolenko S.V., Evstigneev A.I., Balakhonov D.I. Obtaining tungsten carbide by plasma action on scheelite concentrate. *Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University*, 2018, vol. 1, no. 3, pp. 97–105. In Rus.

16. Kuzmichev E.N., Balakhonov D.I. Obtaining functional materials based on tungsten-containing multicomponent mineral raw materials. *Plasma, high-frequency, microwave and laser technologies*, 2015, no. 3, pp. 39–44. In Rus.
17. Kuzmichev E.N., Nikolenko S.V., Balakhonov D.I. Preparation of tungsten carbide from scheelite concentrate using concentrated energy fluxes. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2018, vol. 52, no. 4, pp. 619–623.
18. Pak A.Ya., Shanenkov I.I., Mamontov G.Y., Kokorina A.I. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2020, vol. 93, pp. 105343.
19. Arora N., Sharma N.N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: comprehensive review. *Diamond and Related Materials*, 2014, vol. 50, pp. 135–150.
20. Su Y., Wei H., Li T., Geng H., Zhang Y. Low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by low-pressure air arc discharge. *Materials Research Bulletin*, 2014, vol. 50, pp. 23–25.
21. Berkman A.J., Jagannatham M., Reddy R.D., Haridoss P. Synthesis of thin bundled single walled carbon nanotubes and nanohorn hybrids by arc discharge technique in open air atmosphere. *Diamond & Related Materials*, 2015, vol. 55, pp. 12–15.
22. Predel B. Phase equilibria, crystallographic and thermodynamic data of binary alloys. *C-W (Carbon-Tungsten)*, 1992, vol. 5B, pp. 1–3.
23. Saito Ya., Matsumoto T., Nishikubo K. Encapsulation of carbides of chromium, molybdenum and tungsten in carbon nanocapsules by arc discharge. *Journal of Crystal Growth*, 1997, vol. 172, pp. 163–170.

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Alexander Ya. Pak, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Tamara Yu. Yakich, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksandra I. Kokorina, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 339.13:553.631

ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СОЛЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ

Боярко Григорий Юрьевич¹,
gub@tpu.ru

Хатьков Виталий Юрьевич^{1,2},
V.Khatkov@adm.gazprom.ru

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

² ПАО «Газпром»,
Россия, 196143, г. Санкт-Петербург, пл. Победы, 2.

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения состояния соляной промышленности России при наличии значительной импортозависимости по хлориду натрия.

Цель: изучение динамики товарных потоков (производства, импорта, экспорта, потребления) хлорида натрия и производимых из него товарных продуктов, их цен (мировых, российского импорта и экспорта), сырьевой базы каменной соли России и перспектив увеличения ее национального производства.

Методы: статистический, графический, логический.

Результаты. Соляная промышленность России, несмотря на значительные объемы добычи (до 6,5 млн т/год) на фоне роста потребления (+3,8 %/год, до 7,8 млн т/год), длительное время являлась импортозависимой отраслью, импортируя до 2,4 млн т/год, или до 45 % от национального потребления. Лишь в 2019 г. доля импорта каменной соли снизилась до 18 %. Зависимость обусловлена устоявшимися товарными потоками каменной соли в экономическом пространстве СНГ, первоначально в основном с Украины. После политических санкций 2014 г. поток украинской соли был замещен увеличением импорта из Беларуси и Казахстана. Сырьевая база каменной соли России практически не ограничена, но востребованы преимущественно объекты добычи поблизости от главных потребителей (население Европейской части России и химические предприятия запада страны). Фактор транспортной логистики для каменной соли является определяющим. Создание новых центров добычи каменной соли, а также расширение имеющихся производств хлористого натрия, проблемно ввиду невысокой стоимости этого товара. Поэтому темпы производства соли медленно замещали импортные потоки каменной соли на фоне опережающего роста ее национального потребления. Рост национального производства каменной соли происходил в основном за счет увеличения выпуска попутного технического хлорида натрия при добыче калийных солей ПАО «Уралкалий» (с 0,76 млн т в 2015 г. до 1,8 млн т в 2019 г.). Увеличение потребления технической соли обусловлено ростом производства соляной кислоты (+3,5 %/год), гипохлоритов, хлоратов и перхлоратов (+2,4 %/год), а также значительным ростом потребления антиобледенительных материалов. Увеличение объемов заготовки поваренной соли возможно на объектах геотехнологической разработки месторождений ПАО «Руссоль» и АО «Башкирская содовая компания». Прирост объемов добычи технической соли наиболее реален путем увеличения выхода попутного хлорида натрия при добыче калийных солей в ПАО «Уралкалий», а также в рамках подготавливаемого проекта строительства Гремячинского ГОКа АО «МХК "ЕвроХим"».

Ключевые слова:

Соляная промышленность России, сырьевая база, техническая соль, пищевая соль, добыча, импорт, потребление, импортозависимость.

Введение

Хлорид натрия (каменная соль, садовая соль, поваренная соль) подразделяется на пищевую, кормовую и техническую соль. Самое массовое потребление хлорида натрия в России идет на пищевые нужды (2,8–3,5 млн т/год). Техническая соль используется в крупнотоннажном химическом производстве (2,5–4,2 млн т/год), в котором из хлорида натрия получают хлор, кальцинированную и каустическую соду, соляную кислоту, хлораты, гипохлораты и перхлораты [1, 2]. Значительные объемы хлорида натрия используются в нефтегазовой отрасли для изготовления буровых растворов. Появился новый емкий рынок потребления технической соли для производства антигололедных материалов. Хлорид натрия (каменная соль) представляет собой широко распространенное и относительно дешевое сырье. Тем не менее в России сложилась ситуация, когда имеется огромная национальная сырьевая база подготовленных месторождений каменной и садовой соли, устойчиво рабо-

тают крупные добывающие компании, и в то же время имеет место значительный импорт этого сырья (до 2,5 млн т/год) [3–6]. Для определения проблем российского рынка соли необходимо произвести анализ состояния национальной минерально-сырьевой базы соли, тенденций ее спроса и предложения. По результатам анализа возможна выработка рекомендаций по дальнейшему развитию соляной промышленности.

Методы исследования

С целью изучения российского рынка соли и соляных продуктов были обработаны данные по движению их товарных потоков за 2002–2019 гг., по динамике мировых цен и цен российского импорта и экспорта хлорида натрия. Источники информации: базы данных Федеральной службы государственной статистики [7] и Федеральной таможенной службы России [8], статистические данные ООН [9], обзоры информационных центров [10, 11].

Объемы товарных потоков солевых продуктов учтены в метрических тоннах, а цены – в долларах США за тонну товара. Доли импорта определялись по отношению импортных объемов к объемам национального потребления, доли экспорта – по отношению экспортных объемов к объемам национального производства. Среднемировые цены соли рассчитаны по суммарным объемам и стоимости мирового экспорта и импорта.

Темпы годовых изменений во времени абсолютных показателей (объемы, стоимость) определяются в виде сложных процентов, относительных показателей (цены, доли) – в виде простых процентов.

Состояние соляной отрасли России

Если рассматривать галургическую промышленность минеральных солей формально, то она включает в себя кроме хлоридов натрия (каменной соли) еще и хлориды калия, гидрокарбонаты и сульфаты натрия. Но калийные соли представляют собой отдельное крупнотоннажное производство (7–8 млн т/год), направленное на выпуск исключительно калийных минеральных удобрений, и это направление необходимо рассматривать отдельно. Гидрокарбонаты натрия (природная сода), сульфаты натрия ввиду редкого нахождения этих видов минеральных солей на территории России добываются в ограниченных объемах (первые тысячи тонн в год). В нашем случае соляная промышленность рассматривается исключительно как комплекс предприятий по производству и переработке хлорида натрия (пищевой и технической соли).

Хлорид натрия (каменная соль, садовая соль, поваренная соль) – природное легко растворимое в воде соединение, в природе встречается в растворенном виде в морской воде и рассолах соляных озер, а также в твердом виде (соляные минералы, галогенные породы).

Предприятия соляной промышленности добывают и перерабатывают соли, находящиеся в галогенных породах ископаемых отложений, а также из поверхностных вод и рассолов.

На рис. 1 показана география соляных провинций России [12, 13], месторождений каменной соли, добывающих ее предприятий и производств, потребляющих хлорид натрия.

В осадочном чехле земной коры всего мира находится 25–30 млн км³ (70–80×10¹⁵ т) различных минеральных солей, ресурсы солей в России весьма велики, измеряемые сотнями триллионов тонн. В Восточно-Сибирском соленосном бассейне они оцениваются в 1,68×10¹⁵ т, в Прикаспийской – 37,2×10¹⁴ т, в Уральском – 3,4×10¹² т [12–14]. Суммарные мощности соляных отложений по различным бассейнам оцениваются от 75 м в Московском до 2000 м в Восточно-Сибирском. Запасы подготовленных месторождений составляют сотни миллионов и миллиарды тонн.



Рис. 1. Соленосные провинции, предприятия, добывающие и перерабатывающие соляные продукты: 1 – соленосные бассейны (I – Предкавказский, II – Калининградский [часть Центрально-Европейского], III – Московский, IV – Прикаспийский, V – Приуральский [Верхнекамский], VI – Южно-Сибирский [Барабино-Кулундинский], VII – Минусинский, VIII – Восточно-Сибирский [Ангара-Ленский], IX – Хатангский), 2–4 – месторождения (2 – каменной соли, 3 – самосадочной [озерной] поваренной соли, 4 – сульфатов натрия), 5, 6 – горнодобывающие предприятия, реализующие минеральные соли (5 – действующие, 6 – остановленные), 7 – химические предприятия по переработке соляного сырья

Fig. 1. Saline provinces and company producing and processing salt products: 1 – saline basins (I – Pre-Caucasian, II – Kaliningrad [part of Central European], III – Moscow, IV – Caspian, V – Ural [Verkhnekamsky], VI – South Siberian [Barabino-Kulundinsky], VII – Minusinsky, VIII – East Siberian [Angara-Lena], IX – Khatanga), 2–4 – deposits (2 – rock salt, 3 – self-settling [lake] table salt, 4 – sulfates sodium), 5, 6 – mining companies that sell mineral salts (5 – active, 6 – stopped), 7 – chemical plants that process salt raw materials

Ресурсная база каменной соли России не ограничивается подготовленными месторождениями, прирост запасов возможен как за счет доразведки периферии известных месторождений (имеющийся фонд забалансовых запасов), так и за счет разведки новых месторождений.

Добыча каменной соли в России осуществлялась начиная с XII в. путем ее выварки из соляных источников и подземных рассолов. Практически все известные к настоящему времени месторождения каменной соли были охвачены кустарными, а в некоторых случаях и весьма масштабными, разработками. Предпочтение отдавалось тем промыслам, которые находились ближе к центрам массового потребления – на месторождениях Московской соленосной провинции [15]. При индустриализации соляной промышленности, сопровождавшейся падением цен на соль, эти промыслы оказались неконкурентоспособными, и их разработка была остановлена (Сольвычегодское, Сереговское, Усть-Кутское, Дис-Дагское и другие месторождения). По причине отдаленности от потребителей ограничено развитие соляной промышленности в крупнейшей Восточно-Сибирской соленосной провинции, даже в непосредственной близости от железных дорог в Иркутской области.

Лидирует в производстве хлорида натрия в России холдинг ООО «Руссо́ль» (г. Оренбург), управляющий центрами добычи каменной соли (рис. 1):

- ЦДПС «Бассоль» из озерной садочной соли озера Баскунчак в Астраханской области с годовой добычей до 1,8 млн т/год;
- ЦДПС «Илецксо́ль» из каменной соли Илецкого месторождения в Оренбургской области (запасы 568 млн т, добыча 275 тыс. т/год);
- ЦДПС «Новомосковский» из каменной соли Новомосковского месторождения в Тульской области (запасы 96 млн т, добыча 200 тыс. т/год);
- ЦДПС «Усо́лье» из каменной соли Усо́ль-Сибирского месторождения в Иркутской области (запасы 4,4 млрд т, добыча 100 тыс. т/год).

Из других предприятий, осуществляющих добычу солей, следует отметить:

- АО «Уралкалий» на Верхнекамском месторождении калийных солей в Пермском крае (попутный продукт хлорид натрия – до 1,8 млн т/год, запасы NaCl – 4,6 млрд т);
- АО «Башкирская содовая компания» на Яр-Бишкадакском месторождении каменной соли (2,2 млрд т) в Республике Башкортостан (рассолов до 9 млн м³/год);
- АО «Тыретский солерудник» на Тыретском месторождении каменной соли в Иркутской области (запасы 1,2 млрд т, добыча до 500 тыс. т/год);
- АО «Саянскхимпласт» (рассолов до 1,5 млн м³/год [эквивалент 495 тыс. т NaCl/год]) на Зиминском месторождении каменной соли (1,6 млрд т) в Иркутской области;
- Братский филиал АО «Группа "Илим"» – добыча рассолов для нужд Братского хлорного завода на Братском месторождении каменной соли (0,4 млрд т) в Иркутской области;

- АО «Иреляхнефть» на Иреляхском месторождении каменной соли в Республике Саха-Якутия (запасы 784 млн т, добыча до 25 тыс. т/год);
- ООО «Магмайн» на Светлоярском месторождении каменной соли в Волгоградской области (запасы 1,08 млрд т, добыча геотехнологическим способом для обеспечения потребностей АО «Кастик»);
- ООО «Алтайская соледобывающая компания» на озере Бурлинское в Алтайском крае (до 15 тыс. т/год);
- АО «Кимпендйская соляная компания» на Кимпендйских соляных источниках в Республике Саха-Якутия (до 5 тыс. т/год).

Имеются разведанные и подготовленные к освоению месторождения каменной соли: Шедокское в Краснодарском крае (2 млрд т), Керженское в Кировской области (700 млн т), Белбажское в Нижегородской области (2,5 млрд т), Шумковское (160 млн т) в Пермском крае, Стерлитамакское (1,3 млрд т) и Стерлибашеевское (500 млн т) в Республике Башкортостан, Талаканское (4,1 млрд т), Наманинское (748 млн т) и Олекминское (892 млн т) в Республике Саха (Якутия).

Рассматриваются инвестиционные проекты организации разработки Белбажского (ПАО «Соль Руси») и Шедокского (Администрация Мостовского района Краснодарского края) месторождений каменной соли.

На рис. 2, а приводится динамика рынка хлорида натрия в России за 2002–2019 гг. Национальное производство (добыча) соли длительное время (до 2018 г.) колеблется в пределах от 2,3 до 4,3 млн т/год. Лишь в 2019 г. произошло серьезное увеличение до 6,5 млн т. В то же время потребление хлорида натрия в России значительно больше собственного производства с отчетливым ростом с 4,3 млн т в 2002 г. до 7,8 млн т в 2019 г. Темпы среднегодового роста потребления хлорида натрия в +3,8 %/год опережают рост производства в +3,5 %/год (табл. 1), что свидетельствует о необходимости дальнейшего увеличения объемов национальной добычи соли.

Дефицит потребления покрывается по импорту, который вырос с 0,7 млн т в 2002 г. до максимума 2,4 млн т в 2013 г. (стоимостью 137 млн \$США) и начал в дальнейшем снижаться до 1,4 млн т в 2019 г. Среднегодовое изменение объемов импорта каменной соли составило +3,8 % (табл. 1), что пропорционально динамике прироста потребления. До 2016 г. основным поставщиком хлорида натрия в Россию была Украина (33–70 % импорта), но в 2016 г. хлорид натрия был включен в санкционный список запрета импортных покупок, и в 2017 г. импорт соли из этой страны прекратился. Импортный дефицит соли тут же был перекрыт наращиваемыми поставками из Беларуси (с 26 до 70 %) и Казахстана (с 5 до 18 %) (рис. 2, d).

На рис. 2, b показана динамика мировых цен экспорта и импорта хлорида натрия, а также цены его импорта в Россию. Превышение мировых цен импорта над экспортом (за счет транспортных и таможенных расходов) составляет 10–20 %. Мировые цены на соль росли с 2002 г. для экспорта (импорта) с 25 (32) до 50 (55) \$/т в 2008 г. В дальнейшем средние экспортные (импортные) цены на хлорид натрия в 2009–

2019 г. находятся в коридоре 42–50 (54–64) \$/т. Цена импорта хлористого натрия в Россию в 2002–2008 гг. была на 30...60 % ниже среднемировых импортных цен, но начиная с 2009 г. соотношение цены российского импорта со среднемировыми стали близкими – +5...–10 %. Цена импорта соли с Украины (рис. 2, e) всегда была ниже цены среднероссийского импорта, причем имела тенденция к увеличению разницы с – 6 % в 2002 г. до –20 % в 2007 г. и до –58 % в 2015 г. Цены же импорта хлористого натрия из Беларуси и

Казахстана сопоставимы со среднемировыми. Кроме этого, для Казахстана имеется тенденция снижения цены с –3 % от среднероссийской цены импорта в 2015 г. до –31 % в 2019 г.

Начиная с 2005 г. доля импорта хлорида натрия была выше на 25 % (рис. 2, c), т. е. этот товарный продукт относился к *импортозависимым* [16–18]. Лишь в 2019 г., после резкого роста национальной добычи (на 76 %), доля импорта соли в национальном потреблении снизилась до 18 %.

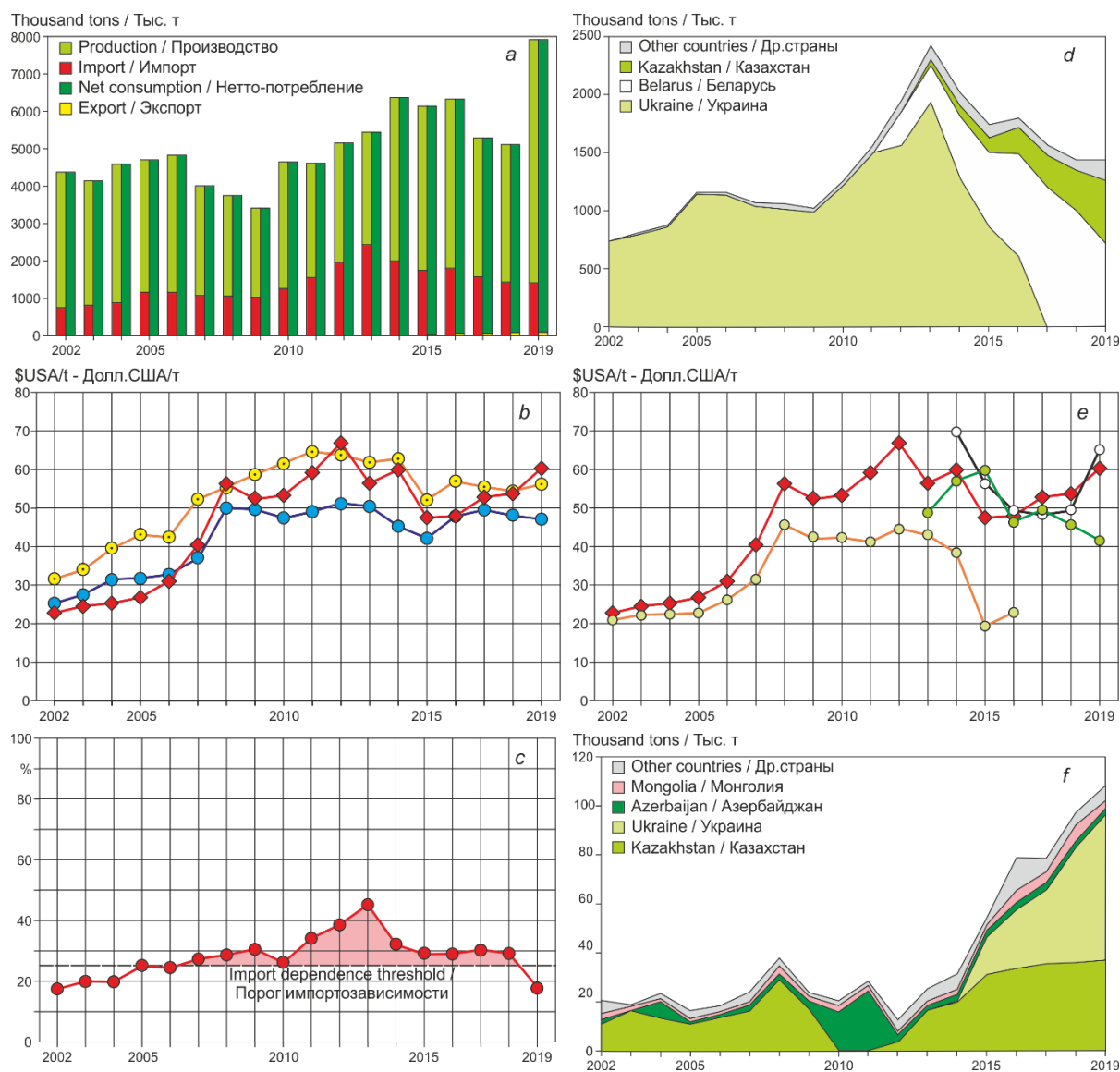


Рис. 2. Динамика показателей товарных потоков хлорида натрия за 2002–2019 гг. Составлено по обобщенным данным [8–12]. а) балансы российского рынка хлорида натрия; б) цены международной торговли хлорида натрия (● – среднемировая цена экспорта, ◐ – среднемировая цена импорта, ◆ – цена импорта в Россию); в) доля импорта хлорида натрия от национального потребления России; д) импорт хлорида натрия в Россию по странами-поставщикам; е) цены импорта хлорида натрия в Россию по странам-поставщикам (◐ – Украина, ◑ – Казахстан, ◒ – Беларусь, ◆ – средняя цена импорта в Россию); ф) экспорт хлорида натрия из России по странами-покупателям

Fig. 2. Dynamics of indicators of commodity flows of sodium chloride for 2002–2019. Compiled from generalized data [8–12]. а) balances of the Russian sodium chloride market; б) international trade prices of sodium chloride (● – average world export price, ◐ – average world import price, ◆ – price of import to Russia); в) share of sodium chloride imports from national consumption of Russia; д) import of sodium chloride to Russia by supplier countries; е) import prices of sodium chloride to Russia by supplier countries (◐ – Ukraine, ◑ – Kazakhstan, ◒ – Belarus, ◆ – average import price to Russia); ф) export of sodium chloride from Russia to the buyer countries

Таблица 1. Объемы товарных потоков, доли импорта (от потребления), экспорта (от производства), среднегодовые изменений объемов соляных продуктов в 2002 и 2019 гг. Составлено по данным Службы государственной статистики [7] и Таможенной службы РФ [8]

Table 1. Volume of commodity flows, the share of imports (from consumption), exports (from production), the average annual changes in the volume of salt products in 2002 and 2019. Compiled according to the State Statistics Service [7] and the Customs Service of the Russian Federation [8]

Товарные продукты Commercial products	Производство Production		Импорт Import		Экспорт Export		Потребление Consumption		Доля импорта Share of imports		Доля экспорта Export share		Среднегодовые изменения объемов Average annual volume changes			
	тыс. т/ thousand tons										%					
	2002	2019	2002	2019	2002	2019	2002	2019	2002	2019	2002	2019	производства production	импорта import	экспорта export	потребления consumption
Хлористый натрий (соль каменная) Sodium chloride (rock salt)	3619,5	6388,1	751,6	1427,2	21,2	109,0	4349,9	7706,3	17,3	18,1	0,6	1,7	+3,5	+3,8	+10,1	+3,8
Карбонат натрия (сода кальцинированная) Disodium carbonate (soda ash)	2384,5	3383,2	49,9	16,1	487,9	769,5	1946,5	2629,8	2,6	0,6	20,5	22,7	+2,1	-6,5	+2,7	+1,8
Каустическая сода (натр едкий) Caustic soda (caustic soda)	1146,3	1290,7	1,3	34,5	39,3	67,2	1108,3	1258,0	0,1	2,7	3,4	5,2	+0,7	+21,3	+3,2	+0,8
Кислота соляная Hydrochloric acid	686,3	1221,7	0,0	11,8	17,1	19,2	669,2	1214,3	0,0	1,0	2,5	1,6	+3,5	Н.д. N.d.a.	+0,7	+3,6
Хлор/Chlorine	Н.д.* N.d.a.*	449,7	Н.д. N.d.a.	0,8	Н.д. N.d.a.	2,9	Н.д. N.d.a.	447,6	Н.д. N.d.a.	0,2	Н.д. N.d.a.	0,6	Н.д. N.d.a.	Н.д. N.d.a.	Н.д. N.d.a.	Н.д. N.d.a.
Кальций хлористый Calcium chloride	211,6	330,0	43,9	14,5	19,4	29,5	236,1	315,0	18,6	5,6	9,2	10,7	+2,7	-6,3	+2,5	+1,7
Гипохлориты, хлораты и перхлораты Hypochlorites, chlorates, and perchlorates	185	278,5	9,2	76,4	10,1	8,4	184,1	346,5	5,0	22,0	5,5	3,0	+2,4	+13,3	-1,1	+3,5
в т. ч. гипохлорит кальция including calcium hypochlorite	60,9	35,0	1,0	21,8	4,9	0,8	57,0	56,0	1,8	38,9	8,0	2,3	-3,0	+19,8	+10,0	-0,2

* Н.д./N.d.a. – нет данных/no data available.

В условиях изменения объемов и направлений товарных потоков с 2014 г. несколько увеличился экспорт соли из России (рис. 2, f) с 20–30 тыс. т/год в 2002–20014 гг. до 109 тыс. т в 2019 г., причем основное увеличение приходится на Казахстан и Украину.

По видам использования соли (табл. 2) до 2018 г. преобладало производство и потребление пищевой соли (62–65 и 53–56 %, соответственно), но в результате значительного увеличения национальной добычи

в 2019 г. наметилось серьезное увеличение долей производства и потребления технической соли – до 53,5 и 54,7 %, соответственно. Следует отметить также тенденцию снижения объемов (и долей) импорта технической соли с 1078 тыс. т (68,1 %) в 2017 г. до 857 тыс. т (60,0 %) в 2019 г. Идет увеличение объемов экспорта и пищевой, и технической солей, но ввиду их малой размерности (n×10 тыс. т/год) эти изменения неактуальны.

Таблица 2. Динамика потоков соли по видам товарного использования за 2017–2019 гг. Составлено по данным Службы государственной статистики [7] и Таможенной службы РФ [8]

Table 2. Dynamics of salt flows by type of commodity use for 2017–2019. Compiled according to the State Statistics Service [7] and the Customs Service of the Russian Federation [8]

Виды товарного использования Types of commercial use	Соль пищевая/Table salt			Соль техническая/Technical salt		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019
Объемы, тыс. т/Volumes, thousand tons						
Производство/Production	2312,6	2360,1	2972,6	1399,5	1236,5	3415,5
Импорт/Import	504,8	498,0	570,3	1078,0	949,0	856,9
Экспорт/Export	47,8	53,1	54,8	31,8	44,6	54,2
Потребление/Consumption	2769,6	2805,0	3488,1	2445,7	2140,9	4218,2
Доли от суммарных объемов/Shares of total volumes, %						
Производство/Production	62,3	65,6	46,5	37,7	34,4	53,5
Импорт/Import	31,9	34,4	40,0	68,1	65,6	60,0
Экспорт/Export	60,1	54,4	50,3	39,9	45,6	49,7
Потребление/Consumption	53,1	56,7	45,3	46,9	43,3	54,7

Техническая соль чаще всего употребляется в химической промышленности. В табл. 1 и на рис. 3 приводятся данные по крупнотоннажным товарным продуктам, произведенным при переработке хлорида натрия. В 2019 г. произведено 3,4 млн т карбоната

натрия (кальцинированной соды), 1,3 млн т каустической соды, 1,2 млн т соляной кислоты, 450 тыс. т хлора и 278 тыс. т гипохлоритов. Имеется экспортный поток соды (до 500 тыс. т/год, или до 22 % от производства). Экспорт остальных химических про-

дуктов, производимых из каменной соли, незначителен – менее 5 % от их производства. Имеет место увеличение объемов импорта гипохлоритов, хлоратов и перхлоратов до 76 тыс. т в 2019 г. (22 % от потребления) с приростом +13 %/год, в т. ч. для гипохлорита кальция – до 22 тыс. т (39 % от потребления) и с приростом +20 %/год. Потребление продуктов, произведенных из соли, увеличивается во времени для соляной кислоты (до 1,2 млн т/год, +3,6 %/год) и гипохлоритов + хлоратов + перхлоратов (до 348 тыс. т/год, +3,5 %/год).

Главными потребителями хлорида натрия в химической промышленности являются содовые заводы АО «Башкирская содовая компания» (Башкортостан), АО «Березниковский содовый завод» и ПАО «Крым-

ский содовый завод», химические предприятия неорганического и органического синтеза АО «ВТЕ-Юго-Восток» и ООО «Метахим» (г. Москва), ООО «Хлорехима» (Московская обл.), ООО «Новомосковский хлор» (Тульская обл.), ПАО «Химпром» (Чувашия), АО «Каустик (Волгоградская обл.), ПАО «Галоплимер Пермь» (Пермский край), ООО «Химпром» (Кемеровская обл.), АО «Саянхимпласт» и Братский хлорный завод (Иркутская обл.) (рис. 1).

В нефтегазовой отрасли ежегодно используется до 300 тыс. т хлорида натрия для приготовления буровых растворов при бурении в многолетнемерзлых породах. В связи с расширением разработки нефтяных и газовых месторождений в Арктике и Восточной Сибири объемы потребления буровой соли могут возрасти.



Fig. 3. Dynamics of the balance sheets of commodity flows of multi-tonnage chemical products from salt raw materials for 2002–2019. Compiled according to generalized data [8–12]: a) disodium carbonate (soda ash); b) caustic soda (caustic soda); c) hydrochloric acid; d) calcium chloride; e) hypochlorites, chlorates and perchlorates. 1 – import, 2 – production, 3 – export, 4 – net consumption

Появился и новый быстро растущий рынок антигололедных материалов с использованием соляных

продуктов – собственно молотой соли, хлористого магния и хлористого кальция [19–21]. Емкость этого

рынка по солевому сырью уже превышает 500 тыс. т/год и он будет расти по аналогии с другими странами – к примеру, в США доля потребления соли на производство антигололедных материалов (от поставок технической соли) увеличилась с 30 % в 2000 г. до 43 % в 2020 г. [22].

Хлорид натрия является относительно дешевым сырьем, и поэтому его добыча основывается на экономических интересах потребителей, которые предпочитают наиболее близкие источники сырья (минимизация транспортных расходов), и производителей соли, выстраивающих стратегию минимальных издержек производства. Существует три технологические способа добычи соли: бассейновый, шахтный и геотехнологический.

Бассейновый способ представляет собой заготовку соли на озерах в естественных (самосадочных) и искусственных (садочных) бассейнах (оз. Баскунчак, оз. Бурлинское). Этот способ добычи является относительно простым и экономически весьма эффективным. Недостаток – неравномерность заготовок во времени ввиду влияния сезонности работ.

Шахтный способ добычи соли системой подземных горных выработок (разработки Соль-Илецкого, Верхнекамского и Тыретьского месторождений). Достоинства шахтного способа – возможность селективной разработки пластов солей разных видов, высокая управляемость производственным процессом при концентрации машинной техники и технологического оборудования [23–25]. Недостатки этого способа – большие потери солей в недрах (до 70 %), высокая опасность прорыва в выработки подземных вод, деформации земной поверхности. Для снижения опасности затоплений подземных выработок организуется опережающее замораживание околошахтных пород [26–28].

Геотехнологический способ разработки солей представляет собой организованный галургический передел с растворением в околосоляном пространстве и кристаллизацией солей из поднятых на поверхность рассолов (разработки Усолье-Сибирского и Новомосковского месторождений). Геотехнологический способ имеет некоторые преимущества перед шахтным: возможность освоения месторождений соли на большую глубину и с более сложными условиями залегания продуктивных залежей, с низкими и менее выдержанными параметрами их качества и мощности, низкие удельные капитальные затраты, высокая производительность, более высокие показатели извлечения соли из недр. Имеется также возможность встраивания в технологические цепочки потребителей соляного сырья, когда соляные рассолы подаются непосредственно в цеха их переработки (производство соды и каустика в «Башкирской содовой компании», соляной кислоты в «Новомосковском хлоре», каустика в волгоградском «Каустике», каустика и поливинилхлорида в «Саянхимпласте», хлора на Братском хлорном заводе). Из недостатков следует отметить сложность управления горным давлением массива (обрушение кровли, вплоть до деформации земной поверхности).

Обсуждение результатов обзора

Рынок хлорида натрия (каменной или поваренной соли) относится к крупнотоннажному, но дешевизна этого товарного продукта накладывает свои требования по логистике поставок сырья потребителям, экономичности новых проектов добычи соли и природоохранных ограничений [27–33].

Логистика поставок соляного сырья потребителям выбирается по принципу минимизации расстояний от источников сырья до центров их потребления. Главными потребителями поваренной соли является домохозяйства и предприятия пищевой промышленности, естественно, большей частью находящиеся в Европейской части России. Поэтому поставки соли с Прикаспийской («Бассоль», «Илецксо́ль»), и Московской («Новомосковск») соленых провинций наиболее предпочтительны. Большинство химических предприятий также находятся западнее Урала, в т. ч. и непосредственно вблизи от центров добычи («Новомосковский хлор», «Башкирская содовая компания», «Березовский содовый завод», «Галополимер-Пермь»). Востребованы остались и уже устоявшиеся товарные потоки соли из Беларуси («Мозырь-соль») и Казахстана («Павлодарсоль»), а до введения санкций – и с Украины («Артемсоль»).

Существовавшая длительное время импортная зависимость России по потреблению каменной соли не была критичной, хотя и имелась тенденция роста доли импорта до 2013 г. (рис. 2, в). Но следует отметить, что импортный поток с Украины заместился не увеличением национального производства соли, а повышением объемов импорта из Беларуси и Казахстана. Поставщики АО «Мозырьсоль», ТОО «Павлодарсоль», АО «Аралтуз» и ТОО «Inder Tuz Company» смогли значительно увеличить свои мощности добычи каменной соли, в то же время из российских источников увеличение поступлений было медленным.

Ресурсы каменной соли в России весьма велики, имеется значительное количество подготовленных к освоению месторождений. Увеличилось производство попутного хлористого натрия в ПАО «Уралкалий» с 0,76 млн т в 2015 г. до 1,8 млн т в 2019 г. Сформирован новый добывающий центр ПАО «Руссоль» в Тульской области – ЦДПС «Новомосковск» на базе Новомосковского месторождения каменной соли. Рассматриваются инвестиционные проекты организации новых центров добычи каменной соли – на Белбажском (Нижегородская область, ПАО «Соль Руси») и Шедокском (Краснодарский край, Администрация Мостовского района) месторождениях.

Рост национального производства каменной соли опять же ограничивают транспортные возможности. Промышленные мощности соляной отрасли в самой большой по запасам Восточно-Сибирской провинции ограничены спросом потребления соли населением Сибири и Дальнего Востока, мощностями химических производств в Иркутской («Саянхимпром»), Братский хлорный завод) и Кемеровской («Химпром») областях и небольшим пока спросом нефтегазовых предприятий Красноярского края, Иркутской области

и Республики Саха-Якутия. Организация здесь крупных новых центров добычи соли (Талаканское, Олекминское, Наманинское месторождения) и расширение действующих производств (Зиминское, Усолье-Сибирское, Тыретское месторождения) весьма проблематично. Появление новых участников на рынке предложения соли в Европейской части России (инвестиционные проекты Белбажского и Шедокского месторождений) также проблемно ввиду высоких рисков проектов и невысокой стоимости товарной соли. Реально осуществлять новые проекты выпуска хлорида натрия могут лишь крупные его производители, обладающие уже имеющимся техническим парком добычного оборудования и квалифицированным персоналом, а также способные привлечь значительные финансовые ресурсы (ПАО «Руссоль», АО «Башкирская содовая компания» и ПАО «Уралкалий»).

На озере Баскунчак, разрабатываемом ПАО «Руссоль», ранее добывалось до 5 млн т/год, а ныне не более 1,8 млн т/год [34]. Увеличение заготовки поваренной соли на этом месторождении не рекомендуется ввиду ограничения природного самосадочного процесса на уровне 1,7–1,8 млн т/год [35].

Возможности расширения производства шахтной добычи поваренной соли на Илецком месторождении ограничены – для крупных приращений необходимо создание нового шахтного поля или организация разработки нижних горизонтов месторождений, требующих значительных капитальных вложений [36, 37].

Наиболее предпочтительно увеличение объемов заготовки поваренной соли на Новомосковском месторождении, разрабатываемом геотехнологическим способом ЦДПС «Новомосковск» ПАО «Руссоль». Создание дополнительного поля эксплуатационных скважин и увеличение мощности выварочного производства поваренной соли не составляет сложности, все упирается в привлечение относительно небольших финансовых средств.

Осуществляется инвестиционный проект по производству выварочной поваренной соли (80 тыс. т/год) в волгоградском АО «Каустик» из рассолов, добываемых на Светлоярском месторождении.

Возможно также увеличение производства выварочной поваренной соли в АО «Башкирская содовая компания» из рассолов, добываемых на Яр-Бишкадакском месторождении.

Увеличение объемов национального производства технической соли наиболее реально путем расширения производства попутной добычи хлорида натрия при добыче калийных солей, что и осуществляется в ПАО «Уралкалий», а также может быть осуществлено на подготавливаемом к освоению Гремячинском месторождении калийных солей в Волгоградской области (проект Гремячинского ГОКа АО «МХК «ЕвроХим»).

Все чаще ставится вопрос об использовании в бальнеологических целях остановленных соляных промыслов (Сольвычегодское, Усть-Кутское, Дус-Дагское и др.), что в конечном итоге выведет многие соляные месторождения (в т. ч. находящиеся в эксплуатации) из объектов, перспективных для промышленной

разработки [38–40]. Район озера Эльтон объявлен Национальным парком, что уже исключает промышленную добычу поваренной соли на этом уникальном месторождении.

Импорт соляного сырья остается значительным, но, учитывая экономические связи в рамках Таможенного союза, объемы поставок из Беларуси и Казахстана будут зависеть в основном от ценового фактора и в меньшей степени от наращивания национального производства хлористого натрия. Экспорт российской соли весьма незначителен и вряд ли будет системно увеличиваться.

Выводы

Хлорид натрия, являясь широко распространенным и достаточно доступным минеральным сырьем, тем не менее оказался в рискованной зоне импортозависимости. Это является следствием невысокой стоимости самого сырья и проблемами привлечения значительных инвестиций для реализации новых проектов добычи и перекрытия дефицита потребления хлорида натрия.

Рост национального производства хлорида натрия (6,4 млн т в 2019 г.) с 2002 по 2019 г. составляет +3,5 %/год, и он отстает от роста потребления этого товарного продукта (+3,8 %/год). Рост производства каменной соли осуществлялся в основном за счет увеличения выпуска попутного технического хлорида натрия при добыче калийных солей ПАО «Уралкалий» (с 0,76 млн т в 2015 г. до 1,8 млн т в 2019 г.). Одновременно растет доля технического хлорида натрия в общих объемах потребления соли (до 55 % в 2019 г.). Увеличение потребления технической соли обусловлено ростом производства соляной кислоты (+3,5 %/год), гипохлоритов, хлоратов и перхлоратов (+2,4 %/год), а также значительным ростом производства и потребления антиобледенительных материалов.

Практически весь анализируемый период хлорид натрия являлся импортозависимым продуктом (до 2,4 млн т/год, или 45 % от национального потребления), и лишь в 2019 г. этот товар вышел из критической зоны импортной зависимости (1,4 млн т импорта или 18 %). Зависимость обусловлена устоявшимися товарными потоками каменной соли в экономическом пространстве СНГ, первоначально в основном с Украины. После политических санкций 2014 г. поток украинской соли был замещен увеличением импорта из Беларуси и Казахстана.

Сырьевая база каменной соли России практически не ограничена, но востребованы преимущественно объекты добычи вблизи от главных потребителей (населения в Европейской части России, пищевых и химических предприятий). Создание новых центров добычи каменной соли, как и расширение имеющихся производств хлористого натрия, проблемно ввиду невысокой стоимости этого товара. Поэтому темпы роста производства соли медленно замещали импортные потоки каменной соли на фоне опережающего роста ее национального потребления.

Наиболее предпочтительно увеличение объемов заготовки поваренной соли на объектах геотехноло-

гической разработки месторождений ПАО «Руссо́ль» (Новомосковское) и АО «Башкирская содовая компания» (Яр-Бишкадакское). Рост объемов добычи технической соли наиболее реален путем увеличения

производства попутного хлорида натрия при добыче калийных солей в ПАО «Уралкалий», а также в рамках подготавливаемого проекта строительства Гремячинского ГОКа АО «МХК «ЕвроХим».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минеральное сырье. Соли минеральные. Справочник / Ю.В. Баталин, Р.Р. Туманов, И.Н. Тихвинский, А.К. Вишняков, В.А. Хуснутдинов, В.А. Копейкин. – М.: Геоинформмарк, 1999. – 73 с.
2. Bolen W.P. Salt. Advance Release. 2016 Minerals Yearbook. U.S. Geological Survey. 2020. 23 p. URL: <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2016-salt.pdf> (дата обращения 01.11.2020).
3. Кондратьева И.Ф. Российская солевая индустрия: проблемы развития // Проблемы прогнозирования. – 2009. – № 3 (114). – С. 37–44.
4. Счисляева Е.П., Миролюбова О.В., Сайченко О.А. Развитие сырьевых рынков: российский и международный рынок каменной соли. – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2014. – 192 с.
5. Мехедькин А.А. Характеристика рынка соли в России и перспективы его развития // Управление рисками в АПК. – 2019. – № 3. – С. 27–50.
6. Пермяков Р.С. Горно-химическая промышленность России // Горный журнал. – 2015. – № 7. – С. 98–102. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.13.
7. Федеральная служба государственной статистики России. URL: <https://gks.ru/emiss> (дата обращения: 28.02.2021).
8. Федеральная таможенная служба России. URL: <http://stat.customs.gov.ru/analysis> (дата обращения: 28.02.2021).
9. A world of information. UNdata. URL: <https://data.un.org/> (дата обращения: 28.02.2021).
10. TrendEconomy. URL: [dataexplorer \(trendeconomy.ru\)](http://dataexplorer.trendeconomy.ru) (дата обращения: 28.02.2021).
11. Исследовательская группа ИНФОМАЙН. URL: <http://www.infomine.ru/> (дата обращения: 28.02.2021).
12. Иванов А.А., Воронова М.Л. Галогенные формации. – Л.: Недра, 1972. – 328 с.
13. Беленицкая Г.А. Литолого-геодинамический анализ соленосных осадочных бассейнов: дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук. – СПб, 1999. – 351 с.
14. Conditions for the salt strata formation of the Upper Pechora Basin (Russia) / S.N. Shanina, A.R. Halamay, N.V. Sokerina, O.O. Ignatovich, V.P. Morozov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1920. – V. 516. – № 1. – Article number 012018. – P. 1–12. DOI: 10.1088/1755-1315/516/1/012018.
15. Норко С.И. История становления недропользования на Руси. Ч. 2. История добычи соли в России // Недропользование. XXI век. – 2011. – № 4. – С. 98–99.
16. Хатьков В.Ю., Боярков Г.Ю. Регулирование импорта дефицитного для России минерального сырья // Горный журнал. – 2005. – № 9–10. – С. 53–56.
17. Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply / K.J. Schulz, J.H. DeYoung, R.R. Seal, D.C. Bradley. – Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2017. – 862 p. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802> (дата обращения 28.02.2021).
18. Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Critical Raw Materials Factsheets. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. – 515 p. URL: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> (дата обращения 28.02.2021).
19. Hossain S.M.K., Fu L., Lu C.-Y. Deicing performance of road salt: modeling and applications // Transportation Research Record. – 2014. – V. 2440. – P. 76–84. DOI: 10.3141/2440-10.
20. Simulation and optimization of road deicing salt usage based on Water-Ice-Salt / H.-C. Dan, J.-W. Tan, Y.-F. Du, J.-M. Cai // Cold Regions Science and Technology. – 2020. – V. 169. – № 1. – Article number 102917. – P. 1–10. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102917.
21. Settling of road-deposited sediment: influence of particle density, shape, low temperatures, and deicing salt / S.H. Rommel, L. Gelhardt, A. Welker, B. Helmreich // Water (Switzerland). – 2020. – V. 12. – № 11. – Article number 3126. – P. 1–15. DOI: 10.3390/w12113126.
22. Mineral commodity summaries 2021. U.S. Geological Survey, 200 p. URL: <https://doi.org/10.3133/mcs2021> (дата обращения 28.02.2021).
23. Häge K. German mining industry going global // Erzmetall: Journal for Exploration, Mining and Metallurgy. – 2002. – V. 55. – № 12. – P. 637–644.
24. Semenow V., Maltcher M., Petrow W. Russische Vortriebs- und Gewinnungsmaschinen für die Gewinnung von Kali- und Steinsalzen // Gluckauf: Die Fachzeitschrift für Rohstoff, Bergbau und Energie. – 2006. – V. 142. – № 11. – P. 505–508.
25. Соловьев В.А., Секунцов А.И. Технико-технологические решения по повышению производительности комбайновых комплексов на рудниках Верхнекамского месторождения // Горный журнал. – 2015. – № 2. – С. 47–50. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.08.
26. Dorn E., Kaledin O. Moderne und innovative Schachtbautechnik am Beispiel aktueller Abteufprojekte // Geomechanik und Tunnelbau. – 2013. – V. 6. – № 5. – P. 574–581. DOI: 10.1002/geot.201300029.
27. Еременко В.А., Косырева М.А. Геомеханическое обеспечение проектирования отработки запасов каменной соли // Научный вестник Арктики. – 2017. – № 2. – С. 5–18.
28. Зубов В.П. Применяемые технологии и актуальные проблемы ресурсосбережения при подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых // Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 77–83. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.16.
29. Substantiation of convergent technology data for the Pleets rocksaltmining / V.A. Eremenko, Yu.P. Galchenko, N.G. Vysotin, M.A. Kosyreva, E.D. Yakusheva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – V. 523. – № 1. – Article number 0120302019. – P. 1–10. DOI: 10.1088/1755-1315/523/1/012030.
30. Spachtholz F.X. Rohstoffeffizienz im Kali- und Steinsalzbergbau // Chemie-Ingenieur-Technik. – 2010. – V. 82. – № 11. – P. 1871–1879. DOI: 10.1002/cite.201000128.
31. Joint projects on the comparison of constitutive models for the mechanical behavior of rock salt I. Overview of the projects, reference mine for 3-D benchmark calculations, in-situ measurements and laboratory tests / K. Salzer, R.-M. Günther, W. Minkley, T. Popp, M. Wiedemann, A. Hampel, A. Pudewills, B. Leuger, D. Zapf, K. Staudmeister, R. Rokahr, K. Herchen, R. Wolters, K.-H. Lux // Mechanical Behavior of Salt VII. Proc. of the 7th Conference on the Mechanical Behavior of Salt. – Paris, 2012. – P. 221–230.
32. Mechanism of groundwater inrush hazard caused by solution mining in a multilayered rock-salt-mining area: A case study in Tongbai, China / B. Zeng, T. Shi, Z. Chen, L. Xiang, S. Xiang, M. Yang // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2018. – V. 18. – № 1. – P. 79–90. DOI: 10.5194/nhess-18-79-2018.
33. Von der idee zum Gewinnungsbergwerk – Komplexe anforderungen an die planung im kaliuna steinsalzbergbau des 21. Jahrhunderts / S. Engler, C. Ackermann, T. Teichert, H. Rauche // World of Mining – Surface and Underground. – 2019. – V. 71. – № 2. – P. 93–102.
34. Ахмадов А.-Н.Н. Геоэкологические проблемы озера Баскунчак, связанные с освоением природных ресурсов // Вестник современных исследований. – 2018. – № 12–14 (27). – С. 43–47.
35. Зеленковский П.С., Куриленко В.В. Природно-техногенная система соляного озера Баскунчак и особенности эксплуатации её ресурсов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2013. – № 4. – С. 33–52.
36. Мозер С.П., Ковалёв О.В., Тхориков И.Ю. Опыт разработки Илецкого месторождения каменной соли // Горный журнал. – 2015. – № 9. – С. 59–62. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.13.

37. Геомеханическое обеспечение проектирования отработки запасов каменной соли на Илецком месторождении / В.Н. Захаров, Е.В. Федоров, В.А. Еременко, Д.В. Лагутин // Горный журнал. – 2018. – № 2. – С. 41–47. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.06.
38. Аракчаа К.К.Д., Камбалина М.Г. Перспективы освоения Дус-Дагского месторождения каменной соли республики Тыва // Вестник Тувинского государственного университета. Естественные и сельскохозяйственные науки. – 2014. – № 2. – С. 99–104.
39. Николаев А.А. Эколого-географическое обоснование планируемого природного парка «Кемпендэй» в Республике Саха (Якутия) // Проблемы и перспективы современной науки. – 2017. – № 17. – С. 11–19.
40. About a problem of post-industrialisation of salt-mining European towns / V.P. Petrishev, S.A. Dubrovskaya, S.Y. Noreika, R.V. Riakhov, N.V. Petrisheva // Euro-eco Hannover 2014. Okologische, Technologische und Rechtliche Aspekte der Lebensversorgung: Internationaler Kongress Fachmesse. – Hannover, 2014. – P. 133–134.

Поступила 12.05.2021 г.

Информация об авторах

Боярко Г.Ю., доктор экономических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Хатьков В.Ю., начальник департамента, ПАО Газпром; соискатель нефтегазового отделения Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 339.13:553.631

CURRENT STATE OF THE RUSSIAN SALT INDUSTRY

Grigory Yu. Boyarko¹,
gub@tpu.ru

Vitaly Yu. Khatkov^{1,2},
V.Khatkov@adm.gazprom.ru

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

² Gazprom PJSC,
2, Pobedy square, St. Petersburg, 196143, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to study the state of the Russian salt industry in the presence of significant import dependence on sodium chloride.

The aim of the research is to study the dynamics of commodity flows (production, import, export, consumption) of sodium chloride and the commodity products produced from it, their prices (world, Russian imports and exports), the raw material base of rock salt in Russia and the prospects for increasing its national production.

Methods: statistical, graphical, logical.

Results. The Russian salt industry, despite significant production volumes (up to 6,5 million tons/year) and consumption growth (+3,8 %/year, to 7,8 million tons/year), has long been an import-dependent industry, importing up to 2,4 million tons/year or up to 45 % of national consumption. Only in 2019, the share of imports of rock salt decreased to 18 %. The dependence is caused by the established commodity flows of rock salt in the CIS economic space, initially mainly from Ukraine. After the political sanctions of 2014, the flow of Ukrainian salt was replaced by an increase in imports from Belarus and Kazakhstan. The raw material base of rock salt in Russia is practically unlimited, but production facilities are mainly in demand near the main consumers (the population of the European part of Russia and chemical enterprises in the West of the country). The factor of transport logistics for rock salt is crucial. The creation of new centers for rock salt extraction as well as the expansion of existing production of sodium chloride are problematic due to the low cost of this product. Therefore, the rate of salt production slowly replaced imported flows of rock salt against the background of faster growth of its national consumption. The increase in the national production of rock salt was mainly due to an increase in the production of associated technical sodium chloride in manufacturing potash salts of PJSC «Uralkali» (from 0,76 million tons in 2015 to 1,8 million tons in 2019). The increase in industrial salt consumption is caused by the growth in the production of hydrochloric acid (+3,5 %/year), hypochlorites, chlorates and perchlorates (+2,4 %/year), as well as a significant increase in the consumption of de-icing materials. The growth in volume of table salt preparation is possible at the objects of geotechnological development of the fields of PJSC Russol and JSC Bashkir Soda Company. The increase in industrial salt production is most real by increasing the yield of associated sodium chloride in the production of potash salts in PJSC «Uralkali», and also under the forthcoming project of construction of the Gremyachinskoe GOK JSC «MCC "EuroChem"».

Key words:

Russian salt industry, raw material base, industrial salt, food salt, production, import, consumption, import dependence.

REFERENCES

- Batalin Yu.V., Tumanov R.R., Tikhvinskiy I.N., Vishnyakov A.K., Khusnutdinov V.A., Kopeykin V.A. *Mineralnoe syre. Soli mineralnyye. Spravochnik* [Mineral raw material. Mineral salts. Guide]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1999. 73 p.
- Bolen W.P. *Salt. Advance Release. 2016 Minerals Yearbook*. U.S. Geological Survey, 2020. 23 p. Available at: <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2016-salt.pdf> (accessed 28 February 2021).
- Kondratyeva I.F. Russia's salt industry: Problems of development. *Studies on Russian Economic Development*, 2009, vol. 20, no. 3. pp. 254–258. DOI: 10.1134/S1075700709030034.
- Schislyayeva E.R., Mirolyubova O.V., Saychenko O.A. *Razvitie syrevykh rynkov: rossiyskiy i mezhdunarodnyy rynek kamennoy soli* [Development of raw materials markets: Russian and international rock salt market]. St-Petersburg, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University Publ., 2014. 192 p.
- Mekhedkin A.A. Characteristics of the salt market in Russia and prospects for its development. *Risk management in the agro-industrial complex*, 2019, no. 3, pp. 27–50. In Rus.
- Permyakov R.S. Mining and chemical industry of Russia. *Gornyy zhurnal*, 2015, no. 7, pp. 98–102. In Rus. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.13.
- Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki Rossii* [Federal state statistics service of Russia]. Available at: <https://gks.ru/emiss> (accessed 28 February 2021).
- Federalnaya tamozhennaya sluzhba Rossii* [Federal customs service of Russia]. Available at: <http://stat.customs.gov.ru/analysis> (accessed 28 February 2021).
- A world of information*. UNdata. Available at: <https://data.un.org/Search.aspx?q=molybdenum> (accessed 28 February 2021).
- TrendEconomy*. Available at: [dataexplorer \(trendeconomy.ru\)](http://dataexplorer.trendeconomy.ru) (accessed 28 February 2021).
- Issledovatel'skaya gruppy INFOMAJN* [INFOMINE research group] Available at: <http://www.infomine.ru/> (accessed 28 February 2021).
- Ivanov A.A., Voronova M.L. *Galogennye formatsii* [Halogen formations]. Leningrad, Nedra Publ., 1972. 328 p.
- Belenitskaya G.A. *Litologo-geodinamicheskiy analiz solenasnykh osadochnykh bassejnov*. Dis. Dokt nauk [Litho-geodynamic analysis of sedimentary basins of the salt. Dr. Diss.]. St-Petersburg, 1999. 351 p.
- Shanina S.N., Halamay A.R., Sokerina N.V., Ignatovich O.O., Morozov V.P. Conditions for the salt strata formation of the Upper Pechora Basin (Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1920, vol. 516, no. 1, article number 012018, pp. 1–12. DOI: 10.1088/1755-1315/516/1/012018.
- Norko S.I. *Istoriya stanovleniya nedropolzovaniya na Rusi. Ch. 2. Istoriya dobychi soli v Rossii* [The history of the formation of sub-surface use in Russia. P. 2. History of salt mining in Russia]. *Nedropolzovanie XXI vek*, 2011, no. 4, pp. 98–99.

16. Khatkov V.Yu., Boyarko G.Yu. Regulation of imports of mineral raw materials that are scarce in Russia. *Gorny zhurnal*, 2005, no. 9–10, pp. 53–56. In Rus.
17. Schulz K.J., DeYoung J.H., Seal R.R., Bradley D.C. *Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey, 2017. 862 p. Available at: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802> (accessed 28 February 2021).
18. *Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Critical Raw Materials Factsheets*. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2017. 515 p. Available at: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> (accessed 28 February 2021).
19. Hossain S.M.K., Fu L., Lu C.-Y. Deicing performance of road salt: modeling and applications. *Transportation Research Record*, 2014, vol. 2440, pp. 76–84. DOI: 10.3141/2440-10.
20. Dan H.-C., Tan J.-W., Du Y.-F., Cai J.-M. Simulation and optimization of road deicing salt usage based on Water-Ice-Salt. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, vol. 169, no. 1, article number 102917, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102917.
21. Rommel S.H., Gelhardt L., Welker A., Helmreich B. Settling of road-deposited sediment: Influence of particle density, shape, low temperatures, and deicing salt. *Water* (Switzerland), 2020, vol. 12, no. 11, article number 3126, pp. 1–15. DOI: 10.3390/w12113126.
22. *Mineral commodity summaries 2021*. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, 2021. 200 p. Available at: <https://doi.org/10.3133/mcs2021> (accessed 28 February 2021).
23. Häge K. German mining industry going global. *Erzmetall: Journal for Exploration, Mining and Metallurgy*, 2002, vol. 55, no. 12, pp. 637–644.
24. Semenov V., Maltscher M., Petrow W. Russian roadheading and winning machines for the extraction of potash and rock salts. *Gluckauf: Die Fachzeitschrift für Rohstoff, Bergbau und Energie*, 2006, vol. 142, no. 11, pp. 505–508. In Germ.
25. Solovyev V.A., Sekuntsov A.I. Technical and technological solutions to increase the productivity of combine complexes at the Verkhnekamskoye field mines. *Gorny zhurnal*, 2015, no. 2, pp. 47–50. In Rus. DOI 10.17580/gzh.2015.02.08.
26. Dorn E., Kaledin O. Modern and innovative shaft sinking and construction technology with examples from current projects. *Geomechanik und Tunnelbau*, 2013, vol. 6, no. 5, pp. 574–581. In Germ. DOI: 10.1002/geot.201300029.
27. Eremenko V.A., Kosyreva M.A. Geomechanical support for the design of mining of rock salt reserves. *Scientific Bulletin of the Arctic*, 2017, no. 2, pp. 5–18. In Rus.
28. Zubov V.P. Applied technologies and actual problems of resource saving in underground development of reservoir mineral deposits. *Gorny zhurnal*, 2018, no. 6, pp. 77–83. In Rus. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.16.
29. Eremenko V.A., Galchenko Yu.P., Vysotin N.G., Kosyreva M.A., Yakusheva E.D. Substantiation of convergent technology data for the Ilets rocksaltmining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 523, no. 1, article number 0120302019, pp. 1–10. DOI: 10.1088/1755-1315/523/1/012030.
30. Spachtholz F.X. Ressource efficiency in potash and rock salt mining. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 2010, vol. 82, no. 11, pp. 1871–1879. In Germ. DOI: 10.1002/cite.201000128.
31. Salzer K., Günther R.-M., Minkley W., Popp T., Wiedemann M., Hampel A., Pudewills A., Leuger B., Zapf D., Staudtmeister K., Rokahr R., Herchen K., Wolters R., Lux K.-H. Joint projects on the comparison of constitutive models for the mechanical behavior of rock salt I. Overview of the projects, reference mine for 3-D benchmark calculations, in-situ measurements and laboratory tests. *Mechanical Behavior of Salt VII. Proc. of the 7th Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Paris, 2012. pp. 221–230.
32. Zeng B., Shi T., Chen Z., Xiang L., Xiang S., Yang M. Mechanism of groundwater inrush hazard caused by solution mining in a multilayered rock-salt-mining area: a case study in Tongbai, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 79–90. DOI: 10.5194/nhess-18-79-2018.
33. Engler S., Ackermann C., Teichert T., Rauche H. From an idea to a producing mine. Complex demands on engineering in potash and rock salt mining of the 21st century. *World of Mining – Surface and Underground*, 2019, vol. 71, no. 2, pp. 93–102. In Germ.
34. Ahmadvov A.-N.N. Geo-ecological problems of lake Baskunchak associated with the development of natural resources. *Bulletin of the modern research*, 2018, no. 12–14 (27), pp. 43–47. In Rus.
35. Zelenkovskiy P.S., Kurilenko V.V. Natural and technogenic system of the Baskunchak salt lake and features of its resources exploitation. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2013, no. 4, pp. 33–52. In Rus.
36. Mozer S.P., Kovalyov O.V., Thorikov I.Yu. Experience in the development of the Ilets rock salt deposit. *Gorny zhurnal*, 2015, no. 9, pp. 59–62. In Rus. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.13.
37. Zaharov V.N., Fedorov E.V., Eremenko V.A., Lagutin D.V. Geomechanical support for the design of mining of rock salt reserves at the Ilets field. *Gorny zhurnal*, 2018, no. 2, pp. 41–47. In Rus. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.06.
38. Arakchaa K.K.D., Kambalina M.G. Perspektivy osvoeniya Dugdaskogo mestorozhdeniya kamennoj soli respubliki Tyva [Prospects for the development of the Dus-Dag rock salt Deposit in the Republic of Tyva]. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennyye i sel'skhozaystvennyye nauki*, 2014, no. 2, pp. 99–104.
39. Nikolaev A.A. Ecological and geographical justification of the planned natural Park «Kempendyai» in the Republic of Sakha (Yakutia). *Problems and prospects of modern science*, 2017, no. 17, pp. 11–19. In Rus.
40. Petrishev V.P., Dubrovskaya S.A., Noreika S.Y., Riakhov R.V., Petrisheva N.V. About a problem of post-industrialisation of salt-mining European towns. *Euro-eco Hannover 2014. Internationaler Kongress Fachmesse. Okologische, Technologische und Rechtliche Aspekte der Lebensversorgung*. Hannover, 2014. pp. 133–134.

Received: 12 May 2021.

Information about the authors

Grigory Yu. Boyarko, Dr. Sc., Cand. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vitaly Yu. Khatkov, department head, Gazprom PJSC; degree applicant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 630*432(571.621)

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРИРОДНОЙ ПОЖАРООПАСНОСТИ ОСУШЕННЫХ БОЛОТ НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРЕЙСКОЙ АВТОНОМНОЙ ОБЛАСТИ

Зубарева Анна Михайловна¹,
anna-doroshenko@yandex.ru

Зубарев Виталий Александрович¹,
Zubarev_1986@mail.ru

¹ Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,
Россия, 679016, г. Биробиджан, ул. Шолом-Алейхема, 4.

Актуальность исследования определяется необходимостью выявления наиболее пожароопасных территорий, подверженных влиянию осушения, которые могут являться основой для прогнозирования рисков возникновения пожаров, а также для разработки рекомендаций по рациональному использованию и снижению пожароопасности нарушенных земель Еврейской автономной области.

Цель: комплексная оценка потенциальной природной пожароопасности осушенных болот на территории Еврейской автономной области.

Методы. Для комплексной оценки потенциальной природной пожароопасности были выбраны критерии, которые являются средоформирующими в ландшафте для возникновения пожара: рельеф (угол наклона территории), климат (среднегодовое количество осадков и средняя многолетняя температура июля), внутренние воды (густота речной сети, уровень болотных вод), почвы (водопроницаемость и влагоёмкость почв) и растительность (класс пожароопасности растительности). Для оценки пожароопасности мелиоративных территорий из них были выбраны главные, поскольку такие показатели, как угол наклона и климатические условия, будут иметь одинаковое значение при исследованиях крупного масштаба. Каждый показатель оценен по равномерным пятиуровневым шкалам. Комплексная оценка была получена суммированием баллов.

Результаты. Была проведена оценка, учитывающая ряд основных природных факторов, обуславливающих возникновение пожаров в пределах заболоченных территорий. Выделены территории с разной степенью природной предрасположенности к возникновению и распространению возгораний. Установлено, что осушительная мелиорация является одним из сельскохозяйственных факторов, способствующих возникновению пожаров растительности. Изменение режима увлажнения в первую очередь порождает трансформацию растительного покрова, где один тип растительности меняется на другой, а также изменение почвенного покрова и снижение уровня болотных вод. Это всё приводит к тому, что класс пожарной опасности территории в совокупности и покомпонентно сдвигается в сторону увеличения пожароопасности.

Ключевые слова:

Природный пожар, осушительная мелиорация, комплексная оценка, растительность, уровень болотных вод.

Введение

Одними из самых распространенных и опасных природных рисков являются природные пожары (ПП) [1–4]. ПП – это сложный объект исследования, который зависит от многообразия факторов: погодных и климатических условий [5, 6], характеристик растительного покрова [7], почв [8, 9], рельефа местности [10], а также влияния человека [11] и интенсивности техногенной нагрузки [12, 13]. Вследствие осушительных работ изменяются пирологические свойства геосистем [14]: трансформируется накопление органических веществ [15], наблюдаются потери запасов углерода [16], изменяется рост растений [17–20], микроклимат [21], изменяется структура и состав почвы [22], изменяется уровень грунтовых вод [23].

Пожароопасность (ПО) территории определяется как угроза возникновения пожара, выражаемая его вероятностью, появлением факторов, обуславливающих пожар, а также их пирологическими характеристиками на определённой территории [24]. Факторы пожароопасности подразделяются на природные и антропогенные, в связи с этим вероятность появления природных факторов, определяющих появление и распространение пожара, а также природных пирологических характеристик на определённой территории,

мы понимаем как природную пожароопасность. В качестве единицы оценки, дающей информацию о генетической взаимосвязи и взаимозависимости структурных частей природного происхождения и их пирологических свойств, был выбран бассейн реки [25].

Земли, изменённые человеком, как правило, менее устойчивы, чем те первичные, которые не были подвержены изменениям, ибо естественный механизм саморегуляции в них нарушен [26]. Поэтому некоторые экстремальные отклонения параметров внешней среды, которые снижены в естественных условиях, могут оказаться катастрофическими для территории, подверженной антропогенному воздействию мелиорации [27].

Проблемой пожароопасности водно-болотных угодий занимаются учёные разных стран. В Восточной и Юго-Восточной Азии по данным спутниковых данных MODIS больше всего пожарам подвержены водно-болотные угодья в Индии, Пакистане, Индонезии и Мьянме, и на тридцати процентах территории Юго-Восточной Азии пожары имеют тенденцию к повторению, больше всего в Лаосе, Камбодже, Таиланде и Мьянме. [28]. В подверженной пожарам восточной канадской тайге используют протяженность пожара и систематически реконструируют пространственно-

временную изменчивость масштабов и интервалов пожаров, определяющих эталонные условия для оценки значимости, прогнозирования пространственно-временной динамики и воздействия усиливающейся в настоящее время пожарной активности в североамериканских бореальных лесах [29]. В Китае установлена сезонная динамика выбросов метана в водно-болотных угодьях после пожаров [30]. В южной Амазонке периодические пожары привели к изменению видового состава и почвенного покрова, т. к. увеличилось количество голой земли и как следствие, уменьшилось видовое богатство и разнообразие видов. [31]. В Индонезии установили, что плантации масличных пальм и мелкие фермерские хозяйства возле населенных пунктов являются основными источниками пожаров в торфяно-болотном лесном массиве в Центральном Калимантане [32], в Танзании изучают ретроспективу многолетних изменений растительности в результате пожаров на высокогорных водно-болотных угодьях на Килиманджаро [33]. Степень изученности вопроса по направлению пирологической уязвимости мелиорированных территорий в России не высока, работы проводились в Томской [34] и Ленинградской [35] областях. На Дальнем Востоке, несмотря на наличие осушенных заболоченных земель, исследования по влиянию на пожаро-

опасность территории не проводились. В Еврейской автономной области, расположенной на юге Дальнего Востока, в данный момент большой сегмент мелиорированных земель по существу не эксплуатируется, обрастает мелкоколесьем и кустарниками и при низком уровне болотных вод периодически подвержен пожарам. Таким образом, целью данного исследования является проведение комплексной оценки (совокупности основных пожаропределяющих факторов) потенциальной природной пожароопасности осушенных болот на территории ЕАО.

Материалы и методики исследования

Оценки ПО осушенной территории проведена на основе собственных данных полевых ландшафтных исследований, проведенных в 2008–2016 гг. Оценка ПО заболоченной территории в период до осушения проведена на основе имеющегося архивного картографического материала [36].

В качестве объектов исследования были выбраны три заболоченные территории, расположенные на территории Среднеамурской аллювиальной низменности, которые были осушены в 50-х гг. XX в. и до настоящего времени эксплуатируются как сельскохозяйственные пахотные угодья [37] (рис. 1).

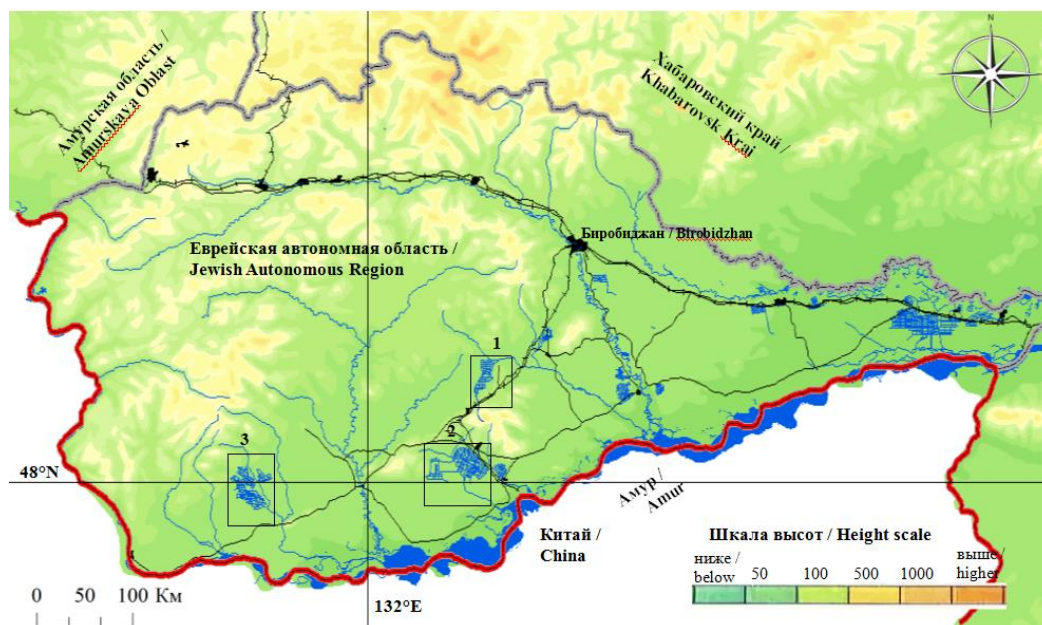


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования
Fig. 1. Layout of the objects of study

Ландшафтные исследования выполнены на выбранных полигонах и включают в себя описание микрорельефа, растительности, уровня болотных вод (УБВ) [38, 39].

Е.С. Арцыбашевым разработана шкала природной пожарной опасности осушаемых лесных земель. В этой шкале автор предлагает по степени природной ПО, то есть предрасположенности к появлению огня, мелиорированные территории разделить на пять классов [40]. Предложенное распределение местности достойно высокого признания, но на наш взгляд не

учитывает очень важные показатели, такие как уровень болотных вод и тип почв, которые обуславливают готовность к воспламенению растительных горючих материалов.

Средоформирующими критериями возникновения пожара являются: рельеф (угол наклона территории) [41], климат (среднегодовое количество осадков и средняя многолетняя температура июля) [42, 43], внутренние воды (густота речной сети, уровень болотных вод) [44], почвы (влагопроницаемость и влагоёмкость) [45, 46] и растительные сообщества (класс

пожарной опасности растительности) [47], а также доля осушенной территории.

Для данного анализа ПО осушенной местности из представленных критериев были выбраны главные: пожароопасность растительности, свойства почв, уровень болотных вод, поскольку такие показатели, как угол наклона и климатические характеристики, будут иметь одинаковое значение при исследованиях крупного масштаба.

Для покомпонентной оценки ПО осушенной территории использовались разработанные ранее методики. Класс пожарной опасности растительности определяется по методике Стародумова [47]. В этой классификации дальневосточные растительные сообщества разделены на пять классов по степени пожарной опасности. I класс характеризуется очень высокой пожарной опасностью, преобладанием массовых пожаров в пожароопасный период и верхних пожаров в засушливые периоды. Иногда пожар может возникнуть при низком значении показателя пожарной опасности Нестерова. V класс отличается очень низкой пожарной опасностью, с преобладанием пожаров только после продолжительной засухи. Эффективными инструментами для обработки и анализа полученных данных служат геоинформационные системы и технологии [48]. В связи с этим площадь исследуемых растительных формаций вычислялась на основе ее распределения в ГИС, созданной в MapInfo Professional 6.0 сотрудниками Лаборатории региональных геоэкологических исследований ИКАРП ДВО РАН). Исследования пожароопасности почв проводились, учитывая влагопроницаемость и влагоёмкость, поскольку эти свойства почв формируют условия увлажнения растительных горючих материалов. Используя разработанную нами ранее шкалу [44] по влагопропускной способности, типы почвы были разделены на пять классов и оценены от 1 до 5 баллов: наиболее проницаемые, невлагоёмкие почвы соответствуют 5 баллам, а труднопроницаемые, влагоёмкие – 1 баллу. Данные по уровню болотных вод сформированы в результате полевых исследований, а пирологическая их оценка происходила в соответствии с классификацией в работе [34], где наиболее пожароопасным является УБВ ниже поверхности и соответствует 2 баллам, а наименее – выше поверхности (0 баллов) (таблица).

Каждый показатель оценен по соответствующей ему шкале, где максимальный балл присвоен наиболее пожароопасному значению. Комплексная оценка была получена суммированием баллов. Применение балльной оценки объясняется одновременным использованием критериев, имеющих количественные и качественные характеристики, к которым статистические методы не применяются. В балльной системе оценок многие авторы видят всеобщее средство измерения и установления связи различных индивидуальных оценок [49, 50]. Весовые коэффициенты, определяющие вклад каждого критерия в пожароопасность территории, не использовались вследствие разнообразия условий и комплексности разных факторов, формирующих пирологические условия, в том

числе и недостаточной изученности физико-химических течений, возникающих при возгораниях.

Результаты и их обсуждение

Проведена оценка ПО бассейнов рек, подверженных осушению.

В анализе потенциальной природной ПО бассейнов исследуемых рек учет пирологических характеристик растительности весьма необходим, так как биота является непосредственным объектом горения [51]. Территория ЕАО отличается разнообразием растительности, неоднородность которой связана с широтной и высотной зональностью, присутствием интразональных группировок, антропогенным воздействием. Вследствие этого растительность изучаемой территории классифицирована в соответствии с пятью классами пожароопасности, каждый из которых был оценен в баллах; наименее пожароопасному присвоен 1 балл, а наиболее пожароопасному – 5. Установлено, что на исследуемой мелиорируемой территории растительные формации I класса – очень высокой ПО (5 баллов), занимают 37 %, к ним относятся осоково-разнотравно-вейниковые и вейниковые луга. Растительные формации высокой ПО (II класс), с пожароопасностью 4 балла, характеризуются дубняками и редколесьями с березой даурской, леспедецей двуцветной и лещиной разнолистной, а также травяными и кустарничково-травяными редколесьями, занимающими 12,5 % от общей площади исследуемой мелиорируемой территории. Растительные формации со средним (III) классом ПО не были выделены. Низким (IV) значением рассматриваемого показателя (2 балла) обладают: смешенные широколиственные леса с преобладанием липы, участии мелколиственных пород, осиново-белоберезовые травянистые леса по рёлкам, местами в сочетании с ерниково-тальничковыми зарослями и вейниково-осоковыми кочковатыми лугами. Они распространены на 12,8 % площади. К V классу, с очень низкой пожароопасностью, относятся: комплекс осоково-разнотравно-вейниковых лугов, моховых и осоковых болот, с остатками листовенных марей; лесные комплексы с дубняками, березняками и осинниками с разнотравно-вейниковыми лугами; мокрые вейниково-осоковые луга в сочетании с осоковыми и моховыми болотами, с редким ерником, единичной березой маньчжурской и осинной, прирусловые заросли ив, совместно занимающие всего менее 37,7 % площади исследуемой области.

Таким образом, на исследуемой осушенной территории растительность наиболее опасных классов пожарной опасности составляют более 39,5 %, что указывает на высокую пожароопасность территории.

Изучение пирологических свойств педосферы базируется на исследовании дренажных свойств почв, формировании благоприятных или неблагоприятных условий для возникновения возгораний. Влагопроницаемость (качество держать и процеживать воду) и влагоемкость (свойство задерживать то или иное количество воды) в педосфере определяют режим влагосохранения растительных горючих материалов и применяются в качестве критериев условий возгорания. При

оценке пирологических свойств почв на осушенных землях было установлено, что территорий с почвами очень высокого (I) и высокого (III) класса пожарной опасности не обнаружено. Участки со II классом пожарной опасности составляют 15,3 %. К ним относятся бурые лесные почвы. Территории с почвами IV класса пожарной опасности занимают 41,9 % оцениваемых земель, на которых расположены лугово-глеевые почвы. К V классу относятся лугово-болотные, болотно-низинные, лугово-бурые почвы, которые распространены на 42,8 % исследуемой территории.

В таблице и на рисунках отражены данные предрасположенности исследуемых территорий к возгоранию до и вовремя осушения, что позволяет проследить взаимосвязь природных компонентов и их пирогенных характеристик в рамках естественных границ речных бассейнов.

Бассейн р. Ульдура имеет площадь водосбора 8,5 тыс. га, на 1,1 тыс. га занят сельскохозяйственными землями, залесенность составляет 20 %, заболоченность – 80 %. Преобладающим типом растительности являются лугово-болотные луга с дерново-подзолистым типом почв.

Таблица. Оценка потенциальной природной ПО бассейна р. Ульдура

Table. Assessment of the potential natural fire hazard of the Uldur river basin

	Почвы (балы) Soils (points)	Растительность (баллы) Vegetation (points)	Уровень болотных вод (балы) Level of marsh water (points)	Итог. балл Total points
до осушения/before draining	Бурые лесные суглинистые Brown forest loamy (3)	Смешенные широколиственные леса с преобладанием липы Mixed deciduous forests with a predominance of lime tree (4)	Ниже поверхности Below the surface (2)	22
		Дубняки и редколесья с березой даурской, леспедецей двуцветной и лещиной разнолистной Oak forests and woodlands with Daurian birch, Lespedetsa bicolor and variegated hazel (4)		
	Луговые глинистые Clayey meadow (2)	Мокрые вейниково-осоковые луга в комплексе с осоковыми и моховыми болотами, иногда с редким ерником, единичной березой маньчжурской Wet reed grass-sedge meadows in a complex with sedge and moss bogs, sometimes with rare dwarf birch, single Manchurian birch (1)	На уровне поверхности Surface level (1)	
		Осоково-разнотравно-вейниковые и вейниковые луга, периодически или постоянно переувлажненные Sedge-forb-reed grass and reed grass meadows, periodically or permanently waterlogged (1)	Выше уровня поверхности Above the surface level (0)	
		Осиново-белоберезовые травянистые леса по релкам, местами в сочетании с ерничково-тальничковыми зарослями и вейниково-осоковыми кочков Aspen-white birch herbaceous forests along reeds, in places in combination with dwarf birch-talnik thickets and reed-sedge hummocks (2)		
		Редколесье осины и маньчжурской березы с ивой козьей и вейниково-осоковыми лугами Sparse forests of aspen and Manchurian birch with goat willow and reed-sedge meadows (2)		
после осушения/after draining	Бурые лесные суглинистые Brown forest loamy (3)	Смешенные широколиственные леса с преобладанием липы Mixed deciduous forests dominated by linden (4)	Ниже поверхности Below the surface (2)	31
		Дубняки и редколесья с березой даурской, леспедецей двуцветной и лещиной разнолистной Oak forests and woodlands with Daurian birch, Lespedetsa bicolor and variegated hazel (4)		
	Луговые глинистые Clayey meadow (2)	Мокрые вейниково-осоковые луга в комплексе с осоковыми и моховыми болотами, иногда с редким ерником, единичной березой маньчжурской Wet reed grass-sedge meadows in a complex with sedge and moss bogs, sometimes with rare dwarf birch, single Manchurian birch (1)	На уровне поверхности Surface level (1)	
		Осоково-разнотравно-вейниковые и вейниковые луга, периодически или постоянно переувлажненные Sedge-forb-reed and reed meadows, periodically or constantly waterlogged (1)	Выше уровня поверхности Above the surface level (0)	
		Осиново-белоберезовые травянистые леса по релкам, местами в сочетании с ерничково-тальничковыми зарослями и вейниково-осоковыми кочков Aspen-white birch herbaceous forests along reeds, in places in combination with dwarf birch-talnik thickets and reed-sedge hummocks (2)		
		Редколесье осины и маньчжурской березы с ивой козьей и вейниково-осоковыми лугами Sparse forests of aspen and Manchurian birch with goat willow and reed-sedge meadows (2)		
Антропогенно преобразованные сельскохозяйственные Anthropogenically transformed agricultural (2)	Осушенные разнотравно-злаковые луга и сельскохозяйственные посевные угодия Drained forb-cereal meadows and agricultural crops (5)	Ниже поверхности Below the surface (2)		

Бассейн р. Ульдура стал пожароопаснее по природным характеристикам (интегральный показатель изменился с 22 до 31) после проведения в его границах осушительных работ. Это связано с тем, что увеличивается, приблизительно в два раза, площадь земель с уровнем болотных вод ниже поверхности и растительностью, относящейся к I классу (очень высокой) пожароопасности.

Бассейн р. Грязнушка (рис. 2) был оценен по такому же принципу как бассейн р. Ульдура (таблица). Растительный и почвенный покров относительно однороден: 4,4 тыс. га (20 %) занято бурыми почвами с

лесной растительностью и около 14,6 тыс. га (80 %) приходится на луговые почвы с разнотравными лугами, периодически или постоянно переувлажненными. Общий итоговый балл ПО территории бассейна до проведения осушительных работ составляет 24.

После осушения и проведения сельскохозяйственных работ вероятность возникновения пожара возрастает (интегральный показатель баллов изменился с 24 до 27), так как повышается, приблизительно в два раза, площадь земель с уровнем болотных вод ниже поверхности и растительностью, относящейся к I классу (очень высокой) ПО.

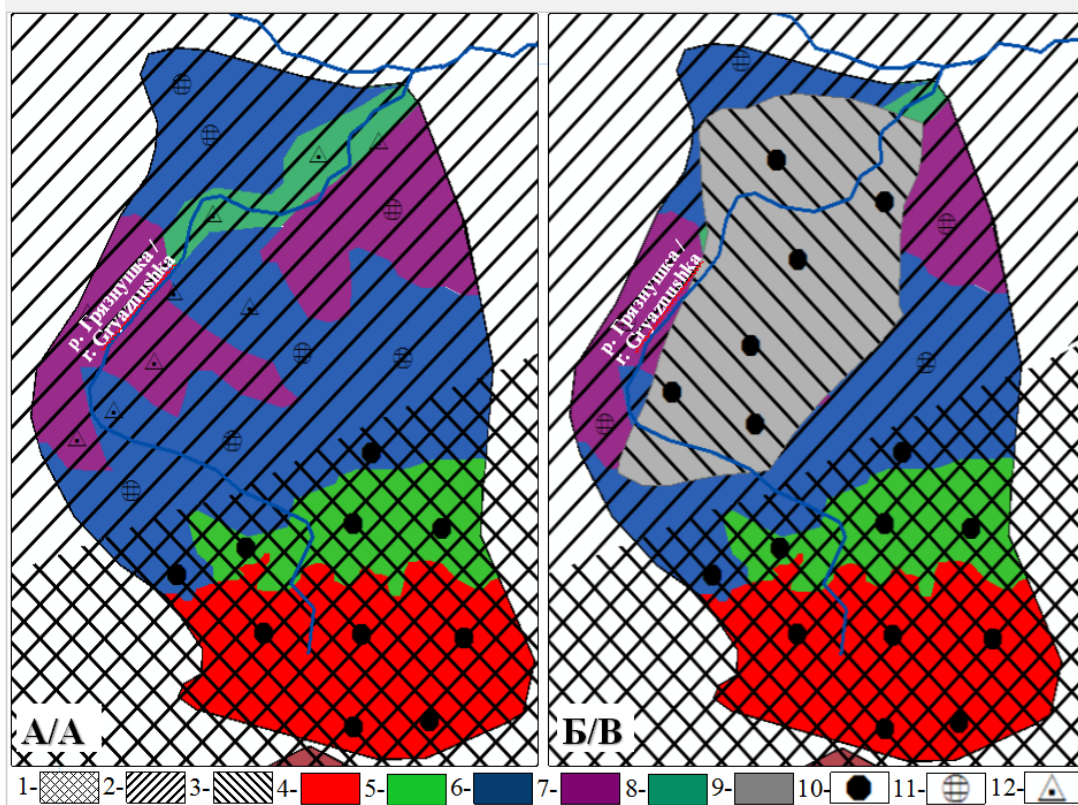


Рис. 2. Бассейн р. Грязнушка до (А) и после (Б) проведения осушительных работ. Условные обозначения. Почвы: 1 – бурые лесные, 2 – луговые глинистые, 3 – антропогенно-преобразованные сельскохозяйственные. Растительность: 4 – смешенные широколиственные леса с преобладанием липы, 5 – дубняки и редколесья с березой даурской, леспедецей двуцветной и лещиной разнолистной, 6 – осоково-разнотравно-вейниковые и вейниковые луга, периодически или постоянно переувлажненные, 7 – мокрые вейнико-осоковые луга в комплексе с осоковыми и моховыми болотами, иногда с редким ерником, еденичной березой маньчжурской, 8 – приустьевые заросли ив, 9 – осушенные разнотравно-злаковые луга и сельскохозяйственные посевные угодия. Уровень болотных вод: 10 – ниже уровня поверхности, 11 – на уровне поверхности, 12 – выше уровня поверхности

Fig. 2. Basin of the Gryznushka river before (A) and after (B) drainage works. Symbols. Soils: 1 – brown forest, 2 – meadow clayey, 3 – anthropogenically transformed agricultural soils. Vegetation: 4 – mixed broad-leaved forests with a predominance of linden, 5 – Dubnyaki and light forests with Daurian birch, Lespedeza bicolor and variegated hazel, 6 – sedge-forb-reed and reed meadows, periodically or constantly waterlogged, 7 – wet reed meadows in sedge complex with sedge and moss bogs, sometimes with rare dwarf birch, single Manchurian birch, 8 – riverbed willow thickets, 9 – drained forb-cereal meadows and agricultural crops. Bog water level: 10 – below surface level, 11 – at surface level, 12 – above surface level

По примеру р. Ульдура (таблица) была составлена оценка природной ПО р. Осиновка (рис. 3). Бассейн р. Осиновка имеет площадь водосбора 430 тыс. га. Зелененность ее бассейна составляет 30 %, заболоченность – 70 %. Водоток и всё его русло трансформировано в мелиоративный канал, бассейн занят лугами и пастбищами.

В нижнем течении долины реки высокий процент заболоченности. Здесь река принимает большое количество мелиоративных каналов. В среднем течении русло реки выпрямлено, сильно активно затягивается высшей водной растительностью, скорость течения низкая, русловой аллювий представлен преимущественно илом.

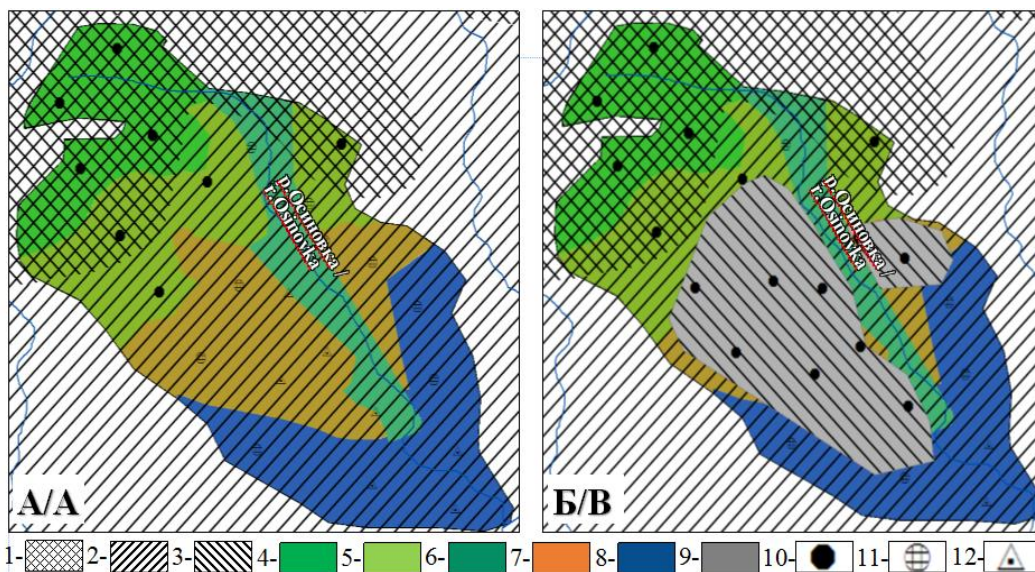


Рис. 3. Бассейн р. Осиновка до (А) и после (Б) проведения осушительных работ. Условные обозначения. Почвы: 1 – бурые лесные, 2 – луговые глинистые, 3 – антропогенно-преобразованные сельскохозяйственные. Растительность: 4 – дубняки и редколесья с березой даурской, леспедецей двуцветной и лециной разнолистной, 5 – смешенные леса и редколесья с большим участием мелколиственных пород, 6 – прирусловые заросли ив, 7 – комплекс осоково-разнотравно-вейниковых лугов, моховых и осоковых болот, с остатками лиственничных марей, 8 – осоково-разнотравно-вейниковые и вейниковые луга, периодически или постоянно переувлажненные, 9 – осушенные разнотравно-злаковые луга и сельскохозяйственные посевные угодия. Уровень болотных вод: 10 – ниже уровня поверхности, 11 – на уровне поверхности, 12 – выше уровня поверхности

Fig. 3. Basin of the Osinovka river before (A) and after (B) drainage works. Symbols. Soils: 1 – brown forest, 2 – meadow clayey, 3 – anthropogenically transformed agricultural soils. Vegetation: 4 – oak forests and light forests with Daurian birch, *Lespedeza bicolor* and variegated hazel, 5 – mixed forests and light forests with a large participation of small-leaved species, 6 – riverbed willow thickets, 7 – complex of sedge-forb-reed meadows, moss and sedge bogs with remnants of larch marshes, 8 – sedge-forb-reed and reed meadows, periodically or permanently waterlogged, 9 – drained forb-cereal meadows and agricultural crops. Bog water level: 10 – below surface level, 11 – at surface level, 12 – above surface level

Оценивая природную пожароопасность бассейна реки Осиновка, можно заключить, что вероятность возникновения возгораний после проведения осушения увеличилась (интегральный показатель баллов изменился с 21 до 31), так как примерно в два раза увеличилась территория с уровнем болотных вод ниже поверхности и пожароопасной растительностью, относящейся к I классу – очень высокой пожарной опасности.

Таким образом, в ходе исследования пожарной опасности выбранных бассейнов рек можно заключить, что после осушения пожароопасность исследуемой территории увеличилась. Об этом свидетельствует итоговый балл комплексной оценки, который во всех случаях увеличивается после осушения. Это происходит вследствие:

- появления осушенных территорий. Часть территории с периодически или постоянно переувлажненными лугами заняли осушенные разнотравно-вейниковые и вейниковые луга. Трансформируемая территория составила 15,1 тыс. га.
- замены растительного покрова. Прирусловые заросли ив; комплекс осоково-разнотравно-вейниковых лугов, моховых и осоковых болот, с остатками лиственничных марей; осоково-разнотравно-вейниковые и вейниковые луга, периодически или постоянно переувлажненные, частично трансфор-

мировались в осушенные разнотравно-вейниковые и вейниковые луга, а также сельскохозяйственные посевные угодия.

- снижения уровня болотных вод на 16,2 тыс. га исследуемой территории бассейнов рек, подверженных мелиорации.
- трансформации почвенного покрова, где типичные почвы изменяются в антропогенно-преобразованные сельскохозяйственные.

Заключение

Таким образом, была проведена пирологическая оценка в пределах заболоченных территорий с учётом ряда основных факторов, формирующих природные условия развития пожаров. Выделены бассейны с разной степенью природной предрасположенности к возникновению и распространению возгораний.

Осушительная мелиорация является одним из сельскохозяйственных факторов, способствующих возникновению пожаров растительности. Изменение режима увлажнения в первую очередь приводит к трансформации растительного покрова, где один тип растительности меняется на другой, изменению почвенного покрова, снижению уровня болотных вод. Это всё приводит к тому, что класс пожарной опасности территории в совокупности и покомпонентно сдвигается в сторону увеличения пожароопасности.

Полученные результаты могут являться базой для прогнозирования природных возгораний, в том числе и разработки рекомендаций по целесообразному использованию и уменьшению потенциальной природной пожароопасности мелиорируемых территорий Еврейской автономной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hallema D.W., Robinne F.-N., Bladon K.D. Reframing the challenge of global wildfire threats to clean water // *Earth's Future*. – 2018. – V. 6. – № 6. – P. 772–776. DOI: 10.1029/2018EF000867.
2. Goldammer J.G. Regional climate change and forest fires // *Large-Area Forest Fires*. – Warsaw: Forest Research Institute, 2004. – P. 5–8.
3. Goldammer J.G. Report on early warning for fire and other environmental hazards // *UN International Decade for Natural Disaster Reduction*. – Geneva: Freiburg University, 1997. – P. 3–34.
4. Fire spread from MODIS burned area data: obtaining fire dynamics information for every single fire International / D. Frantz, M. Stellmes, A. Röder, J. Hill // *Journal of Wildland Fire*. – 2016. – V. 25. – № 12. – P. 1228–1237. DOI: 10.1071/WF16003.
5. Bedel A., Mote T., Goodrick S. Climate change and associated fire potential for the south-eastern United States in the 21st Century // *International Journal of Wildland Fire*. – 2013. – V. 22. – P. 1034–1043. DOI: 10.1071/WF13018.
6. Сычев Р.С., Базаров А.В., Бадмаев Н.Б. Использование метеорологических данных Vega-SCIENCE для изучения различий в возникновении пожарной опасности в аридных и гумидных ландшафт Байкальского региона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2020. – Т. 17. – № 3. – С. 127–134.
7. Kopoteva T.A., Kuptsova V.A. Effect of fires on the functioning of phytocenoses of peat bogs in the Middle-Amur lowland // *Russian Journal of Ecology*. – 2016. – Т. 47. – № 1. – P. 11–18. DOI: 10.7868/S0367059715060086.
8. Влияние лесных пожаров на свойства почв (обзор литературы) / А.А. Дымов, Е.В. Абакумов, И.Н. Безкорвайная, А.С. Прокушкин, Я.В. Кузяков, Е.Ю. Милановский // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2018. – № 4. – С. 13–23.
9. The effect of tropical peat land-use changes on plant diversity and soil properties / C. Agus, Z.R. Ilfana, F.F. Azmi, D. Rachmanadi, Widiyatno, D. Wulandari, P.B. Santosa, M.K. Harun, T.W. Yuwati, T. Lestari // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2020. – V. 17. – P. 1703–1712. DOI: 10.1007/s13762-019-02579-x.
10. Potential influence of nutrient availability along a hillslope: peatland gradient on aspen recovery following fire / M. Depante, R.M. Petrone, K.J. Devito, N. Kettridge, M.L. Macrae, C. Mendoza, J.M. Waddington // *Ecohydrology*. – 2018. – V. 11. – № 5. DOI: 10.1002/eco.1955.
11. Human impacts on fire occurrence: a case study of hundred years of forest fires in a dry alpine valley in Switzerland / T. Zumbrennen, P. Menéndez, H. Bugmann, M. Conedera, U. Gimmi, M. Bürgi // *Regional Environmental Change*. – 2012. – V. 12. – № 4. – P. 935–949. DOI: 10.1007/s10113-012-0307-4.
12. Peat swamp forest; management and development of indigenous species to support economic local people at periphery forest (case study in Central Borneo, Indonesia) / L. Indrayanti, J.M. Rotinsulu, Y. Yanarita, S. Sosilawaty // *Journal of Ecological Engineering Received*. – 2019. – V. 20. – № 4. – P. 76–83.
13. Sources of anthropogenic fire ignitions on the peat-swamp landscape in Kalimantan, Indonesia / M.E. Cattau, M.E. Harrison, I. Shinyo, S. Tungau, M. Uriart, R. DeFries // *Global Environmental Change*. – 2019. – V. 39. – P. 205–219. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.005.
14. Pinno B.D., Hawkes V.C. Temporal trends of ecosystem development on different site types in reclaimed boreal forests // *Forests*. – 2015. – V. 6. – № 6. – P. 2109–2124. DOI: 10.10390/f6062109.
15. Anderson J., Prescott C.E., Grayston S.J. Organic matter accumulation in reclaimed soils under spruce, poplar and grass in the Alberta Oil Sands // *New Forests*. – 2019. – V. 50. – P. 307–322. DOI: 10.1007/s11056-018-9646-4.
16. Carbon stocks of mangroves and losses arising from their conversion to cattle pastures in the Pantanos de Centla, Mexico / J.B. Kauffman, T.H. Hernandez, M. del Carmen Jesus Garcia, W.M. Contreras // *Wetlands Ecology and Management*. – 2016. – V. 24. – P. 203–216. DOI: 10.1007/s11273-015-9453-z.
17. Loblolly pine growth patterns on reclaimed mineland: allometry, biomass, and volume / J. Priest, J. Stovall, D. Coble, B. Oswald, H. Williams // *Forests*. – 2015. – V. 6. – № 10. – P. 3547–3581. DOI: 10.3390/f6103547.
18. Tremblay P.Y., Thiffault E., Pinno B.D. Effects of land reclamation practices on the productivity of young trembling aspen and white spruce on a reclaimed oil sands mining site in northern Alberta // *New Forests*. – 2019. – V. 50. – P. 911–942. DOI: 10.1007/s11056-019-09705-0.
19. Gupta S.D., Pinno B.D. Spatial patterns and competition in trees in early successional reclaimed and natural boreal forests // *Acta Oecologica*. – 2018. – V. 92. – P. 138–147. DOI: 10.1016/j.actao.2018.05.003.
20. Hydraulic redistribution and hydrological controls on aspen transpiration and establishment in peatlands following wildfire / M. Depante, M.Q. Morison, R.M. Petrone, K.J. Devito, N. Kettridge, J.M. Waddington // *Hydrological Processes*. – 2019. – V. 33. – № 12. – P. 2714–2728. DOI: 10.1002/hyp.13522.
21. Watts A.C., Kobziar L.N. Hydrology and fire regulate edge influence on microclimate in wetland forest patches // *Freshwater Science*. – 2015. – V. 34. – № 4. – P. 1383–1393. DOI: 10.1086/683534.
22. Sulwinski M., Metrak M., Suska-Malawska M. Long term fire effects of the drained open fen on organic soils // *Archives of Environmental Protection*. – 2017. – V. 43. – № 1. – P. 11–19. DOI: 10.1515/aep-2017-0002.
23. Begmatov I.A. Land meliorative status in irrigated lands of Sverdlovsk province // *European Science Review*. – 2017. – V. 1–2. – P. 177–181.
24. Курбатский Н.П. Терминология лесной пирологии // *Вопросы лесной пирологии*. – Красноярск: ИЛИД, 1972. – С. 171–213.
25. Зубарев В.А. Изменение концентраций тяжелых металлов в компонентах малой реки (на примере осушительной мелиорации) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 16–23. DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2764.
26. Ecosystem scale evapotranspiration and CO₂ exchange in burned and unburned peatlands: Implications for the ecohydrological resilience of carbon stocks to wildfire / M.Q. Morison, R.M. Petrone, S.L. Wilkinson, A. Green, J.M. Waddington // *Ecohydrology*. – 2020. – V. 13. – № 2. – P. 2189. DOI: 10.1002/eco.2189.
27. Peatland-fire interactions: a review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands / K. Nelson, D. Thompson, C. Hopkinson, R. Petrone, L. Chasmer // *Science of the Total Environment*. – 2021. – V. 769. – P. 145212. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145212.
28. Trends in vegetation fires in south and southeast Asian countries / K.P. Vadrevu, K. Lasko, L. Giglio, W. Schroeder, S. Biswas, C. Justice // *Scientific Reports*. – 2019. – V. 9. – P. 7422. DOI: 10.1038/s41598-019-43940-x.
29. Spatial and temporal dimensions of fire activity in the fire-prone eastern Canadian taiga / S. Erni, D. Arseneault, M.A. Parisien, Y. Begin // *Global Change Biology*. – 2017. – V. 23. – № 3. – P. 1152–1166. DOI: 10.1111/gcb.13461.
30. Short-term effects of fire disturbance on CH₄ emission from forested wetlands in the Xiaoxing'an Mountains, Northeast China / H. Gu, W. Zheng, D. Xu, C. Mu // *Journal of Forestry Research*. – 2019. – V. 30. – P. 969–979. DOI: 10.1007/s11676-018-0774-7.
31. Vetrina Y., Cochrane M.A. Fire frequency and related land-use and land-cover changes in Indonesia's Peatlands // *Remote Sens*. – 2020. – V. 12. – № 1. – P. 5–11. DOI: 10.3390/rs12010005.

32. Fine-scale effects of fire on non-woody species in a southern Amazonian seasonal wetland / H.S. Jancoski, J.R.R. Pinto, D.S. Nogueira, H.A. Mews, J.S. Abad, M.C. Scalon, B.S. Marimon // *Wetlands Ecology and Management*. – 2019. – V. 27. – P. 267–281. DOI: 10.1007/s11273-019-09658-3.
33. A 3000-year record of vegetation changes and fire at a high-elevation wetland on Kilimanjaro, Tanzania / C.J.C. Mustaphi, R. Kinyanjui, A. Shoemaker, C. Mumbi, V. Muiruri, L. Marchant, S.M. Rucina, R. Marchant // *Quaternary Research*. – 2020. – V. 99. – P. 34–62. DOI: doi.org/10.1017/qua.2020.76
34. Оценка потенциальной пожарной опасности осушенных болот Томской области / А.А. Синюткина, Е.Н. Бурнашова, А.А. Беленко, Л.П. Гашкова, А.А. Малолетко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 45–53.
35. Безпалько Р.В. Влияние осушения на природную пожарную опасность лесов: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – СПб., 2004. – 27 с.
36. Куренцова Г.Э. Очерк растительности Еврейской автономной области. – Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 1967. – 61 с.
37. Зубарев В.А., Мищук С.Н. Изменение концентраций тяжелых металлов почв юга Среднеамурской низменности при длительном сельскохозяйственном использовании // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 8. – С. 18–26. DOI: 10.18799/24131830/2019/8/2208.
38. Zubarev V.A., Kogan R.M. Ecological conditions of watercourses in the Middle Amur Lowland in the areas of drainage reclamation // *Water Resources*. – 2017. – V. 44. – № 7. – P. 940–951.
39. Zubarev V.A., Mazhaysky Y.A., Guseva T.M. The impact of drainage reclamation on the components of agricultural landscapes of small rivers // *Agronomy Research*. – 2020. – V. 18. – № 4. – P. 2677–2686.
40. Арцыбашев Е.С. Проблема пожаров на оторфованных лесных землях // *Лесное хозяйство*. – 2006. – № 5. – С. 36–38.
41. Шешуков М.А. Исследование природы низовых пожаров в основных лесных формациях Нижнего Приамурья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – Красноярск, 1970. – 27 с.
42. Коган Р.М., Глаголев В.А. Система пространственного прогноза возникновения пожаров по погодным и лесорастительным условиям // *Безопасность в техносфере*. – 2013. – Т. 2. – № 5. – С. 11–20.
43. Григорьева Е.А., Коган Р.М. Пирологические характеристики климата на юге Дальнего востока России // *Региональные проблемы*. – 2010. – Т. 13. – № 2. – С. 78–81
44. Зубарева А.М. Оценка пожарной опасности территории: на примере Еврейской автономной области: автореф. дис. ... канд. географ. наук. – Биробиджан, 2013. – 145 с.
45. Неуструев С.С. Элементы географии почв – М.; Л.: Сельхозгиз, 1930. – 240 с.
46. Росликова В.И. Почвы Средне-Амурской низменности и их особенности агрогенных трансформаций // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. – 2009. – № 2 (13). – С. 95–102.
47. Стародумов А.М. Шкала пожарной опасности насаждений и других категорий площадей для условий Дальнего Востока. – Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1965. – 1 с.
48. Grassland fire spread simulation using NDVI / N.V. Baranovskiy, R.M. Kogan, V.A. Glagolev, A.M. Zubareva // 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. – Иркутск, 2017. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10466/2286782/Grassland-fire-spread-simulation-using-NDVI-data/10.1117/12.2286782> (дата обращения 15.03.2021).
49. Исаченко А.Г. Методы прикладных ландшафтных исследований. – Л.: Наука, 1980. – 220 с.
50. Мирзеханова З.Г., Нарбут Н.А. Методика расчёта потенциальной природной уязвимости территории. – Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 1993. – 50 с.
51. Зубарева А.М., Фетисов Д.М. Комплексная оценка природной пожароопасности в Еврейской автономной области // *География и природные ресурсы*. – 2014. – № 4. – С. 138–145.

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

Зубарева А.М., кандидат географических наук, научный сотрудник Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН.

Зубарев В.А., кандидат биологических наук, научный сотрудник Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН.

UDK 630*432(571.621)

COMPLEX EVALUATION OF POTENTIALLY NATURAL DRIED BOG-ASSOCIATED FIRE HAZARDS IN THE TERRITORY OF THE JEWISH AUTONOMOUS REGION

Anna M. Zubareva¹,
anna-doroshenko@yandex.ru

Vitaly A. Zubarev¹,
Zubarev_1986@mail.ru

¹ Institute for Complex Analysis of Regional Problems of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 4, Sholem Aleichem street, Birobidzhan, 679016, Russia.

The relevance of the research was determined by the need to identify the most hazardous fire areas, prone to the effects of drainage. Identifying these areas forms the basis for predicting the risk of fires in addition to developing recommendations for the rational use and reduction of fire risks in the disturbed lands of the Jewish Autonomous Region.

The aim of the research is the comprehensive assessment of the potentially natural fire hazards associated with drained marshes in the Jewish Autonomous Region.

Methods. For a comprehensive assessment of the potentially natural fire hazards, the criteria were selected for medium shaped landscape with respect to occurrence of a fire: terrain (slope of the territory); climate (average annual rainfall and mean multiyear temperature in July); inland waters (density of the river network); soil (water permeability and soil moisture content); and vegetation (class of vegetation-associated fire dangers). Each indicator was evaluated on a uniform five-level scale. A comprehensive assessment was obtained by summing the scores, which were ranked according to the degree of fire hazard based on the developed scale.

Results. The authors have carried out the assessment, taking into account a number of the main natural factors causing the occurrence of fires within the wetlands. Areas with varying degrees of natural predisposition to the occurrence and spread of fires were identified. It was established that drainage reclamation is one of the agricultural factors contributing to the occurrence of vegetation fires. A change in the moisture regime primarily generates a transformation of the vegetation cover, where one type of vegetation is changed by another, as well as a change in soil cover and a decrease in the level of bog waters. All this leads to the fact that the class of fire hazard of the territory in aggregate and componentwise shifts towards an increase in fire hazard.

Key words:

Wildfire, drainage reclamation, comprehensive assessment, vegetation, bog water level.

REFERENCES

- Hallema D.W., Robinne F.-N., Bladon K.D. Reframing the challenge of global wildfire threats to clean water. *Earth's Future*, 2018, vol. 6, no. 6, pp. 772–776.
- Goldammer J.G. Regional climate change and forest fires. *Large-Area Forest Fires*. Warsaw, Forest Research Institute, 2004. pp. 5–8.
- Goldammer J.G. Report on early warning for fire and other environmental hazards. *UN International Decade for Natural Disaster Reduction*. Geneva, Freiburg University, 1997. pp. 3–34.
- Frantz D., Stellmes M., Röder A., Hill J. Fire spread from MODIS burned area data: obtaining fire dynamics information for every single fire International. *Journal of Wildland Fire*, 2016, vol. 25, no. 12, pp. 1228–1237.
- Bedel A., Mote T., Goodrick S. Climate change and associated fire potential for the south-eastern United States in the 21st Century. *International Journal of Wildland Fire*, 2013, vol. 22, pp. 1034–1043.
- Sychev R.S., Bazarov A.V., Badmaev N.B. The use of VEGA-Science meteorological data to study differences in fire hazard occurrence in the Baikal region arid and humid landscapes. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 127–134. In Rus.
- Kopoteva T.A., Kuptsova V.A. Effect of fires on the functioning of phytocenoses of peat bogs in the Middle-Amur lowland. *Russian Journal of Ecology*, 2016, vol. 47, no 1, pp. 11–18.
- Dymov A.A., Abakumov E.V., Bezkorovaynaya I.N., Prokushkin A.S., Kuzyakov Ya.V., Milanovsky E.Yu. Impact of forest fire on soil properties (review). *Theoretical and Applied Ecology*, 2018, no. 4, pp. 13–23. In Rus.
- Agus C., Ilfana Z.R., Azmi F.F., Rachmanadi D., Widiyatno, Wulandari D., Santosa P.B., Harun M.K., Yuwati T.W., Lestari T. The effect of tropical peat land-use changes on plant diversity and soil properties. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2020, vol. 17, pp. 1703–1712.
- Depante M., Petrone R.M., Devito K.J., Kettridge N., Macrae M.L., Mendoza C., Waddington J.M. Potential influence of nutrient availability along a hillslope: Peatland gradient on aspen recovery following fire. *Ecohydrology*, 2018, vol. 11, no. 5. DOI: 10.1002/eco.1955.
- Zumbrunnen T., Menéndez P., Bugmann H., Conedera M., Gimmi U., Bürgi M. Human impacts on fire occurrence: a case study of hundred years of forest fires in a dry alpine valley in Switzerland. *Regional Environmental Change*, 2012, vol. 12, no. 4, pp. 935–949.
- Indrayanti L., Rotinsulu J.M., Yanarita Y., Sosilawaty S. Peat swamp forest; management and development of indigenous species to support economic local people at periphery forest (case study in Central Borneo, Indonesia). *Journal of Ecological Engineering Received*, 2019, vol. 20, no. 4, pp. 76–83.
- Cattau M.E., Harrison M.E., Shinyo I., Tungau S., Uriart M., DeFries R. Sources of anthropogenic fire ignitions on the peat-swamp landscape in Kalimantan, Indonesia. *Global Environmental Change*, 2019, vol. 39, pp. 205–219.
- Pinno B.D., Hawkes V.C. Temporal trends of ecosystem development on different site types in reclaimed boreal forests. *Forests*, 2015, vol. 6, no. 6, pp. 2109–2124.
- Anderson J., Prescott C.E., Grayston S.J. Organic matter accumulation in reclaimed soils under spruce, poplar and grass in the Alberta Oil Sands. *New Forests*, 2019, vol. 50, pp. 307–322.
- Kauffman J.B., Hernandez T.H., Del Carmen Jesus Garcia M., Contreras W.M. Carbon stocks of mangroves and losses arising from their conversion to cattle pastures in the Pantanos de Centla, Mexico. *Wetlands Ecology and Management*, 2016, vol. 24, pp. 203–216.
- Priest J., Stovall J., Coble D., Oswald B., Williams H. Loblolly pine growth patterns on reclaimed mineland: allometry, biomass, and volume. *Forests*, 2015, vol. 6, no. 10, pp. 3547–3581.
- Tremblay P.Y., Thiffault E., Pinno B.D. Effects of land reclamation practices on the productivity of young trembling aspen and white spruce on a reclaimed oil sands mining site in northern Alberta. *New Forests*, 2019, vol. 50, pp. 911–942.

19. Gupta S.D., Pinno B.D. Spatial patterns and competition in trees in early successional reclaimed and natural boreal forests. *Acta Oecologica*, 2018, vol. 92, pp. 138–147.
20. Depante M., Morison M.Q., Petrone R.M., Devito K.J., Kettridge N., Waddington J.M. Hydraulic redistribution and hydrological controls on aspen transpiration and establishment in peatlands following wildfire. *Hydrological Processes*, 2019, vol. 33, no. 12, pp. 2714–2728.
21. Watts A.C., Kobziar L.N. Hydrology and fire regulate edge influence on microclimate in wetland forest patches. *Freshwater Science*, 2015, vol. 34, no. 4, pp. 1383–1393.
22. Sulwinski M., Metrak M., Suska-Malawska M. Long term fire effects of the drained open fen on organic soils. *Archives of Environmental Protection*, 2017, vol. 43, no. 1, pp. 11–19.
23. Begmatov I.A. Land meliorative status in irrigated lands of Syrdarya province. *European Science Review*, 2017, vol. 1–2, pp. 177–181.
24. Kurbatsky N.P. Terminologiya lesnoy pirologii [Terminology of forest pyrology]. *Voprosy lesnoy pirologii* [Issues of forest pyrology]. Krasnoyarsk, IliD Publ., 1972. pp. 171–213.
25. Zubarev V.A. Change of concentrations of heavy metals in the components of a small river (on the example of drainage reclamation). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 16–23. In Rus.
26. Morison M.Q., Petrone R.M., Wilkinson S.L., Green A., Waddington J.M. Ecosystem scale evapotranspiration and CO₂ exchange in burned and unburned peatlands: Implications for the ecohydrological resilience of carbon stocks to wildfire. *Ecology*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 2189.
27. Nelson K., Thompson D., Hopkinson C., Petrone R., Chasmer L. Peatland-fire interactions: a review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 769, pp. 145212.
28. Vadrevu K.P., Lasko K., Giglio L., Schroeder W., Biswas S., Justice C. Trends in vegetation fires in south and south-east Asian countries. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 7422, pp. 1–13.
29. Erni S., Arseneault D., Parisien M.A., Begin Y. Spatial and temporal dimensions of fire activity in the fire-prone eastern Canadian taiga. *Global Change Biology*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 1152–1166.
30. Gu H., Zheng W., Xu D., Mu C. Short-term effects of fire disturbance on CH₄ emission from forested wetlands in the Xiaoxing'an Mountains, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 2019, vol. 30, pp. 969–979.
31. Vetrina Y., Cochrane M.A. Fire frequency and related land-use and land-cover changes in Indonesia's Peatlands. *Remote Sens*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 5–11.
32. Jancoski H.S., Pinto J.R.R., Nogueira D.S., Mews H.A., Abad J.S., Scalon M.C., Marimon B.S. Fine-scale effects of fire on non-woody species in a southern Amazonian seasonal wetland. *Wetlands Ecology and Management*, 2019, vol. 27, pp. 267–281.
33. Mustaphi C.J.C., Kinyanjui R., Shoemaker A., Mumbi C., Muiruri V., Marchant L., Rucina S.M., Marchant R. A 3000-year record of vegetation changes and fire at a high-elevation wetland on Kilimanjaro, Tanzania. *Quaternary Research*, 2020, vol. 99, pp. 34–62.
34. Sinyutkina A.A., Burnashova E.N., Belenko A.A., Gashkova L.P., Maloletko A.A. Assessment of potential fire risk of Tomsk region mires. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 45–53. In Rus.
35. Bezpalko R.V. Vliyanie osusheniya na prirodnyuyu pozharnuyu opasnost lesov. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [The influence of drainage on the natural fire hazard of forests. Cand. Diss. Abstract]. St-Petersburg, 2004. 27 p.
36. Kurentsova G.E. *Ocherk rastitelnosti Evreyskoy avtonomnoy oblasti* [An outline of the vegetation of the Jewish Autonomous Region]. Vladivostok, Far Eastern Book Publ., 1967. 61 p.
37. Zubarev V.A., Mishchuk S.N. Changes in concentration of heavy metals in soils of Middle Amur lowland under conditions of long period of agricultural use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 8, pp. 18–26. In Rus.
38. Zubarev V.A., Kogan R.M. Ecological conditions of watercourses in the Middle Amur Lowland in the areas of drainage reclamation. *Water Resources*, 2017, vol. 44, no. 7, pp. 940–951.
39. Zubarev V.A., Mazhaysky Y.A., Guseva T.M. The impact of drainage reclamation on the components of agricultural landscapes of small rivers. *Agronomy Research*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 2677–2686.
40. Arcybashev E.S. The problem of fires on peat forest lands. *Lesnoe khozyaystvo*, 2006, vol. 5, pp. 36–38. In Rus.
41. Sheshukov M.A. *Issledovanie prirody nizovykh pozharov v osnovnykh lesnykh formatsiyakh Nizhnego Priamurya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Investigation of the nature of ground fires in the main forest formations of the Lower Amur region. Cand. Diss. Abstract]. Krasnoyarsk, 1970. 27 p.
42. Kogan R. M., Glagolev V.A. System of spatial forecast of fires emergence on weather and forest vegetation conditions. *Safety in Technosphere*, vol. 2, no. 5, pp. 11–20. In Rus.
43. Grigor'eva E.A., Kogan R.M. Pyro-logical characteristics of climate in the south of the Russian Far East. *Regional problems*, 2010, vol. 13, no. 2, pp. 78–82. In Rus.
44. Zubareva A.M. *Otsenka pozharnoy opasnosti territorii: na primere Evreyskoy avtonomnoy oblasti*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Assessment of the fire hazard of the territory: on the example of the Jewish Autonomous Region. Dis. Cand. Abstract]. Birobidzhan, 2013. 145 p.
45. Neustruev S.S. *Elementy geografii pochv* [Elements of soil geography]. Moscow, Leningrad, Selkhozgiz Publ., 1930. 240 p.
46. Roslikova V.I. Soils of the Middle-Amur Lowland and features of their agrogenic transformations. *Bulletin of Pacific national university*, 2009, vol. 2, no. 13, pp. 95–102. In Rus.
47. Starodumov A.M. *Shkala pozharnoy opasnosti nasazhdeniy i drugiykh kategoriy ploshchadey dlya usloviy Dalnego Vostoka* [Scale of fire hazard of plantings and other categories of areas for the conditions of the Far East]. Khabarovsk, DalNIILH Publ., 1965. 1 p.
48. Baranovskiy N.V., Kogan R.M., Glagolev V.A., Zubareva A.M. Grassland fire spread simulation using NDVI. *23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics*. Irkutsk, 2017. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10466/2286782/Grassland-fire-spread-simulation-using-NDVI-data/10.1117/12.2286782> (accessed 15 March 2021).
49. Isachenko A.G. *Metody prikladnykh landshaftnykh issledovaniy* [Methods of applied landscape research]. Leningrad, Nauka Publ., 1980. 220 p.
50. Mirzekhanova Z.G., Narbut N.A. *Metodika rascheta potentsialnoy prirodnoy uyazvimosti territorii* [Methodology for calculating the potential natural vulnerability of the territory]. Khabarovsk, IVEP DVO RAN Publ., 1993. 50 p.
51. Zubareva A.M., Fetisov D.M. Comprehensive assessment of natural fire hazard in Jewish Autonomous Oblast. *Geography and Natural Resources*, 2014, no. 4, pp. 138–145. In Rus.

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Anna M. Zubareva, Cand. Sc, researcher, Institute for Complex Analysis of Regional Problems of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences.

Vitaly A. Zubarev, Cand. Sc, researcher, Institute for Complex Analysis of Regional Problems of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 553.212:548.4

РЕЛИКТЫ ФТОРИДНО-КАЛЬЦИЕВОГО (ФЛЮОРИТОВОГО) И СОЛЕВЫХ РАСПЛАВОВ В ПОРОДАХ МАССИВА АРЫ-БУЛАК (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Дмитриева Анна Сергеевна,
dmitrieva@igc.irk.ru

Перетяжко Игорь Сергеевич,
pigmigor@igc.irk.ru

Савина Елена Алексеевна,
helen@igc.irk.ru

¹ Институт геохимии СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А.

Актуальность исследования онгонитов, являющихся субвулканическими аналогами редкометалльных Li-F гранитов, обусловлена получением новых данных о петрологии и геохимии обогащенных F и многими редкими элементами кислых магматических пород. Исследование процессов, связанных с разделением исходного гомогенного силикатного расплава на несмешивающиеся жидкие фазы контрастного состава, представляется важной проблемой магматической петрологии.

Цель: изучение явлений фторидно-силикатной несмесимости при эволюции онгонитовой магмы по данным исследования расплавных и флюидных включений в минералах.

Объекты: породы массива Ары-Булак, Восточное Забайкалье.

Методы: термометрическое исследование расплавных и флюидных включений, анализ включений методом лазерной абляции (LA-ICP-MS), катодолюминесцентное изучение зональности минералов, определение состава минералов, фаз и силикатных стекол методом сканирующей энергодисперсионной спектроскопии (SEM EDS).

Результаты. Изучены включения силикатных расплавов, фторидных расплавов и солевых рассолов-расплавов, а также сосуществующих с ними флюидов в кварце и топазе. Температуры гомогенизации включений: 350–400 °С для ФВ, 370–570 °С для солевых рассолов-расплавов, 700–730 °С для расплавных включений размером до 30 мкм (в более крупных расплавных включениях гомогенизация не наблюдается). При образовании пород массива участвовали флюиды P-Q типа – паровые растворы, NaF-содержащие с примесью хлоридов. В расплавных включениях находятся продукты кристаллизации онгонитового расплава (кварц, санидин, альбит, флюорит, слюда, виллимит, W-иксиопит). Стекла расплавных включений имеют плюмазитовый состав, высокие содержания F (2–10 мас. %) и воды (10–15 мас. %), некоторые содержат Cs₂O (до 5,6 мас. %) и As₂O₅ (14,4 мас. %). Обнаружены включения фторидных расплавов и рассолов-расплавов: с фторидно-кальциевой (F-Ca) фазой или флюоритом (преобладают), с алюмофторидами и фазами, имеющими разное соотношение хлоридов Na, K, Cs, Mn, Fe, Ca, фторидов K, Al, Na. Для F-Ca включений характерны высокие концентрации Y и LREE. Результаты изучения включений свидетельствуют о фторидно-силикатной жидкостной несмесимости в онгонитовой магме. Установлено, что совместно с онгонитовым расплавом находились фторидные расплавы, рассоль-расплавы и водно-солевые флюиды. Полученные данные демонстрируют ведущую роль F-Ca (флюоритового) расплава в концентрировании REE и Y в онгонитовой магме.

Ключевые слова:

Фторидно-силикатная жидкостная несмесимость, флюидные и расплавные включения, фторидно-кальциевый (F-Ca) расплав, онгонит, массив Ары-Булак.

Введение

Онгониты являются субвулканическими аналогами редкометалльных литий-фтористых гранитов [1–9]. В России эти необычные породы открыты в Восточном Саяне, Забайкалье, Прибайкалье и на Алтае. Онгониты могут быть источником рудного редкометалльного сырья, так как содержания в них Li, Rb, Cs, Be, Ta и Nb в десятки–сотни раз выше по сравнению с гранитами и часто достигают уровня, характерного для промышленно-значимых редкометалльных гранитов и пегматитов [10–16].

Актуальность изучения явлений фторидно-силикатной жидкостной несмесимости определяется важной ролью F-содержащих растворимых компонентов в гранитоидных расплавах, процессах концентрирования в них рудного вещества и формирования месторождений редких металлов, а также необходимостью дополнить полученные ранее данные о физико-химических условиях образования и эволюции высоко-

кофтористых кислых магм. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал, свидетельствующий о фазовой неоднородности природных и модельных гранитоидных расплавов [17–37].

Ликвационные процессы с участием силикатных расплавов и флюидов несут сложный многостадийный характер, что свойственно флюидно-магматическим системам P-Q типа [11, 38]. В ходе быстрого изменения P-T параметров при движении силикатной магмы к поверхности может происходить ее дегазация и гетерогенизация изначально гомогенного силикатного расплава. Растворение флюсующих компонентов (воды, фтористых соединений и др.) в силикатном расплаве существенно снижает его ликвидус-солидусные температуры и вязкость, что может приводить к расслаиванию на несмешивающиеся расплавы и их конвекционному течению в магматической камере. Дифференциация обогащенных F гранитоидных магм может сопровождаться выделением

флюидно-солевых фаз, образованием фторидных расплавов и остаточного редкометалльного силикатного расплава. Между этими жидкими фазами перераспределяются многие рудные и редкие элементы [18, 20–23, 30, 31, 33, 37]. Фторидно-силикатная несмесимость свойственна насыщенным фтором магмам кислого состава, и поэтому реликты фторидных жидких фаз находят в онгонитах, щелочных гранитах, пегматитах и риолитах [23, 39, 40].

Фторидные расплавы кристаллизуются с образованием фторидных минералов того же состава, из-за чего доказать присутствие таких расплавов в магматических системах достаточно сложно. Природные объекты, где обнаружены реликты фторидных расплавов, редки и чрезвычайно интересны для исследования. Прямую информацию по составу расплавов, из которых кристаллизовались минералы онгонитов, предоставляют первичные включения силикатных и фторидных расплавов (РВ), в также сосуществующие с ними флюидные включения (ФВ), которые изучались в настоящей работе. Ранее было показано, что обогащенные флюоритом породы массива Ары-Булак образовались из гетерогенной онгонитовой магмы, содержащей фторидно-кальциевый (F-Ca или флюоритовый), алюмофторидные и силикатные расплавы, в т. ч. аномально обогащенные Cs и As, а также магматические флюиды первого и P-Q типов [41–47].

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в научных и аналитических лабораториях ИГХ СО РАН (г. Иркутск) и ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). В работе использована коллекция образцов, отобранная И.С. Перетяжко и Е.А. Савиной на массиве Ары-Булак в 2004–2010 гг., и полевые материалы экспедиционных работ 2015 г., полученные с участием А.С. Дмитриевой. Детально изучено 18 образцов онгонитов. Минералы (кварц, топаз, санидин) просматривались в полированных плоскопараллельных пластинках. В качестве препаратов для термометрических опытов (прогревов) выбиралась обломки пластинок пород, содержащие зерна (вкрапленники, фенокристы) минералов с РВ и ФВ размером от 40 до 150 мкм.

Термометрические свойства РВ и ФВ изучали при атмосферном давлении в термокриокамере Linkam THMSG-600 и термокамере Linkam TS1500 с визуальным контролем на микроскопе OLYMPUS BX-51 (ИГХ СО РАН). Длительность прогревов РВ составляла 2–3 ч, а время выдержки препаратов при 700 °С не превышало 60–90 минут. Также были проведены опыты со ступенчатым подъемом температуры от 450 до 800 °С и прогревание РВ при 730 °С в течение 4–5 ч (некоторые эксперименты длились до 20 ч) в термокамере ТК-1500. Данная методика позволила получить гомогенные стекла в РВ. Для вскрытия включений зерен минералов шлифовались при помощи абразивных порошков и полировались алмазными пастами.

Составы стекла и кристаллических фаз были определены с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра INCA Energy 450 на электронном микроскопе MIRA-3 LMU (ИГМ СО РАН, анали-

тик Н.С. Карманов). Фазы анализировали при 20 кВ, токе зонда 1,5 нА и наборе EDS спектров 20 с, что обеспечивало предел обнаружения элементов ~0,2–0,3 мас. % (в оксидной форме) [48]. Фазы сканировали на площади >10 мкм² (если позволял их размер) для того, чтобы минимизировать потери щелочных элементов. Концентрацию кислорода во фторидных фазах определяли, измеряя его аналитический сигнал, с учетом матричных поправок. Фазовый состав был изучен в 36 РВ.

Ростовую зональность зерен (фенокристов и вкрапленников) минералов изучали методом катодолуминесценции на электронном микроскопе LEO 1430VP, используя КР-детектор Centaurus (ИГМ СО РАН, аналитик М.В. Хлестов). REE и Y в стеклах и F-Ca фазе определяли методом масс-спектрометрии с лазерной абляцией (LA ICP MS) на квадрупольном масс-спектрометре NexION300D с лазерной платформой NWR-213, используя Nd:YAG лазер с длиной волны 213 нм (ИГХ СО РАН). Первичным стандартом было стекло NIST-610, а для внутренних стандартов использовали содержания SiO₂, Ca и F в фазах.

Описание пород массива Ары-Булак

Массив онгонитов Ары-Булак представляет собой лакколит следующих размеров: около 500×800 м на поверхности и ~700×1500 м по вертикальному сечению под четвертичными отложениями. На западном и восточном флангах онгониты находятся в контакте с базальтами, а на южном – с метаморфизованными породами усть-борзинской свиты (преимущественно сланцами). Петрографические, минералогические и геохимические особенности пород массива Ары-Булак представлены в работах [1, 41–47]. Все разновидности пород имеют возраст 141,6 ± 0,5 млн лет [46].

В массиве преобладают порфиоровые онгониты. В апикальной юго-западной части размером 50–100 м они сменяются афировыми разностями. Порфиоровые онгониты имеют в своем составе до 20 об. % фенокристов (рис. 1, а): кристаллов дымчатого кварца величиной 1–5 мм, прозрачного санидина, альбита и, реже, топаза с игольчатыми включениями W-иксиолита. Афировые породы имеют массивный полустекловатый флюидальный облик, содержат редкие порфиорокристы дымчатого кварца и санидина. Матрикс порфиоровых и афировых пород сложен изометричными микролитами кварца (20–30 мкм) и кристаллами альбита (30–80 мкм), обрастающими каймой санидина размером 5–20 мкм. В афировых породах содержится до 26 мас. % прозопита CaAl₂F₄(OH)₄ и обнаружены другие алюмофториды [43, 44, 46].

Порфиоровые породы содержат менее 0,2 мас. % CaO и 1–1,5 мас. % F, а все афировые имеют крайне высокие концентрации CaO (до 22 мас. %) и F (до 19 мас. %). Кроме того, в центральной части и на юго-западном фланге массива обнаружены пятнообразные выделения порфиоровых онгонитов, в которых концентрации CaO достигают 10 мас. %, а F – 7 мас. % [43, 44]. В этих породах интерстиции между минералами (фенокристами и микролитами) заняты флюоритом, сформировавшимся из фторидно-кальциевой

(F-Ca) фазы, появляющейся в результате кристаллизации F-Ca расплава [43–46]. Для F-Ca фазы характерны примеси O (до 12 мас. %), Si (до 1,5 мас. %) и Al (до 3,3 мас. %). Некоторые F-Ca выделения не содержат примесей на уровне разрешающей способности SEM EDS метода и соответствуют по составу идеальному флюориту.

Микроскопическое изучение и фазовый состав включений

В кварце и топазе были изучены ФВ и РВ. В санидине не обнаружено включений, подходящих для термометрии. Включения по залеченным микротрещинам отнесены к вторичным и не изучались. Первичные ФВ и РВ часто встречаются совместно и располагаются небольшими группами или одиночно, иногда по зонам роста кристаллов. По фазовому составу ФВ были разделены на два типа. К первому типу относятся существенно газовые ФВ водных паровых растворов. Объемные соотношения фаз в таких

ФВ варьируют, но газовая фаза во всех случаях преобладает (80–90 об. %) над жидкой. Размеры включений достигают 70 мкм, иногда до 200 мкм, некоторые имеют форму обратного кристалла (в кварце). Иногда встречаются трехфазные ФВ с галитом (NaCl) и, намного реже, с виллиомитом (NaF). Ко второму типу отнесены ФВ концентрированных солевых растворов (рассолов), содержащие пузырь, водный раствор и кристаллические фазы, занимающие до 70–80 % их объема. В ФВ содержится большое количество кристаллических фаз: до трех изотропных кубической или округлой формы и до шести анизотропных с разным двупреломлением и неправильной формы. ФВ рассолов имеют сложную морфологию с многочисленными апофизами и значительные вариации размера (до 15 мкм в минимальном и до 100 мкм в максимальном сечениях). По морфологическим признакам ФВ рассолов являются первично-вторичными и часто наблюдаются совместно с ФВ первого типа.

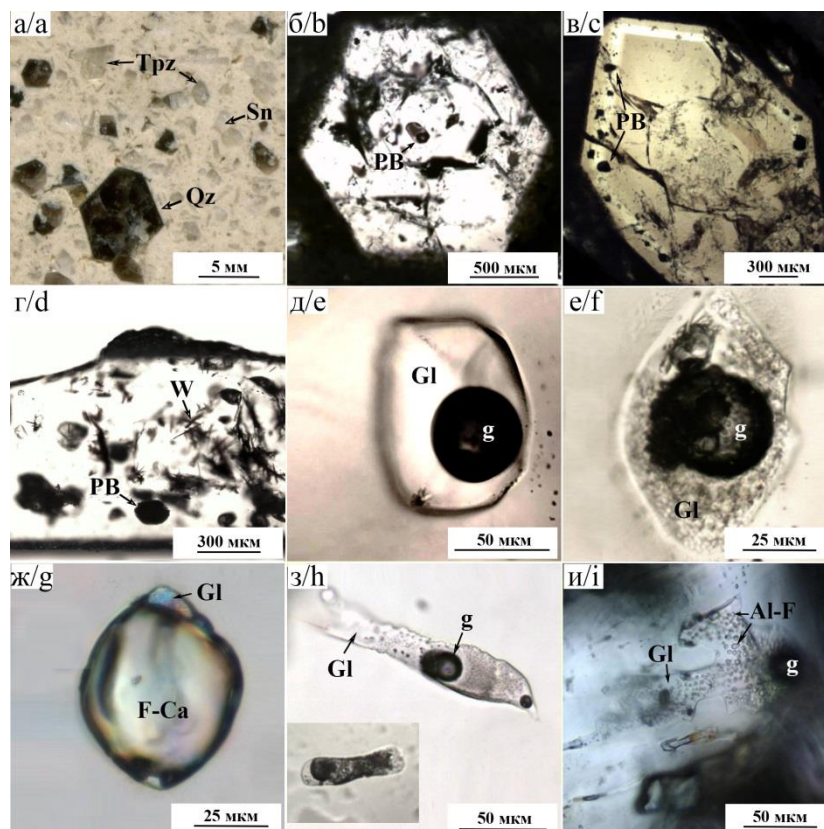


Рис. 1. а) фрагмент образца порфирового онгонита с вкрапленниками кварца, топаза и санидина. РВ в минералах онгонитов: б) в центральной зоне роста кристалла кварца; в) в краевой зоне роста кристалла кварца; г) в топазе, содержащем игольчатый W-иксиолит; д) с прозрачным стеклом в кварце; е) частично закристаллизованное стекло в РВ из кварца; ж) с крупным обособлением F-Ca фазы (флюорита) в кварце; з) с многочисленными солевыми глобулами в кварце; и) с многочисленными алюмофторидными глобулами в топазе. Qz – кварц, Trz – топаз, Sn – санидин, W – W-иксиолит; F-Ca – фторидно-кальциевая фаза, Al-F – алюмофторидные фазы, Gl – силикатное стекло, g – газовый пузырь. Все изображения в проходящем свете

Fig. 1. a) fragment of a porphyritic ongonite sample with quartz, topaz and sanidine phenocrysts. Melt inclusions (MI) in ongonite minerals: b) in the central growth zone of quartz phenocryst; c) in the marginal growth zone of quartz phenocryst; d) in topaz containing acicular W-ixiolite; e) with residual glass in quartz; f) partially recrystallized glass in MI from quartz; g) with large segregation of the F-Ca phase (fluorite) in quartz; h) with numerous globules of salt melt in quartz; i) with numerous rounded aluminofluoride globules in topaz. Qz – quartz, Trz – topaz, Sn – sanidine, W – W-ixiolite, F-Ca is the fluoride-calcium phase, Al-F is the aluminofluoride phases, Gl – silicate glass, g – gas bubble. Transmitted light

В порфировых онгонитах фенокристы кварца и топаза в центральных областях и по зонам роста содержат большое количество РВ, размеры которых варьируют от 40 до 300 мкм. Фенокристы минералов из афировых пород редко содержат РВ. Для РВ характерен округлый облик, иногда форма отрицательного кристалла (в кварце). РВ заполнены кристаллическим агрегатом, реже содержат стекло и несколько пузырей. В РВ обнаружены следующие кристаллические фазы: санидин, альбит, флюорит, слюда, каолинит, виллимит, W-иксиолит. На основе визуального изучения было выделено пять типов РВ, различающихся по фазовому составу:

- 1) однофазные стекловатые со светлым и прозрачным стеклом либо темные и непрозрачные, заполненные кристаллическим агрегатом силикатных минералов (рис. 1, б–з);
- 2) двухфазные со стеклом и пузырями (рис. 1, д);
- 3) многофазные с кристаллическими фазами, стеклом и пузырьком (рис. 1, е);
- 4) многофазные с F-Ca глобулами (флюоритом) в силикатном стекле ± пузырьком и редкими кристаллическими фазами; флюорит заполняет почти весь объем некоторых РВ (рис. 1, ж);
- 5) многофазные со стеклом и многочисленными обособлениями (глобулами) солевых кристаллических фаз ± пузырьком (рис. 1, з, и).

В кварце и топазе преобладают РВ 1–3 типов, остальные встречаются гораздо реже. Наибольший интерес для наших исследований представляли включения 4 и 5 типов. Среди них наиболее распространены закристаллизованные РВ, в которых F-Ca фаза становилась видимой после плавления агрегата силикатных минералов. Помимо F-Ca обособлений, во включениях 4 и 5 типов иногда захватывались другие фторсодержащие фазы, сходные по составу с криолитом, хиолитом и алюмофторидами [43–46]. На рис. 1, и показано РВ (175×80 мкм) 5 типа в кристалле топаза (образец АРБ-106Т) с многочисленными глобулами (<1–5 мкм) алюмофторидного состава, имеющими отношение Na/Al, близкое к хиолиту и криолиту с примесью Ca, K и Cl.

Результаты катодоллюминесцентного изучения вкрапленников кварца и топаза демонстрируют их ростовую зональность (рис. 2). В отдельных кристаллах видны ядра, вокруг которых формировались более поздние генерации минерала (рис. 2, з). РВ разных типов сосредоточены в ранних и промежуточных зонах роста кристаллов.

Отметим также, что изоморфное замещение фтора на кислород в структуре флюорита приводит к появлению агрегатов кислород-вакансионных центров [40], которые под воздействием лазера вызывают люминесцентное свечение F-Ca фазы в основной массе онгонитов.

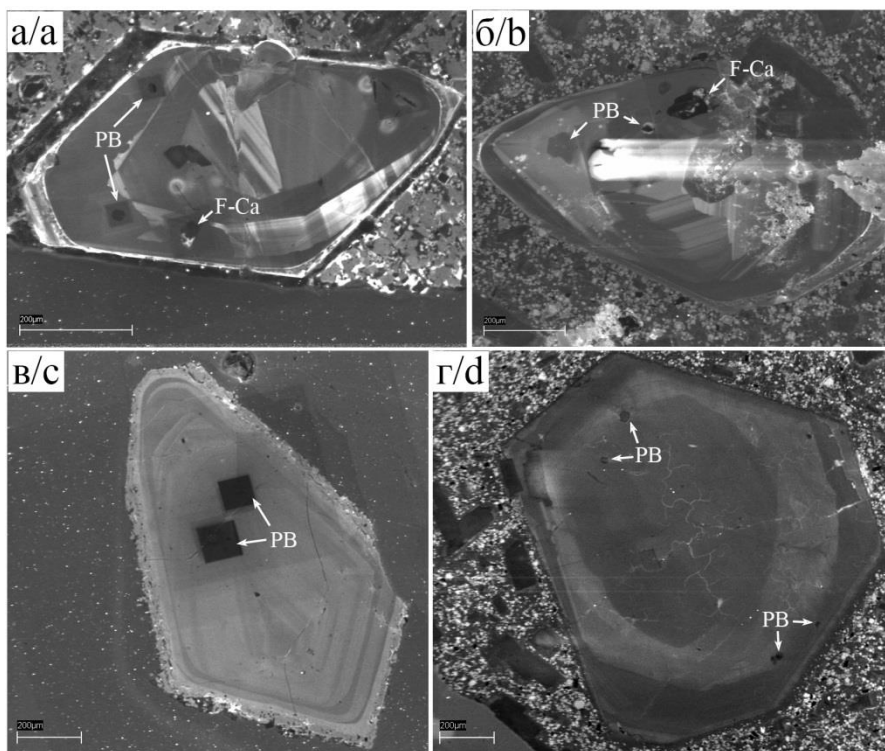


Рис. 2. Катодоллюминесцентные изображения кристаллов топаза и кварца с ростовой зональностью: а, б) раскристаллизованные РВ и включения F-Ca фазы на границе промежуточной и краевой зон роста кристаллов топаза, обр. АРБ-127Т и АРБ-370Т; в) РВ в центральной части вкрапленника кварца, обр. АРБ-142; г) РВ на границе с внешней частью зерна кварца, обр. АРБ-370. Длина масштабной линейки 200 мкм. Другие условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 2. Cathodoluminescent images of crystals of topaz and quartz with a clearly pronounced growth zoning; a, b) MI and inclusions of the F-Ca phase at the border of the intermediate and edge zones of topaz crystal growth, ARB-127 samples and ARB-370; c) MI in the central growth zone of a quartz crystal, sample ARB-142; d) MI in the marginal growth zone of a quartz crystal, sample ARB-370. Scale bar length is 200 μm. Other symbols are in Fig. 1

Термометрическое изучение флюидных и расплавных включений

Существенно газовые ФВ изучались методом криометрии. Температура плавления льда в жидкой фазе изменялась от $-0,2$ до $-4,8$ °С. Во время опытов наблюдалась гомогенизация ФВ в газовую фазу при $350-400$ °С. Кристаллы виллиомита в ФВ этого типа не изменялись при нагреве до $550-600$ °С, а затем быстро растворялись при $600-670$ °С. Ранее установлено, что кристаллическая фаза ведет себя подобным образом в водно-солевых флюидах *P-Q* типа [11, 38, 44].

ФВ рассолов характеризуются следующим поведением во время опытов. Наблюдается растворение фаз: анизотропных ($90-320$ °С), изотропных ($250-570$ °С, редко выше 600 °С). Последняя изотропная фаза исчезает одновременно с газовым пузырьком либо на $10-40$ °С позднее температуры частичной гомогениза-

ции ФВ в жидкую фазу. Гомогенизация включений обычно происходит при $370-570$ °С в жидкую фазу. Во время охлаждения наблюдается быстрая кристаллизация фаз, при этом их размеры заметно уменьшаются. В течение дальнейших нагревов все фазы растворяются раньше, чем газовый пузырёк. При этом температура гомогенизации становится выше. Некоторые анизотропные кристаллические фазы, скорее всего, являются кристаллогидратами, содержащими молекулярно-связанную H_2O [43, 44]. Подобные фазы растворяются во время нагрева ФВ, а при их охлаждении появляются вновь, но с меньшим количеством H_2O . В дальнейшем наблюдается некоторое увеличение объема кристаллических фаз, но к первоначальному размеру они не возвращаются, что свидетельствует о медленном установлении равновесия в концентрированных водно-солевых растворах ФВ.

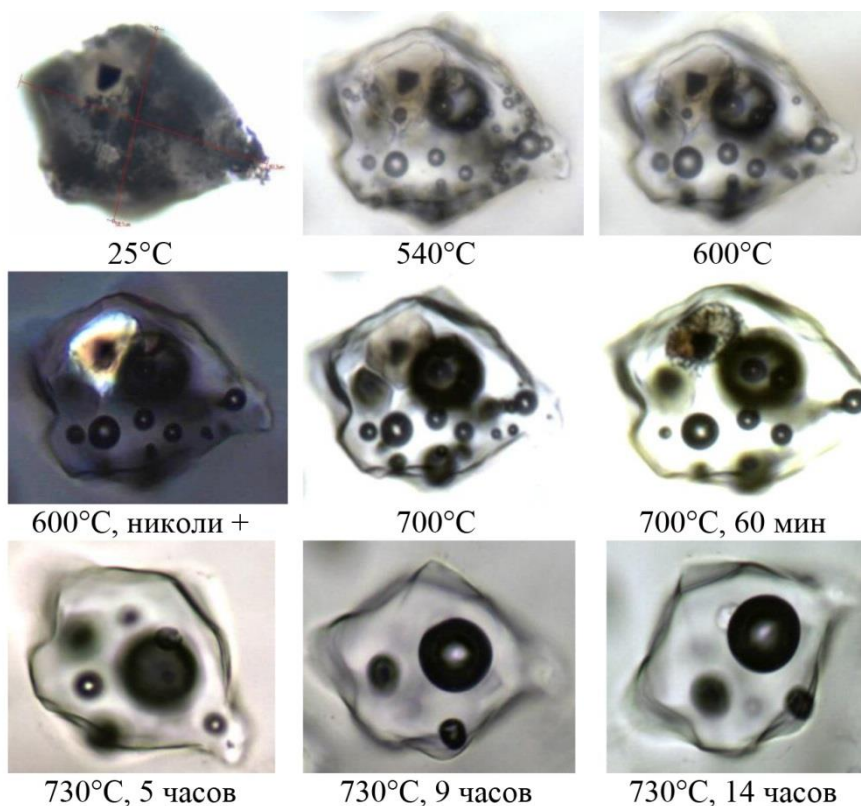


Рис. 3. Расплавное включение (60×80 мкм) в кварце при нагревании, обр. АРБ-365

Fig. 3. Melt inclusion ($60 \times 80 \mu m$) in quartz upon heating, sample ARB-365

Плавление фаз в закристаллизованных РВ начинается при $430-530$ °С (содержимое светлее, образуются мелкие пузырьки). При $650-730$ °С в течение $1-2$ ч происходит полное плавление кристаллических фаз. В отдельных РВ размером до 30 мкм пузырьки в расплаве исчезают при $700-730$ °С. Наиболее крупные РВ прогревались при 730 °С на протяжении $4-5$ ч (в некоторых опытах выдержка достигала 20 ч). В таких РВ сохраняется несколько пузырьков, кристаллические фазы растворяются частично, и полная гомогенизация не наблюдается. Один из опытов с РВ в кварце представлен на рис. 3.

На всех этапах опытов не замечено каких-либо признаков вскрытия РВ, вызванного возрастающим внутривакуольным давлением. В некоторых зернах кварца из образцов АРБ-141, АРБ-142 и АРБ-359 встречаются РВ, содержащие стекло и многочисленные глобулы солевых фаз (рис. 1, з). Состав глобул (вероятно, смеси кристаллогидратных соединений) значительно варьирует по отношению Na/Ca и F/Cl . В интервале $350-550$ °С наблюдается медленное растворение глобул в расплаве. Полное растворение происходит в интервале $600-800$ °С, а при охлаждении РВ от 700 до 450 °С глобулы появляются вновь.

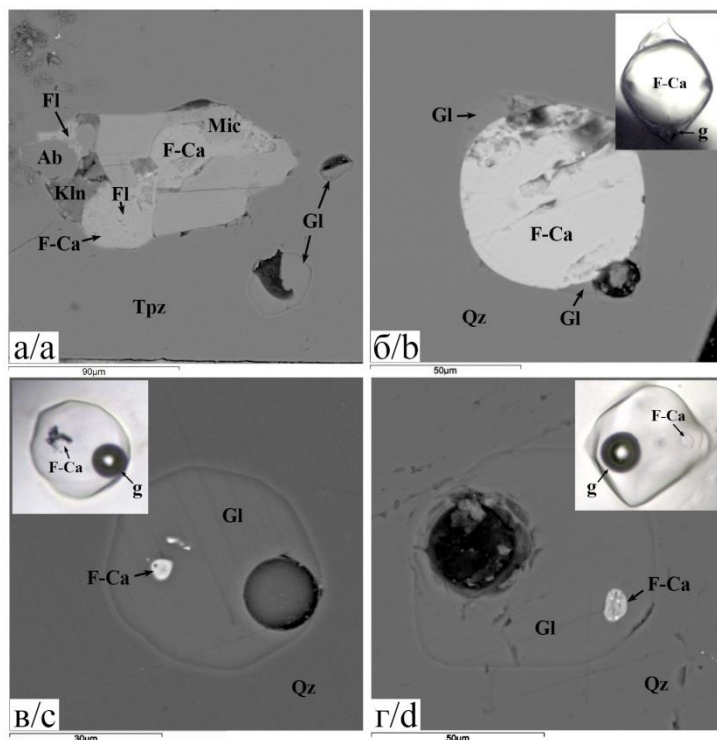


Рис. 4. F-Ca фаза в РВ из фенокристов кварца и топаза. а) вскрытое РВ (без нагрева), содержащее F-Ca фазу, флюорит, альбит, каолинит и слюду (предположительно, цинвальдит), обр. АРБ-370Т; б) крупное сферическое обособление F-Ca фазы в стекле, после нагрева РВ до 700 °С, обр. АРБ-132; в, г) округлые глобулы F-Ca фазы после нагрева РВ до 730 °С, соответственно, обр. АРБ-356 и АРБ-366. Все изображения в BSE, врезки – проходящий свет. Fl – флюорит, Ab – альбит, Kln – каолинит, Mic – слюда. Остальные обозначения см. на рис. 1

Fig. 4. Calcium-fluoride phase in MI from phenocrysts of quartz and topaz. a) opened MI (without heating) containing F-Ca phase, fluorite, albite, kaolinite and mica (presumably zinnwaldite), sample ARB-370T; b) large spherical separation of the F-Ca phase in glass MI, after heating to 700 °C, sample ARB-132; c, d) rounded globules of the F-Ca phase after heating the MI to 730 °C, sample, respectively, ARB-356 and ARB-366. All images are in back-scattered electrons (BSE), inset – transmitted light. Fl – fluorite, Ab – albite, Kln – kaolinite, Mic – mica. Other symbols are in Fig. 1

В РВ с F-Ca фазой (рис. 4) наблюдались следующие изменения в процессе нагрева. В РВ с крупным округлым флюоритом (рис. 1, ж) при 350–400 °С начиналось его плавление, после 400–450 °С появлялись мелкие пузырьки в силикатном расплаве. При 550–650 °С были отчетливо видны контуры F-Ca обособления при его незначительном увеличении в объеме. К 700 °С силикатное стекло и флюорит полностью плавилась, а в тонкой кайме силикатного расплава сохранялись мелкие пузырьки (рис. 4, б). Округлые капли F-Ca расплава в силикатном расплаве РВ были заметны после выдержки при 730 °С, они сливались и укрупнялись в длительных опытах. После охлаждения препаратов в стеклах РВ часто находятся F-Ca глобулы размером от <5 до 20 мкм (рис. 4, в, г).

Составы F-Ca фазы и силикатного стекла во включениях

В таблице представлены средние составы F-Ca фазы и силикатных стекол из РВ. F-Ca фаза похожа на флюорит по отношению Ca/F, но содержит Si (0,04–0,30 мас. %), Al (0,02–0,23 мас. %) и O (0,13–2,87 мас. %), REE, Y, иногда Mg и K (таблица, ан. 1–7). Среднее содержание F находится в пределах 44,76–48,54 мас. % и Ca от 34,90 до 48,84 мас. %. Для

F-Ca фазы характерны высокие концентрации Y (до 4,75 мас. %) и легких REE (мас. %) – до 7,06 Ce, до 2,61 La, 0,99 Pr и до 3,18 Nd. В одном РВ (таблица, ан. 3) обнаружены также примеси Sm, Gd и Dy. Повышение концентрации элементов-примесей (REE, Y, Si и др.) в F-Ca фазе сопровождается уменьшением F с 48 до 44 мас. % (рис. 5). Наблюдается обратная зависимость между содержаниями F и O (рис. 5, а). Максимальное количество O (>8 мас. %) имеет F-Ca фаза из РВ в топазе, образец АРБ-370Т. Концентрации кислорода и примесных элементов не коррелируются в F-Ca фазе (рис. 5, в–е).

Переплавленные и остаточные силикатные стекла в РВ (таблица, ан. 8–18, рис. 6) содержат до 9,7 мас. % F и характеризуются постоянной примесью Cl до 1,9 мас. % и FeO до 1 мас. %. Отличительной особенностью безводного состава стекол является большая дисперсия SiO₂ (55,7–74,9 мас. %) и высокая сумма щелочей Na₂O+K₂O (таблица, рис. 6, в, г) – до 12 мас. % с преобладанием Na над K (2,9–7,3 мас. % Na₂O, 1,1–6,4 мас. % K₂O). Концентрация CaO в стеклах не превышает 0,25 мас. %.

Для стекол РВ характерно плюмазитовое отношение Al/(Ca+Na+K), мол. % >1 (таблица, рис. 6, а). Суммы оксидов в SEM EDS анализах намного мень-

ше 100 мас. %, что может свидетельствовать о наличии в стеклах до 10–15 мас. % H₂O. Наблюдаются обратные связи между содержаниями в стеклах SiO₂ и

Al₂O₃, Na₂O, F (рис. 6, б, в, е). В наибольшей степени обогащены F (до 8–10 мас. %) стекла РВ из образцов АРБ-127Т, АРБ-142 и АРБ-347 (таблица, ан. 11–13, 17).

Таблица. Средние составы (мас. %) F-Са фазы и стекол в РВ из фенокристов кварца и топаза

Table. Average compositions (wt. %) of the F-Ca phase and silicate glasses in MI from quartz and topaz phenocrysts

Образец Sample	43 1(6)	132 2(5)	347 3(5)	363 4(8)	368 5(3)	136Т 6(2)	370Т 7(12)				
F	48,29	47,80	44,76	47,84	48,54	48,18	47,36				
Ca	40,81	45,01	34,90	45,83	48,07	46,98	48,84				
Si	0,04	0,08	0,30	0,07	0,21	–	0,12				
Al	0,04	–	–	0,02	–	–	0,23				
Mg	–	–	–	–	–	–	0,04				
Na	–	–	–	–	–	–	0,02				
K	–	–	–	–	0,10	–	0,02				
La	1,05	0,63	2,61	0,50	–	0,53	–				
Ce	2,95	1,64	7,06	2,45	1,15	1,74	0,11				
Pr	0,08	–	0,99	0,17	–	–	–				
Nd	1,48	0,91	3,18	1,01	–	0,68	–				
Y	4,75	3,78	3,46	0,94	1,02	0,71	0,26				
O	0,52	0,13	0,46	1,05	0,92	1,06	2,87				
Сумма Total	97,61	96,70	97,21	96,21	97,67	96,52	98,86				
Образец Sample	34 8(5)	43 9(5)	132 10(2)	142 11(7)	347 12(3)	347 13(2)	363 14(3)	368 15(3)	106Т 16(5)	127Т 17(12)	370Т 18(2)
SiO ₂	67,28	68,70	67,01	71,69	63,33	55,72	66,11	66,28	69,16	63,13	74,87
Al ₂ O ₃	17,69	15,25	19,71	13,67	19,45	11,14	18,71	17,97	16,99	21,26	14,85
FeO	0,27	0,54	0,41	0,11	0,28	0,19	1,02	–	0,21	0,06	–
CaO	–	0,12	0,24	–	0,10	0,25	0,17	–	–	0,03	–
Na ₂ O	5,65	3,75	4,71	4,38	6,59	3,89	6,59	7,29	2,92	6,77	4,97
K ₂ O	4,70	3,01	4,51	3,38	4,78	1,14	3,89	4,82	6,38	3,97	4,26
Cs ₂ O	0,96	5,57	–	0,89	0,53	5,28	–	0,15	0,76	–	–
As ₂ O ₅	–	–	–	1,07	–	14,36	–	–	1,28	–	–
F	5,62	4,91	5,37	7,38	7,96	9,68	5,39	5,66	3,38	8,00	1,59
Cl	0,26	0,29	0,38	0,71	0,44	1,89	0,49	0,27	0,45	0,19	0,18
Сумма Total	93,04	98,64	90,49	91,08	87,73	84,24	97,77	94,69	91,00	92,58	96,91
A/NK	1,23	1,62	1,56	1,27	1,21	1,46	1,24	1,05	1,45	1,38	1,16
A/CNK	1,20	1,31	1,51	1,24	1,19	1,11	1,22	1,04	1,42	1,38	1,16

Все номера образцов имеют префикс АРБ-. В скобках после порядкового номера образца – количество SEM EDS анализов. (1–7) F-Са фаза, (8–18) силикатные стекла. Составы нормированы к 100 мас. %, в стеклах – сумма для исходных анализов с поправкой на F и Cl. A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O), мол. %; A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O+Cs₂O), мол. %. Прочерк – содержания ниже предела обнаружения методом SEM EDS. В анализах дополнительно обнаружено (мас. %): (3) – 0,73 Sm, 0,61 Gd и 0,93 Dy; (4) – 0,12 Th; (6) – 0,14 U; (7) – 0,09 Sr и 0,05 S; (13) – 0,98 Sb₂O₃.

All sample numbers are prefixed with ARB-. The number of analyses is given in parentheses after the sample number. (1–7) – F-Ca phase, (8–18) – silicate glasses. Compositions are normalized to 100 wt. %, analytical totals are given for original analyses of glasses corrected for F and Cl. A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O), mol. %; A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O+Cs₂O), mol. %. Dash – below detection limit for SEM EDS. The analyses additionally revealed (wt. %): (3) – 0,73 Sm, 0,61 Gd and 0,93 Dy; (4) – 0,12 Th; (6) – 0,14 U; (7) – 0,09 Sr and 0,05 S; (13) – 0,98 Sb₂O₃.

Некоторые РВ содержат стекла с высоким содержанием Cs₂O (до 5,6 мас. %) (рис. 6, ж, таблица 1, ан. 9, 13). Учитывая полученные ранее данные по распределению Cs в минералах и породах массива [41, 43], предполагается, что в онгонитовой магме находились обособления (капли) богатого Cs силикатного расплава. Стекла РВ, обогащенные Cs, часто также содержат значительную примесь As. Максимальная концентрация As₂O₅ (14,36 мас. %) определена в стекле РВ из обр. АРБ-347 (рис. 6, з, таблица, ан. 13).

LA-ICP-MS анализ включений

Для определения концентраций REE и Y в стеклах включений и F-Са глобулах применялся метод LA-ICP-MS. Абляция проводилась для РВ, ранее изученных методом SEM EDS. Составы силикатного стекла

и F-Са фазы по данным LA-ICP-MS получены по методике, описанной в [23, 40]. Выполнены анализы крупных РВ размером более 50 мкм, расположенных на вскрытой поверхности и на глубине 5–7 мкм от поверхности кварца. Большинство стекол имеют низкую сумму REE (<10–20 ppm) и концентрацию Y <15 ppm. Только в стекле одного РВ определено около 400 ppm суммы REE и 40 ppm Y [47].

Обсуждение результатов

Изучение включений минералообразующих сред, структурно-текстурных, минералогических и геохимических особенностей обогащенных флюоритом онгонитов массива Ары-Булак приводит к выводу о их образовании из несмешивающихся жидких фаз контрастного состава – силикатного онгонитового и F-Са расплавов [41, 43–47]. Предполагается, что F-Са рас-

плав появился в силикатном расплаве вследствие локального повышения в нем содержания F, воды и щелочей. Низкая вязкость и высокая текучесть F-Ca расплава сохранялась до субсолидусных температур (700–730 °С) онгонитового расплава, что подтверждается петрографическими и SEM наблюдениями, а также поведением РВ в ходе термометрических опытов. После кристаллизации F-Ca расплава формировалась F-Ca фаза и в дальнейшем флюорит с приме-

сью O, REE и других элементов. Реликты такой фазы наблюдаются в РВ (рис. 1, ж, рис. 2, а, б, рис. 4). Изучение катодоллюминесцентных особенностей кварца и топаза свидетельствует о совместном существовании F-Ca и онгонитового расплавов на разных стадиях роста фенокристов (рис. 2, а, б). Повышенные содержания O, Y и REE в F-Ca фазе из включений отражают особенности первичного состава F-Ca (флюоритового) расплава.

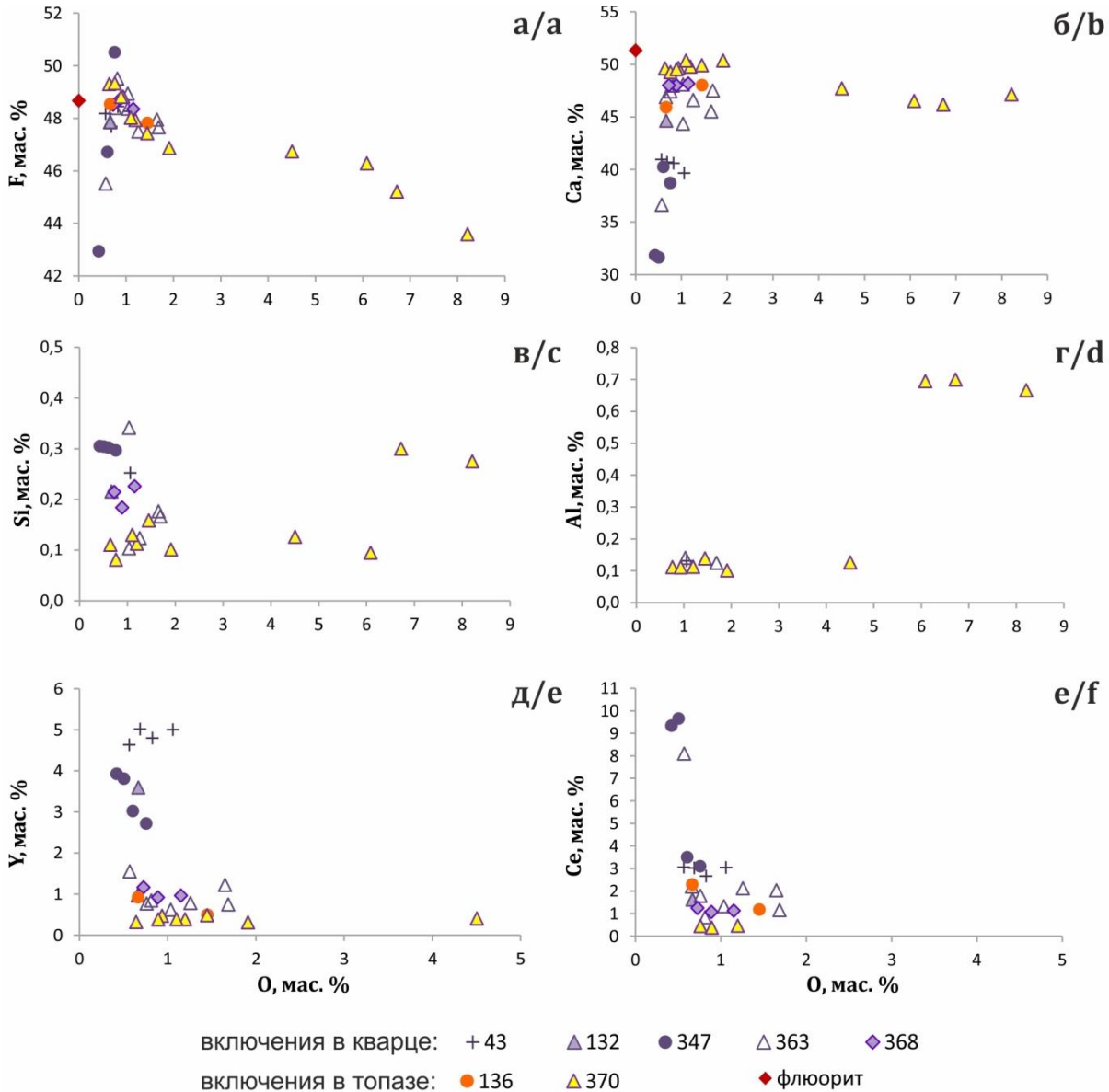


Рис. 5. Вариации содержаний F, Ca, Si, Al, Y, Ce и кислорода (мас. %) в F-Ca фазе из РВ в кварце и топазе. Показаны составы стекол, где содержания элементов выше предела обнаружения SEM EDS метода. Красный ромб – флюорит идеального стехиометрического состава

Fig. 5. Variations in F, Ca, Si, Al, Y, Ce and oxygen contents (wt. %) in the F-Ca phase from MI in quartz and topaz. The compositions of glasses are shown, where the element content is higher than the detection limit of the SEM EDS method. The red rhombus shows the ideal fluorite composition (CaF_2)

Изучение сингенетических ассоциаций ФВ и РВ во вкрапленниках минералов дает представление о составе минералообразующих сред, существовавших при образовании массива Ары-Булак. Захват сингенетических ФВ и РВ в фенокристах кварца и топаза про-

исходил на стадии дегазации онгонитового расплава. ФВ расплыв, обнаруженные совместно с РВ и существенно газовыми ФВ, возникли в процессе захвата остаточного расплава и флюидных фаз разной плотности во время их кипения. Для таких условий гомо-

геннизация ФВ рассолов происходит при температуре образования ФВ и РВ. Температуры гомогенизации ФВ рассолов (500–570 °С) находятся в диапазоне плавления содержимого РВ (430–700 °С), что подтверждает магматическую природу флюида.

Температуры гомогенизации РВ <750 °С наблюдаются, если в силикатном расплаве содержится большое количество флюсующих компонентов – H₂O и F. Это

согласуется с концентрацией F в стеклах РВ из кварца и топаза, достигающей 8–10 мас. %, и с SEM EDS данными, по которым количество H₂O в стеклах может достигать 10–15 мас. % (таблица). Для стекол РВ характерен плюмазитовый состав, высокая сумма Na₂O и K₂O – до 12 мас. %, с преобладанием Na над K. Снижение суммы Na₂O и K₂O в стеклах до 5–7 мас. % сопровождается увеличением концентрации Cs₂O до 5–6 мас. %.

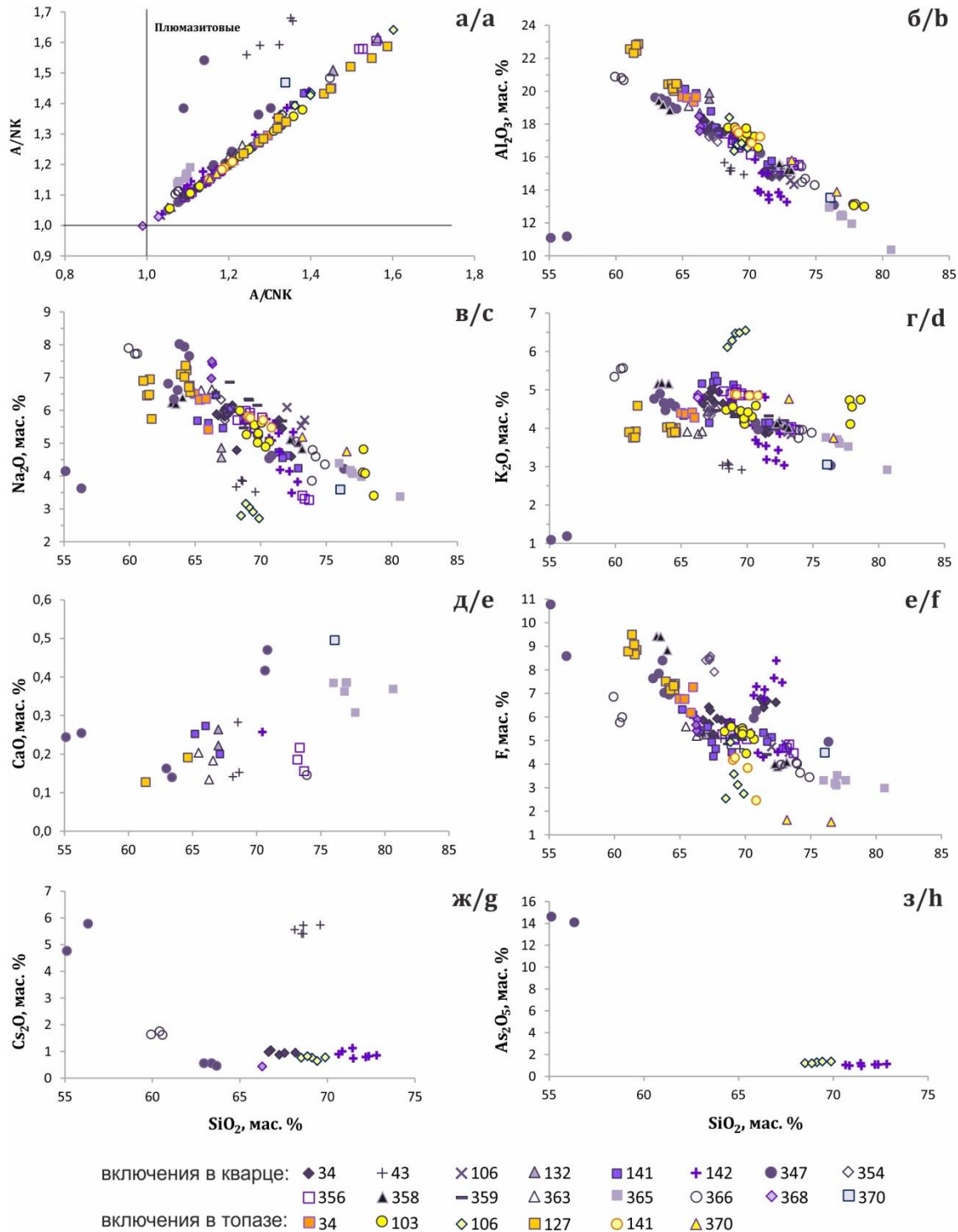


Рис. 6. Соотношение индексов A/CNK и A/NK (а) и содержаний Al₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO, F, Cs₂O и As₂O₅ относительно SiO₂ (б–з) в силикатных стеклах РВ в кварце и топазе

Fig. 6. A/CNK and A/NK indices (a) and contents of Al₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO, F, Cs₂O and As₂O₅ vs. SiO₂ (b–h) for silicate glasses of melt inclusions in quartz and topaz

Ранее было установлено, что концентрации REE во фторидных расплавах намного выше, чем в силикатных [49]. По данным [50], при 700–800 °С и 1 кбар коэффициенты распределения D_{P33} между фторидными и силикатными расплавами заметно понижаются от La к Lu, а для промежуточных REE элементов (Ce и Pr; Tb и Dy; Tm и Yb), по сравнению с крайними REE элементами тетрад (La, Nd, Gd, Ho, Er, Lu), установлены минимальные значения D_{P33} , особенно сильные у D_{Ce} и D_{Pr} . Для нормированных к хондриту спектров REE стекол ПВ характерны тетрад-эффекты М-типа в I (La–Nd), III (Gd–Ho) и IV (Er–Lu) тетрадах. Вблизи F-Ca фазы стекла ПВ значительно обеднены REE, Y и формы их нормированных спектров близки к таковым для онгонитов. Спектры D_{P33} имеют прогибы W-типа для третьей и четвертой тетрад REE, что объясняет появление тетрад-эффектов М-типа в силикатных стеклах [27, 29]. Связь фторидно-силикатной несмесимости с тетрад-эффектами в нормированных спектрах распределения REE онгонитов подтверждается полученными LA-ICP-MS данными. Процессы жидкостной фторидно-силикатной несмесимости влияют на геохимические особенности обогащенных флюоритом пород массива Ары-Булак. При этом REE и Y концентрировались в F-Ca расплаве, а онгонитовый расплав обогащался Cs и As.

Заключение

Данные по включениям из фенокритов кварца и топаза подтверждают существование F-Ca и силикатных несмесимых расплавов в процессе эволюции и кристаллизации относительно низкотемпературной гетерогенной онгонитовой магмы. При температурах

700–730 °С экспериментально воспроизведена жидкостная фторидно-силикатная несмесимость с разделением (ликвацией) на F-Ca и онгонитовый расплавы. Определен состав силикатных стекол расплавных включений из вкрапленников минералов. Зафиксированы ощутимые вариации содержания петрогенных и примесных элементов в стеклах ПВ. Стекла имеют плюмазитовый состав, высокие концентрации F (2–10 мас. %) и, вероятно, воды (10–15 мас. %). Обнаружены стекла, содержащие до 5,6 мас. % Cs_2O и As_2O_5 до 14,4 мас. %. Изучены ПВ гетерогенного захвата с силикатным стеклом и округлыми выделениями F-Ca фазы (флюорита) в разном соотношении. Для F-Ca включений характерны высокие содержания Y и легких REE. Наши данные подтверждают связь между явлениями фторидно-силикатной несмесимости с участием F-Ca расплава и тетрад-эффектами в спектрах распределения REE онгонитов. Происходило перераспределение примесных элементов между несмесимыми расплавами: в F-Ca расплаве концентрировались REE и Y, а в онгонитовом – Cs и As.

В ходе проведенных исследований была получена информация о температурном режиме, составе и эволюции флюидов, онгонитового и F-Ca расплавов при формировании пород массива Ары-Булак. Метод термобарогеохимии дополняет традиционные петрологические и геохимические исследования, а включения минералообразующих сред наиболее информативны для определения составов магматических расплавов и флюидов.

Работа проводилась по программе ФНИ РАН № 0284-2021-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко В.И., Коваленко Н.И. Онгониты – субвулканические аналоги редкометалльных литий-фтористых гранитов. – М.: Наука, 1976. – 127 с.
2. Дергачев В.Б. Редкометалльные онгониты и эльваниты и их возможные аналоги в юго-западной Англии // Геология и геофизика. – 1990. – № 11. – С. 74–79.
3. Владимиров А.Г., Анникова И.Ю., Антипин В.С. Онгонит-эльванитовый магматизм Южной Сибири // Литосфера. – 2007. – № 4. – С. 21–40.
4. Соколова Е.Н., Смирнов С.З., Хромых С.В. Условия кристаллизации, состав и источники редкометалльных магм при формировании онгонитов Калба-Нарымской зоны Восточного Казахстана // Петрология. – 2016. – Т. 24. – № 2. – С. 168–193.
5. Рихванов Л.П., Арбузов С.И., Даш Б. Новые данные по геохимии онгонитов // Геосферные исследования. – 2017. – № 1. – С. 50–59.
6. Hortemeier W.T., Burt D.V. Ongonite and topazite dikes in the Flying Wranch area Tonto basin, Arizona // American Mineralogist. – 1988. – V. 73. – P. 507–523.
7. Štemprok M. Ongonite from Ongon Khairkhan, Mongolia // Mineralogy and Petrology. – 1991. – V. 43. – P. 255–273.
8. Johnston C., Chappell B.W. Topaz-bearing rocks from Mount Gibson, North Queensland, Australia // American Mineralogist. – 1992. – V. 77. – P. 303–313.
9. Naapala I. Magmatic and postmagmatic processes in tin-mineralized granites: topaz-bearing leucogranite in the Eurajoki Rapakivi Granite Stock, Finland // Journal of Petrology. – 1997. – V. 38. – № 12. – P. 1645–1659.
10. Гранитные пегматиты. Т. 2. Редкометалльные пегматиты / В.Е. Загорский, В.М. Макагон, Б.М. Шмакин и др. – Новосибирск: Наука, 1997. – 285 с.
11. Смирнов С.З. Флюидный режим магматического этапа развития редкометалльных гранито-пегматитовых систем, обогащенных фтором и бором: петрологические следствия: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2015. – 556 с.
12. Амазонитовые Li-F граниты REE-Nb-Zr-Th-U специализации: геохимия, минералогия, изотопная геохронология Тургинского массива в Восточном Забайкалье / Л.Ф. Сырицо, А.А. Иванова, Е.В. Баданина, Е.В. Волкова // Петрология. – 2021. – Т. 29. – № 1. – С. 64–89.
13. Magmatic evolution of Li-F, rare-metal granites: a case study of melt inclusions in the Khangilay complex, Eastern Transbaikalia (Russia) / E.V. Badanina, I.V. Veksler, R. Thomas, L.F. Syritso // Chemical Geology. – 2004. – V. 210. – P. 113–133.
14. Cretaceous ongonites (topaz-bearing albite-rich microleucogranites) from Ongon Khairkhan, Central Mongolia: products of extreme magmatic fractionation and pervasive metasomatic fluid: rock interaction. / J. Dostal, D.J. Kontak, O. Gerel, J.G. Shellnutt, M. Fayek // Lithos. – 2015. – V. 236–237. – P. 173–189.
15. Differentiated rare-element mineralization in an ongonite-topazite composite dike at the Xianghualing tin district, Southern China / F. Huang, R. Wang, L. Xie, J. Zhu, S. Erdmann et al. // Ore Geology Reviews. – 2015. – V. 65. – P. 761–778.
16. Vasyukova O., Williams-Jones A.E. Partial melting, fractional crystallisation, liquid immiscibility and hydrothermal mobilisation – A ‘recipe’ for the formation of economic A-type granite-hosted HFSE deposits // Lithos. – 2020. – V. 356–357. – 105300.
17. Сук Н.И. Жидкостная несмесимость в щелочных магматических системах. – М.: КДУ, «Университетская книга», 2017. – 238 с.
18. Алферьева Я.О., Щеткина Т.И., Граменицкий Е.Н. Предельное содержание фтора и воды в гранитных высокоэволюционированных расплавах // Вестник Московского ун-та. Серия 4. Геология. – 2018. – № 3. – С. 70–76.
19. Делицын Л.М. Механизм ликвации в природных и технологических силикатно-солевых расплавах – концентраторах редких земель и ниобия. – М.: ГЕОС, 2018. – 408 с.

20. Жидкостная несмесимость во флюидно-магматических системах (экспериментальное исследование) / А.П. Котельников, Н.И. Сук, З.А. Котельникова, Й. Янев, С. Енчева, В.В. Ананьев // Петрология. – 2019. – Т. 27. – № 2. – С. 206–224.
21. Жидкостная несмесимость и проблемы рудогенеза (по экспериментальным данным) / Ю.Б. Шаповалов, А.П. Котельников, Н.И. Сук, В.С. Коржинская, З.А. Котельникова // Петрология. – 2019. – Т. 27. – № 5. – С. 577–597.
22. Распределение REE, Y, Sc и Li между алюмосиликатным и алюмофторидным расплавами в модельной гранитной системе в зависимости от давления и содержания воды / Т.И. Щекина, А.А. Русак, Я.О. Алферьева и др. // Геохимия. – 2020. – Т. 65. – № 4. – С. 343–361.
23. Эволюция состава фторидно-кальциевого расплава по экспериментальным данным и процессы образования флюорита в риолитах / И.С. Перетяжко, Е.А. Савина, Н.И. Сук, А.П. Котельников, А.Н. Сапожников, Р.Ю. Шендрик // Петрология. – 2020. – Т. 28. – № 3. – С. 254–279.
24. Roedder E., Coombs D.S. Immiscibility in granitic melts, indicated by fluid inclusions in ejected granitic blocks from Ascension island // Journal of Petrology. – 1967. – V. 8. – № 3. – P. 417–451.
25. Hards N.J., Freestone I.C. Liquid immiscibility in fluor-silicate systems // NERC Rpt Prog Exp Petrol. – 1978. – V. 4. – P. 11–13.
26. Dolejš D., Baker D.R. Thermodynamic modeling of melts in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{NaAlO}_2-\text{SiO}_2-\text{F}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2005. – V. 69. – № 23. – P. 5537–5556.
27. Dolejš D., Baker D.R. Liquidus equilibria in the system $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{F}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ to 100 MPa: I. Silicate-fluoride liquid immiscibility in anhydrous systems // Journal of Petrology. – 2007. – V. 48. – P. 785–806.
28. Immiscibility between silicate magmas and aqueous fluids: a melt inclusion pursuit into the magmatic-hydrothermal transition in the Omsukchan granite (NE Russia) / V.S. Kamenetsky, V.B. Naumov, P. Davidson et al. // Chemical Geology. – 2004. – V. 210. – P. 73–90.
29. Klemme S. Evidence for fluoride melts in Earth's mantle formed by liquid immiscibility // Geology. – 2004. – V. 32. – № 5. – P. 441–444.
30. Veksler I.V. Liquid immiscibility and its role at the magmatic-hydrothermal transition: a summary of experimental studies // Chemical Geology. – 2004. – V. 210. – P. 7–31.
31. Partitioning of elements between silicate melt and immiscible fluoride, chloride, carbonate, phosphate and sulfate melts with implications to the origin of natrocarbonatite / I.V. Veksler, A.M. Dorfman, P. Dulski et al. // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2012. – V. 79. – P. 20–40.
32. Thomas R., Davidson P. Water and melt/melt immiscibility, the essential components in the formation of pegmatites; evidence from melt inclusions // Zeitschrift für Geologische Wissenschaften Berlin. – 2008. – V. 36. – № 6. – P. 347–364.
33. Vasyukova O., Williams-Jones A.E. Fluoride-silicate melt immiscibility and its role in REE per formation: evidence from the Strange Lake rare metal deposit, Quebec-Labrador, Canada // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2014. – V. 139. – P. 110–130.
34. Experimental study of liquid immiscibility in the Kiruna-type Vergenoeg iron-fluorine deposit, South Africa / T. Hou, B. Charlier, O. Namur, P. Schütte et al. // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2017. – V. 203. – P. 303–322.
35. Formation by silicate-fluoride + phosphate melt immiscibility of REE-rich globular segregations within aplite dikes / C.R. Stern, J.M. Allaz, M.B. Raschke, G.L. Farmer, M.A. Skewes // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2018. – V. 173. – Iss. 65. – P. 1–13.
36. Liquid immiscibility and problems of ore genesis / A.R. Kotelnikov, Yu.B. Shapovalov, N.I. Suk, Z.A. Kotelnikova, V.S. Korzhinskaya // Experiment in Geosciences. – 2019. – V. 25. – № 1. – P. 140–144.
37. Yang L., Van Hinsberg V.J. Liquid immiscibility in the CaF_2 -granite system and trace elements partitioning between the immiscible liquids // Chemical Geology. – 2019. – V. 511. – P. 28–41.
38. Перетяжко И.С. Включения магматических флюидов: P-V-T-X свойства водно-солевых растворов разных типов, петрологические следствия // Петрология. – 2009. – Т. 17. – № 2. – С. 197–221.
39. Несмесимость фторидно-кальциевого и силикатного расплава в трахириолитовой магме: данные изучения кислых вулканитов Нилгинской депрессии в Центральной Монголии / И.С. Перетяжко, Е.А. Савина, Н.С. Карманов, А.С. Дмитриева // Петрология. – 2018. – Т. 26. – № 4. – С. 400–424.
40. Peretyazhko I.S., Savina E.A. Fluoride-calcium (F-Ca) melt in rhyolitic magma: evidence from fluorite-rich rhyolites of the Nyalga Basin, Central Mongolia // Lithos. – 2020. – V. 354–355. – 105348.
41. Перетяжко И.С., Царева Е.А., Загорский В.Е. Первая находка аномально цезиевых алюмосиликатных расплавов в онгонитах (по данным изучения расплавных включений) // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 413. – № 6. – С. 791–797.
42. Геохимические особенности онгонитов Ары-Булакского массива, Восточное Забайкалье / В.С. Антипин, И.А. Андреева, В.И. Коваленко, В.А. Кузнецов // Петрология. – 2009. – Т. 17. – № 6. – С. 601–612.
43. Перетяжко И.С., Савина Е.А. Признаки жидкостной несмесимости в онгонитовой магме по данным изучения расплавных и флюидных включений в породах массива Ары-Булак (Восточное Забайкалье) // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 433. – № 5. – С. 678–683.
44. Перетяжко И.С., Савина Е.А. Флюидно-магматические процессы при образовании пород массива онгонитов Ары-Булак (Восточное Забайкалье) // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 10. – С. 1423–1442.
45. Перетяжко И.С., Савина Е.А. Тетрад-эффекты в спектрах распределения редкоземельных элементов гранитоидных пород как индикатор процессов фторидно-силикатной жидкостной несмесимости в магматических системах // Петрология. – 2010. – Т. 18. – № 5. – С. 536–566.
46. Rb-Sr изотопная система и особенности распределения Rb и Sr в породах массива онгонитов Ары-Булак, образованных при участии процессов фторидно-силикатной магматической несмесимости / И.С. Перетяжко, Е.А. Савина, С.И. Дриль, Н.С. Герасимов // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 11. – С. 1776–1789.
47. Перетяжко И.С., Савина Е.А., Дмитриева А.С. Распределение R3Э и Y между фторидно-кальциевым и силикатным несмесимыми расплавами в онгонитовой и обогащенной фтором трахириолитовой магмах // Материалы XVIII Всероссийской конференции по термобарогеохимии. – М., 2018. – С. 100–102.
48. Лаврентьев Ю.Г., Карманов Н.С., Усова Л.В. Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий микроскоп // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56 (8). – С. 1473–1482.
49. Граменицкий Е.Н., Щекина Т.И., Девятова В.Н. Фазовые отношения во фторсодержащих гранитной и нефелин-сиенитовой системах и распределение элементов между фазами. – М.: Геос, 2005. – 188 с.
50. Partitioning of lanthanides and Y between immiscible silicate and fluoride melts, fluorite and cryolite and the origin of the lanthanide tetrad effect in igneous rocks / I.V. Veksler, A.M. Dorfman, M. Kamenetsky, P. Dulski, D.B. Dingwell // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2005. – V. 69. – P. 2847–2860.

Поступила 12.09.2020 г.

Информация об авторах

Дмитриева А.С., младший научный сотрудник лаборатории геохимии гранитоидного магматизма и метаморфизма Института геохимии СО РАН.

Перетяжко И.С., доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по науке Института геохимии СО РАН.

Савина Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии гранитоидного магматизма и метаморфизма Института геохимии СО РАН.

UDC 553.212:548.4

RELICTS OF FLUORIDE-CALCIUM (FLUORITIC) AND SALT MELTS IN ROCKS OF THE ARY-BULAK MASSIF (EAST TRANSBAIKALIA)

Anna S. Dmitrieva,
dmitrieva@igc.irk.ru

Igor S. Peretyazhko,
pigmigor@igc.irk.ru

Elena A. Savina,
helen@igc.irk.ru

¹ Vinogradov Institute of Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
1a, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russia.

The relevance of the study of ongonites, which are subvolcanic analogs of rare-metal Li-F granites, is caused by obtaining new data on petrology and geochemistry of F and rare elements enriched with felsitic igneous rocks. Investigation of the processes associated with the separation of the initial homogeneous silicate melt into immiscible liquid phases with a contrasting composition is one of the important tasks of magmatic petrology.

The aim of the research is to study the phenomena of fluoride-silicate liquid immiscibility during the evolution of ongonite magma based on the data of studies of melt and fluid inclusions in minerals.

Objects: rocks of the Ary-Bulak massif, East Transbaikalia, Russia.

Methods: thermometric study of melt and fluid inclusions, analysis of inclusions using laser ablation system (LA-ICP-MS), cathodoluminescent study of mineral zoning, determination of the composition of minerals, phases and silicate glasses by energy dispersive spectrometry (SEM EDS).

Results. The inclusions of silicate melts, fluoride melts and saline brine-melts, as well as fluids coexisting with them in quartz and topaz were studied. Homogenization temperatures of inclusions: 350–400 °C for Fl, 370–570 °C for saline brines-melts, 700–730 °C for melt inclusions up to 30 μm in size (no homogenization is observed in larger melt inclusions). The formation of the rocks of the massif involved P-Q type fluids – steam solutions, NaF-containing with an admixture of chlorides. Melt inclusion contains crystallization products of ongonite melt (quartz, sanidine, albite, fluorite, mica, villiomite, W-ixiolite). Melt inclusion glasses have a per aluminous composition, high contents of F (2–10 wt. %) and water (10–15 wt. %), some of them contain Cs₂O (up to 5,6 wt. %) and As₂O₅ (14,4 wt. %). The authors have found out the inclusions of fluoride melts and brines-melts: with fluoride-calcium (F-Ca) phase or fluorite (prevailing), with aluminofluorides and phases with different ratios of chlorides Na, K, Cs, Mn, Fe, Ca, fluorides K, Al, Na. F-Ca inclusions are characterized by high concentrations of Y and LREE. The results of studying the inclusions indicate a fluoride-silicate liquid immiscibility in ongonite magma. It was found that, together with the ongonite melt, there were fluoride melts, brine-melts and water-salt fluids. The data obtained demonstrate the leading role of the F-Ca (fluorite) melt in the concentration of REE and Y in ongonite magma.

Key words:

Fluoride-silicate liquid immiscibility, fluid and melt inclusions, fluoride-calcium (F-Ca) melt, ongonite, Ary-Bulak massif.

The research was carried out as part of Basic Research Program no. 0284-2021-0007 of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

- Kovalenko V.I., Kovalenko N.I. *Ongonity – subvulkanicheskie analogi redkometalnykh lityi-ftoristykh granitov* [Ongonite – subvolcanic analogue of raremetal Li-F granite]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 127 p.
- Dergachev V.B. Rare metal ongonites and elvanites and their possible analogues in southwestern England. *Geology and Geophysics*, 1990, no. 31 (11), pp. 69–73. In Rus.
- Vladimirov A.G., Annikova I.Yu., Antipin V.S. Ongonite-elvan magmatism of southern Siberia. *Lithosphere*, 2007, no. 4, pp. 21–40. In Rus.
- Sokolova E.N., Smirnov S.Z., Khromykh S.V. Crystallization conditions, composition and sources of rare-metal magmas during the formation of ongonites of the Kalba-Narym zone of Eastern Kazakhstan. *Petrology*, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 168–193. In Rus.
- Rikhvanov L.P., Arbuzov S.I., Dash B. New data on the geochemistry of ongonites. *Geosphere research*, 2017, no. 1, pp. 50–59. In Rus.
- Hortemeier W.T., Burt D.V. Ongonite and topazite dikes in the Flying Wrench area Tonto basin, Arizona. *American Mineralogist*, 1988, vol. 73, pp. 507–523.
- Štemprok M. Ongonite from Ongon Khairkhan, Mongolia. *Mineralogy and Petrology*, 1991, vol. 43, pp. 255–273.
- Johnston C., Chappell B.W. Topaz-bearing rocks from Mount Gibson, North Queensland, Australia. *American Mineralogist*, 1992, vol. 77, pp. 303–313.
- Haapala I. Magmatic and postmagmatic processes in tin-mineralized granites: topaz-bearing leucogranite in the Eurajoki Rapakivi Granite Stock, Finland. *Journal of Petrology*, 1997, vol. 38, no. 12, pp. 1645–1659.
- Zagorsky V.E., Makagon V.M., Shmakin B.M. *Granitnye pegmatity. T. 2. Redkometalnye pegmatity* [Granite pegmatites. Vol. 2. Rare-metal pegmatites]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1997. 286 p.
- Smirnov S.Z. *Flyuidnyy rezhim magmaticheskogo etapa razvitiya redkometalnykh granitno-pegmatitovykh sistem, obogashchennykh fluorom i borom: petrologicheskie sledstviya. Diss. Dokt. nauk* [Fluid regime of the magmatic stage of development of rare-metal granite-pegmatite systems enriched in fluorine and boron: petrological consequences: Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2015. 556 p.
- Syryso L.F., Ivanova A.A., Badanina E.V., Volkova E.V. Amazonite Li-F granites REE-Nb-Zr-Th-U specializations: geochemistry, mineralogy, isotope geochronology of the Turgin massif in Eastern Transbaikalia. *Petrology*, 2021, vol. 29, no. 1, pp. 64–89. In Rus.
- Badanina E.V., Veksler I.V., Thomas R., Syritso L.F., Trumbull R.B. Magmatic evolution of Li-F, rare-metal granites: a case study of

- melt inclusions in the Khangilay complex, Eastern Transbaikalia (Russia). *Chemical Geology*, 2004, vol. 210, pp. 113–133.
14. Dostal J., Kontak D.J., Gerel O., Shellnutt J.G., Fayek M. Cretaceous ongonites (topaz-bearing albite-rich microleucogranites) from Ongon Khairkhan, Central Mongolia: products of extreme magmatic fractionation and pervasive metasomatic fluid: rock interaction. *Lithos*, 2015, vol. 236–237, pp.173–189.
 15. Huang F., Wang R.-C., Xie L., Zhu J.-C., Erdmann S. Differentiated rare-element mineralization in an ongonite – topazite composite dike at the Xianghualing tin district, Southern China: an electron-microprobe study on the evolution from niobium-tantalum-oxides to cassiterite. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 65, pp.761–778.
 16. Vasyukova O., Williams-Jones A.E. Partial melting, fractional crystallisation, liquid immiscibility and hydrothermal mobilization – a ‘recipe’ for the formation of economic A-type granite-hosted HFSE deposits. *Lithos*, 2020, vol. 356–357, 105300.
 17. Suk N.I. *Zhidkostnaya nesmesimost v shchelochnykh magmaticheskikh sistemakh* [Liquid immiscibility in alkaline magmatic systems]. Moscow, KDU, University book Publ., 2017. 238 p.
 18. Alferieva Ya.O., Shchekina T.I., Gramenitskiy E.N. Maximum fluorine and water concentration in highly evolved granite melts. *Moscow University Bulletin. Ser. 4. Geology*, 2018, no. 3, pp. 70–76. In Rus.
 19. Delitsyn L.M. *Mekhanizm likvatsii v prirodnykh i tekhnologicheskikh silikatno-solevykh rasplavakh – kontsratorakh redkikh zemel i niobiya* [The mechanism of segregation in natural and technological silicate-salt melts – concentrators of rare earths and niobium]. Moscow, GEOS Publ., 2018. 408 p.
 20. Kotelnikov A.R., Suk N.I., Kotelnikova Z.A., Yanev Y., Encheva S., Ananiev V.V. Liquid immiscibility in fluid-magmatic systems (experimental study). *Petrology*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 186–201. In Rus.
 21. Shapovalov Yu.B., Kotelnikov A.R., Suk N.I., Korzhinskaya V.S., Kotelnikova Z.A. Liquid immiscibility and problems of ore genesis (according to experimental data). *Petrology*, 2019, vol. 27, no. 5, pp. 534–551. In Rus.
 22. Shchekina T.I., Rusak A.A., Alferyeva Y.O. REE, Y, Sc and Li Partition between aluminosilicate and aluminofluoride melts, depending on pressure and water content in the model granite system. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, pp. 391–407. In Rus.
 23. Peretyazhko I.S., Savina E.A., Suk N.I., Kotelnikov A.R., Sapozhnikov A.N., Shendrik R.Y. Evolution of the of fluoride-calcium melt composition according to experimental data and fluorite formation in rhyolites. *Petrology*, 2020, vol. 28, no. 3, pp. 221–245. In Rus.
 24. Roedder E., Coombs D.S. Immiscibility in granitic melts, indicated by fluid inclusions in ejected granitic blocks from Ascension island. *Journal of Petrology*, 1967, vol. 8, no. 3, pp. 417–451.
 25. Hards N.J., Freestone I.C. Liquid immiscibility in fluor-silicate systems. *NERC Rpt Prog Exp Petrol.*, 1978, vol. 4, pp. 11–13.
 26. Dolejs D., Baker D.R. Thermodynamic modeling of melts in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{NaAlO}_2-\text{SiO}_2-\text{F}_2\text{O}_1$. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, vol. 69, no. 23, pp. 5537–5556.
 27. Dolejs D., Baker D.R. Liquidus equilibria in the system $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{F}_2\text{O}_1-\text{H}_2\text{O}$ to 100 MPa: 1. Silicate-fluoride liquid immiscibility in anhydrous systems. *Journal of Petrology*, 2007, vol. 48, pp. 785–806.
 28. Kamenetsky V.S., Naumov V.B., Davidson P. Immiscibility between silicate magmas and aqueous fluids: A melt inclusion pursuit into the magmatic-hydrothermal transition in the Omsukchan granite (NE Russia). *Chemical Geology*, 2004, vol. 210, pp. 73–90.
 29. Klemme S. Evidence for fluoride melts in Earth’s mantle formed by liquid immiscibility. *Geology*, 2004, vol. 32, no. 5, pp. 441–444.
 30. Veksler I.V. Liquid immiscibility and its role at the magmatic-hydrothermal transition: a summary of experimental studies. *Chemical Geology*, 2004, vol. 210, pp. 7–31.
 31. Veksler I.V., Dorfman A.M., Dulski P. Partitioning of elements between silicate melt and immiscible fluoride, chloride, carbonate, phosphate and sulfate melts with implications to the origin of natrocarbonatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, vol. 79, pp. 20–40.
 32. Thomas R., Davidson P. Water and melt/melt immiscibility, the essential components in the formation of pegmatites; evidence from melt inclusions. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften Berlin*, 2008, vol. 36, no. 6, pp. 347–364.
 33. Vasyukova O., Williams-Jones A.E. Fluoride-silicate melt immiscibility and its role in REE per formation: Evidence from the Strange Lake rare metal deposit, Quebec-Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 139, pp. 110–130.
 34. Hou T., Charlier B., Namur O., Schütte P., Schwarz-Schampera U., Zhang Z., Holtz F. Experimental study of liquid immiscibility in the Kiruna-type Vergenoeg iron–fluorine deposit, South Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, vol. 203, pp. 303–322.
 35. Stern C.R., Allaz J.M., Raschke M.B., Farmer G. L., Skewes M.A., Ross J.T. Formation by silicate–fluoride + phosphate melt immiscibility of REE-rich globular segregations within aplite dikes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2018, vol. 173, Iss. 65, pp. 1–13.
 36. Kotelnikov A.R., Shapovalov Yu.B., Suk N.I., Kotelnikova Z.A., Korzhinskaya V.S. Liquid immiscibility and problems of ore genesis. *Experiment in Geosciences*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 140–144.
 37. Yang L., Hinsberg V.J. Liquid immiscibility in the CaF_2 -granite system and trace elements partitioning between the immiscible liquids. *Chemical Geology*, 2019, vol. 511, pp. 28–41.
 38. Peretyazhko I.S. Inclusions of magmatic fluids: P-V-T-X properties of aqueous salt solutions of various types and petrological implications. *Petrology*, 2009, vol. 17, no. 2, pp. 178–201. In Rus.
 39. Peretyazhko I.S., Savina E.A., Karmanov N.S., Dmitrieva A.S. Immiscibility of fluoride-calcium and silicate melts in trachyrhyolitic magma: data on acidic volcanic rocks from the Nyalga basin, Central Mongolia. *Petrology*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 389–413. In Rus.
 40. Peretyazhko I.S., Savina E.A. Fluoride-calcium (F-Ca) melt in rhyolitic magma: Evidence from fluorite-rich rhyolites of the Nyalga Basin, Central Mongolia. *Lithos*, 2020, vol. 354–355, 105348.
 41. Peretyazhko I.S., Tsareva E.A., Zagorsky V.Ye. A first finding of anomalously Cs-rich aluminosilicate melts in ongonite: Evidence from melt inclusion study. *Doklady Earth Sciences*, 2007, vol. 413, pp. 462–468. In Rus.
 42. Antipin V.S., Andreeva I.A., Kovalenko V.I., Kuznetsov V.A. Geochemical specifics of ongonites in the Ary-Bulak massif, Eastern Transbaikalia. *Petrology*, 2009, vol. 17, no. 6, pp. 558–569. In Rus.
 43. Peretyazhko I.S., Savina E.A. Sinks of liquid immiscibility in ongonitic magma: Evidence from the study of melt and fluid inclusions in the rocks of the Ary-Bulak massif (Eastern Transbaikalia). *Doklady Earth Sciences*, 2010, vol. 433, pp. 1077–1082. In Rus.
 44. Peretyazhko I.S., Savina E.A. Fluid and magmatic processes in the formation of the Ary-Bulak ongonite massif (Eastern Transbaikalia). *Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 10, pp. 1110–1125. In Rus.
 45. Peretyazhko I.S., Savina E.A. Tetrad effects in the rare earth element patterns of granitoid rocks as an indicator of fluoride-silicate liquid immiscibility in magmatic systems. *Petrology*, 2010, vol. 18, no. 5, pp. 514–543. In Rus.
 46. Peretyazhko I.S., Savina E.A., Dril S.I., Gerasimov N.S. Rb-Sr isotope system and Rb-Sr partitioning in the rocks of the Ary-Bulak ongonite massif, formed with the participation of fluoride-silicate magmatic immiscibility. *Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 11, pp. 1401–1411. In Rus.
 47. Peretyazhko I.S., Savina E.A., Dmitrieva A.S. Raspreделение REE i Y mezhdru ftoridno-kaltsievym i silikatnym nesmesimymi rasplavami v ongonitovoy i obogashchennoy ftorom trachiriolitovoy magmakh [Distribution of REE and Y between fluoride-calcium and silicate immiscible melts in ongonite and fluorine-enriched trachyrhyolite magmas]. *Materialy XVIII Vserossiyskoy konferentsii po termobarogeokhimi* [Proc. of the XVIII Russian Conference on fluid inclusions]. Moscow, 2018. pp. 100–102.
 48. Lavrentiev Y.G., Karmanov N.S., Usova L.V. Electron probe microanalysis of minerals: Microanalyzer or scanning electron microscope. *Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 8, pp. 1154–1161. In Rus.
 49. Gramenitskiy E.N., Shchekina T.I., Devyatova V.N. *Fazovye otosheniya vo ftorsoderzhashchikh granitoy i nefelin-sienitovoy sistemakh i raspredelenie elementov mezhdru fazami* [Phase relations in fluorine-bearing granite and nepheline-syenite systems and distribution of elements between phases]. Moscow, Geos Publ., 2005. 188 p.
 50. Veksler I.V., Dorfman A.M., Kamenetsky M., Dulski P., Dingler D.B. Partitioning of lanthanides and Y between immiscible silicate and fluoride melts, fluorite and cryolite and the origin of the lanthanide tetrad effect in igneous rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, vol. 69, pp. 2847–2860.

Received: 12 September 2020.

Information about the authors

Anna S. Dmitrieva, research assistant, Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Igor S. Peretyazhko, Dr. Sc., deputy director for research, Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Elena A. Savina, Cand. Sc., senior research officer, Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 666.972

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННОГО МИКРОКРЕМНЕЗЕМА СОВМЕСТНО С МИКРОАРМИРУЮЩИМ ВОЛОКНОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Ткач Евгения Владимировна¹,
ev_tkach@mail.ru

Темирканов Руслан Ильясович¹,
profit288@gmail.com

Ткач Семен Андреевич²,
DS_2009@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 12933, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

² Открытое Акционерное Общество «РОТ ФРОНТ», Россия, 115184, г. Москва, 2-й Новокузнецкий пер., 13/15.

Актуальность. Основной задачей осуществления экологической политики является создание ресурсоэффективной системы размещения и утилизации промышленных отходов и вторичного сырья, в частности, при производстве строительных материалов и изделий заданных свойств. В рамках данного исследования рассмотрены вопросы, связанные с активацией микрокремнезема, являющегося отходом ферросплавного производства, и способами его применения для модифицирования структуры цементного камня, в частности для тяжелого бетона. Определены механизм процесса структурообразования, способ введения и оптимальный расход добавки для модифицирования бетонной смеси. С помощью комплексного исследования определены продукты диспергирования микрокремнезема, входящего в состав комплексного модификатора. Установлено, что процесс действия химической активации минеральных частиц изучен недостаточно, в связи с этим представленные исследования, заключающиеся в поиске решений повышения эксплуатационных характеристик за счет процесса предварительной обработки микрокремнезема щелочной средой $pH=10,2$ совместно с микроармирующим компонентом, являются актуальными.

Цель: установить положительное действие процесса активации микрокремнезема совместно с микроармирующим компонентом на модифицирование структуры тяжелого бетона для повышения прочностных, деформативных и гидрофизических свойств.

Объект: модифицированный тяжелый бетон на основе активированного микрокремнезема совместно с микроармирующим компонентом.

Методы: рентгенофазовый анализ; физико-химическая активация микрокремнезема водой, обработанной методом электролиза прибором «Мелеста»; ИК-спектроскопия при помощи ИК Фурье спектрометра Varian 640-IR; испытания на трещиностойкость с помощью сервогидравлической системы ADVANTEST 9; определение марки морозостойкости в климатической камере WK3 180/40; водонепроницаемость определяли в установке УВБ-МГ4.01; водопоглощение определяли, используя электрическую цифровую печь СНОЛ.

Результаты. Установлено положительное влияние активированного микрокремнезема на свойства тяжелого бетона путем уменьшения содержания вяжущего (цемента) и замены его микродисперсным наполнителем, предварительно активированным щелочной средой с $pH=10,2$. При этом отмечается повышение прочности на сжатие бетона в возрасте 28 суток на 20,72 МПа в сравнении с контрольным составом. Дальнейшее модифицирование комплексной добавкой (высоководоредуцирующая добавка «MasterGlenium 115» с расходом 1 % и реакционно-химическая добавка микрокремнезем марки МКУ-95 – 15 % от массы вяжущего) совместно с базальтовым волокном позволяет улучшить не только физико-механические свойства бетона, но и гидрофизические: водопоглощение – 2 %; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость – F600, что дает возможность применять данный состав на практике для получения строительных изделий и конструкций с заданными характеристиками в суровых условиях эксплуатации.

Ключевые слова:

Химическая активация, кремнезем, комплексная добавка, щелочная среда, микроармирующее волокно, модифицирование структуры цементного камня, гидрофизические свойства.

Введение

Тяжелые бетоны применяются в качестве конструктивных материалов, работающих в суровых условиях эксплуатации при возведении конструкции для зданий и сооружений гражданского, промышленного и специального назначения, что обусловлено их высокой прочностью (до 150 МПа и выше), морозостойкостью ($F_1=1000$), плотностью (до 2500 кг/м³), водонепроницаемостью (W20), коррозионной стойко-

стью в агрессивных средах. В настоящее время активно проводятся исследования по модифицированию бетонов путем применения химических добавок-модификаторов, а также микро- и нанодисперсных добавок (углеродные нанотрубки, силикатные microsферы, наночастицы оксидов металлов и др.) [1–3].

Преимуществами таких бетонов, по сравнению с традиционными, являются повышенные показатели качества: физико-механические характеристики

(прочность на сжатие, растяжение при изгибе, трещиностойкость), что связано с повышением плотности и модифицированием структуры цементного камня. Вместе с тем по ряду физико-механических характеристик тяжёлые бетоны не соответствуют современным требованиям, предъявляемым к современным строительным материалам и изделиям на их основе. Для улучшения их эксплуатационных характеристик в последнее время проводятся исследования в направлении модифицирования цементных бетонов путем введения в состав эффективных комплексных добавок, содержащих активные частицы кварца [4–8], а также микроармирующие компоненты [9–13], что является перспективным и ресурсосберегающим направлением развития материаловедения. Имеющиеся в литературе данные по этой проблеме [5, 6, 12] не позволяют составить целостного представления о влиянии состава бетонной смеси, перевода частиц аморфного микрокремнезема в активную форму в щелочной среде совместно с микроармирующим компонентом в виде полипропиленовой фибры или базальтового волокна на физико-механические свойства. В связи с чем изучение синергетического эффекта воздействия микроармирующего волокна и активированного микрокремнезема на эксплуатационные характеристики тяжелого бетона является актуальным как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

Одним из путей решения проблемы повышения характеристик тяжёлых бетонов является введение в состав бетонных смесей активных минеральных добавок – золы уноса, микрокремнезема, золы рисовой шелухи. В этом направлении наиболее перспективные результаты получены в работах [4, 14–17].

В работе [17] авторы приводят результаты исследований бетонной смеси с комплексным модификатором, в состав которой входят: зола рисовой шелухи, зола уноса (неорганическая составляющая), суперпластификатор С-3 или Sika ViscoCrete 5-New (органическая составляющая). Выявлен двоякий механизм действия модификаторов в цементных системах: «химический» фактор – содержание в своем составе диоксида кремния в аморфной модификации и золы рисовой шелухи высокой дисперсности; «физический» фактор – заполнение пространства между кристаллогидратами и сокращение объема свободной воды, приводящий к снижению капиллярной пористости цементного камня и повышению количества гелевых пор. Введение в бетонную смесь золы рисовой шелухи и золы уноса с расходом каждой добавки 10 % совместно с суперпластификатором Sika ViscoCrete 5-New расходом 1,5 % от массы вяжущего вещества повышает в возрасте 28 суток прочность на растяжение при изгибе на 10 %, призмную прочность на 19,5 %, кубиковую прочность при сжатии на 18,2 %, по отношению к контрольному образцу. Результаты использования данной добавки при получении высокопрочного бетона, которые не вполне соответствуют данным [6], также приведены в работах [4, 16]. Расхождения можно объяснить содержанием кварца в активных минеральных добавках и рекомендуемым

расходом комплексной добавки. Другие типы добавок, способствующих улучшению характеристики трещиностойкости бетонов, исследованы в работах [8–11]. В работе [12] исследования основаны на изучении влияния дисперсного армирования полипропиленовым волокном на бетонные элементы. Показано, что введение в мелкозернистую бетонную смесь полипропиленовой фибры с расходом 4 кг/м^3 и длиной элементарного волокна 6 мм способствует повышению предела прочности при сжатии на 25,4 % и при изгибе на 51,2 % относительно контрольного состава. При этом отмечается эффект «переармирования» материала при повышении рекомендуемого расхода волокна, что негативно влияет на физико-механические характеристики исследуемых образцов бетона. Дальнейшее увеличение содержания полипропиленового волокна уменьшает толщину цементного камня между ними, что приводит к расслоению и нарушению сплошности образца. Аналогичное изменение вышеуказанных показателей по сравнению с контрольными образцами наблюдали в работах [10, 11].

Более перспективным с точки зрения ресурсоэффективности является использование модификаторов, содержащих в своем составе аморфный микрокремнезем, являющийся более доступным и экологически безопасным отходом ферросплавного производства. Преимуществом его применения является способность позитивно воздействовать на основные эксплуатационные свойства тяжелого бетона: водонепроницаемость, прочность, морозостойкость, износостойкость, выносливость, стойкость к хлоридной, сульфатной коррозии, сопротивляемость к воздействию морской воды и слабых кислот [4, 17]. Ряд модификаторов изучены в работах зарубежных авторов [6–10]. В исследовании [13] показано, что введение комплексной добавки суперпластификатор GleniumACE 430 совместно с микрокремнеземом в бетонную смесь на основе гидравлического вяжущего вещества повышает морозостойкость до 400 циклов и выше, что связано с аморфизацией структуры цементного камня. Результаты использования этой добавки при получении высокопрочного тяжелого бетона, которые не вполне соответствуют данным [13], также приведены в работах [4, 15, 17]. Расхождения можно объяснить различным способом введения и дозировкой модификатора. Анализ литературных данных [1–17] по составу и характеристикам бетонов, влиянию комплексных модификаторов на прочностные и эксплуатационные характеристики показал, что вопросы снижения расхода микрокремнезема путем перевода частиц в активную форму и совместное влияние дисперсного армирования на заданные характеристики изучаемого материала до сих пор остаются невыясненными. В связи с этим целью настоящей работы являлась разработка органоминеральной композиции с оптимальным расходом активированного микрокремнезема и микроармирующего волокна для повышения прочностных, деформативных и гидрофизических характеристик тяжелого бетона.

Материалы и методы исследования

При исследовании основных прочностных и деформативных характеристик бетонов в качестве вяжущего применялся портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н, производитель ООО «Холсим (Рус) Строи-

тельные Материалы» (г. Калуга). Химический и минеральный состав цемента определяли при помощи рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализов, результаты которых представлены в табл. 1.

Таблица 1. Химический и минеральный состав портландцемента

Table 1. Chemical and mineral composition of Portland cement

Марка цемента Cement grade	Химический состав, мас. % Chemical composition, wt. %						
	Na ₂ O	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
ЦЕМ I 42,5Н CEM I 42,5N	0,57	0,3	0,69	3,75	65,36	4,89	24,44
	Содержание кристаллических фаз в клинкере, мас. % Content of crystalline phases in clinker, wt. %						
	C ₄ AF (4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃)		C ₃ A (3CaO·Al ₂ O ₃)		C ₂ S (2CaO·SiO ₂)		C ₃ S (3CaO·SiO ₂)
	11,46		7,84		12,62		68,08

Дисперсный состав, технологические и прочностные характеристики цемента и получаемого из него цементного камня определяли с использованием ситового анализа (контролировали тонкость помола цемента прохождения через сито № 008 с размером ячеек 80 мкм не менее 85 % массы просеиваемой пробы), пикнометрического метода (истинная плотность цемента составила 3156 кг/м³), определения прочности на изгиб и сжатие (универсальный испытательный блок UPB 86/200, Form+Test, Германия) в соответствии со стандартными методиками. Для определения механической прочности готовили образцы-балочки размером 4×4×16 см из цементно-песчаного раствора с водоцементным отношением В/Ц=0,4. После изготовления образцы в формах содержали 1 сутки в ванне с гидравлическим затвором, в которой обеспечивался режим: относительная влажность воздуха не менее 90 % и температура среды (20±2) °С. Через сутки образцы расформовали и затем 27 суток хранили в ванне с водой, температуру в которой контролировали в пределах (20±2) °С. После установленного срока выдержки исследуемые образцы-балочки вынимались из ванны, заполненной водой, и через 30 минут испытывали на прочностные характеристики. По результатам испытаний установлено, что цемент соответствует требованиям стандарта по нормируемым показателям: тест на равномерность изменения объема (кольцо Ля Шателье) выдерживает; начало схватывания цементного теста – 197 мин, прочности при сжатии в возрасте 2 и 28 суток – 24,7 и 57,5 МПа, соответственно.

В качестве мелкого заполнителя использовали природный песок с модулем крупности 2,4 с размером частиц от 0,16 до 2,5 мм (поставщик ООО «СТМ-Неруд», г. Чехов, Московская область). Основной фазой песка являлся SiO₂ в кристаллической модификации кварц, тримит и кристобалит. Содержание примесей не превышало 1,5 %, в состав которых входили глинистые и пылевидные частицы.

В исследовательской части работы крупный заполнитель был представлен в виде гранитного щебня, фракции от 5 до 20 мм производства ООО «Сунский карьер», г. Петрозаводск, который соответствует требованиям по содержанию глинистых, илистых, пыле-

видных частиц – 0,95 %; зерен игольчатой и пластинчатой и формы – 12,9 %; марка щебня по морозостойкости – 300; удельная эффективная активность радионуклидов (A_{эфф}) – 91 Бк/кг; марка щебня по дробимости – 1400; насыпная плотность – 1355 кг/м³; марка щебня по истираемости И-1. Максимум в распределении щебня по размерам приходился на 20 мм. Исследуемый заполнитель относится к среднезернистому типу кристаллической структуры.

Для затворения бетонных смесей использовали водопроводную воду с содержанием сульфатов 2500 мг/л (в пересчете на SO₄) и содержанием всех солей 3600 мг/л. Для сохранения марки по жесткости (Ж1) водоцементное отношение не изменяли (В/Ц=0,35).

Для повышения подвижности бетонных смесей в них вводили гиперпластификатор «MasterGlenium 115» на основе эфира поликарбоксилата, (производитель ООО «БАСФ Строительные системы», г. Краснодар), расход которого составлял 1 % от массы вяжущего вещества, рекомендованный производителем модификатор вводили в бетонную смесь одновременно с водой затворения из расчета 4,2 кг на 1 м³ готовой смеси.

В качестве активной минеральной добавки в бетонные смеси вводили микрокремнезем марки МКУ-95 (производитель ООО «РУСАЛ Кремний Урал», г. Каменск-Уральский) с интервалом варьирования в количестве от 10 до 20 % от массы вяжущего вещества. Микрокремнезем данной марки является отходом производства ферросилиция, содержащий пылевидные частицы размером от 0,87 до 76,06 мкм. Микрокремнезем вводили в бетонные смеси на этапе смешивания крупного и мелкого заполнителя с цементом. В ряде экспериментов использовали активированный микрокремнезем. Активацию проводили методом электролиза (прибор «Мелеста», производитель ООО «МВП») с применением электродов: катод, выполненный из нержавеющей стали, анод – из титана, покрытого оксидом рутения. В прибор заливали водопроводную воду в объеме 0,8 л, и проводили электролиз в соответствии с паспортными данными прибора до температуры нагревания воды 35 °С.

Для повышения трещиностойкости бетонов в бетонную смесь вводили микроармирующие компонен-

ты – полипропиленовую фибру или рубленое базальтовое волокно (ООО «Европолис», г. Дубна, Московская область), на этапе сухого перемешивания вяжущего (портландцемента) совместно с мелким и крупным заполнителем.

Для испытания на прочностные и гидрофизические свойства бетона использовалось следующее лабораторное оборудование: универсальный испытательный блок UPB 86/200, сервогидравлическая система ADVANTEST 9, климатическая камера WK3 180/40, установка УВБ-МГ4.01, электрическая цифровая печь СНОЛ.

Результаты и их обсуждение

Поведение кремнезема в щелочной среде и способ перевода частиц в активную форму изучались в данной работе путем применения в качестве воды затворения водопроводной воды, предварительно обработанной электролизером. Впервые д-р техн. наук, профессор В.М. Бахир в 1972 г. открыл неизвестную на тот момент закономерность: модели католита и анолита, приготовленные путем растворения в воде химических реагентов [18, 19], по своим физическим, химическим параметрам и реакционной способности сильно отличаются от анолита и католита, полученных в электрохимическом диафрагменном реакторе из слабоминерализованной воды. Дальнейшее исследование данного процесса привело к выводу, что полученные модели при обработке воды отличаются от растворов стабильных кислот или щелочей присутствием периода релаксации и являются электрохимически активированными растворами (водой). Разработанная методика электрохимической активации характеризуется повышенными показателями водородного потенциала, окислительно-восстановительного потенциала, электропроводности, физико-химических параметров.

По мнению автора, использование данной воды возможно в качестве реакционной среды с целью экономии энергии, повышения качества конечного материала, управления сложными физико-химическими реакциями, что подтверждается и в работах других исследователей [20, 21]. Для проведения лабораторных исследований в качестве электролизера применялся прибор «Мелеста» (ТУ 5156-002-32064511-07, сертификат соответствия № ТС С-РУ.АЯ36.В.00661 Серия RU № 0136939), производи-

тель ООО МВП «Мелеста», г. Уфа, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

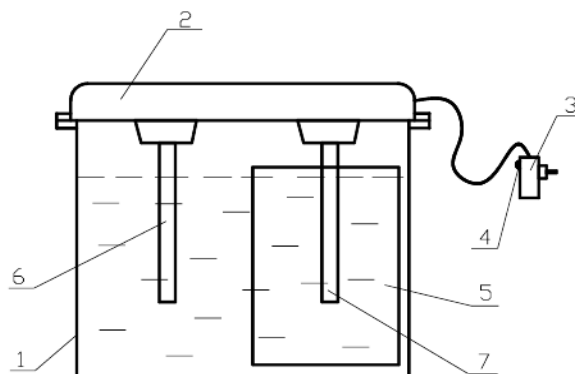


Рис. 1. Схема устройства прибора «Мелеста», где: 1 – основная емкость; 2 – съемная верхняя крышка; 3 – блок питания с предохранителем ВП4-5 3.15 А; 4 – световой индикатор; 5 – съемная внутренняя емкость с диафрагмой; 6 – катод; 7 – анод

Fig. 1. Diagram of the device «Melesta», where: 1 – main vessel; 2 – removable top cover; 3 – power supply unit with fuse VP4-5 3.15 A; 4 – light indicator; 5 – removable inner container with a diaphragm; 6 – cathode; 7 – anode

Катод в приборе выполнен из нержавеющей стали, а анод – из титана, покрытого оксидом рутения. В прибор заливали водопроводную воду в объеме 0,8 л, и проводили электролиз в соответствии с паспортными данными прибора до температуры нагревания воды 35 °С. По результатам обработки воды в основной емкости (позиция 1, рис. 1) образовалась щелочная среда с pH=10,2, а во внутренней емкости (позиция 5, рис. 1) – кислая среда с pH= 2,6. Полученные результаты согласуются с трудами ученых [18–24]. Следующим этапом изучалось воздействие полученного католита на микрокремнезем с его предварительной выдержкой до 20 минут в щелочной среде, связанное с переводом частиц кремнезема в активную форму, и введение совместно с гиперпластификатором «MasterGlenium 115» и водой затворения на этапе сухого смешивания мелкого и крупного заполнителя, вяжущего вещества и волокна. Механизм растворения кремнезема в воде в присутствии гидроксил-ионов представлен на рис. 2.

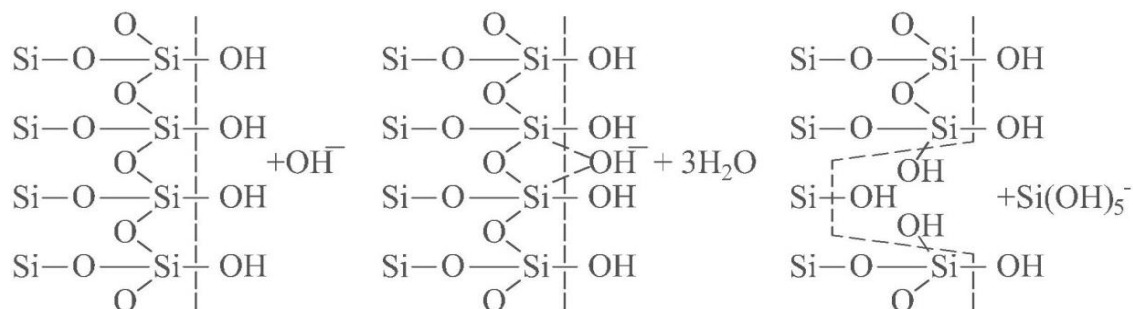
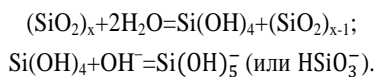


Рис. 2. Принципиальная схема растворения кремнезема в воде в присутствии гидроксил-ионов. Пунктирная линия показывает поверхность раздела между водой (справа) и кремнеземом (слева) [25]

Fig. 2. Schematic diagram of silica dissolution in water in the presence of hydroxyl ions. The dotted line shows the interface between water (right) and silica (left) [25]

Из химических реакций (рис. 2.) следует, что первоначально происходит процесс адсорбции иона OH^- , за ним следует переход поверхностного атома кремния в раствор в виде силикат-иона, который при pH 10,2 гидролизует с образованием ионов OH^- и молекул растворимого кремнезема $\text{Si}(\text{OH})_4$, что согласуется с работой [26]. В данной области значений pH растворимый аморфный кремнезем находится в равновесии как с нейтральным мономером, так и с силикат-ионами:



Проанализировав представленные выше теоретические данные работ [25, 26], связанные с поведением аморфного кремнезема в щелочной среде при $\text{pH}=10,2$, было принято решение использовать в качестве среды предварительно обработанную методом электролиза водопроводную воду, которая содержит гидрокарбонаты кальция и магния.

Далее эффективность применения добавок оценивали по экспериментально установленным показателям механических и физико-химических свойств модифицируемых составов бетона. Для определения оптимального расхода высокорекреационной добавки в виде микрокремнезема в составе бетонной смеси с целью повышения физико-механических характеристик бетона был установлен интервал варьирования расхода добавки в количестве 5 % от массы вяжущего. При введении микронаполнителя расход цемента уменьшали в связи с высокой вероятностью образования локальных агрегатов из цементных частиц, которые непосредственно взаимно контактируют в процессе смешивания с водой. Удаленность частиц вяжущего относительно друг друга на расстояние диаметра частиц микрокремнезема способствует повышению микрооднородности структуры и прочности модифицированной цементной матрицы [27]. Оптимальное содержание комплексной добавки (высоководоредуцирующая добавка «MasterGlenium 115» плюс реакционно-химическая добавка микрокремнезем марки MKU-95) определяли по изменению предела прочности на сжатие в возрасте 28 суток нормального твердения, по 3 образца для каждого состава, размером $150 \times 150 \times 150$ мм. Исследуемые составы и результаты испытания, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что оптимальное содержание микрокремнезема составляет 15 % [состав 4], что подтверждается превышением прочности на 39,5 % относительно контрольного образца.

Представленный на рис. 3 ИК-спектр многократного нарушения полного внутреннего отражения обработанного микрокремнезема кислот и щелочной средой по положению пиков и полос поглощения в спектрах пропускания в диапазоне $500\text{--}4500$ cm^{-1} совпадает с золам ортокремневой кислоты. В диапазоне $500\text{--}600$ cm^{-1} полоса поглощения характерна для деформационных колебаний связей внутри кремнекислородных сочленений и их группировок. За счёт сим-

метричных колебаний Si-O-Si связей (колебаний кремнекислородных тетраэдров друг относительно друга) возникает полоса поглощения $700\text{--}900$ cm^{-1} , что свидетельствует об их полной полимеризации. В спектральной области $1000\text{--}1290$ cm^{-1} присутствует глубокая полоса поглощения, связанная с поперечными, смешанными и продольными и колебаниями Si-O-Si связей, с минимумом пропускания при 1080 cm^{-1} [28].

Таблица 2. Исследуемые составы бетона с учетом расхода материалов и результаты испытаний

Table 2. Investigated concrete compositions, taking into account the consumption of materials, and test results

Компоненты бетонной смеси Concrete components	Состав и расход на 1 м^3 смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$ Composition and consumption per 1 м^3 of mixture, kg/m^3				
	Контрольный Control	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Цемент ЦЕМ I 42,5Н Cement CEM I 42,5N	421	377	356	337	358
Крупный заполнитель – гранитный щебень Large aggregate – granite rubble	951	951	951	951	951
Вода/Water	148	148	148	148	–
Мелкий заполнитель – песок Fine aggregate – sand	844	844	844	844	844
Микрокремнезем MKU-95 Microsilica MKU-95	–	41	64	85	64
Гиперпластификатор «MasterGlenium 115» Hyperplasticizer «MasterGlenium 115»	4,21	4,21	4,21	4,21	4,21
Вода, обработанная методом электролиза с $\text{pH}=10,2$ Water treated by electrolysis method with $\text{pH}=10,2$	–	–	–	–	148
В/Т (Ц+МК) Water-solid ratio (cement+microsilica)	0,351	0,351	0,351	0,351	0,351
Средняя плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ Average density, kg/m^3	2433,1	2453,2	2458,8	2476,3	2460,2
Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа Compressive strength at the age of 28 days, MPa	52,41	57,49	60,87	50,32	73,13

В соединениях, в составе которых присутствует диоксид кремния (SiO_2), в ИК-спектрах присутствуют широкие полосы поглощения в диапазоне $1630\text{--}1640$ и $3350\text{--}3550$ cm^{-1} , что соответствуют валентным ν - и деформационным δ -колебаниям адсорбированных молекул воды. Полоса поглощения 1625 cm^{-1} соответствует δ -колебаниям моно- или димерномолекулярно адсорбированной H_2O , а полоса при максимуме 3540 cm^{-1} – о наличии OH -группы. Анализ полученных ИК-спектров в виде полос колебаний подтверждает наличие в синтезированной системе идентифицируемых катионных OH -групп, адсорбированной воды и валентных связей Si-O .

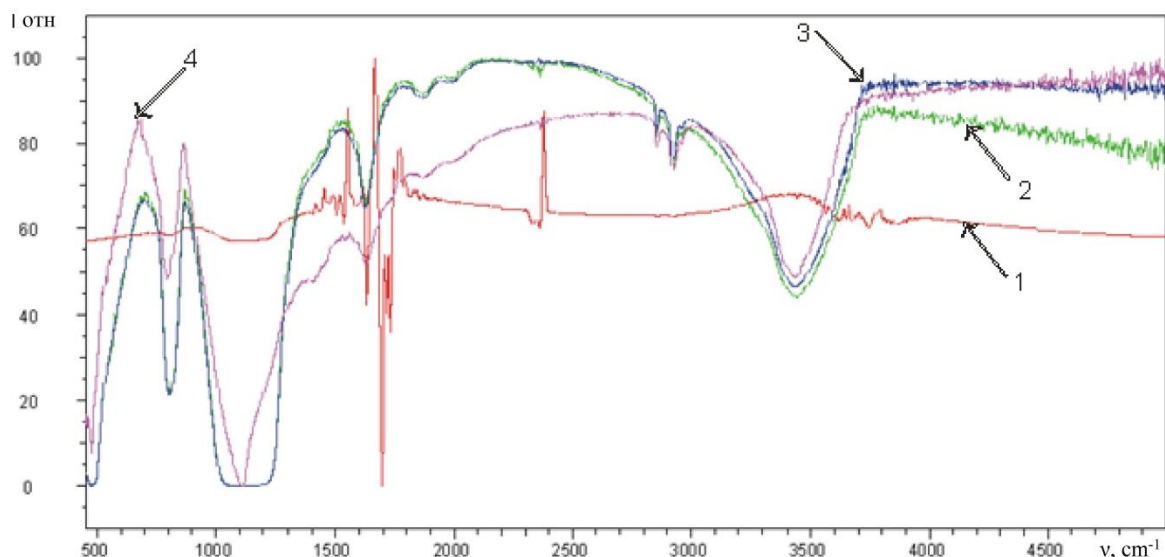


Рис. 3. ИК спектры образцов: 1 – микрокремнезем MKU-95 (аморфный); 2 – микрокремнезем MKU-95, обработанный кислой средой; 3 – микрокремнезем MKU-95, обработанный щелочной средой; 4 – кварцевое стекло (эталон)

Fig. 3. IR spectra of samples: 1 – microsilica MKU-95 (amorphous); 2 – microsilica MKU-95, treated with acidic medium; 3 – microsilica MKU-95, treated with alkaline medium; 4 – quartz glass (standard)

Для дальнейших исследований, с учетом особенности влияния кислой среды на коррозию арматуры в железобетонных изделиях, было принято решение осуществлять обработку микрокремнезема только водой, полученной методом электролиза с pH=10,2. Таким образом, можно сделать вывод, что при обработке микрокремнезема различными средами получили практически одинаковые ИК-спектры, близкие к эталону (кварцевое стекло) и отличные от аморфного микрокремнезема, что является доказательством химической активации микрокремнезема. Установлено, что на процесс диспергирования микрокремнезема до состояния кислоты ортокремниевой Si(OH)₄ и ее димеров влияют в кислой среде ионы оксония H₃O⁺, а в щелочной среде ионы гидроксил-ионов OH⁻.

В ходе изучения нагрузок, действующих на изделия из тяжелого бетона, в частности, на примере железобетонных шпал, работающих в суровых условиях эксплуатации, особым критерием стоит отметить сопротивление к динамическим воздействиям. Присутствие в материале трещин от макро- до субмикромасштабного размера и фрактальной иерархии процесса трещинообразования создает предпосылки для эффективного дисперсного армирования материала волокнами [27]. Для дальнейшего исследования влияния армирующих элементов на характеристику трещиностойкости тяжелого бетона в состав смеси вводили рубленное базальтовое волокно и полипропиленовую фибру, которые хорошо себя зарекомендовали [8–10].

Для испытаний прочностных и деформативных характеристик образцов модифицированного бетона использовались стандартные методы исследований. В дальнейших экспериментах использовались образцы-призмы с размером ребер 70×70×280 мм, составы которых представлены в табл. 3.

Таблица 3. Расход материалов для разработанных составов бетонных смесей

Table 3. Consumption of materials for the developed concrete mixes

Вводимые компоненты Input components	Расход компонентов на 1 м ³ , кг Component consumption per 1 m ³ , kg						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
ЦЕМ I 42,5Н Cement CEM I 42,5N	358						
Крупный заполнитель – гранитный щебень Large aggregate – granite rubble	951						
Обработанная вода с pH=10,2 Treated water with pH=10,2	148						
Мелкий заполнитель – песок Fine aggregate – sand	842						
Микрокремнезем MKU-95 Microsilica MKU-95	62						
Гиперпластификатор «MasterGlenium 115» Hyperplasticizer «MasterGlenium 115»	4,3						
Фибра полипропиленовая (ППФ) Polypropylene fiber (PPF)	–	–	–	–	4,6	6,83	9,2
Базальтовое волокно (БВ) Basalt fiber (BF)	–	13,8	20,6	27,5	–	–	–
В/Т (Ц+МК) Water-solid ratio (cement+ microsilica)	0,351						

При проведении испытаний на трещиностойкость модифицированного бетона, путем введения в бетонную смесь микроармирующего волокна и микрокремнезема, предварительно обработанного щелочной средой, необходимо соблюдение следующих требований: температурный режим окружающей среды t=20±5 °С и относительная влажность не менее 50 %. Предварительно произвели два цикла нагружения–разгружения с нагрузкой,

равной 10 % от ожидаемой максимальной нагрузки. При проведении неравновесных испытаний образцы-призмы нагружали непрерывно до момента их разделения на две части, зафиксировав при этом максимальное значение нагрузки F_c^* – динамическое начало движения магистральной трещины. Результаты испытаний представлены в табл. 4, а графики нагружения на рис. 4.

Таблица 4. Испытания на трещиностойкость модифицированного бетона

Table 4. Crack resistance tests of modified concrete

Показатель Indicator	Маркировка образцов Marking of samples						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Нагрузка, кН Load, kN	2,235	2,609	2,741	2,571	2,804	2,933	2,739
Напряжение, МПа Voltage, MPa	6,401	7,180	7,542	7,074	7,709	8,064	7,532

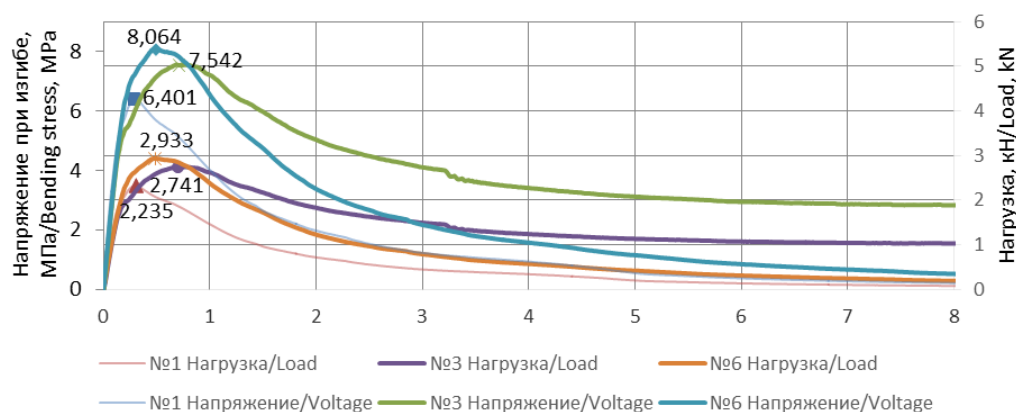


Рис. 4. Нагружение образцов-призм из модифицированного тяжелого бетона: № 1 – контрольный состав; № 3 – с полипропиленовой фиброй (0,75 %); № 6 – с базальтовым волокном (0,75 %)

Fig. 4. Loading of specimens-prisms made of modified heavy concrete: no. 1 – control composition; no. 3 – with polypropylene fiber (0,75 %); no. 6 – with basalt fiber (0,75 %)

Таблица 5. Результаты деформативных и прочностных характеристик образцов-призм исследуемых составов модифицированных бетонов

Table 5. Results of the deformation and strength characteristics of the modified concrete specimens-prisms

Маркировка образца Sample mark	Условный коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м Conditional stress intensity factor, MPa·m	Максимальная нагрузка, кН Maximum load, kN	Максимальное напряжение при изгибе, МПа Maximum bending stress, MPa
Контрольный Control	0,05886	2,235	6,401
ППФ/PPF 0,75 %	0,06920	2,741	7,542
БВ/BF 0,75 %	0,07435	2,933	8,064

Анализ рис. 4 показал длительный характер ширины раскрытия магистральной трещины образцов-призм (рис. 4, состав № 3, 6), армированных волокнами, по сравнению с контрольным (рис. 4, состав № 1). Это свидетельствует о том, что разрушение сопровождается высокой задействованностью введенных

Анализ полученных опытных данных (табл. 4) показал, что образцы-призмы из тяжелого бетона с базальтовым волокном показали повышенную способность сопротивления приложенной нагрузке. При этом требуемая нагрузка для разрушения и зафиксированное напряжение образца с расходом базальтового волокна возросли на 30 % по отношению к контрольному (без микроармирующего наполнителя) и на 7 % с полипропиленовой фиброй расходом 0,75 %. Полученные результаты свидетельствуют о повышении сцепления между цементно-песчаной матрицей и введенными в бетонную смесь базальтовыми волокнами, обладающими лучшей микроармирующей способностью и релаксацией напряжений на поверхностях контакта «матрица–заполнитель» в сравнении с полипропиленовой фиброй, что согласуется с данными работ [12–16, 27].

волокон. Повышенная степень вязкости разрушения дисперсно-армированных образцов характеризуется достаточно замедленной ниспадающей ветвью, отраженной на графиках (рис. 4, состав № 3, 6). Повышенная концентрация новообразований вдоль микроармирующих волокон обуславливает значительную разницу в полученных результатах, что согласуется с результатами работ [12–16, 27].

Полученные результаты деформативных и прочностных характеристик исследуемых образцов-призм отображены в табл. 5.

Полученные результаты, представленные в табл. 5, показали, что у образцов бетона, содержащих базальтовое волокно (состав 6), повысились показатели максимальной нагрузки и условного коэффициента интенсивности напряжений на 31,23 и 24,21 % соответственно, а напряжение при изгибе – на 26,3 % в сравнении с контрольным (состав 1). При этом наблюдается повышение деформативных и прочностных характеристик на 7,5 % относительно состава 3 (с полипропиленовой фиброй), что объясняется дисперсным армированием тяжелого бетона базальтовым волокном, повышающим физико-механические характеристики за счет положительного влияния на

структуру бетона при нагружении – выравнивание напряжения в структуре бетона и их перераспределение между составляющими цементной матрицы, снижение концентрации напряжений в зоне макродефектов и ограничение распространения роста магистральной трещины, что согласуется с данными [27].

Таблица 6. Результаты испытаний бетона на водопоглощение и водонепроницаемость

Table 6. Results of concrete tests for water absorption and water resistance

№ Состав Composition no.	Модификатор, % от массы цемента для микрокремнезема и % от объема для волокна Modifier, % by weight of cement for microsilica and % by volume for fiber	Водопоглощение, % Water absorption, %	Водонепроницаемость образцов, МПа Waterproof value of samples, MPa	Марка бетона по водонепроницаемости Concrete grade by waterproof value
1	Контрольный, без модификаторов Control, no modifiers	3,5	0,8	W8
2	МКУ-95, 15 % MKU-95, 15 %	2,3	1,0	W10
3	Активированный МКУ-95, 15 % Activated MKU-95, 15 %	2,15	1,0	W10
4	Активированный МКУ-95, 15 %; ППФ, 0,75 % Activated MKU-95, 15%; PPF, 0,75 %	2,1	1,2	W12
5	Активированный МКУ-95, 15 %; БВ, 0,75 % Activated MKU-95, 15%; BF, 0,75 %	2,0	1,2	W14

Для повышения стойкости строительных изделий и конструкций в суровых условиях эксплуатации необходимо также улучшить гидрофизические свойства бетона, такие как водонепроницаемость, водопоглощение и морозостойкость, которые значительно

повышают долговечность и безотказный срок службы конструкций. Результаты стандартных испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость бетона представлены в табл. 6. Анализ полученных данных табл. 6 показывает, что бетон, в состав которого входит активированный микрокремнезем совместно с базальтовым волокном (состав 5), имеет пониженные показатели водопоглощения в сравнении с контрольным (состав 1) на 57 %. Водонепроницаемость модифицированного бетона (состав 5) повысилась до W14 в сравнении с контрольным составом бетона (без модификаторов, состав 1), на 4 степени относительно составов без волокна (составы 2, 3) и на 2 степени относительно состава с ПФ (состав № 4).

Повышение гидрофизических свойств образцов бетона (состав 4) объясняется улучшением качества структуры модифицированного цементного камня и бетона на его основе в присутствии комплексного модификатора (высоководоредуцирующая добавка «MasterGlenium 115» плюс реакционно-химическая добавка микрокремнезем марки МКУ-95) совместно с базальтовым волокном, за счет дробления макропор под действием ПАВ («MasterGlenium 115») уменьшается развитие капиллярных трещин, развивается микропористость с размерами пор 0,1 мкм, то есть близкая к контракционной, что согласуется с выводами работ [5–7, 27, 29].

Для проведения испытаний на морозостойкость применялся первый базовый метод при многократном замораживании и оттаивании в водонасыщенном состоянии в соответствии с методикой, в которой установлены условия испытания: вода для насыщения и оттаивания с температурой 20 ± 2 °С и с температурой замораживания минус 18 ± 2 °С. Определение марки морозостойкости бетона проводилось на образцах с ребрами $100 \times 100 \times 100$ мм в возрасте 28 суток. Результаты испытаний на морозостойкость исследуемых бетонов представлены на рис. 5.

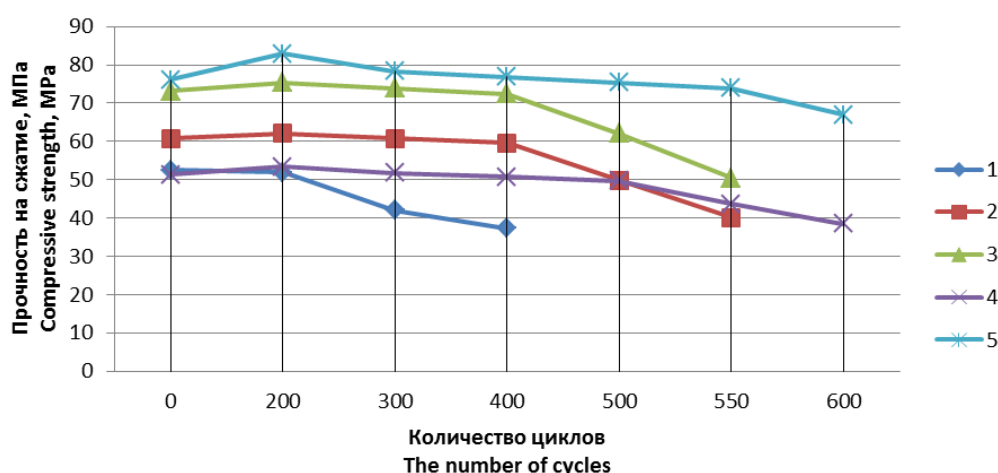


Рис. 5. Графическая интерпретация результатов испытаний образцов тяжелого бетона на морозостойкость: 1 – контрольный состав; 2 – МКУ-95 с расходом 15 %; 3 – активированный МКУ-95 с расходом 15 %; 4 – активированный МКУ-95 с расходом 15 %, ППФ с расходом 0,75 %; 5 – активированный МКУ-95 с расходом 15 %, БВ с расходом 0,75 %

Fig. 5. Graphic interpretation of the results of testing heavy concrete samples for frost resistance: 1 – control composition; 2 – MKU-95, 15 % flow rate; 3 – activated MKU-95, 15 % flow rate; 4 – activated MKU-95, 15 % flow rate, PPF, 0,75 % flow rate; 5 – activated MKU-95, 15 % flow rate; BF, 0,75 % flow rate

Анализ данных по морозостойкости позволил сделать следующие выводы:

- полученные результаты испытаний контрольного (состава 1) бетона показали, что, начиная с 400 циклов, в образцах отмечалось снижение массы на 5,5 % и кубиковой прочности на 29 %;
- при 550–600 циклах глубина разрушения образцов с ППВ и активированным микрокремнеземом (состав 4) становилась критической – она понизила прочностные характеристики более чем на 25 %, а снижение массы достигло 4,2 %.
- высокая морозостойкость (состав 5) с оптимальным расходом активированного микрокремнезема марки МКУ-95 с расходом 15 % и БВ 0,75 % характеризуется потерей массы до 3 % и прочности на 12 % при 600 циклах испытания, что обусловлено созданием замкнутой мелкопористой структуры цементного камня и высокой его водонепроницаемостью [30].

Таким образом, можно резюмировать, что предлагаемые составы бетонов обеспечивают получение эффективных бетонов с повышенными эксплуатационными показателями: прочность на сжатие в возрасте 28 сут – 73 МПа; условный коэффициент интенсивности напряжений – 0,07435 МПа·м; водопоглощение – 2 %; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость – F600, что позволяет рекомендовать их к эксплуатации в суровых климатических условиях РФ, в частности, в экстремально холодном (ЭХл, ЕС) и холодном (Хл, С) типах климата, покрывающих более 60 % ее территории.

Выводы

1. Обосновано и экспериментально доказано положительное действие предварительной подготовки минеральной добавки-микрокремнезема, являющейся отходом ферросплавного производства, на процессы структурообразования гидратационной системы твердения. Раскрыта сущность физико-химической активации микрокремнезема в щелочной среде $pH=10,2$, обогащенной гидроксильными группами OH^- , связанная с переходом поверхностного атома кремния в раствор в виде силикат-иона, который гидролизует с образованием ионов OH^- и молекул растворимого кремнезема $Si(OH)_4$, что подтверждается ИК-спектроскопией с помощью которой зафиксировано образование ортокремниевой кислоты $Si(OH)_4$.
2. Экспериментально подтверждено, что при оптимальном содержании комплексной добавки в составе модифицированного бетона (высоководоредуцирующая добавка «MasterGlenium 115» с расходом 1 % плюс реакционно-химическая добавками микрокремнезем марки МКУ-95 – 15 % от массы вяжущего) повышается прочность на сжатие на 39,5 % в сравнении с контрольным, что связано с образованием продуктов гидролиза активированного микрокремнезема, которые концентрируют вокруг себя новообразования, формирующие коллоидную систему, что способствует повышенной гидратации цементных зерен.
3. Определен характер разрушения образцов-призм из модифицированного бетона совместно с БВ 0,75 %, и установлены его физико-механические характеристики, которые значительно превосходят контрольный состав бетона (без микроармирующего волокна) и с ППФ: возросла максимальная нагрузка и условный коэффициент интенсивности напряжений на образцы-призмы (БВ 0,75 %) на 31,23 и 24,21 %, соответственно, по отношению к контрольному составу; напряжение при изгибе – на 26,3 %. Аналогично наблюдается повышение указанных характеристик на 7,0 и 7,44 %, соответственно, по отношению к составу бетона с ППФ 0,75 % за счет высокой микроармирующей способности БВ.
4. Экспериментально доказано улучшение гидрофизических свойств модифицированного состав бетона в сравнении с контрольным: водопоглощение – 2 %; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость – F600 с потерей массы до 3 % и прочности на 12 %, что обусловлено получением мелкопористой структуры цементного камня с образованием пор до 0,1 мкм.
5. Установлено, что предлагаемое модифицирование комплексной добавкой совместно с БВ позволяет получить тяжелый бетон высокого качества с улучшенными эксплуатационными характеристиками (прочность на сжатие, условный коэффициент интенсивности напряжений, трещиностойкость, водопоглощение, водонепроницаемость и морозостойкость), что дает возможность рекомендовать его для производства строительных изделий и конструкций, работающих в суровых условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками / Г.И. Яковлев, Г.Н. Первущин, А. Корженко, А.Ф. Бурьянов, И.А. Пудов, А.А. Лушникова // Строительные материалы. – 2011. – № 2. – С. 47–51.
2. Preparation of TiO_2 coated silicate micro-spheres for enhancing the light diffusion property of polycarbonate composites / Y. Zhao, P. Ding, C. Ba, A. Tang, N. Song, Y. Liu, L. Shi // Displays. – 2014. – V. 35. – № 4. – P. 220–226.
3. Осаждение металлических наночастиц из коллоидных растворов импульсно-периодическим лазерным излучением / А.А. Антипов, С.М. Аракелян, С.В. Кутровская, А.О. Кучерик, Д.С. Ногтев, В.Г. Прокошев // Перспективные материалы. – 2011. – № 10. – С. 200–205.
4. Высокопрочный бетон из материалов Вьетнама / Ю.М. Баженов, О.В. Александрова, Д.К. Нгуен, Б.И. Булгаков, О.А. Ларсен, Н.А. Гальцева, Д.С. Голотенко // Строительные материалы. – 2020. – № 3. – С. 32–38.
5. Effect of silica fume and fly ash on compressive strength and weight loss of high strength concrete material in sulfuric and acetic acid attack / W. Liu, H. Tan, C. Ni, Z. Chen, T. Luo, L. Yu // Key engineering materials. – 2017. – № 748. – P. 301–310.
6. Superhydrophobic and oleophobic textiles with hierarchical micro-nano structure constructed by sol-gel method / X. Luo, Y. Weng, S. Wang, J. Du, H. Wang, C. Xu // Journal of sol-gel science and technology. – 2019. – № 3. – P. 820–829.
7. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete / J. Massana, E. Reyes,

- J. Bernal, N. Leon, E. Sanchez-Espinosa // Construction and Building Materials. – 2018. – № 165. – P. 93–103.
8. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete / X. Sun, Z. Gao, P. Cao, C. Zhou // Construction and building materials. – 2019. – № 202. – P. 58–72.
 9. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with bfrp and grfp bars / K. Attia, A. Elrefai, W. Alnahhal, Y. Rihan // Composite structures. – 2019. – № 211. – P. 1–12.
 10. Afroz M., Patnaikuni I., Venkatesan S. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium // Construction and building materials. – 2017. – V. 154. – P. 191–203.
 11. Оптимизация состава цементного бетона для аэродромных покрытий / В.Г. Хозин, Н.М. Красникова, И.М. Морозов, О.В. Хохлаев // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 2 (28). – С. 166–172.
 12. Мелкозернистый фибробетон армированный полипропиленовым волокном / А.В. Клюев, С.В. Клюев, А.В. Нетребенко, А.В. Дураченко // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 4. – С. 67–72.
 13. Влияние добавки «микрокремнезем-поликарбоксилатный суперпластификатор» на гидратацию цемента, структуру и свойства цементного камня / К.В. Шуляков, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Н.А. Мамаев // Цемент и его применение. – 2013. – № 2. – С. 114–118.
 14. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers / T.Q.K. Lam, T.M.D. Do, V.T. Ngo, T.C. Nguyen // Magazine of civil engineering. – 2020. – № 1 (93). – С. 27–34.
 15. Teramoto A., Maruyama I., Mitani Y. Influence of silica fume additive and temperature history on the volume change of ultra-high-strength cement paste and concrete // Advances in civil engineering materials. – 2019. – № 3. – P. 153–172.
 16. Effects of the incorporation of combined additions in cement on the properties of concretes / L. Kherraf, A. Abdelouhed, M. Belachia, H. Hebhou // International review of civil engineering. – 2018. – № 1 (9). – P. 31–39.
 17. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К. Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 3 (40). – С. 24–34.
 18. Активированные вещества. Некоторые вопросы теории и практики / В.М. Бахир, А.Р. Атаджанов, У.Д. Мамаджанов, С.А. Алехин, Н.А. Мариампольский, А.Х. Наджимитдинов // Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук. – 1981. – № 5. – С. 68–72.
 19. Электрохимическая активация: универсальный инструмент зеленой химии / В.М. Бахир, Ю.Г. Задорожний, Б.И. Леонов, С.А. Паничева, В.И. Прилуцкий. – М.: Маркетинг Саппорт Сервисиз, 2005. – 176 с.
 20. Петрушанко И.Ю., Лобышев В.И. Физико-химические свойства водных растворов, полученных в мембранном электролизере // Биофизика. – 2004. – № 1 (49). – С. 22–31.
 21. Schulte W.S. Molekulare Zielstrukturen im Allo-xan-induzierten Diabetesmodell der Maus // Life Sciences. – 2002. – № 71. – P. 1681–1694.
 22. Томилов А.П. Электрохимическая активация – новое направление прикладной электрохимии // Жизнь и безопасность. – 2002. – № 3. – С. 302–307.
 23. Лукомский Ю.Я., Гамбург Ю.Д. Физико-химические основы электрохимии. – Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2008. – 424 с.
 24. Гринберг В. А., Скунцин А. М. Ничего мистического // Химия и жизнь. – 1985. – № 7. – С. 67–69.
 25. Per R.K. The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry of silica. – New York: NY Wiley, 1979. – 896 p.
 26. Чукин Г.Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезёма. – М.: Изд-во «Паладин», 2008. – 172 с.
 27. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
 28. Особенности природных и техногенных силикатных стёкол по данным ИК Фурье-спектроскопии, ЭПР и мёссбауэровской спектроскопии / В.П. Лютоев, С.С. Потапов, А.Ю. Лысюк, О.С. Головатая // Минералогия техногенеза. – 2018. – № 19. – С. 26–51.
 29. Исследование пористости цементного камня, модифицированного комплексными органоминеральными модификаторами / В.И. Соловьев, Е.В. Ткач, Р.Ф. Серова, С.А. Ткач, Б.М. Тоимбаева, Г.А. Сейдинова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8-3. – С. 590–595.
 30. Habbaba A., Plank J. Interaction between polycarboxylate superplasticizers and amorphous ground granulated blast furnace slag // Journal of the american ceramic society. – 2010. – № 9 (93). – P. 2857–2863.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Ткач Е.В., доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и материаловедения Института строительства и архитектуры Национального исследовательского Московского государственного строительного университета.

Темирканов Р.И., аспирант кафедры строительных материалов и материаловедения Института строительства и архитектуры Национального исследовательского Московского государственного строительного университета.

Ткач С.А., кандидат технических наук, начальник отдела капитального строительства ОАО «РОТ ФРОНТ».

UDC 666.972

COMPREHENSIVE STUDY OF MODIFIED CONCRETE BASED ON ACTIVATED MICROSILICON TOGETHER WITH MICRO-REINFORCING FIBER TO IMPROVE PERFORMANCE

Evgeniya V. Tkach¹,
ev_tkach@mail.ru

Ruslan I. Temirkanov¹,
profit288@gmail.com

Semen A. Tkach²,
DS_2009@yandex.ru

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering,
26, Yaroslavskoe highway, Moscow, 12933, Russia.

² JSC «ROT FRONT»,
13/15, 2nd Novokuznetsky lane, Moscow, 115184, Russia.

Relevance. The main task of implementing environmental policy is to create a resource-efficient system for the placement and disposal of industrial waste and secondary raw materials, in particular, in the production of building materials and products of specified properties. Within the framework of the study, the authors considered the issues related to the activation of microsilicon, which is a waste of ferroalloy production, and methods of its use for modifying the structure of cement stone, in particular, for heavy concrete. The mechanism of the structure formation, the method of introduction and the optimal consumption of the additive for modifying the concrete mix are determined. Using a comprehensive study, the dispersion products of microsilicon, which is a part of the complex modifier, were determined. It is established that the process of chemical activation of mineral particles has not been sufficiently studied, and therefore the presented research for finding solutions to improve performance through the process of pretreatment of microsilicon with an alkaline medium pH=10,2 together with the micro-reinforcing component, is relevant.

The aim of the research is to establish the positive effect of the activation process of microsilicon together with the micro-reinforcing component on modifying the structure of heavy concrete to improve strength, deformative and hydrophysical properties.

Object: modified heavy concrete based on activated microsilicon together with a micro-reinforcing component.

Methods: x-ray phase analysis (XRD); physical and chemical activation of microsilicon with water treated by electrolysis with the Melesta device; IR spectroscopy using the Varian 640-IR Fourier spectrometer; crack resistance tests using the ADVANTEST 9 servo-hydraulic system; determination of frost resistance in the WK3 180/40 climate chamber; water resistance was determined in the UVB-MG4.01 installation; water absorption using the SNOL electric digital furnace.

Result. The positive effect of activated microsilica on the properties of heavy concrete was established by reducing the content of the binder (cement) and replacing it with a microdispersed filler, previously activated with an alkaline medium with pH=10,2. At the same time, there is an increase in the compressive strength of concrete at the age of 28 days by 20,72 MPa in comparison with the control composition. Further modifying complex additive (high water reducing additive «MasterGlenium 115» with the consumption of 1 % plus a reactive chemical additive microsilica brand mku-95 – 15 % by weight of the binder) together with basalt fiber, allows improving the physico-mechanical properties of concrete as well as the hydrophysical ones: water absorption – 2 %; grade waterproofing – W14; frost – F600, which gives the opportunity to put into practice a composition for production of building products and constructions on its basis with specified characteristics under severe operating conditions.

Key words:

Chemical activation, silica, complex additive, alkaline medium, micro-reinforcing fiber, modification of the cement stone structure, hydrophysical properties.

REFERENCES

1. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzhenko A., Buryanov A.F., Pudov I.A., Lushnikova A.A. Modifikatsiya tsementnykh betonov mnogosloynnymi uglerodnymi nanotrubkami [Modification of cement concretes with multilayer carbon nanotubes]. *Stroitelnye materialy*, 2011, no. 2, pp. 47–51.
2. Zhao Y., Ding P., Ba C., Tang A., Song N., Liu Y., Shi L. Preparation of TiO₂ coated silicate micro-spheres for enhancing the light diffusion property of polycarbonate composites. *Displays*, 2014, vol. 35, no. 4, pp. 220–226.
3. Antipov A.A., Arakelyan S.M., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O., Nogtev D.S., Prokoshev V.G. Deposition of metal nanoparticles from colloidal solutions by repetitively pulsed laser radiation. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2011, no. 10, pp. 200–205. In Rus.
4. Bazhenov Yu.M., Alexandrova O.V., Nguyen D.K., Bulgakov B.I., Larsen O.A., Galtseva N.A., Golotenko D.S. High-performance concrete produced with locally available materials of Vietnam. *Building materials*, 2020, no. 3, pp. 32–38. In Rus.
5. Liu W., Tan H., Ni C., Chen Z., Luo T., Yu L. Effect of silica fume and fly ash on compressive strength and weight loss of high strength concrete material in sulfuric and acetic acid attack. *Key engineering materials*, 2017, vol. 748, pp. 301–310.
6. Luo X., Weng Y., Wang S., Du J., Wang H., Xu C. Superhydrophobic and oleophobic textiles with hierarchical micro-nano structure constructed by sol-gel method. *Journal of sol-gel science and technology*, 2019, no. 3, pp. 820–829.
7. Massana J., Reyes E., Bernal J., Leon N., Sanchez-Espinosa E. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 2018, no. 165, pp. 93–103.
8. Sun X., Gao Z., Cao P., Zhou C. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete. *Construction and building materials*, 2019, no. 202, pp. 58–72.
9. Attia K., Elrefai A., Alnahhal W., Rihan Y. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with bfrp and grfp bars. *Composite structures*, 2019, no. 211, pp. 1–12.

10. Afroz M., Patnaikuni I., Venkatesan S. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium. *Construction and building materials*, 2017, vol. 154, pp. 191–203.
11. Khozin V.G., Krasnikova N.M., Morozov I.M., Khokhryakov O.V. Optimization of composition of cement concrete for airfield coverings. *News of the KSUAE*, 2014, vol. 28, no. 2, pp. 166–172. In Rus.
12. Klyuev A.V., Klyuev S.V., Ntrebenko A.V., Durachenko A.V. Melkozernisty fibrobeton armirovanny polipropilenovym voloknom [Fine-grained fiber-reinforced concrete reinforced with polypropylene fiber]. *Vestnik belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2014, no. 4, pp. 67–72.
13. Shuldyakov K.V., Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Mamaev N.A. Influence of the polycarboxylate superplasticizer – microsilica additive on the hydration, structure and properties of cement. *Cement and its application*, 2013, no. 2, pp. 114–118. In Rus.
14. Lam T.Q.K., Do T.M.D., Ngo V.T., Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers. *Magazine of civil engineering*, 2020, vol. 93, no. 1, pp. 27–34.
15. Teramoto A., Maruyama I., Mitani Y. Influence of silica fume additive and temperature history on the volume change of ultra-high-strength cement paste and concrete. *Advances in civil engineering materials*, 2019, no. 3, pp. 153–172.
16. Kherraf L., Abdelouhed A., Belachia M., Hebhouh H. Effects of the incorporation of combined additions in cement on the properties of concretes. *International review of civil engineering*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 31–39.
17. Inozemtsev A.S., Korolev E.V., Zyong T.K. Rheological features of cement-mineral systems with a polycarboxylate plasticizer. *Regional architecture and engineering*, 2019, vol. 40, no. 3, pp. 24–34. In Rus.
18. Bakhir V.M., Atadzhanov A.R., Mamadzhanov U.D., Alekhin S.A., Mariampolsky N.A., Nadzhimitdinov A.Kh. Aktivirovannyye veshchestva. Nekotorye voprosy teorii i praktiki [Activated substances. Some questions of theory and practice]. *Izv. Academy of Sciences of the Uzbek SSR. Ser. tech. Science*, 1981, no. 5, pp. 68–72.
19. Bakhir V.M., Zadorozhny Yu.G., Leonov B.I., Panicheva S.A., Prilutsky V.I. *Elektrokhimicheskaya aktivatsiya: universalny instrument zelenoy khimii* [Electrochemical activation: a versatile tool for green chemistry]. Moscow, Marketing Support Services Publ., 2005. 176 p.
20. Petrushanko I.Yu., Lobyshev V.I. Physical and chemical properties of aqueous solutions obtained in a membrane electrolyzer. *Biophysics*, 2004, vol. 49, no. 1, pp. 22–31. In Rus.
21. Schulte W.S. Molekulare Zielstrukturen im Allo-xan-induzierten Diabetesmodell der Maus, *Leipzig, Germany. Life Sciences*, 2002, no. 71, pp. 1681–1694.
22. Tomilov A.P. Elektrokhimicheskaya aktivatsiya – novoe napravlenie prikladnoy elektrokhimii [Electrochemical activation – a new direction of applied electrochemistry]. *Zhizn i bezopasnost*, 2002, no. 3, pp. 302–307.
23. Lukomsky Yu.Ya., Hamburg Yu.D. *Fiziko-khimicheskie osnovy elektrokhimii* [Physical and chemical foundations of electrochemistry]. Dolgoprudny, Intellect Publ. House, 2008. 424 p.
24. Grinberg V.A., Skunkin A.M. Nichego misticheskogo [Nothing mystical]. *Khimiya i zhizn*, 1985, no. 7, pp. 67–69.
25. Iler R.K. *The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry of silica*. New York, NY Wiley, 1979. 896 p.
26. Chukin G.D. *Khimiya poverkhnosti i stroenie dispersnogo kremnezema* [Surface chemistry and structure of dispersed silica]. Moscow, Paladin Publ., 2008. 172 p.
27. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. *Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony* [Modified high quality concrete]. Moscow, Association of building universities Publ., 2006. 368 p.
28. Lyutov V.P., Potapov S.S., Lysyuk A.Yu., Golovataya O.S. Comparative research of natural and technogenetic silicate glasses by FTIR, ESR and mössbauer spectroscopy. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2018, no. 19, pp. 26–51. In Rus.
29. Soloviev V.I., Tkach E.V., Serova R.F., Tkach S.A., Toimbaeva B.M., Seydinova G.A. Research of cement stone porosity modified by complex organic mineral modifiers. *Fundamental research*, 2014, no. 8-3, pp. 590–595. In Rus.
30. Habbaba A., Plank J. Interaction between polycarboxylate superplasticizers and amorphous ground granulated blast furnace slag. *Journal of the american ceramic society*, 2010, no. 9 (93), pp. 2857–2863.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Evgeniya V. Tkach, Dr. Sc., professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering.

Ruslan I. Temirkanov, post-graduate student, National Research Moscow State University of Civil Engineering.

Semen A. Tkach, Cand. Sc., head of the capital construction department, JSC «ROT FRONT».

УДК 550.832

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЙСМОФАЦИАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА ПРИМЕРЕ НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ПО ДАННЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН)

Чучалина Кристина Юрьевна¹,
K.Yu.Chuchalina@gmail.com

Коровин Михаил Олегович¹,
korovinmo@hw.tpu.ru

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

Актуальность исследования определена необходимостью минимизации неопределенностей геологической интерпретации благодаря применению различных классификационных алгоритмов в процессе обработки всего комплекса геолого-геофизических данных.

Цель: прогноз и статистическое обоснование распределения фаций на основе геофизической информации на примере одного из месторождений Томской области.

Объектом исследования являются палеозойские отложения юго-восточной части Западно-Сибирской плиты – коллекторы сложнопостроенных карбонатных толщ, где встречаются терригенные образования и карбонатные разности – известняк и доломит. Исходя из условий построения сейсмофациальной карты, было выбрано окно исследования, которое охватывает объем горной породы равный 40 м.

Методы исследования основаны на применении классификационных алгоритмов к сейсмическому сигналу, которые разделяют исследуемый объект на однородные по ряду признаков области. В классификационный алгоритм по сейсмической трассе очень часто включают геофизические исследования скважин и лабораторные исследования керна, что подразумевает комплексирование информации. Комплексная интерпретация сейсмических и скважинных данных позволяет прогнозировать на качественном уровне литофациальную изменчивость на локальных участках, что способствует более рациональному размещению эксплуатационных скважин.

В результате исследования выделены и ранжированы литотипы пород продуктивной толщи на основе сравнения сейсмического параметра – акустический импеданс, по данным скважинной и сейсмической информации. Сопоставление данных осуществлено с помощью восстановленных измерений плотностного каротажа. Предложенная схема комплексирования информации для перспектив нефтегазоносности палеозойских отложений на примере нефтяного месторождения Западной Сибири позволит выделить перспективные зоны для планирования бурения новых скважин.

Ключевые слова:

Сейсмофациальный анализ, сейсмофациальная карта, фация, геофизические исследования скважин, акустический импеданс, палеозойские отложения.

Введение

На изучаемом месторождении отмечается палеозойский стратиграфический диапазон нефтегазоносности – от среднего до позднего девона. В течение среднего и верхнего девона территория подвергалась активным тектоническим воздействиям, в результате чего был сформирован органогенный биогерм. С северо-востока данный биогерм был ограничен открытым глубоководным бассейном, а с юго-запада – изолированным мелководным морем [1–3]. Исходя из сложных геологических условий необходимо комплексировать геолого-геофизическую информацию.

Для анализа распределения фаций были получены сейсмофациальная карта и комплекс заранее выбранных сейсмических атрибутов [4, 5]. При построении сейсмофациальной карты были использованы сейсмические атрибуты, которые способствуют выделению зон с отличающимися характеристиками волнового поля, выявлению геологических объектов и оконтуриванию аномальных зон. Комплекс сейсмических атрибутов включал следующий набор [6–8]: мгновенная частота, мгновенная фаза, мгновенное качество, относительный акустический импеданс, первая производная, затухание.

Сейсмофациальная карта, используемая для статистического обоснования сложнопостроенных карбонатных толщ изучаемого месторождения, представлена на рис. 1.

Геофизические методы изучения сложнопостроенных карбонатных коллекторов

Для изучения карбонатных коллекторов наиболее распространёнными являются следующие геофизические методы: гамма каротаж, нейтронный гамма каротаж, методы сопротивления, а также методы акустического и плотностного каротажей [9], последние из которых позволяют определить акустические свойства пород, что предполагает комплексирование геофизических данных с сейсмической информацией. На примере изучаемого нефтяного месторождения был проведен анализ ГИС (геофизические исследования скважин) во всех скважинах, кроме 4R, из-за отсутствия измерений (табл. 1).

На основе данных, представленных в табл. 1, стоит отметить, что в более 50 % фонда скважин невозможно напрямую определить акустические свойства пласта по причине отсутствия измерений акустического каротажа. Более того, отсутствуют исследования плотности

горных пород, что является важным параметром для изучения распространения литотипов на месторождении. Из этого следует, что отсутствие полного ком-

плекса геофизических исследований предполагает комплексирование имеющейся геофизической информации и данных лабораторных исследований керна.

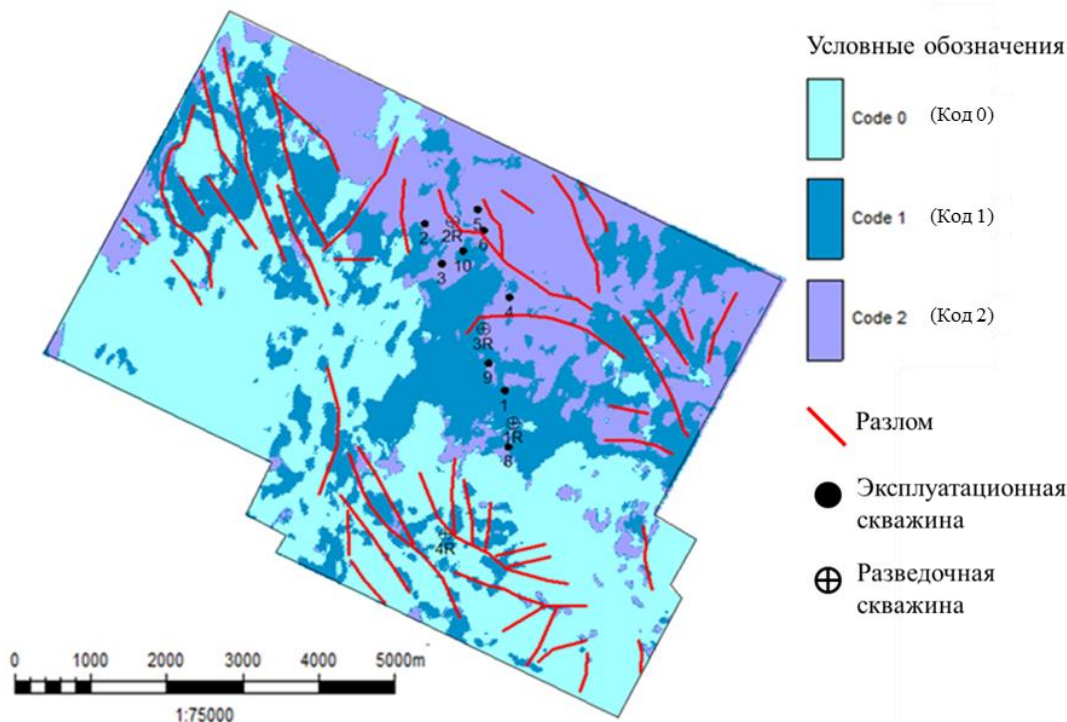


Рис. 1. Сейсмофациальная карта по кровле фундамента Ф2

Fig. 1. Seismic facies map on the top of the foundation F2

Таблица 1. Сводные данные комплекса ГИС

Table 1. Summary data of the well logs

Каротаж Well logging	ГК GR	ПС SP	АК DT	АКs DTS	ИК IK	НКТ Neut
Скважина № Well no.						
5	+	+	-	-	-	+
6	+	+	-	-	+	+
2	+	+	+	+	+	+
2R	+	+	+	-	+	+
10	+	+	+	+	+	+
1	+	+	+	-	+	+
1R	+	+	+	-	+	+
4	+	+	-	-	-	+
4R	-	-	-	-	-	-
3	+	+	-	-	-	+
3R	+	+	+	-	+	+
9	+	+	-	-	-	+
8	+	+	-	-	-	+

ГК – гамма каротаж (GR – Gamma Ray), ПС – каротаж сопротивления (SP – Resistivity Log), АК – акустический каротаж продольной волны (DT – Acoustic Log), АКs – акустический каротаж поперечной волны (DTS – Acoustic Log of Secondary wave), ИК – индукционный каротаж (IK – Induction Log), НКТ – нейтронный каротаж (Neut – Neutron Log).

Расчленение разреза для выделения литотипов в каждой скважине было осуществлено с помощью комплекса ГИС: низкая радиоактивность, высокие значения сопротивления и нейтронного каротажа для карбонатных отложений; низкие значения сопротив-

ления, средние и низкие значения нейтронного каротажа для глинисто-кремнистых пород; а также были выделены эффузивы исходя из высоких значений индукционного каротажа и радиоактивности [10, 11]. Сводная панель геолого-геофизических материалов для скважин № 1-1R-3R представлена на рис. 2. Необходимо отметить, что для выделения литотипов было принято ограничение в объеме окна исследования, которое охватывает объем горных пород от кровли палеозойских отложений мощностью 40 м. На основе проведенной корреляции пород в объеме окна исследования 40 м в каждой скважине было выделено процентное содержание фаций. Результаты статистической оценки представлены в табл. 2.

Согласно статистическому анализу распределения фаций (табл. 2), можно выделить три группы скважин по преобладающему литотипу, что позволяет сопоставить каждую группу скважин с кластерами фаций, расположенных на сейсмофациальной карте:

- 1) Глинисто-кремнистые породы – скважина № 4R.
- 2) Доломит – скважины № 2R, 1R и 3R.
- 3) Известняк – скважины № 5, 6, 2, 10, 1, 4, 3, 8, 9.

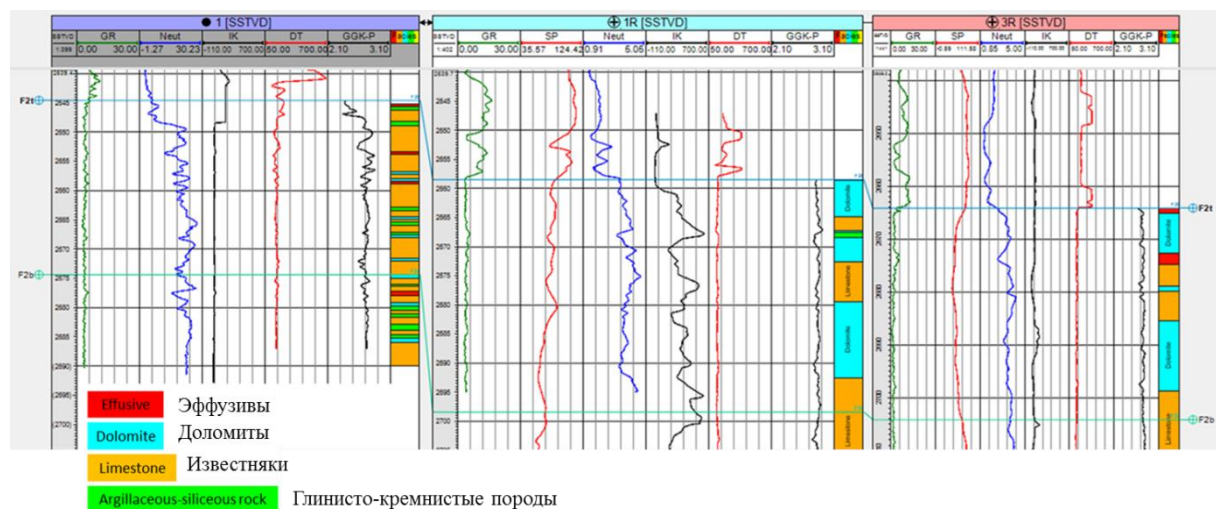
При сопоставлении полученных результатов с сейсмофациальной картой (рис. 1) было принято решение каждому коду на карте присвоить определенный литотип горной породы:

- 1) Код 0 – глинисто-кремнистые породы.
- 2) Код 1 – известняк.
- 3) Код 2 – доломит.

Таблица 2. Сводная таблица статистического анализа фаций на основе данных ГИС (геофизические исследования скважин)

Table 2. Summary table of statistical analysis of facies based on well logs data

Литотип, % Lithotype, %	Глинисто-кремнистые Argillaceous-siliceous	Алевриты Siltstone	Доломит Dolomite	Известняк Limestone	Эффузивы Effusive	Преобладающий литотип Prevailing type
Скважина № Well no.						
5	–	–	30,5	69,50	–	Известняк Limestone
6	5,00	2,50	17,50	70,00	5,00	Известняк Limestone
2	4,71	3,62	17,39	71,02	3,26	Известняк Limestone
2R	8,49	–	69,00	–	22,5	Доломит Dolomite
10	18,21	–	10,59	62,28	8,89	Известняк Limestone
1	10	–	9,50	76,00	4,49	Известняк Limestone
1R	1,99	–	60,00	37,99	–	Доломит Dolomite
4	–	–	17,27	82,73	–	Известняк Limestone
4R	100	–	–	–	–	Глинисто-кремнистые Argillaceous-Siliceous
3	–	–	40,43	59,57	–	Известняк Limestone
3R	–	–	69,50	24,00	6,49	Доломит Dolomite
9	–	–	45,14	54,86	–	Известняк Limestone
8	–	–	67,15	32,85	–	Доломит Dolomite



GR (Gamma Ray) – ГК (гамма каротаж), SP (Resistivity Log) – РС (каротаж сопротивления), Neut (Neutron Log) – НКТ (нейтронный каротаж), IK (Induction Log) – ИК (индукционный каротаж), DT (Acoustic Log) – АК (акустический каротаж продольной волны), GGK-P (gamma-gamma density Log) – ГГК-П (плотностной гамма-гамма каротаж).

Рис. 2. Корреляционная панель по скважинам № 1-1R-3R

Fig. 2. Correlation panel for wells no. 1-1R-3R

В результате сопоставления данных получается, что возникает расхождение между скважинной и сейсмической информацией в районе скважин № 5, 6, 2R, 2, 10. Эти расхождения связаны с наличием геологических неопределенностей, некорректной интерпретацией ГИС, которая обусловлена недостаточной разрешающей способностью. Для уменьшения неопре-

деленности геологического строения было принято решение проанализировать упругие свойства горных пород, используя зависимости на основе материалов ГИС, а также провести анализ керна материала.

Для распределения фаций были проведены расчёты акустического импеданса, которые позволяют выделить фациальную изменчивость пространства гор-

ной породы [12]. Акустический импеданс рассчитывался на основе данных ГИС. С учетом всех вышеизложенных условий, где исследования акустического каротажа представлены в ограниченном объеме, а исследования плотности горных пород на изучаемой территории не проводились, возникают трудности для анализа фациального строения. Из-за отсутствия полного комплекса ГИС также не предоставляется возможным рассчитать акустический импеданс, так как расчет акустического импеданса производится по следующей формуле [13]:

$$AI = V_p * \rho, \quad (1)$$

где AI – акустический импеданс, $\text{м/с} * \text{г/см}^3$; V_p – скорость продольной волны, м/с ; ρ – плотность горной породы, г/см^3 .

Были рассмотрены четыре варианта получения зависимостей для расчета плотности горной породы в исследуемом интервале [14–16]:

Вариант 1. Зависимость между АК и ГГК-П каротажом, где измерения проводились в горизонтальном стволе эксплуатационной скважины на глубине 2913 м (рис. 3). Рассматривая данный вариант, необходимо учитывать тот факт, что измерения проводились в горизонтальном стволе, а применить полученную зависимость необходимо на вертикальную или наклонно-направленную скважины. Исходя из этого, возникает вопрос о корректности расчетных значений при использовании этой зависимости. Поэтому было предложено рассмотреть другие варианты построения зависимостей.

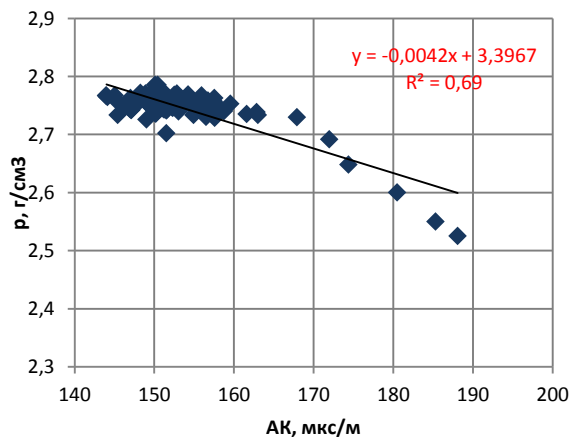


Рис. 3. Зависимость акустического и плотностного каротажа

Fig. 3. Dependence of acoustic and density logging

Полученная зависимость на основе измерений в горизонтальном стволе эксплуатационной скважины № 2 представляет хорошую корреляционную связь, но физический смысл проведения работ в горизонтальном стволе не позволяет использовать данное уравнение для расчетов в наклонно-направленных скважинах.

Вариант 2. Зависимость гамма каротажа и значений плотности горных пород из лабораторных исследований эксплуатационной скважины № 2 (рис. 4).

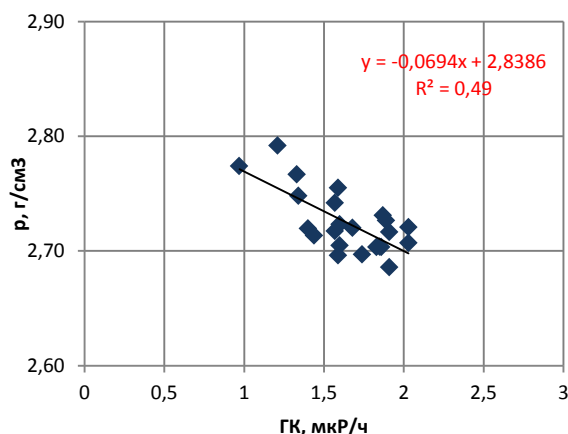


Рис. 4. Зависимость гамма каротажа и плотности горной породы по ядерным данным

Fig. 4. Dependence of gamma logging and rock density according to core data

Для проверки корректности расчетных значений было осуществлено сопоставление полученных значений плотности по ГИС со значениями плотности горных пород на основе лабораторных исследований ядра, результат представлен на рис. 5. Исходя из сопоставления видно, что использование данной корреляционной зависимости для получения упругих свойств пород является невозможным, так как наблюдается расхождение данных.

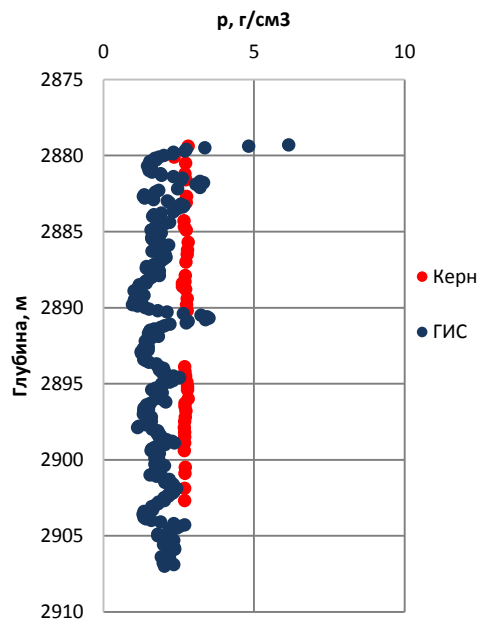


Рис. 5. Сопоставление данных плотности по ядру и ГИС для варианта 2

Fig. 5. Comparison of core density and well logs data for case 2

Вариант 3. Зависимость между каротажом Альфа ПС для вертикальной эксплуатационной скважины № 2 и значениями плотности горной породы по лабораторным исследованиям ядра в этой же скважине (рис. 6).

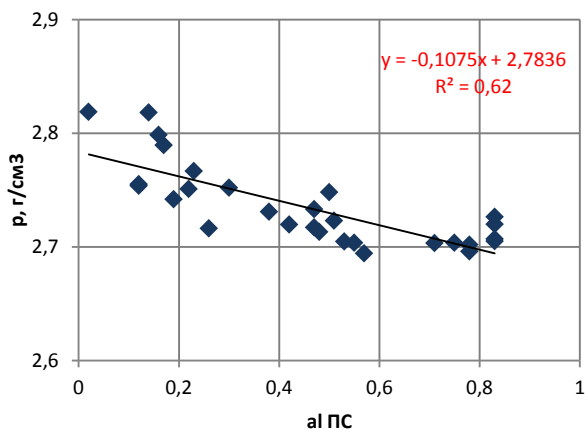


Рис. 6. Зависимость Альфа ПС (метод потенциалов самопроизвольной поляризации) относительно плотности горной породы по керну

Fig. 6. Dependence of Alpha SP (spontaneous potential logging) versus core density of rock

В варианте 3 была отмечена также хорошая корреляционная связь между значениями и корректное сопоставление данных ГИС–керна, что позволяет использовать данный расчет для дальнейшего прогнозирования плотности горных пород (рис. 7).

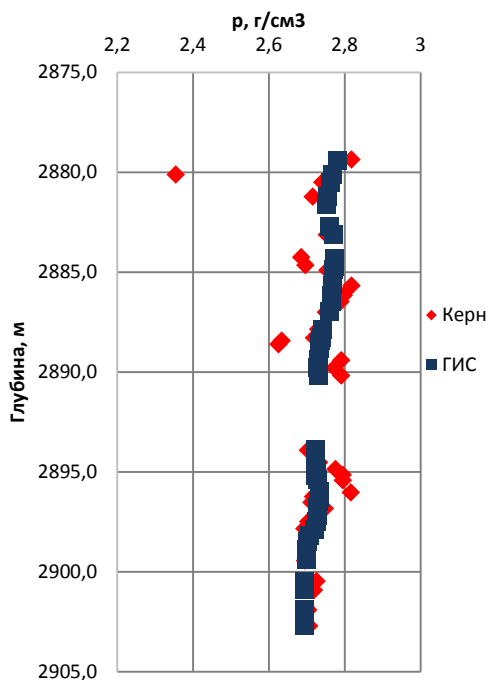


Рис. 7. Сопоставление данных плотности по керну и ГИС для варианта 3

Fig. 7. Comparison of core density and well logs data for case 3

Для каждого варианта расчета был получен диапазон значений плотности горных пород и среднее значение для всего интервала, которые представлены в табл. 3. Согласно опубликованным данным [17], где диапазон плотности для пород – известняков – составляет 2,37–2,77 г/см³, а для доломитов – 2,84–2,86 г/см³,

необходимо отметить, что среднее значение и диапазон минимального и максимального значений не достоверно отображают значения плотности горной породы после расчетов.

Вариант 4. Зависимость между акустическим каротажем в вертикальной эксплуатационной скважине № 2 и значениями плотности горных пород из лабораторных исследований эксплуатационной скважины № 2 (рис. 8).

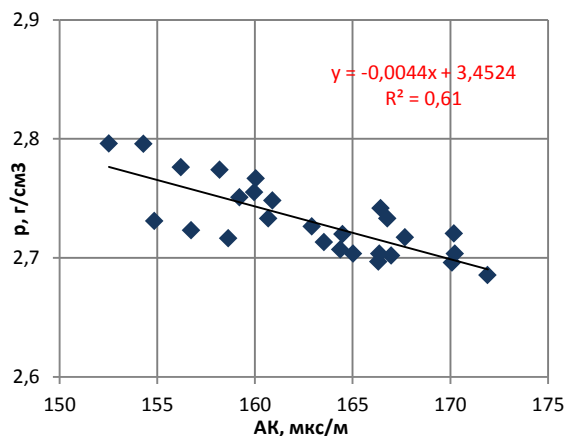


Рис. 8. Зависимость акустического каротажа относительно плотности горной породы по керну

Fig. 8. Dependence of acoustic logging versus core density

Анализируя вариант 4, можно утверждать, что данные, полученные с помощью этого варианта, характеризуют результаты, наиболее приближенные к опубликованным статистическим результатам [17], а также представляют хорошее сопоставление ГИС–керна. Результаты представлены на рис. 9.

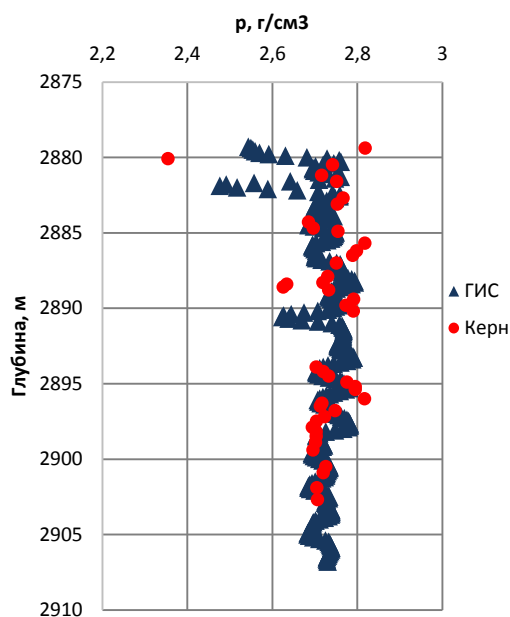


Рис. 9. Сопоставление данных плотности по керну и ГИС для варианта 4

Fig. 9. Comparison of core density and well logs data for case 4

Использование данной зависимости позволяет минимизировать неточность расчетных значений, а также данный вариант сохраняет физический смысл зависимости. Таким образом, эта корреляционная связь в дальнейшем будет использована для расчета плотности горных пород в скважинах № 2, 2R, 10, 1, 1R и 3R.

Таблица 3. Значения плотности горной породы по результатам ГИС

Table 3. Values rock density according to the results of well logs

Вариант Variant	Диапазон значений Range of values	Среднее значение плотности Average density
	г/см ³ (g/cm ³)	
1	2,46–2,76	2,70
2	2,56–2,77	2,66
3	2,71–2,75	2,73
4	2,64–2,88	2,74

Для сопоставления скважинной информации с сейсмическими данными было предложено получить расчетным способом акустический импеданс, на основе материалов ГИС, используя формулу (1) для тех скважин, где имеется набор значений акустического и плотностного каротажей [18, 19]. Результат представлен в виде гистограммы частоты встречаемости сейсмического параметра по ГИС (рис. 10).

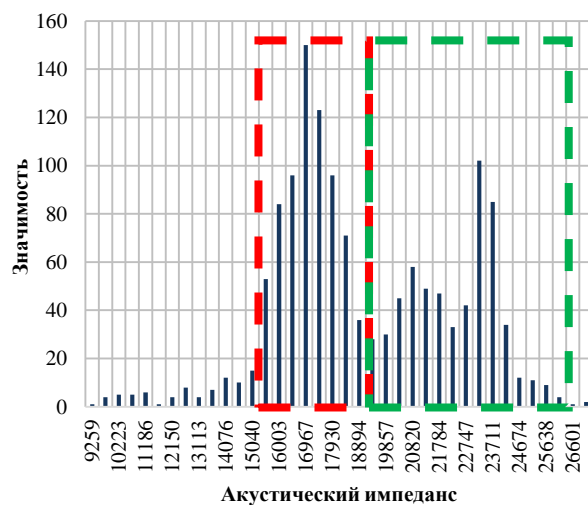


Рис. 10. Гистограмма частоты распределения акустического импеданса по ГИС для скважин № 2, 2R, 10, 1, 1R и 3R (области различающихся значений выделены красным и зелёным цветом)

Fig. 10. Histogram of the acoustic impedance distribution frequency by the well logs for wells no. 2, 2R, 10, 1, 1R and 3R (blocks of different values colored with red and green)

Анализируя распределение на рис. 10, можно выделить две отчетливо выраженные области различающихся значений акустического импеданса, что, ве-

роятно, будет совпадать с распределением литологии по интерпретации геофизических исследований. Для выделения и подтверждения преобладающих фаций в скважинах значения акустического импеданса были разделены на два кластера согласно табл. 2. Результат разделения на фации представлен на рис. 11.

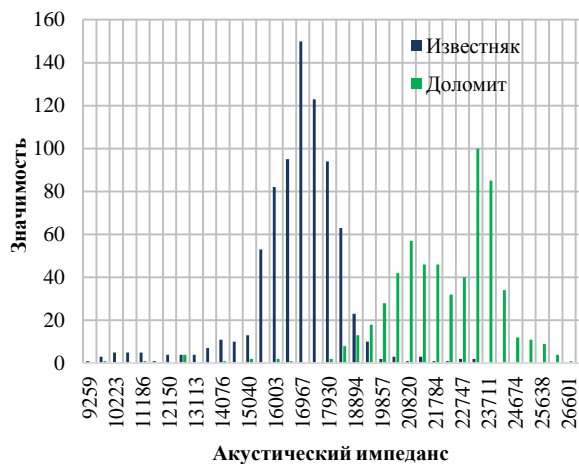


Рис. 11. Гистограмма частоты распределения акустического импеданса по ГИС для скважин № 2, 2R, 10, 1, 1R и 3R

Fig. 11. Histogram of the acoustic impedance distribution frequency by the well logs for wells no. 2, 2R, 10, 1, 1R and 3R

Из расчетных значений акустического импеданса отчетливо выделяются две области литотипов пород – известняки и доломиты, что подтверждает интерпретацию разреза и выделение фаций согласно табл. 2 в скважинах № 2, 2R, 10, 1, 1R и 3R [20, 21].

Заключение

Используемые в работе методы интерпретации сложнопостроенных карбонатных толщ основаны на статистической оценке фаций с помощью данных ГИС. Необходимо отметить, что описанные способы восстановления измерений геофизических исследований позволяют приблизиться к корректной точности физических значений горной породы. Созданный на их основе подход сопоставления точечных данных с сейсмическими параметрами позволяет на количественном уровне прогнозировать распределение фаций, что в дальнейшем благоприятно сопутствует оценке перспектив сложнопостроенных коллекторов.

Ранее было отмечено несоответствие сейсмических и скважинных данных, что является возможным на данной площади исследования в связи со сложным геологическим строением территории. Дальнейшие исследования в данном направлении необходимы для более достоверного комплексирования данных, уточнения распределения фаций, что, собственно, влияет на уменьшение неопределенностей в заложении эксплуатационного фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ежова А.В. Изучение палеозойских коллекторов Северо-Останинского нефтяного месторождения по керну и шламу. Кн. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 102 с.
2. Ежова А.В., Меркулов В.П., Чеканцев В.А. Геологическая модель строения палеозойского фундамента Северо-Останинского нефтяного месторождения (Томская область) // Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 35–38.
3. Изучение коллекторов нефти и газа месторождений Западной Сибири геофизическими методами / Е.И. Леонтьев, Л.М. Дорогиницкая, Г.С. Кузнецов, А.Я. Малыхин. – М.: Недра, 1974. – 240 с.
4. Волкова А.А. Выбор оптимальных параметров сейсмического фациального анализа при изучении палеозойских отложений Западной Сибири // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXII Международного научного симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск: Томский политехнический университет, 2018. – Т. I. – С. 383–384.
5. Волкова А.А., Меркулов В.П. Информативность 3D сейсморазведки при оценке перспектив нефтегазоносности отложений Палеозойского фундамента Западной Сибири // Санкт-Петербург 2018: 8-ая международная геолого-геофизическая конференция и выставка EAGE. Тезисы доклада. – СПб., 2018. URL: earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=91397 (дата обращения 18.04.2020).
6. Chopra S., Marfurt K. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization // Geophysical developments. – Tulsa: SEG, 2007. – 464 p.
7. Seismic facies analysis and structural interpretation of the Sandakan sub-basin / K. Futralan, A. Mitchell, K. Amos, G. Backe // AAPG international conference and exhibition. – Singapore, 2012. – P. 1–18. URL: <http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2012/30254futralan/ndx/futralan.pdf.html> (дата обращения 10.05.2020).
8. White R.E. Properties of instantaneous seismic attributes: The Leading Edge. – 1991. – № 10 (7). – P. 26–32.
9. Djebbar T., Erle C.D. Petrophysics – theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties // Elsevier. – 2004. – 926 p.
10. Pirson S.J. Sedimentological studies by log curve shapes. Geologic well log analysis // Gulf publishing company. – 1983 – P. 36–58.
11. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1982. – 448 с.
12. Сейсмофациальный анализ и возможности прогнозирования литотипов пород по данным сейсморазведки / Г.Д. Ухлова, В.В. Соломатин, Л.И. Штифанова, Т.И. Чернышова // VII Всероссийское литологическое совещание. – Новосибирск, 2013. – С. 227–230.
13. Прогнозирование структуры и свойств природных резервуаров на основе комплексной интерпретации сейсмических и скважинных геолого-геофизических данных / А.П. Жуков, В.А. Жемчугова, К.А. Эпов, С.Л. Федотов // Технологии сейсморазведки. – 2006. – № 1. – С. 69–78.
14. Sheriff R.E. Reservoir geophysics. – Tulsa: SEG, 1992. – 401 p.
15. Дементьев Л.Ф. Статистические методы обработки и анализа промыслово-геологических данных. – М.: Недра, 1966. – 206 с.
16. A genetic approach to the prediction of petrophysical properties / F.X. Jian, C.Y. Chork, I.J. Taggart, D.M. McKay, R.M. Bartlett // Journal of Petroleum Geology. – 1994. – V. 17. – P. 71–88.
17. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Анализ данных сейсморазведки. – Екатеринбург: Изд-во УГТГА, 2002. – 212 с.
18. Seismic facies analysis based on 3D multiattribute volume classification, La Palma Field, Maracaibo, Venezuela / V. Linari, M. Santiago, C. Pastore, K. Azbel, M. Poupon // The Leading Edge. – 2003. – P. 32–36.
19. Дюбрьоль О. Геоestatистика в нефтяной геологии. – М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 256 с.
20. Чучалина К.Ю. Статистическое обоснование сейсмофациального анализа сложнопостроенных карбонатных коллекторов Северо-Останинского нефтяного месторождения: магистерская диссертация. – Томск, 2019. – 84 с.
21. Volkova A., Chuchalina K., Merkulov V. Statistical justification of seismic facies analysis of complex carbonate reservoir // European Association of Geoscientists & Engineers. – Saint Petersburg, 2020. – P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202053102> (дата обращения: 15.05.2020).

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

Чучалина К.Ю., магистрант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Коровин М.О., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.832

APPLICATION OF SEISMIC FACIES ANALYSIS FOR EVALUATING THE PROSPECTS OF COMPLEX CARBONATE RESERVOIR ON THE EXAMPLE OF OIL DEPOSIT (BY THE DATA OF WELL LOGS)

Kristina Yu. Chuchalina¹,
K.Yu.Chuchalina@gmail.com

Mikhail O. Korovin¹,
korovinmo@hw.tpu.ru

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

The relevance of the research is determined by the need to minimize the uncertainties of geological interpretation using various classification algorithms in processing the entire complex of geological and geophysical data.

The main aim of the research is the forecast and statistical justification of the distribution of facies based on geophysical information on the example of one of the deposits in Tomsk region.

The object of the study is the Paleozoic sediments of the southeastern part of the West Siberian Plate – reservoirs of complex carbonate strata where terrigenous formations and carbonate varieties – limestone and dolomite – are encountered. Based on the conditions for constructing a seismic facies map, a study window was selected. It covers a rock volume of 40 m.

Research methods are based on the application of classification algorithms to a seismic signal, which divide the object under study into regions that are homogeneous by a number of signs. In the classification algorithm along the seismic track geophysical studies of wells and laboratory studies of the core, which involves the integration of information, are very often included. A comprehensive interpretation of seismic and borehole data allows predicting at a qualitative level lithofacial variability in local areas, which contributes to a more rational placement of production wells.

The lithotypes of productive strata rocks were identified and ranked based on comparison of the seismic parameter – acoustic impedance, according to borehole and seismic information. Data comparison was carried out using reconstructed density logging measurements.

Key words:

Seismic facies analysis, seismic facies map, facies, well logging, acoustic impedance, Paleozoic deposits.

REFERENCES

- Ezhova A.V. *Izucheniye paleozoyskikh kollektorov Severo-Ostanskogo nefryanogo mestorozhdeniya po kernu i shlamu* [The study of Paleozoic reservoirs of the North Ostaninsk oil field by core and sludge]. Tomsk, TPU Publ. house, 2011. B. 1, 102 p.
- Ezhova A.V., Merkulov V.P., Chekantsev V.A. Geologicheskaya model stroeniya paleozoyskogo fudamenta Severo-Ostanskogo nefryanovogo mestorozhdeniya (Tomskaya oblast) [Paleozoic basement geological structure model of Northern Ostaninsk oil field (Tomsk region)]. *Mountain Journal*, 2012, no. 4, pp. 35–38.
- Leontyev E.I., Doroginitskaya L.M., Kuznetsov G.S., Malykhin A.Ya. *Izucheniye kollektorov nefii i gaza mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri geofizicheskimi metodami* [Study of oil and gas reservoirs in Western Siberia by geophysical methods]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 240 p.
- Volkova A.A. Vybora optimalnykh parametrov seismicheskogo fatsialnogo analiza pri izuchenii paleozoyskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri [Selection of optimal parameters of seismic facies analysis in the study of Paleozoic deposits in Western Siberia]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XXII Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXII International Scientific Symposium named after Academician M.A. Usov for students and young scientists]. Tomsk, TPU, 2018. Vol. I, pp. 383–384.
- Volkova A.A., Merkulov V.P. Informativnost 3D seismorazvedki pri otsenke perspektiv neftegazonosnosti otlozheniy Paleozoyskogo fudamenta Zapadnoy Sibiri [Information value of 3D seismic in evaluation the prospects of oil and gas fields of the Paleozoic basement of Western Siberia]. *8 Mezhdunarodnaya geologo-fizicheskaya konferentsiya i vystavka. Sankt Peterburg-2018* [8th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition. Extended abstract]. St-Petersburg, 2018. Available at: earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=91397 (accessed 18 April 2020).
- Chopra S., Marfurt K. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. *Geophysical developments*. Tulsa, SEG, 2007. 464 p.
- Futalan K., Mitchell A., Amos K., Backe G. Seismic facies analysis and structural interpretation of the San-dakan sub-basin. *AAPG international conference and exhibition*. Singapore, 2012. Available at: www.searchanddiscovery.com/documents/2012/30254futalan/ndx_futalan.pdf (accessed 10 May 2020).
- White R.E. Properties of instantaneous seismic attributes. *The Leading Edge*, 1991, no. 10 (7), pp. 26–32.
- Djebbar T., Erle C.D. Petrophysics – theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. *Elsevier*, 2004, 926 p.
- Pirson, S.J. Sedimentological studies by log curve shapes. *Geologic well log analysis*, 1983, pp. 36–58.
- Dakhnov V.N. *Interpetatsiya rezultatov geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Interpretation of the results of geophysical surveys of wells]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 448 p.
- Ukhlova G.D., Solomatin V.V., Shifanova L.I., Chernyshova T.I. Seismofatsialniy analiz i vozmozhnosti prognozirovaniy litotipov porod po dannym seismorazvedki [Seismic facies analysis and forecasting features of lithotypes of rocks according to seismic data]. *VII Vserossiyskay Litologicheskay Konferentsiya* [VII All-Russian Lithological Conference]. Novosibirsk, 2013. pp. 227–230.
- Zhukov A.P., Zhemchugova V.A., Epov K.A., Fedotov S.L. Prognozirovaniye struktury i svoystv prirodnykh rezervuarov na osnove kompleksnoy interpretatsii seismicheskikh i skvazhinnykh geologo-geofizicheskikh dannykh [Prediction of the structure and properties of natural reservoirs based on a comprehensive interpretation of seismic and borehole geological and geophysical data]. *Seismic exploration technologies*, 2006, no. 1, pp. 69–78.
- Sheriff R.E. *Reservoir geophysics*. Tulsa OK, SEG, 1992. 401 p.
- Dementiev L.F. *Statisticheskie metody obrabotki i analiza promyslovo-geologicheskikh dannykh* [Statistical methods for processing and analyzing field geological data]. Moscow, Nedra Publ., 1966. 206 p.

16. Jian F.X., Chork C.Y., Taggart I.J., McKay D.M., Bartlett R.M. A genetic approach to the prediction of petrophysical properties. *Journal of Petroleum Geology*, 1994, vol. 17, pp. 71–88.
17. Bondarev V.I., Krylatkov S.M. *Analiz dannykh seismorazvedki* [Analysis of seismic data]. Yekaterinburg, UGGAA Publ. House, 2002. 212 p.
18. Linari V., Santiago M., Pastore C., Azbel K., Poupon M. Seismic facies analysis based on 3D multiattribute volume classification, La Palma Field, Maracaibo, Venezuela. *The Leading Edge*, 2003, pp. 32–36.
19. Dubryul O. *Geostatistika v neftnoy geologii* [Geostatistics in petroleum geology]. Moscow, Izhevsk, Institute for Computer Research, SRC «Regular and chaotic dynamics», 2009. 256 p.
20. Chuchalina K.Yu. *Statisticheskoe obosnovanie seismofatsialnogo analiza slozhnoprostroennykh karbonatnykh kollektorov Severo-Ostaninskogo nefynogo mestorozhdeniya*. Magisterskay Diss. [Statistical justification of seismic facies analysis of complex carbonate reservoirs of the North Ostaninskoye oil field. Master's thesis]. Tomsk, 2019. 84 p.
21. Volkova A., Chuchalina K., Merkulov V. *Statistical justification of seismic facies analysis of complex carbonate reservoir*. St-Petersburg, European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202053102> (accessed 15 May 2020).

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Kristina Yu. Chuchalina, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mikhail O. Korovin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 28.05.2021. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 27,45. Уч.-изд. л. 24,83.
Заказ 99-21. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ